



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/07.07.13.04-TDI

**ANÁLISE QUALITATIVA DOS EFEITOS DA
RADIAÇÃO DE DOSE TOTAL IONIZANTE EM
TRANSISTORES E CIRCUITOS INTEGRADOS DE
APLICAÇÃO ESPACIAL**

Josemara Conceição de Mendonça Flausino

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelo Dr. Silvio Manea, aprovada em 10 de maio de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/478BK78>>

INPE
São José dos Campos
2022

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/07.07.13.04-TDI

**ANÁLISE QUALITATIVA DOS EFEITOS DA
RADIAÇÃO DE DOSE TOTAL IONIZANTE EM
TRANSISTORES E CIRCUITOS INTEGRADOS DE
APLICAÇÃO ESPACIAL**

Josemara Conceição de Mendonça Flausino

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelo Dr. Silvio Manea, aprovada em 10 de maio de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/478BK78>>

INPE
São José dos Campos
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Flausino, Josemara Conceição de Mendonça.

F617a Análise qualitativa dos efeitos da radiação de dose total ionizante em transistores e circuitos integrados de aplicação espacial / Josemara Conceição de Mendonça Flausino. – São José dos Campos : INPE, 2022.

xxvi + 103 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/07.07.13.04-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2022.

Orientador : Dr. Silvio Manea.

1. Confiabilidade. 2. Dose total ionizante. 3. Transistores. 4. Circuitos integrados. 5. Análise qualitativa. I.Título.

CDU 621.383.3:629.78



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO JOSEMARA CONCEIÇÃO DE MENDONÇA FLAUSINO BANCA Nº 060/2022, REG 252822/2019.

No dia 10 de maio de 2022, as 14h00min, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca e revisão final pelo(s) orientador(es).

Título novo: "ANÁLISE QUALITATIVA DOS EFEITOS DA RADIAÇÃO DE DOSE TOTAL IONIZANTE EM TRANSISTORES E CIRCUITOS INTEGRADOS DE APLICAÇÃO ESPACIAL."

Membros da Banca:

Dr. Walter Abrahão dos Santos - Presidente – INPE

Dr. Silvio Manea – Orientador – INPE

Dr. Alirio Cavalcanti de Brito – Membro Interno – INPE

Dr. Marcio Afonso Arimura Fialho – Membro Interno – INPE

Dr. Saulo Finco - Membro Externo - CTI-Renato Archer



Documento assinado eletronicamente por **Márcio Afonso Arimura Fialho, Tecnologista**, em 12/05/2022, às 16:16 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alirio Cavalcanti de Brito (E), Usuário Externo**, em 12/05/2022, às 16:53 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Walter Abrahão dos Santos, Tecnologista em Ciência e Tecnologia**, em 12/05/2022, às 19:37 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Saulo Finco, Tecnologista**, em 13/05/2022, às 08:32 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Silvio Manea, Tecnologista**, em 13/05/2022, às 08:58 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **9773088** e o código CRC **7E652B0C**.

Referência: Processo nº 01340.003237/2022-78

SEI nº 9773088

“Ebenézer: Até aqui nos ajudou o Senhor!”

(1 Samuel 7:12)

*Dedico este trabalho a toda minha **Família***

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, autor e guia da minha vida. Por ter me dado sabedoria e perseverança para concluir este trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais, na área de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais. Pela estrutura de ensino e apoio aos alunos.

À Capes pelo apoio financeiro.

Agradeço muito aos meus pais José de Arimatéia e Maria José por desde cedo me apoiarem e incentivarem nos estudos e em minha profissão.

Ao maravilhoso Valmir Augusto Buchalla Passos, agradeço por todo incentivo, carinho, amor e compreensão durante o desenvolvimento. Obrigada por sonhar junto comigo.

Agradeço aos meus irmãos, por todo o carinho e torcida nesses anos de formação.

Ao Professor Dr. Silvio Manea, pela orientação, incentivo e por todos os conhecimentos compartilhados.

Ao meu colega de laboratório Msc. Juliano Quadro Moreira, por toda ajuda no desenvolvimento do trabalho, pela disposição em sanar minhas dúvidas pertinentes à área de eletrônica.

Agradeço à Dr. Ana Paula de Sá Santos Rabello, pela valiosa ajuda.

Aos professores do INPE, na área da ETE/CSE, pelas aulas ministradas, pelo conhecimento passado. Agradeço também aos demais profissionais que atuam no INPE, em especial à Dona Marta pelo zelo em manter nosso ambiente de trabalho sempre limpo e organizado.

Ao projeto CITAR, que disponibilizou os dados do experimento que constam no estudo de caso deste trabalho.

Ao IEAv no qual foram feitos os experimentos nos componentes e em especial ao MSc. Rafael Galhardo Vaz que realizou os experimentos que constam no exemplo da metodologia proposta.

Aos Professores MSc. Silas Camargo de Matos, Dra. Heidi Korzenowski, MSc. Moacir de Souza Prado por todo apoio durante minha formação, que com certeza renderão frutos por toda minha vida.

Por fim, agradeço à todas as pessoas que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho da melhor forma possível.

RESUMO

A todo o momento os satélites em órbita sofrem com o impacto de partículas ionizantes que podem causar danos aos seus sistemas a curto e longo prazo. A tecnologia atual dos dispositivos eletrônicos, tornou-os cada vez mais complexos e/ou altamente integrados o que torna os efeitos da colisão de partículas mais prejudiciais devido a diminuição da área física. Neste contexto para que o Satélite tenha sucesso no seu ciclo de vida é importante melhorar a confiabilidade dos dispositivos para evitar que falhas prejudiquem o sistema e conseqüentemente a Missão. O presente trabalho busca selecionar uma ferramenta de análise **qualitativa**, com o objetivo de realizar um estudo **qualitativo**, dos efeitos da radiação nos modos de falha de transistores e circuitos integrados de uso espacial, e como esses modos de falha impactam no sistema e quais medidas podem ser tomadas para melhorar ou até mitigar os efeitos desta falha no sistema. São apresentados dois estudos de caso para validar o estudo, aplicando a ferramenta de análise **qualitativa** selecionada (*Failure Modes and Effects Analysis* - FMEA): O Primeiro deles aplica a metodologia ao transistor 2N2222A, e o segundo ao Circuito Integrado - CI *Low Voltage Differential Signaling* – LVDS desenvolvido no âmbito do projeto de Circuitos Eletrônicos Tolerantes à Radiação (CITAR). Ambos componentes foram irradiados com partículas provenientes de uma fonte de Cobalto 60 para testar seus parâmetros elétricos sob efeito da radiação.

Palavras-chave: Radiação, Confiabilidade, Dose Total Ionizante, Transistores, Circuitos Integrados, Análise Qualitativa, LVDS.

QUALITATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTS OF TOTAL IONIZING DOSE RADIATION ON TRANSISTORS AND INTEGRATED CIRCUITS OF SPACE APPLICATION

ABSTRACT

At all times, satellites in orbit suffer from the impact of ionizing particles that can cause damage to their systems in the short and long term. The current technology of electronic devices has made them increasingly complex and/or highly integrated, which makes the effects of particle collisions more harmful due to the decrease in physical area. In this context, for the Satellite to be successful in its life cycle, it is important to improve the reliability of the devices to prevent failures from harming the system and consequently the Mission. The present work seeks to select a qualitative analysis tool, with the objective of carrying out a qualitative study, of the effects of radiation on the failure modes of transistors and space-use integrated circuits, and how these failure modes impact the system and what measures can be taken to improve or even mitigate the effects of this failure on the system. Two case studies are presented to validate the study, applying the selected qualitative analysis tool (Failure Modes and Effects Analysis - FMEA): The first one applies the methodology to the 2N2222A transistor, and the second to the Integrated Circuit - CI Low Voltage Differential Signaling – LVDS developed as part of the Radiation Tolerant Electronic Circuits (CITAR) project. Both components were irradiated with particles from a source of Cobalt 60 to test their electrical parameters under the effect of radiation.

Keywords: Radiation. Reliability. Total Ionizing Dose. Transistors. Integrated Circuits. Qualitative Analysis. LVDS.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1. Aumento da área sensível à dos transistores.	3
Figura 1.2 – Tecnologia e aplicações espaciais no Brasil.	6
Figura 2.1 – Espectro da radiação.	9
Figura 2.2. – Grau de penetração da radiação de partículas ionizantes.	12
Figura 2.3 – Os cinturões de Van Allen.	15
Figura 2.4 – Dose total ionizante – TID.	18
Figura 2.5 - Dano por deslocamento – DD.	19
Figura 2.6 - Evento de efeito único – SEE.	20
Figura 2.7 – Estrutura interna do diodo.	28
Figura 3.1 - Regiões de Operação do Transistor.	44
Figura 3.2 – Exemplo de <i>Fault Tree Analysis</i>	50
Figura 3.3 - Diagrama de blocos de confiabilidade - configuração paralela.	51
Figura 3.4 - Diagrama de blocos de confiabilidade - configuração série.	51
Figura 4.1 – Fluxograma para a escolha de uma análise qualitativa.	53
Figura 4.2 - Etapas para a realização da FMEA.	55
Figura 4.3 - Grau de Severidade das falhas.	57
Figura 4.4 - Análise lógica do grau de severidade da falha.	58
Figura 4.5 - <i>Failure Modes and Effects Analysis - FMEA</i>	59
Figura 5.1 - Construção do Transistor 2N2222A.	63
Figura 5.2 - Ganho - hfe 1.	64
Figura 5.3 - Ganho - hfe 2.	65
Figura 5.4 - Ganho - hfe 3.	66
Figura 5.5 - Análise lógica da causa da falha.	67
Figura 5.6 - FMEA dos efeitos da TID no transistor 2N2222A.	70
Figura 5.7 - Estrutura básica de funcionamento do LVDS.	72
Figura 5.8 - Medidas de corrente da fonte de 3V.	74
Figura 5.9 - Medidas de corrente da fonte de 3,3V.	75
Figura 5.10 - Medidas de corrente da fonte de 3,6V.	76
Figura 5.11 - FMEA dos efeitos da TID no LVDS.	81

Figura A.1 - Estrutura interna do Transistor de Junção Bipolar tipo pnp.	91
Figura A.2 - Configuração de funcionamento Base-Comum pnp.	93
Figura A.3 - Configuração de funcionamento Emissor-Comum pnp.	94
Figura A.4 - Configuração de funcionamento Coletor-Comum pnp.....	95
Figura A.5 - Polarização simultânea para transistores <i>pnp</i> e <i>nnp</i>	96
Figura A.6 - Parâmetros elétricos do transistor.	97
Figura A.7 - Curvas características de saída de um transistor.	99
Figura A.8 - Construção do transistor JFET.	101
Figura A.9 - Construção do transistor MOSFET.....	102

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 – Exemplos de desvios para a ferramenta HAZOP.....	48
Tabela 5.1 - Condições de polarização.....	61
Tabela 5.2 - Condições de ensaio.....	61
Tabela 5.3 - Condições Limites de Operação dos Parâmetros Elétricos do Transistor.....	62
Tabela 5.4 - Parâmetros afetados pela radiação.....	63
Tabela 5.5 - Amostras de ensaio de radiação ionizante do LVDS.	71

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AEB	Agência Espacial Brasileira
CI	Circuito Integrado
CITAR	Circuitos Integrados Tolerantes à Radiação
CMOS	<i>Complementary metal-oxide-semiconductor</i>
COTS	<i>Commercial Off-the-Shelf</i>
DD	<i>Displacement Damage</i>
EEE	<i>Electrical, Electronic and Electromechanical</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
FEB	Frequências Extremamente Baixas
FET	Field Effect Transistor
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Modes, Effects and Criticality Analysis</i>
GOCNAE	Grupo de Organização da Comissão Nacional de Atividades Espaciais
IEAv	Instituto de Estudos Avançados
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IR	<i>Infrared</i>
ITRS	<i>International Technology Roadmap for Semiconductors</i>
JFET	<i>Junction Field Effect Transistor</i>
LET	<i>Linear Energy Transfer</i>
LRI	Laboratório de Radiação Ionizante
LVDS	<i>Low Voltage Differential Signaling</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i>

MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
QC	Carga Crítica
RCG	Raios C3smicos Gal3cticos
RHA	<i>Radiation Hardness Assurance</i>
RILC	<i>Radiation Induced Leakage Current</i>
SEE	Single Event Effect
SOI	<i>Silicon on Insulator</i>
TID	<i>Total Ionizing Dose</i>
TJB	Transistor de Junç3o Bipolar
UV	Ultravioleta
SMU	<i>Source Measure Unit</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_{ba}	Carga da barreira
q	Carga do elétron em Coulombs
C_{ba}	Capacitância da barreira
D_n	Coefficiente de difusão do elétron
L	Comprimento do canal
N_{it}	Concentração de cargas armadilhadas
N_A	Concentração de dopagem
N_a	Concentração de dopantes
n_i	Concentração dos portadores de carga
I_B	Corrente de base
I_C	Corrente de coletor
I_E	Corrente do emissor
Φ_{ms}	Diferença entre as funções de trabalho do metal semiconductor
α	Ganho de corrente entre os terminais de coletor e emissor
β	Ganho de corrente do transistor
W_d	Largura da camada de depleção
W	Largura de canal
ϵ_S	Permissividade do semiconductor
Φ_S	Potencial de Fermi
τ_e	Tempo de vida efetivo
τ_p	Tempo de vida da lacuna no silício
τ_n	Tempo de vida do elétron
V_{BE}	Tensão base-emissor
V_{CB}	Tensão coletor-base
V_{CE}	Tensão coletor-emissor
V_{TH}	Tensão de limiar

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contexto	1
1.2 Motivações.....	1
1.3 Objetivo geral.....	4
1.3.1 Objetivos específicos.....	4
1.4 Generalidade e utilidade	5
1.5 Organização da Dissertação.....	6
2 CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 Radiação.....	8
2.1.1 Radiação não ionizante	8
2.1.2 Radiação ionizante	11
2.1.3 Radiação no ambiente espacial	14
2.1.3.1 Radiação aprisionada.....	15
2.1.3.2 Radiação transitória	16
2.1.4 Efeitos da radiação em componentes eletrônicos.....	17
2.1.4.1 Dose total ionizante	17
2.1.4.2 Dano por deslocamento	18
2.1.4.3 Evento de efeito único	19
2.1.5 Parâmetros para a análise da interação de partículas ionizantes e os circuitos eletrônicos	22
2.1.5.1 Transferência Linear de Energia (LET)	22
2.1.5.2 Seção de choque de radiação (<i>cross section</i>).....	23
2.1.5.3 Carga crítica (Qc)	24
2.1.5.4 Volume sensível	24
2.2 Componentes eletrônicos.....	25
2.2.1 Componentes discretos e integrados	25
2.2.2 Componentes ativos e passivos	25
2.2.3 Dispositivos semicondutores.....	26
2.2.3.1 Diodos	27

2.3	Confiabilidade	28
2.3.1	Conceitos associados à confiabilidade.....	29
2.4	Referências e estudos relacionados ao trabalho.	30
2.4.1	Guias da ESA relacionados aos conceitos estudados	30
2.4.2	Estudos relacionados disponíveis na literatura	33
3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E ABORDAGEM PARA A SOLUÇÃO	39
3.1	Formulação do problema.....	39
3.1.1	Impactos da radiação de dose total ionizante - TID nos transistores	40
3.1.1.1	Principais parâmetros elétricos que variam com a TID	40
3.1.1.2	Tensão de limiar (V_{th}) – <i>Threshold Voltage</i>	40
3.1.1.3	Ganho de corrente - β	42
3.1.1.4	Tensão de saturação.....	43
3.1.1.5	Corrente de base.....	44
3.1.2	Efeitos da TID em transistores.....	45
3.1.2.1	Influência da radiação na tensão de limiar	45
3.1.2.2	Influência da radiação no aumento da corrente de fuga	45
3.1.2.3	Criação de armadilhas de interface.....	47
3.1.2.4	Aumento do ruído.....	47
3.2	Abordagem para a solução.....	47
3.2.1	Ferramentas de análise qualitativa.....	48
4	METODOLOGIA	52
4.1.	Escolha de uma ferramenta de análise qualitativa para o desenvolvimento da metodologia	52
4.2	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i> – (FMEA)	54
4.3.	Etapas de execução da <i>Failure Mode and Effect Analysis</i> – (FMEA)	54
5	ESTUDOS DE CASO	60
5.1	Estudo de caso no transistor de junção bipolar 2N2222A	60
5.1.1	Ensaio de Dose Total Ionizante realizado no transistor TJB 2N2222A .. 60	
	Aplicação da ferramenta FMEA na análise qualitativa do impacto da radiação de dose total ionizante no transistor TJB 2N2222A	62
5.2	Estudo de caso no circuito integrado LVDS.....	71
5.2.1	Ensaio de dose total ionizante realizado no circuito integrado LVDS.....	71

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
6.1 Conclusões.....	82
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
APÊNDICE A – TRANSISTORES.....	91

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

O Ambiente Espacial é hostil e oferece riscos às missões espaciais, principalmente aos artefatos que são enviados ao espaço, como satélites artificiais e sondas interplanetárias, devido às altas taxas de radiação provenientes de eventos astronômicos, tais como: Raios Cósmicos Galácticos e Vento Solar, que incidem diretamente sobre os satélites (NORBERG, 2013). Os danos causados pela radiação vão desde falhas que ocorrem em nível de sistema, tais como erros na comunicação de rádio que afetam os telecomandos enviados ao satélite e as telemetrias recebidas do mesmo, danos a componentes na eletrônica de bordo, deterioração da eficiência de células solares, até a perda total de um equipamento/subsistema como as câmeras, por exemplo, que sofrem com um efeito de escurecimento das lentes. Os prejuízos decorrentes da perda de subsistemas são muitas vezes na ordem de milhões de dólares (COSTA; NARDIN, 2011).

Com desenvolvimento tecnológico os sistemas estão cada vez mais integrados, diminuindo seu tamanho e aumentando sua suscetibilidade aos efeitos da radiação, em um cenário inóspito como o encontrado por satélites orbitando a Terra, a confiabilidade no sistema deve ser alta, pois as exigências de funcionamento são grandes e a manutenção desses 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.

1.2 Motivações

1ª Motivação: Os efeitos da radiação não são considerados nas análises de confiabilidade - As análises tradicionais de confiabilidade não consideram os efeitos da radiação no cálculo das taxas de falha dos componentes, um dos principais parâmetros para se fazer uma análise quantitativa de confiabilidade. Antes de fazermos uma análise quantitativa é importante fazer um levantamento qualitativo dos modos

de falha e assim desenvolver uma metodologia mais assertiva para as análises de confiabilidade. Nesse sentido, o trabalho apresentado busca fornecer um guia para realizar uma análise de confiabilidade qualitativa trazendo condições para iniciar os estudos dos efeitos da radiação na confiabilidade dos componentes eletrônicos.

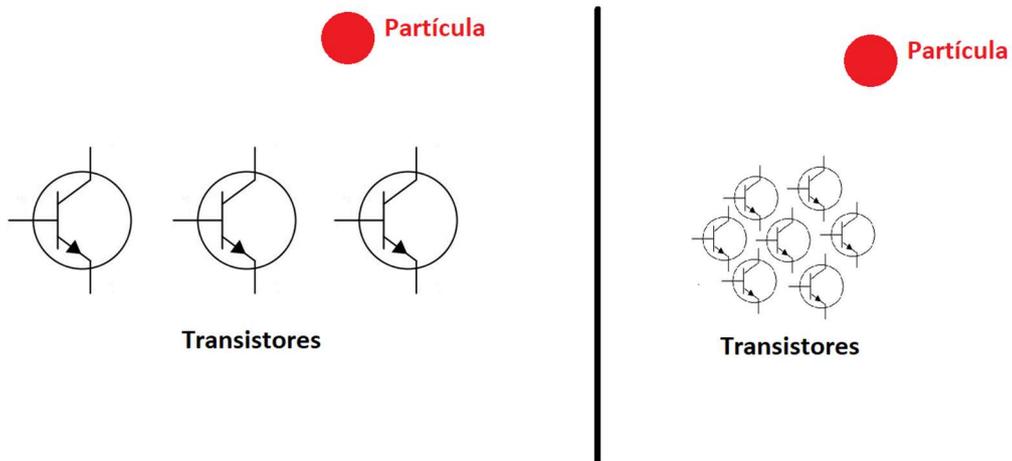
2ª Motivação: Componentes eletrônicos complexos e altamente integrados

- Em 1965, Gordon Earle Moore fez uma previsão sobre a evolução dos semicondutores na qual a cada vinte e quatro meses a quantidade de transistores colocados em um mesmo espaço dobraria (MACK, 2011). Esta previsão, mais tarde ficou conhecida como “Lei de Moore” (INTEL, 2022) O reflexo desse aumento da quantidade de transistores alocados em um espaço é a diminuição do seu tamanho fazendo com que a área sensível à radiação seja comparativamente maior, conforme mostrado na Figura 1.1. que evidencia que o tamanho da partícula permanece o mesmo, contudo a diminuição do tamanho do componente e a proximidade deles no espaço físico faz com que o impacto da partícula atinja uma área comparativamente maior dos transistores.

3ª Motivação: As missões espaciais tem alto custo

- As missões espaciais possuem custos muito elevados, por exemplo, o valor médio de um quilograma de tecnologia espacial normalmente fica acima de USD 100.000 (AEB, 2020), portanto quando uma Missão Espacial se inicia, a limitação de massa é um dos requisitos consideráveis, o que justifica estudar os efeitos da radiação na confiabilidade dos circuitos eletrônicos inseridos no satélite, identificando os possíveis modos de falha e sugerindo as medidas de proteção necessárias para eventuais problemas levando em consideração as limitações exigidas.

Figura 1.1. Aumento da área sensível à dos transistores.



Fonte: Produção do autor.

4ª Motivação: Auxiliar o INPE no desenvolvimento de satélites - O

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais surgiu em meados da década de 60 quando os estudantes de engenharia Fernando de Mendonça e Júlio Alberto de Moraes Coutinho, com a colaboração do Laboratório de Pesquisa Naval da Marinha dos Estados Unidos, construíram uma estação com a qual conseguiram captar os sinais de dois satélites. Motivado pelo desejo de realizar pesquisas espaciais no Brasil o então presidente Jânio Quadros criou o Grupo de Organização da Comissão Nacional de Atividades Espaciais (GOCNAE), precursor do INPE (GOV, 2021). Nesse panorama, vimos que o INPE faz parte do Brasil há mais de 60 (sessenta) anos realizando pesquisas espaciais e fazendo com o que o desenvolvimento tecnológico na área espacial se desenvolvesse. Assim sendo, contribuir para o desenvolvimento de satélites de uma instituição tão importante para a pesquisa no Brasil é uma das principais motivações da presente dissertação.

1.3 Objetivo geral

A dissertação apresentada tem como objetivo geral fazer uma análise **qualitativa** dos efeitos da radiação de dose total ionizante – TID em componentes eletrônicos ativos empregados em satélites do INPE, verificando como a radiação afeta nos modos de falha de transistores e circuitos integrados, utilizando a metodologia de análise qualitativa em dois estudos de caso de componentes de uso espacial: No transistor 2N2222A, tal escolha se deve ao fato de que é um dispositivo simples e com muitos estudos que permeiam seu desenvolvimento, sendo que os transistores são base para a construção de todos os circuitos integrados. O outro objeto de estudo de caso deste trabalho é o circuito integrado LVDS desenvolvido no âmbito de pesquisas do projeto CITAR do INPE. A análise qualitativa proposta busca estudar os parâmetros elétricos dos componentes em condições normais e comparar seu comportamento após a exposição à radiação de dose total ionizante, verificando quais parâmetros sofreram variações e avaliando possíveis causas e abordando como amenizar e/ou mitigar esses efeitos.

1.3.1 Objetivos específicos

Este trabalho possui objetivos específicos listados abaixo:

- a) Expor uma revisão bibliográfica da literatura que englobe: A radiação no ambiente espacial, os efeitos da radiação sobre os componentes eletrônicos e conceitos de confiabilidade importantes para fundamentar a análise qualitativa proposta pelo trabalho;
- b) propor uma metodologia de análise qualitativa para estudar o impacto da radiação nos modos de falha dos transistores e circuitos integrados de uso espacial;
- c) aplicar a análise qualitativa selecionada em dois estudos de caso: O primeiro no transistor BJT 2N2222A e a segunda no circuito integrado LVDS desenvolvido no âmbito do projeto CITAR. A análise qualitativa busca analisar os parâmetros de funcionamento de ambos componentes em condições normais acompanhando dados

apresentados pelo *datasheet* do fabricante e comparando-os com os dados colhidos durante os ensaios de radiação de dose total ionizante, afim de verificar como a radiação afeta os parâmetros elétricos;

d) indicar as conclusões do autor, bem como sugestões para trabalhos futuros;

e) apresentar um Apêndice com informações básicas sobre os transistores para nortear o leitor caso necessite de uma leitura mais aprofundada sobre o componente.

1.4 Generalidade e utilidade

A **Generalidade** deste trabalho consiste no fato de que as análises apresentadas nesta pesquisa poderão ser aplicadas não somente à projetos da área espacial, pois os efeitos da radiação na eletrônica tem sido observados em outras áreas como: Na aviação (FORTES et al., 2012), uma vez que aviões também são expostos à radiação ionizante e as partículas podem ter efeitos nocivos aos sistemas, também podendo ser aplicada à indústria nuclear, bem como em equipamentos hospitalares que utilizam radiação para seu funcionamento (HASSAN et al., 2018) e, por fim a todo e qualquer equipamento de engenharia que possa ser afetado pelos efeitos da radiação.

A **Utilidade** deste trabalho relaciona-se com o programa espacial brasileiro desenvolvido pela Agência Espacial Brasileira (AEB) e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cuja utilização se dá em praticamente todos os setores econômicos do país, conforme ilustrado na Figura 1.2. contribuindo para gerar valor e renda (AEB, 2020). A análise qualitativa apresentada neste trabalho pode ser aplicada às análises de confiabilidade dos satélites fabricados pelo INPE, contribuindo com o sucesso da missão e facilitando o trabalho das equipes de desenvolvimento.

Figura 1.2 – Tecnologia e aplicações espaciais no Brasil.



Fonte: AEB (2020).

1.5 Organização da Dissertação

O **Capítulo 1** do presente trabalho contempla o contexto no qual o conteúdo da dissertação está inserido, a motivação para realizar a pesquisa, e a generalidade e utilidade de estudar os efeitos da radiação nos dispositivos semicondutores.

- O **Capítulo 2** fornece uma apresentação dos conceitos básicos de radiação e confiabilidade que estão relacionados ao desenvolvimento do trabalho e também apresenta um panorama dos estudos relacionados ao tema.
- O **Capítulo 3** apresenta a formulação do problema a ser estudado e a abordagem utilizada para solucionar o problema.
- O **Capítulo 4** apresenta a metodologia escolhida para realizar uma análise qualitativa do impacto da radiação de dose total ionizante em transistores e circuitos integrados de uso espacial.

- O **Capítulo 5** traz dois estudos de caso aplicando a metodologia escolhida para estudar a variação dos parâmetros elétricos nos componentes eletrônicos. O primeiro estudo é aplicado ao transistor 2N2222A após a exposição à radiação de dose total ionizante e analisando como a radiação afeta os modos de falha do componente. O segundo estudo de caso, utiliza a mesma metodologia, aplicando-a ao CI LVDS desenvolvido no projeto CITAR do INPE.
- O **Capítulo 6** mostra a conclusão da autora, bem como apresenta sugestões para trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos no âmbito de pesquisa do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- O **Apêndice A** traz uma abordagem aprofundada dos transistores e seu funcionamento.

2 CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta uma revisão bibliográfica de conceitos pertinentes ao trabalho desenvolvido. Tais conceitos abordados são: Componentes eletrônicos, Radiação e seus efeitos sobre os componentes e Confiabilidade. Ao final do capítulo são expostos artigos e dissertações relacionados ao tema que estão disponíveis na literatura da área.

2.1 Radiação

No contexto deste trabalho podemos definir Radiação como: *“A transferência de energia e momento por meio de um quantum (partícula material ou fóton)”* (MANEA, 2019).

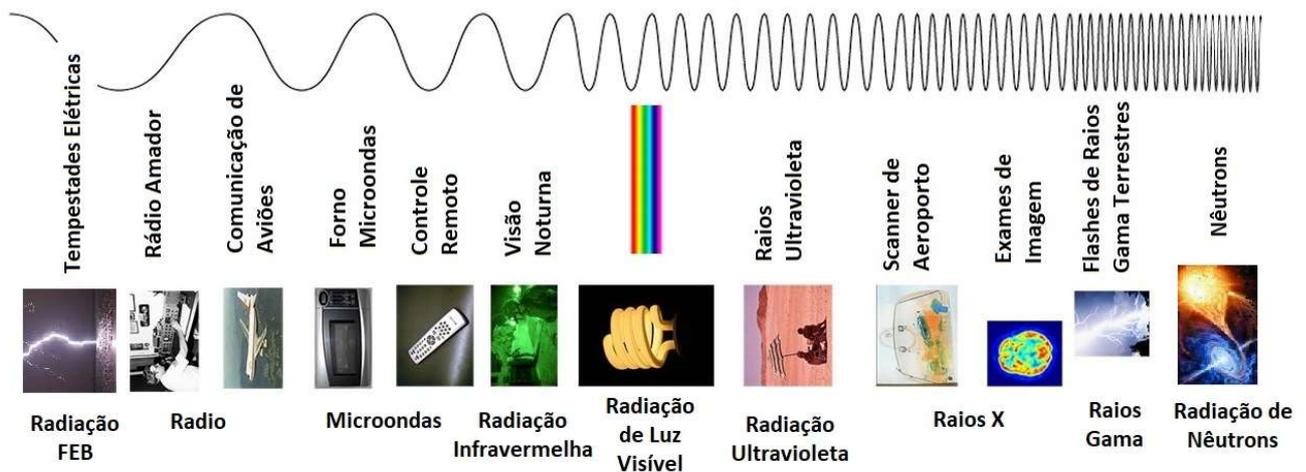
As partículas materiais, quando eletricamente neutras (como nêutrons e neutrinos), de maneira geral, interagem muito menos com a matéria do que as partículas materiais eletricamente carregadas (como prótons, partículas alfa e núcleos de átomos mais pesados), quando essas partículas atingem a outros materiais perdem energia gradualmente. A partícula em si perde energia durante a colisão, enquanto que o meio sofre deposição de energia cujos efeitos podem ser danosos, como por exemplo, em componentes eletrônicos essas interações afetam o funcionamento do mesmo, e podem ser destrutivas ou não destrutivas conforme detalharemos à frente (TURNER, 2007).

A Figura 2.1 apresenta o espectro da radiação partindo da Radiação não ionizante até a Radiação Ionizante.

2.1.1 Radiação não ionizante

Conforme podemos observar na Figura 2.1, a radiação Não Ionizante consiste na faixa de radiação com maiores comprimentos de onda, possuindo baixa energia e frequência, essa emissão é capaz de causar vibrações e movimentos dos átomos dispostos no interior das moléculas, entretanto não é forte o suficiente para que haja deslocamento dos elétrons que compõem tais átomos (WOJTCZAK; PIOTROWSKI, 2020).

Figura 2.1 – Espectro da radiação.



Fonte: Adaptado de NASA (2013).

Conforme podemos observar na Figura 2.1, a radiação Não Ionizante consiste na faixa de radiação com maiores comprimentos de onda, possuindo baixa energia e frequência, essa emissão é capaz de causar vibrações e movimentos dos átomos dispostos no interior das moléculas, entretanto não é forte o suficiente para que haja deslocamento dos elétrons que compõe tais átomos.

A radiação não ionizante é composta por: Radiações em Frequências Extremamente Baixas (FEB), Ondas de Rádio, Micro-ondas, Radiação Infravermelha (IR) Luz Visível e parte da Radiação Ultravioleta (UV) que serão detalhados a seguir (WOJTCAK; PIOTROWSKI, 2020).

Radiação de Frequências Extremamente Baixas (FEB): A Radiação em Frequências Extremamente Baixas provém de partículas carregadas eletricamente gerando um campo elétrico e magnético.

Parte da radiação FEB é gerada e emitida por meios artificiais através da geração, distribuição e uso da energia elétrica, tais como: linhas de distribuição de energia elétrica, cabeamento elétrico, indústria em geral, transporte metroviário e em dispositivos eletrônicos utilizados diariamente. As fontes naturais de Radiação de Frequências

Extremamente Baixas são: fenômenos atmosféricos, como raios, tempestades elétricas e correntes ionosféricas (NIKOLAYENKO et al., 2016).

Ondas de Rádio e Micro-ondas: As ondas de rádio estão entre a faixa de energia de 3kHz e 300GHz. Esse tipo de radiação pode ser produzida tanto pelo Sol, como pela Terra que emitem ondas de rádio, assim como, pode ser produzida artificialmente e utilizada principalmente para as telecomunicações, tais como: sinais enviados e recebidos dos satélites em órbita, transmissão de rádio, televisão, internet e radares (NASA, 2010c).

Radiação Infravermelha (IR): A Radiação infravermelha é a região do espectro eletromagnético que precede a luz visível, não podendo ser detectada pelo olho humano, pode observada termicamente. É muito utilizada em controles remotos, sensores de movimento e para uso espacial na detecção objetos que emitem pouca luz visível, como planetas e estrelas frias, nebulosas, e a Terra propriamente dita, através da energia emitida, sendo possível estudar estruturas de nuvens e detectar queimadas (NASA, 2010b).

Radiação de Luz Visível: A Luz Visível consiste na parte do espectro eletromagnético que pode ser captada pelo olho humano. Toda radiação eletromagnética é denominada luz, entretanto os seres humanos só podem enxergar a faixa de luz com comprimentos de onda entre 380 e 700 nanômetros. Isso acontece porque as células cônicas do olho agem como receptores que estão sintonizados nesses comprimentos de onda específicos, outras partes do espectro tem ondas muito grandes ou muito pequenas e não são percebidas pelo olho. A maior fonte de luz visível que chega ao Planeta Terra é o Sol. As cores são influenciadas pela temperatura dos objetos, objetos mais quentes irradiam energia com comprimentos de onda mais curtos sendo visto em cores mais azuladas, enquanto que os objetos mais frios irradiam energia com comprimentos

de onda mais longos e essa energia é percebida pelo olho em tons de vermelho (NASA, 2010e).

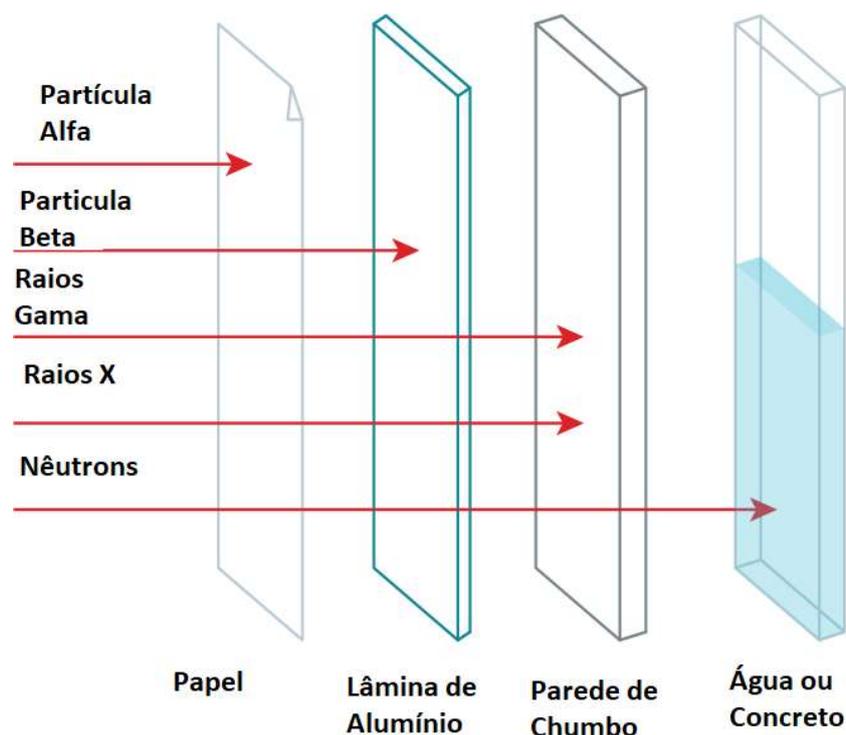
Radiação Ultravioleta (UV): A Radiação Ultravioleta (UV) é parte do espectro eletromagnético que sucede a luz visível e está antes dos raios X. Os comprimentos de onda dessa radiação variam entre 10 e 400 nanômetros. Na faixa de comprimento de onda entre 10 e 100nm a radiação ultravioleta só viaja através do vácuo passando a ser considerada uma radiação ionizante (STANDFORD SOLAR CENTER, 2015). A principal fonte natural de radiação ultravioleta é o Sol e também existem fontes artificiais que incluem, cabines de bronzamento, diversos tipos de lâmpadas e alguns tipos de lasers (NASA, 2010d).

2.1.2 Radiação ionizante

Ao contrário da radiação não ionizante, as partículas de que é composta a radiação ionizante (fótons de alta frequência no caso de radiação eletromagnética, e partículas materiais em outros casos) possuem energia suficiente para arrancar elétrons de átomos ou moléculas. Caso a energia por partícula seja muito alta, podem também quebrar núcleos de átomos. Este processo de remoção de elétrons é conhecido como ionização. A radiação ionizante é prejudicial aos seres vivos, danificando tecidos e podendo ocasionar doenças graves com o câncer. As principais fontes de radiação ionizante são normalmente prótons ou núcleos de átomos mais pesados em velocidades ultra relativísticas provenientes do espaço e materiais radioativos (PEREZ; DUNBAR, 2019)

A radiação ionizante apresenta diferentes níveis de penetração na matéria conforme ilustrado na Figura 2.2, detalhada no decorrer deste tópico.

Figura 2.2. – Grau de penetração da radiação de partículas ionizantes.



Fonte: Adaptado de Baumann e Kruckmeyer (2019).

Partícula Alfa: As partículas alfa são partículas carregadas que tem em sua composição dois nêutrons e dois prótons, sendo assim núcleos de átomos de Hélio. Por terem uma carga positiva dupla esse tipo de partícula é altamente ionizante. No entanto, é importante ter em mente que dentre os tipos de radiação ionizante apresentados, as partículas alfa são as mais ionizantes, contudo, quanto maior o número atômico, mais ionização por unidade de comprimento percorrida num material um núcleo de átomo com muita energia irá provocar. O tamanho da partícula alfa faz com que ela seja mais lenta se comparada a outros tipos de partículas radioativas e um feixe da mesma pode ser bloqueado por exemplo, por uma folha de papel.

As partículas alfa são produzidas naturalmente por elementos radioativos pesados como o urânio, rádio, tório e o actínio. Alguns exemplos de utilização desse tipo de radiação são os detectores de fumaça, eliminadores de eletricidade estática e geradores termoelétricos (BAUMANN; KRUCKMEYER, 2019)

Partícula Beta: As partículas beta consistem de elétrons ou pósitrons ejetados de átomos com excesso de nêutrons ou excesso de prótons (processo conhecido como decaimento beta). São partículas extremamente pequenas e leves, deste modo podem atingir velocidades próximas às da luz. Apesar disso elas perdem energia muito rapidamente durante sua interação com a matéria (HOLMES-SIEDLE; ADAMS, 2007). As partículas beta são bloqueadas pelo corpo humano, e dependendo do nível de exposição essa interação ocasiona queimaduras na pele.

As partículas beta são naturalmente encontradas em materiais como: urânio, tório, actínio, chumbo-210, bismuto-214, potássio- 40, carbono-14 e o tálio-206. Seu uso varia desde aparelhos de controle de qualidade na indústria através de detectores de espessura, no tratamento de alguns tipos de câncer por meio de radioterapia, em exames de tomografia e em lâmpadas de emergência. (ARPANSA, 2020a).

- **Raios X:** Os raios X são muito mais energéticos e viajam na velocidade da luz, originam-se na eletrosfera dos átomos e possuem comprimentos de onda muito mais curtos do que a radiação ultravioleta, geralmente quando se refere aos raios X é feito em termos de energia, não comprimento de onda, pois estes são muito pequenos (entre 0,03 e 3 nanômetros) (BHARDWAJ et al., 2007).

Comumente esse tipo de radiação é produzido artificialmente através da aceleração de elétrons nos chamados tubos de raios X. São utilizados na área médica para verificar a estrutura de ossos e outros objetos no interior do corpo. Também são utilizados na indústria para a inspeção de peças, em aeroportos para verificação de bagagens e por fim na ciência para observar objetos e fenômenos astronômicos, como estudos na coroa do Sol e observação de supernovas (ARPANSA, 2020c).

- **Radiação Gama:** A Radiação Gama é a mais energética do espectro eletromagnético e ao mesmo tempo tem o menor comprimento de onda, ou seja, é inferior a 100 picômetros. São muito semelhantes aos raios X, tendo como principal diferença a origem: os raios gama são originados dos núcleos dos átomos, enquanto que os raios X partem da eletrosfera.

Esse tipo de radiação é altamente penetrante, e dependendo da frequência e da espessura do alvo pode atravessar praticamente todos os tipos de material, desde o corpo humano até o aço. Assim como os raios X os efeitos da penetração de radiação Gama em altas doses no corpo humano podem causar danos irreversíveis à saúde (NASA, 2010a).

A radiação Gama é produzida pelos objetos mais quentes e energéticos do Universo, como as estrelas de nêutrons, explosões de supernovas e pulsares. Na Terra é muito facilmente encontrada em rochas, no solo, na água e alimentos consumidos diariamente pela população através de isótopos radioativos presentes em diminutas quantidades nos alimentos, bem como em elementos radioativos como urânio, tório, actínio, potássio-40 e carbono-14. De maneira geral a radiação gama é utilizada em esterilização de equipamentos hospitalares, na medicina diagnóstica, na indústria vem sendo aplicada ao setor de verificação e qualidade de produto, também sendo empregada em detectores de fumaça para residências (ARPANSA, 2020b).

- **Nêutrons:** A radiação de nêutrons consiste em partículas sem carga elétrica que são aceleradas e ejetadas do núcleo dos átomos em altíssimas velocidades. Os nêutrons danificam os tecidos vivos não por causa da ionização, uma vez que são partículas neutras. Os danos são causados principalmente porque partículas muito aceleradas colidem com os núcleos dos átomos que por sua vez liberam prótons de altíssima energia capazes de causar ferimentos.

Dependendo da espessura do material, os nêutrons são capazes de atravessar todos os tipos de materiais, e podem tornar um material radioativo. A principal aplicação dos nêutrons é em reatores nucleares para a geração de energia (BAUMANN; KRUCKMEYER, 2019).

2.1.3 Radiação no ambiente espacial

O ambiente de radiação espacial é classificado em duas populações: A radiação aprisionada que consiste em partículas carregadas que são capturadas pelo campo magnético da Terra compondo os Cinturões de Van Allen, que incluem

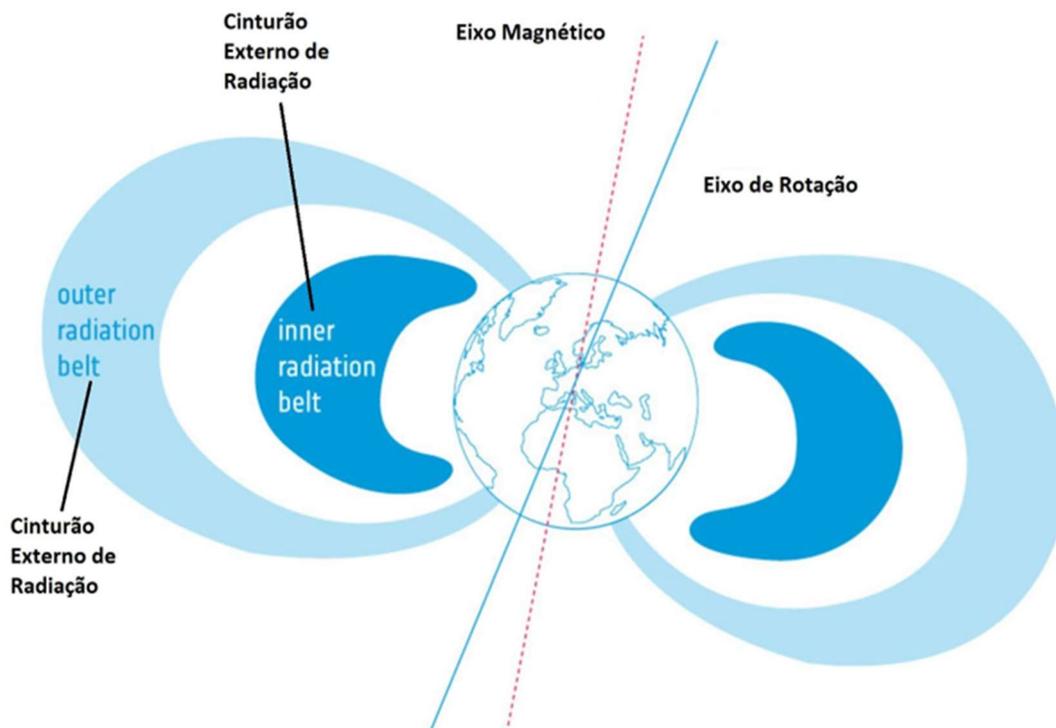
prótons, elétrons e íons pesados, e a radiação transitória que chega até nós através dos Raios Cósmicos Galácticos (RCG) e também durante eventos no nosso próprio Sistema Solar. A radiação transitória é composta por partículas mais energéticas dentre elas estão as partículas alfa, íons pesados e também nêutrons (BARTH et al, 2003).

2.1.3.1 Radiação aprisionada

Parte das partículas que chegam à Terra a todo o momento são aprisionadas pelo campo magnético terrestre formando uma espécie de cinturão conforme mostrado na Figura 2.3, denominado Cinturão de Van Allen.

Os Cinturões de Van Allen foram descobertos em 1958 pelo cientista americano James Van Allen através de experimentos realizados durante a missão de pesquisa do satélite Explorer I (LI; HUDSON, 2019). As pesquisas mostraram que existem dois cinturões: O cinturão interno e o cinturão externo.

Figura 2.3 – Os cinturões de Van Allen.



Fonte: Adaptado de European Space Agency (2016).

O cinturão interno é composto por prótons com muita energia e está localizado entre 1200 km e 6.000 km de altitude (BAUMANN; KRUCKMEYER, 2019). As partículas presentes no cinturão interno se originam principalmente do impacto dos Raios Cósmicos Galácticos na atmosfera terrestre produzindo nêutrons que decaem com meia vida de 15 minutos e também dos prótons energéticos provenientes de eventos solares como erupções e ejeções de massa coronal. Por vezes tais prótons formam um terceiro cinturão distinto da zona interna (HOLMES-SIEDLE; ADAMS, 2007).

O Cinturão externo se estende por uma faixa entre 13.000 km e 60.000 km de altitude (BAUMANN; KRUCKMEYER, 2019) sendo composto por elétrons de alta energia cuja fonte são fenômenos atmosféricos e eventos solares como as explosões solares e ejeções de massa coronal que interagem com o campo magnético terrestre (LI; HUDSON, 2019).

2.1.3.2 Radiação transitória

Raios Cósmicos Galácticos (RCG): Os Raios Cósmicos Galácticos são partículas carregadas de alta energia que se originam de regiões fora do Sistema Solar, formados devido à resíduos de explosões de supernovas. A composição dos Raios Cósmicos Galácticos é basicamente 85 por cento de prótons (núcleos de átomos de Hidrogênio), 10 por cento de partículas alfa (núcleos de átomos de hélio) e 1 por cento de núcleos pesados como urânio, ferro e chumbo (HOLMES-SIEDLE; ADAMS, 2007).

Eventos Solares: Eventos Solares são eventos nos quais as partículas carregadas que vêm do Sol atravessam a atmosfera e chegam a Terra. Dentre eles podemos citar: O **vento solar** que é a liberação constante de partículas energéticas (elétrons, prótons, íons de hélio e uma pequena quantidade de íons pesados) que viajam pelo Sistema Solar. O vento solar é o principal responsável pelas auroras observadas na Terra. Existem também as **explosões solares** que consistem em explosões energéticas na superfície do astro que enviam uma infinidade de prótons em direção ao planeta. Cada explosão solar é única, portanto, a emissão de partículas varia de evento para evento (SHEA; SMART, 1990). As principais partículas emitidas nas explosões solares são: prótons,

partículas alfa, elétrons e íons pesados (BAUMANN; KRUCKMEYER, 2019). Por fim, existem as **ejeções de massa coronal**, que são explosões nas quais o Sol ejeta uma grande quantidade de plasma. Essas ejeções têm consequências severas para o ambiente espacial, o que inclui fortes tempestades geomagnéticas, grandes perturbações ionosféricas e poderosas correntes geomagneticamente induzidas, as perturbações no ambiente espacial podem ser muito danosas aos satélites artificiais e a tecnologias em solo terrestre (SCHRIJVER et al., 2012).

2.1.4 Efeitos da radiação em componentes eletrônicos

A radiação de partículas quando em contato com componentes eletrônicos possui diferentes interações que podem ser classificados em três tipos: Dose Total Ionizante (*Total Ionizing Dose – TID*), Dano por Deslocamento (*Displacement Damage – DD*) e Efeito de Evento Único (*Single Event Effect – SEE*). Dentro desta última categoria existem os efeitos destrutivos e os efeitos não destrutivos que serão abordados na sequência (JUNQUEIRA; MANEA, 2020).

2.1.4.1 Dose total ionizante

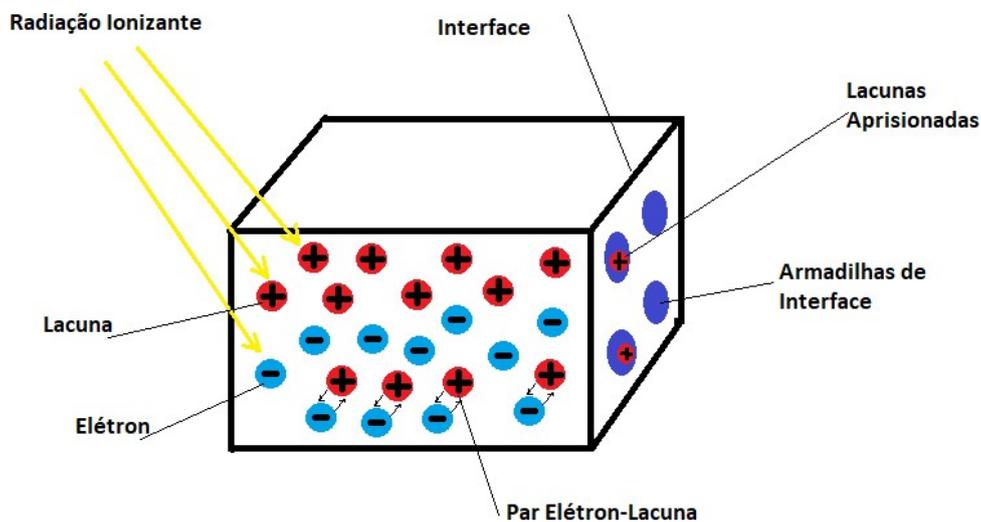
A dose total ionizante é definida como a quantidade de energia depositada por ionização ou excitação em um material por unidade de massa do mesmo (ECSS, 2010). Quando as partículas carregadas atingem os componentes eletrônicos há uma interação entre eles que gera um par contendo um elétron livre e uma lacuna do átomo atingido. Apesar dessa liberação, com o funcionamento do circuito as cargas acabam por se recombinar no interior do material eliminando esses pares, contudo nem todas as cargas são absorvidas e se acumulam, prejudicando assim o desempenho do componente (BAUMANN; KRUCKMEYER, 2019).

De maneira geral, os dispositivos semicondutores utilizam óxido de silício (SiO_2) como isolante, esse tipo de material tem tendência a acumular as lacunas liberadas pelo TID no volume do óxido, essa interação frequentemente libera hidrogênio ionizado que prejudica o funcionamento do componente. Enquanto isso, os elétrons tendem a se acumular na região condutora, devido à sua maior

movibilidade, gerando um campo elétrico parasita que prejudica o funcionamento do componente (JUNQUEIRA et al., 2020).

Os componentes mais sensíveis à Dose Total Ionizante são os dispositivos eletrônicos ativos, tais como diodos, transistores e os circuitos integrados (CIs). A Figura 2.4 ilustra o defeito na estrutura do material causado pela Dose Total Ionizante (ECSS, 2010).

Figura 2.4 – Dose total ionizante – TID.



Fonte: Adaptado de Oser e Mekki (2020).

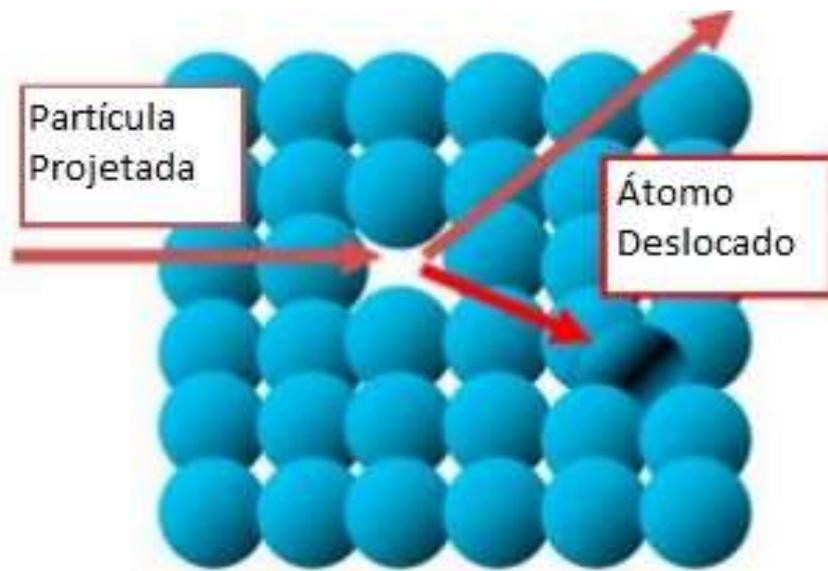
2.1.4.2 Dano por deslocamento

Dano por Deslocamento (DD) é 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 observada em materiais optoeletrônicos, dispositivos bipolares e células solares (ECSS, 2010).

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 (BAUMANN; KRUCKMEYER, 2019).

O DD ocorre por meio da perda de energia das partículas devido à inúmeras colisões elásticas que se acumulam com o tempo (ECSS, 2010). Podemos observar esquematicamente o dano por deslocamento na Figura 2.5 apresentada a seguir.

Figura 2.5 - Dano por deslocamento – DD.



Fonte: Adaptado de Alter Technology (2019).

2.1.4.3 Evento de efeito único

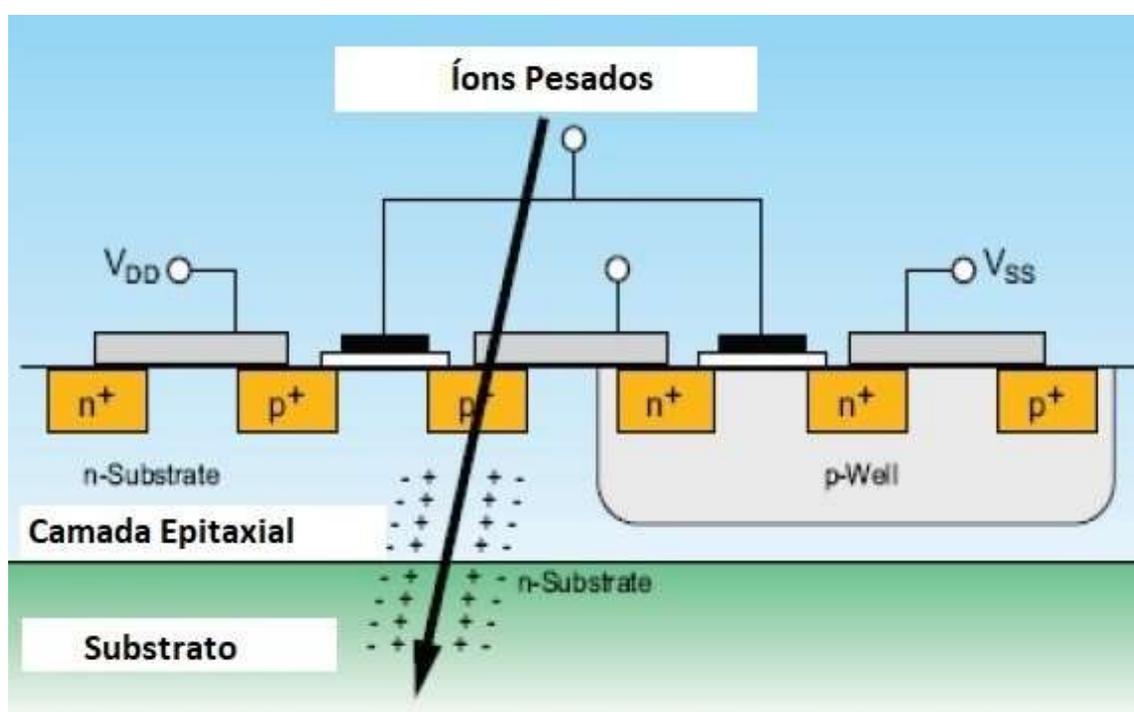
Os Eventos de Efeito Único acontecem quando uma única partícula com muita energia passa pelos semicondutores de um circuito integrado, produzindo uma trilha de pares elétron-lacuna que gera uma série de fenômenos físicos. Essas falhas geralmente são ocasionadas por uma única partícula que atravessa uma região sensível do material como podemos observar na Figura 2.6 (ECSS, 2010).

Para expressar o evento de efeito único utiliza-se a medida de transferência linear de energia (*Linear Transfer Energy – LET*) uma medida da energia depositada pela partícula por unidade do material, ou seja, é a energia que se perde por conta da ionização direta dos átomos (BAUMANN; KRUCKMEYER, 2019).

As partículas carregadas que geram os eventos de efeito único se originam majoritariamente de duas fontes de radiação que vem de fora da Terra: os prótons de alta energia e os íons pesados presentes nos raios cósmicos galácticos (ARRUDA, 2006).

Os eventos de efeito único podem ser subdivididos em: Eventos de Efeito Único Destrutivos e Eventos de Efeito Único Não Destrutivos dependendo do componente e da região atingida (JUNQUEIRA; MANEA, 2020) que serão descritos mais detalhadamente a seguir.

Figura 2.6 - Evento de efeito único – SEE.



Fonte: Adaptado de European Space Agency (1970).

Eventos de Efeito Único destrutivos como o próprio nome já diz são eventos em que ocorre um dano permanente no componente, os tipos de evento de efeito único destrutivos são:

- **Evento de Efeito Único *Latchup*:** O Evento de Efeito Único *Latchup* acontece principalmente em dispositivos CMOS, ocorre quando uma partícula altamente energizada atravessa a base-emissor de transistores parasitas existentes em circuitos CMOS. Esse impacto gera uma corrente parasita que pode fazer uma corrente excessiva circular pelo componente levando à perda (SEXTON, 2003).
- **Evento de Efeito Único *Snapback*:** O Evento de Efeito Único *Snapback* ocorre da mesma forma que o Evento de Efeito Único de *Latchup*, a diferença é que este evento ocorre em grande parte em transistores do tipo N-MOS, quando uma partícula carregada atinge a região de dreno do transistor gerando uma alta corrente parasita que pode sobrecarregar o sistema e levar à perda do componente (BAUMANN; KRUCKMEYER, 2019).
- **Evento de Efeito Único Ruptura de *Gate*:** O Evento de Efeito Único Ruptura de *Gate* ocorre em transistores do tipo MOSFET, quando acontece uma quebra na região isolante gerando um caminho condutor na região do terminal de *Gate* do óxido causando uma falha catastrófica no dispositivo (SEXTON, 2003).
- **Evento de Efeito Único de *Burnout*:** O Evento de Efeito Único de *Burnout* ocorre quando o impacto de uma partícula carregada gera uma alta corrente que pode destruir um componente. Esse tipo de efeito ocorre com frequência em transistores do tipo bipolares, FETs e MOSFETs (SEXTON, 2003).

Eventos de efeito único não destrutivos são aqueles cujos efeitos não causam a falha permanente dos dispositivos, podendo ser corrigidos com ações simples como reset do dispositivo.

- **Efeito de Evento Único *Upset* em Múltiplos Bits:** O Efeito de Evento Único *Upset* em Múltiplos Bits ocorre quando um íon altamente energético atinge um componente digital, geralmente memórias e registradores.

Esse impacto gera uma mudança de mais de um bit no circuito integrado podendo causar erros de comando de transmissão de dados gerando falhas no sistema (BAUMANN; KRUCKMEYER, 2019).

- **Efeito de Evento Único de Interrupção Funcional:** Um Evento Único de Interrupção Funcional consiste na mudança ou interrupção de uma função ou comando de um dispositivo ocasionado pelo impacto de uma partícula altamente carregada, de modo que o funcionamento do circuito acaba sendo prejudicado e/ou interrompido (BAUMANN; KRUCKMEYER, 2019).
- **Efeito de Evento Único Transiente:** O Evento Único Transiente ocorre quando um sinal é gerado através do impacto de uma partícula energética. Este sinal pode propagar-se e gerar um sinal lógico errado causando erros de comando que se não detectados a tempo podem comprometer o sistema (MACHADO, 2014).
- **Efeito de Evento Único *Upset*:** O Efeito de Evento Único de *Upset* acontece quando um íon atinge um ou mais bits e muda a informação contida nele, causando erros no sistema. Esse tipo de efeito pode ser corrigido através da reinicialização do sistema (reset), voltando a informação correta para o lugar do bit atingido (ARRUDA, 2006).

2.1.5 Parâmetros para a análise da interação de partículas ionizantes e os circuitos eletrônicos

Quando se trata de análise da interação de partículas ionizantes com os dispositivos eletrônicos são necessários quatro parâmetros importantes para modelar matematicamente esses fenômenos, sendo eles: Transferência Linear de Energia (LET), Seção de Choque de Radiação (*Cross Section*), Carga Crítica (QC) e o Volume Sensível (ECSS, 2010).

2.1.5.1 Transferência Linear de Energia (LET)

A Transferência Linear de Energia em inglês *Linear Energy Transfer (LET)*, é definida como a quantidade de energia depositada no caminho que a partícula ionizante percorre ao atravessar um meio. Essa grandeza está em função do tipo de partícula estudada e sua energia, e pode ser aproximada da energia de

parada da partícula, ou seja, a energia perdida pela partícula por unidade de comprimento (BAUMANN; KRUCKMEYER, 2019).

A aproximação de tal função pode ser feita através do cálculo da Equação 2.1 apresentada a seguir:

$$\begin{cases} LET(x) \cong \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}(x), \text{ para } 0 \leq x \leq r \\ LET(x) = 0, \quad \text{para os demais casos} \end{cases} \quad (2.1)$$

temos que:

r - É o alcance da partícula;

ρ - É a densidade do material em que a partícula está dispersando sua energia;

dE - É a energia que a partícula (dE) perde ao percorrer a distância (dx).

Utilizando como exemplo o silício, cuja densidade é conhecida e equivale a 2,32g/cm³, a energia que é depositada (E_{dep}) expressa em MeV numa distância d expressa em micrômetros, pode ser calculada utilizando a Fórmula 2.2:

$$E_{dep} = LET \times d \times 0,232 \quad (2.2)$$

Essa fórmula só pode ser utilizada se o LET for considerado constante durante toda a trajetória percorrida pela partícula no interior do material (ECSS, 2010).

2.1.5.2 Seção de choque de radiação (*cross section*).

Quando a probabilidade de interação tende a zero, podemos definir a seção de choque de radiação (σ) como a probabilidade de ocorrer interação por unidade de fluência da partícula, sendo que a fluência consiste na quantidade de partículas que atravessam o material por unidade de área (COSTA; NARDIN, 2011).

Quando se trata de íons pesados, geralmente a seção de choque é calculada em função do LET, em contrapartida, para nêutrons e prótons a seção de choque é calculada em função da energia da partícula, ambas situações podem ser calculadas através das Fórmulas 2.3 e 2.4 (ECSS, 2010).

$$\sigma_{ion} = \frac{\text{número de eventos}}{\text{fluência do íon}} \quad (2.3)$$

$$\sigma_{nêutron e próton} = \frac{\text{número de eventos}}{\text{fluência do nêutron}} \quad (2.4)$$

2.1.5.3 Carga crítica (Qc)

A carga crítica consiste na quantidade mínima de carga coletada em uma região sensível do componente eletrônico devido à passagem de uma partícula ionizante culminando em um efeito de evento único (ECSS, 2010).

A carga crítica é proporcional à energia crítica depositada no volume sensível do dispositivo, citando o exemplo do silício, a ECSS,2010 nos apresenta que a carga crítica é deduzida da energia crítica (em MeV) através da Expressão 2.5.

$$Q_c = \frac{E_c}{22,5} \quad (2.5)$$

2.1.5.4 Volume sensível

O Volume Sensível é representado por um paralelepípedo retangular na superfície do dispositivo eletrônico, onde seja possível o acúmulo de cargas que resultam em um Evento de Efeito Único. De maneira geral, entende-se que a dimensão do volume sensível pode ser calculada pela saturação da seção de choque, multiplicada pela espessura que frequentemente é aproximado como sendo da ordem de 2µm, esse valor é dado de acordo com estudos já realizados, entretanto para dispositivos recentes, altamente integrados com geometrias muito pequenas, por vezes este valor não é válido, então para estes casos é

possível obter uma estimativa mais precisa do volume sensível a partir de medições experimentais (ECSS, 2010).

2.2 Componentes eletrônicos

Os componentes eletrônicos são materiais construídos com a função de conduzir e controlar a corrente elétrica durante sua passagem (ECSS, 2012a). Para o desenvolvimento do escopo desta dissertação podemos classificar os componentes eletrônicos como discretos e integrados e também como ativos ou passivos.

2.2.1 Componentes discretos e integrados

Os componentes discretos são configurados em um invólucro único e sendo assim executam apenas uma função dentro do circuito, são exemplos de componentes discretos, os diodos, transistores, resistores, indutores e capacitores (MELO et al., 2015).

Em contrapartida, os componentes integrados, como o nome já diz são integrados possuindo diversos componentes dentro de um único invólucro. A utilização de circuitos integrados cresceu exponencialmente nos últimos anos com a era digital e o surgimento dos computadores e smartphones (MELO et al., 2015).

2.2.2 Componentes ativos e passivos

Os componentes ativos tem a capacidade de gerar energia no circuito ou amplificar sinais, esse tipo de componente é capaz de promover ganhos para a corrente na potência dos sinais. Os tipos mais comuns de componentes ativos que conhecemos são: transistores, fontes de energia, tiristores e circuitos integrados (BOYLESTAD, 2012).

Componentes passivos não são capazes de amplificar sinais para o circuito através do aumento de corrente ou tensão, eles apenas interagem com ela, os componentes passivos mais comuns são: resistores, capacitores, transformadores e os indutores (BOYLESTAD, 2012) .

2.2.3 Dispositivos semicondutores

Dispositivos Semicondutores são componentes que tem a habilidade de controlar o fluxo de corrente, executando as mesmas funções das antigas válvulas eletrônicas, tendo como vantagem menor tamanho, peso e vida útil, os principais dispositivos semicondutores utilizados são os diodos, transistores e circuitos integrados (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Para entender melhor os dispositivos semicondutores precisamos entender um pouco do funcionamento dos materiais semicondutores. De acordo com Boylestad e Nashelsky (2013): *“Materiais semicondutores são aqueles que possuem um nível de condutividade entre os extremos de um isolante e de um condutor”*.

Os materiais condutores são aqueles cujos elétrons presentes na camada de valência são fracamente ligados ao núcleo, podendo se mover com mais facilidade, de modo que a aplicar-se uma diferença de potencial neste material o mesmo será capaz de conduzir uma corrente elétrica (MALVINO; BATES, 2016).

Materiais isolantes ao contrário dos materiais condutores possuem os elétrons da valência fortemente ligados ao núcleo, apresentando uma forte oposição à passagem de corrente elétrica (MALVINO; BATES, 2016).

Os materiais semicondutores mais utilizados atualmente são o germânio e o silício. Os átomos destes materiais formam uma estrutura cristalina (BOYLESTAD; ASHELSKY, 2013).

Quando o cristal é submetido a uma diferença de potencial, algumas ligações da rede cristalina se rompem gerando um portador de carga elétrica negativa ou positiva. Após o rompimento e a liberação do elétron no lugar deste surge uma lacuna onde qualquer tipo de elétron que esteja próximo pode ser atraído para ela (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Um cristal puro pode ser dopado acrescentando-se átomos de um metal com o objetivo de conseguir o comportamento elétrico desejado, os metais utilizados são de- nominados impurezas, e podem ser átomos trivalentes ou pentavalentes.

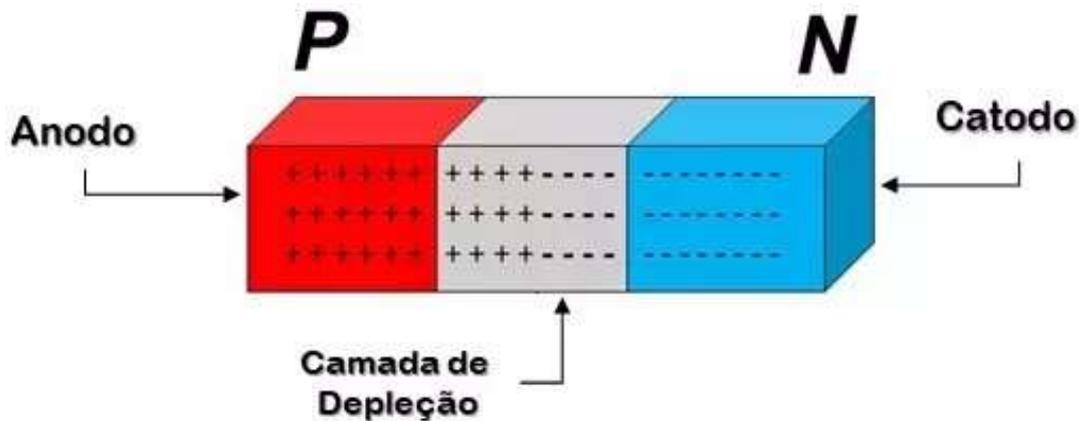
Se forem utilizados materiais trivalentes, ou seja, com três elétrons na camada de valência o cristal gera lacunas, este cristal é chamado de tipo P. Por outro lado, se forem utilizados materiais com cinco elétrons na valência (pentavalentes) são gerados no cristal elétrons livres, este cristal é denominado tipo N (MALVINO; BATES, 2016).

2.2.3.1 Diodos

Os diodos semicondutores são dispositivos montados utilizando-se uma junção P-N, conforme a Figura 2.7 construídos sob um mesmo material de base (germânio ou silício). A partir do momento em que estes materiais são unidos, os elétrons e as lacunas na região de junção combinam-se, de modo que próximo à região não existe portadores de carga, esta região de junção é denominada “camada de depleção”. Os diodos podem ser polarizados diretamente, reversamente ou não serem polarizados (REZENDE, 2013).

Quando o terminal ligado ao material do tipo P é colocado num potencial elétrico mais positivo do que o terminal ligado ao material do tipo N fazendo a diferença de potencial entre o material P e o material tipo N ser positiva. Esta configuração irá fazer com que os elétrons do material tipo N combinem-se com as lacunas do material tipo P fazendo com que a camada de depleção fique mais fina e de acordo com o aumento da tensão aplicada, a corrente também aumenta no diodo (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Figura 2.7 – Estrutura interna do diodo.



Fonte: Alves (2019).

A polarização reversa acontece quando o terminal do material tipo P é ligado ao terminal negativo da fonte de tensão e o terminal do material tipo N é conectado ao terminal positivo da fonte. Nesta configuração número de combinações de elétrons-lacuna na camada de depleção aumenta devido à grande quantidade de elétrons livres presentes no material tipo N enquanto que os íons negativos também aumentam no material tipo P, esse fenômeno gera um aumento na largura da camada de depleção gerando uma corrente de saturação reversa I_s (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Por fim, quando o diodo não é polarizado quaisquer lacunas do material tipo N que estiverem presentes na camada de depleção serão encaminhadas para o material do tipo P. Com essa configuração, o fluxo líquido de carga em qualquer direção no diodo será zero (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

2.3 Confiabilidade

A 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”, (ECSS, 2012a), ou seja, um item é confiável se ele funciona pelo tempo para o qual foi projetado sem falhar.

Ainda podemos apresentar outra definição de confiabilidade como: “A confiabilidade é uma métrica que reflete a probabilidade de determinado sistema, independente da área de conhecimento, ser capaz de operar adequadamente quando solicitado dentro de um intervalo de tempo e condições especificadas” (RABELLO, 2017).

No mundo moderno tem-se tornado cada vez mais imprescindível melhorar o funcionamento de produtos e sistemas visando garantir a diminuição do custo final, uma vez que defeitos e falhas geram custos para a empresa que está operando, tanto custos de produção quando o defeito é de fabricação, bem como custo de manutenção quando a falha ocorre durante o funcionamento do equipamento/sistema. Esta última é pior, pois uma única falha pode gerar outras dentro de um sistema.

2.3.1 Conceitos associados à confiabilidade

Quando se trata de confiabilidade é importante ressaltar seis conceitos básicos associados: Qualidade, Disponibilidade, Manutenibilidade, Segurança e Confiança (FOGLIATO; RIBEIRO, 2011).

Qualidade: A qualidade é o conjunto de todas as características que fazem com que um produto ou serviço satisfaça as necessidades objetivadas, cumprindo as especificações de projeto com o mínimo de variações.

Disponibilidade: é definida como: “A capacidade de um item, mediante manutenção apropriada, desempenhar sua função requerida em um determinado instante de tempo ou em um período de tempo predeterminado” (FOGLIATO; RIBEIRO, 2011). Quando o item não pode ser reparado pela manutenção o conceito de disponibilidade é equivalente ao conceito de confiabilidade, já quando o item pode ser reparado considera-se que o item retornou à condição de nova e utiliza-se a Fórmula 2.6 para calcular o valor médio de disponibilidade para a unidade.

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (2.6)$$

Onde: A é a disponibilidade média da unidade, em inglês (*Available*);

MTTF: é o tempo médio entre as falhas;

MTTR: é o tempo médio de reparo da unidade.

Manutenabilidade: É a capacidade de se realizar manutenção no item, ou seja, fazer com que o item volte a executar suas funções de acordo com as especificações de fabricação e uso, utilizando-se de técnicas e procedimentos padrão.

Segurança: A segurança consiste na escassez de condições que possam acarretar em mortes, danos ou doenças ocupacionais para pessoas ou danos e perdas materiais.

Confiança: Também conhecida como dependabilidade são características de qualidade de um produto em termos do tempo de funcionamento, é a capacidade de um produto executar sua função quando solicitado dependendo de sua aplicação (HARDEVELD, 2012).

2.4 Referências e estudos relacionados ao trabalho.

Nesta sessão relacionaremos documentos que abordam os efeitos da radiação e os estudos da confiabilidade em componentes eletrônicos, sendo eles, os guias da *European Space Agency - ESA* ou Agência Espacial Europeia que apresentam uma base metodológica para o desenvolvimento dos objetivos trabalhados e também relacionaremos estudos disponíveis na literatura que norteiam a pesquisa e facilitam a modelagem da metodologia proposta.

2.4.1 Guias da ESA relacionados aos conceitos estudados

Os guias da ESA da série ECSS são importantes, pois fornecem diretrizes para o gerenciamento, engenharia e garantia de produto em projetos de aplicação espaciais, sendo que os relevantes para o trabalho serão apresentados a seguir:

- **ECSS-Q-ST-30-02C**

Título: *Space product assurance - Failure modes, effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA)*

Ano: 2009

Resumo: A ECSS-Q-ST-30-02C consiste em um guia para a realização de uma análise de confiabilidade qualitativa do tipo Failure Mode and Effects Analysis - FMEA e também do tipo Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis - FMECA. Essas metodologias buscam identificar potenciais falhas em produtos ou processos, avaliar seus efeitos, propor ações para mitigar as falhas começando pelas de maior prioridade e relacionando-as com suas consequências mais críticas e no caso da FMECA os modos de falha são classificados de acordo com sua criticidade (ECSS, 2009). Essa metodologia é basicamente uma análise *bottom-up* que considera cada modo de falha elementar e analisa seus efeitos até que se esgote as possibilidades de análise.

Relevância para o trabalho: O Guia ECSS-Q-ST-30-02C, é relevante para o trabalho, pois se implementada nas fases iniciais de uma missão espacial poupa muitos erros que podem acontecer.

Considerando que uma análise qualitativa inicia o processo de estudo de confiabilidade da missão, a metodologia FMEA é uma ferramenta útil e relativamente simples que pode ser utilizada.

- **ECSS-Q-ST-30C**

Título: *Space product assurance - Dependability*

Ano: 2009

Resumo: Esse guia define um programa de garantia de dependabilidade e os requisitos de dependabilidade para sistemas espaciais, sendo que a garantia de dependabilidade é um processo que dura todo o ciclo de vida do projeto. A ECSS-Q-ST-30C engloba:

- A identificação de todos os riscos técnicos relacionados às necessidades funcionais que levam à não conformidade com os requisitos de confiabilidade;

- Aplicação de métodos de análise e projetos para garantir que as metas de confiabilidade sejam atingidas.

- Otimização do custo e cronograma global, certificando-se que: regras de projeto, análises de dependabilidade e ações para reduzir os riscos estão de acordo com a severidade apropriada; e que as ações de redução de riscos sejam implementadas continuamente desde a concepção do projeto e especialmente durante a fase de desenvolvimento (design) (ECSS, 2009b).

Relevância para o trabalho: Este guia é importante para o trabalho, pois apresenta um conceito global no qual a confiabilidade está inserida e norteia o trabalho indicando métricas de análise de confiabilidade importantes para o escopo da pesquisa.

- **ECSS-Q-ST-60-15C**

Título: *Space product assurance - Radiation hardness assurance - EEE components*

Ano: 2012

Resumo: A ECSS-Q-ST-60-15C especifica os *requisitos Radiation Hardness Assurance - RHA* para projetos espaciais abordando os três principais efeitos de radiação (Dose total ionizante - TID, Dano por Deslocamento - DD e Efeito de Evento Único - SEE) em componentes Elétricos, Eletrônicos e Eletromecânicos - EEE formando uma base para criar um programa de RHA necessário para todos os projetos espaciais (ECSS, 2012b).

Relevância para o trabalho: O Guia ECSS-Q-ST-60-15C é relevante para a dissertação, pois indica como garantir que os componentes EEE cumpram suas funções após sofrerem com os efeitos da radiação, e também fornece conceitos para a fundamentação teórica sobre os efeitos da radiação TID, DD e SEE estudados no presente capítulo, sendo relevantes para estudar o comportamento dos componentes quando expostos à radiação e analisar seus modos de falha.

- **ECSS-E-ST-10-12C**

Título: *Space engineering - Methods for the calculation of radiation received and its effects, and a policy for design margins*

Ano: 2008

Resumo: Este guia abrange os métodos para o cálculo da radiação recebida e seus efeitos, e uma política para margens de projeto, tanto para fontes de radiação naturais, quanto para fontes de radiação artificiais. Este documento aplica-se à avaliação dos efeitos da radiação em todos os sistemas espaciais, e todos os tipos de produtos que operam no espaço, bem como para as missões espaciais tripuladas, visando implementar um processo de engenharia de sistemas que garante um entendimento comum para participantes no processo de desenvolvimento e operações (ECSS, 2008).

Relevância para o trabalho: Este guia é importante para a fundamentação teórica do trabalho, pois também fornece conceitos importantes sobre radiação e seus efeitos nos componentes eletrônicos apresentados na metodologia abordada e nos estudos de caso. A ECSS-E-ST-10-12C abrange também as margens de segurança que devem ser adotadas durante o processo, conceito importante na hora de realizar as análises de confiabilidade de um sistema espacial, sobretudo as análises qualitativas como é o caso do trabalho.

2.4.2 Estudos relacionados disponíveis na literatura

- Estudo de metodologia para aplicação de componentes eletrônicos COTS em ambiente espacial

Autor: Junqueira, B.C.

Ano: 2021

Resumo: O ambiente espacial é severo e o principal problema para os sistemas espaciais é a radiação que provoca efeitos de curto e longo prazo em sistemas e componentes eletrônicos. Neste sentido a solução é utilizar componentes resistentes e tolerantes à radiação. Há algumas

décadas os componentes COTS (Commercial Off-The Shelf), vem suprindo funções que os componentes espaciais não têm. Devido ao fato dos componentes de prateleira (COTS) não serem desenvolvidos para o ambiente espacial, estes não possuem garantia de funcionamento principalmente em relação à radiação. Desta forma a presente dissertação busca desenvolver um entendimento da radiação e seus efeitos nos componentes eletrônicos, em especial transistores, sendo similar para os demais componentes semicondutores, e desenvolver um método de seleção e integração do componente ao sistema de forma a aumentar a confiabilidade do componente juntamente com o sistema no qual está integrado de acordo com a missão pretendida. Como estudo de caso será analisado o comportamento de transistores COTS expostos à radiação ionizante para demonstrar os parâmetros afetados e a sua resistência à radiação, avaliando como se comportaria no ambiente espacial. Por fim, será analisado o método proposto em relação ao estudo de caso. Desta forma, com a utilização correta do componente COTS possibilita-se unir o benefício de utilização deste componente com o aumento de confiabilidade e vida útil do sistema (JUNQUEIRA, 2021).

Palavras-chave: COTS, Radiação, Metodologia para Utilização de Componentes, Ambiente Espacial.

Relevância para o trabalho: O Estudo apresentado é relevante para o desenvolvimento da dissertação, pois aborda os efeitos da radiação sobre os componentes eletrônicos, sobretudo os de uso comercial, conceitos imprescindíveis para a formar a base teórica da dissertação, e para identificar as os modos de falha dos componentes eletrônicos quando expostos à radiação.

- ***Total-Ionizing-Dose Effects in Modern CMOS Technologies***

Autor: Barnaby, H. J.

Ano: 2006

Abstract: *This review paper discusses several key issues associated with deep submicron CMOS devices as well as advanced semiconductor*

materials in ionizing radiation environments. There are, as outlined in the ITRS roadmap, numerous challenges ahead for commercial industry in its effort to track Moore's Law down to the 45 nm node and beyond. While many of the classical threat posed by ionizing radiation exposure have diminished by aggressive semiconductor scaling, the question remains whether there may be unknown, potentially worse threats lurking in the deep submicron regime. This manuscript provides a basic overview of some of the materials, devices, and designs that are being explored or, in some cases, used today. An overview of radiation threats and how radiation effects can be characterized is also presented. Last, the paper provides a detailed discussion of what we know now about how modern devices and materials respond to radiation and how we may assess, through the use of advanced analysis and modeling techniques, the relative hardness of future technologies. (BARNABY, 2006).

Index Terms - *1/f noise, high-k, interface traps, oxide trapped charge, radiation, RILC, shallow trench isolation, silicon-on-insulation (SOI), total ionizing dose.*

Relevância para o trabalho: O artigo de Barnaby é relevante para o desenvolvimento do trabalho, pois aborda como a radiação afeta os parâmetros elétricos dos dispositivos semicondutores, sobretudo em transistores que são os dispositivos base para qualquer equipamento eletrônico desenvolvido atualmente, e como esses efeitos podem ser caracterizados, sendo de suma importância para realizar a análise qualitativa a que se propõe o presente trabalho.

- ***Radiation Hardness Assurance: Evolving for NewSpace***

Autores: Campola, M. J. ; Pellish, J. A.

Ano: 2019

Abstract: *During the past decade, government agencies, private companies and academic institutions, have launched hundreds of small satellites into space, with dramatically expanded dependence on advanced commercial-off-the-shelf (COTS) technologies and systems*

required for mission success. While the radiation effects vulnerabilities of components within small satellites are the same as those of their larger, traditional relatives, revised approaches are needed for risk management because of differences in technical requirements and programmatic resources. While moving to COTS components and systems may reduce direct costs and procurement lead times, it undermines many cost-reduction strategies used for conventional radiation hardness assurance (RHA). Limited resources are accompanied by a lack of radiation testing and analysis, which can pose significant risks. Small satellites have benefited from short mission durations in low Earth orbits with respect to their radiation response, but as mission objectives grow and become reliant on advanced technologies operating for longer and in harsher environments, requirements need to reflect the changing scope without hindering developers that provide new capabilities. In this course we suggest RHA strategies that engineers and scientists can apply to a wide range of aerospace systems, including constellations, with a focus on how to manage aggressive system scaling for smaller platforms (CAMPOLA; PELLISH, 2019).

Relevância para o trabalho: O minicurso apresentado, objetiva ensinar aos usuários estratégias para a utilização de componentes Comercial-off-the-Shelf-COTS ao invés de componentes qualificados que demandam alto custo, burocracia e por muitas vezes não são adquiridos. O curso ainda fornece técnicas de garantia de dureza de radiação para aplicações de projetos espaciais, sua relevância para o trabalho consiste em prover condições para avaliar o impacto da radiação e realizar a análise qualitativa nos componentes eletrônicos que vão para o espaço.

- ***Radiation Effects in SOI Technologies***

Autores: Schwank, J.R.; Ferlet-Cavrois, V. ; Shaneyfelt, M.R.; Paillet, P.; Dodd, P.E.

Ano:2003

Abstract: Silicon-on-insulator (SOI) technologies have been developed for radiation-hardened applications for many years and are rapidly becoming a main-stream commercial technology. The authors review the total dose, single-event effects, and dose rate hardness of SOI devices. The total dose response of SOI devices is more complex than for bulk-silicon devices due to the buried oxide. Radiation-induced trapped charge in the buried oxide can increase the leakage current of partially depleted transistors and decrease the threshold voltage and increase the leakage current of fully depleted transistors. Process techniques that reduce the amount of radiation-induced positive charge trapped in the buried oxide and device design techniques that mitigate the effects of trapped charge in the buried oxide have been developed to harden SOI devices to bulk-silicon device levels. The sensitive volume for charge collection in SOI technologies is much smaller than for bulk-silicon devices potentially making SOI devices much harder to single-event upset (SEU). However, bipolar amplification caused by floating body effects can significantly reduce the SEU hardness of SOI devices. Body ties are used to reduce floating body effects and improve SEU hardness. SOI ICs are completely immune to classic four-layer p-n-p-n single-event latchup; however, floating body effects make SOI ICs susceptible to single-event snapback (single transistor latch). The sensitive volume for dose rate effects is typically two orders of magnitude lower for SOI devices than for bulk-silicon devices. By using body ties to reduce bipolar amplification, much higher dose rate upset levels can be achieved for SOI devices than for bulk-silicon devices (SCHWANK et al., 2003).

Index Terms - Dose rate effects, radiation effects, silicon-on-insulator (SOI), single event effects, total dose effects.

Relevância para o trabalho: Este artigo mostra como os efeitos da radiação afetam dispositivos semicondutores, afetando seus parâmetros elétricos o que acarreta numa série de consequências para o circuito como um todo. O estudo dos dispositivos semicondutores é relevante pois eles são a base de todos os equipamentos eletrônicos que existem

atualmente, desde relógios, até smartphones e satélites, e estão no escopo de estudo da presente dissertação, sendo assim ao entender os mecanismos da radiação quando em contato com os semicondutores, também é possível entender os modos de falha dos componentes estudados.

- ***Total Ionizing Dose Effects in Bipolar Devices and Circuits***

Autor: Pease, R.L.

Ano: 2003

Abstract: *The development of the investigation of total dose effects in bipolar devices and circuit is covered over the past 40 years. There are at least four chronological stages in this field of study highlighted by the early studies on discrete transistors, the effects of total dose on linear circuits and I^2L , the effects of total dose on recessed field oxide digital circuits and, most recently, the low dose rate sensitivity of bipolar linear circuits (PEASE, 2003).*

Index Terms - *Bipolar circuits, bipolar devices, enhanced low dose rate sensitivity, gamma radiation, hardness assurance, ionizing radiation, linear circuits, post irradiation annealing, pre-irradiation elevated, proton and electron radiation, temperature stress, total dose.*

Relevância para o trabalho: O trabalho de Pease (2003) consiste em um artigo de revisão, contendo um compilado de dados de radiação dos últimos 40 anos sendo de suma importância, pois também fornece uma contribuição significativa para o entendimento de como a radiação, sobretudo a dose total ionizante, afeta os componentes semicondutores que serão a base do sistema estudado no trabalho.

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E ABORDAGEM PARA A SOLUÇÃO

3.1 Formulação do problema

O processo de concepção de uma missão espacial é trabalhoso e caro, envolvendo diversas etapas que começam definindo os objetivos da missão e vão até a alocação dos requisitos para os elementos do sistema (LARSON; WERTZ, 1999). Um dos maiores desafios quando se pensa em enviar satélites ao espaço é entender como lidar com os efeitos da radiação constante que atinge os satélites em todas as direções. As partículas carregadas são emitidas pelo Sol e parte delas são emitidas em regiões fora do Sistema Solar e viajam por todo o espaço chegando até a Terra. Como visto na Revisão Bibliográfica apresentada no Capítulo 2, os efeitos da radiação afetam todos os subsistemas do satélite e principalmente os componentes eletrônicos que são partes fundamentais para a construção e funcionamento de todo e qualquer equipamento eletrônico, indispensáveis na atualidade (CLARO, 2005).

Nas órbitas baixas, também conhecidas como a *Low Earth Orbit (LEO)* são encontradas grande incidência de prótons altamente energéticos (BIANCHINI et al., 2018) que ao atingirem o satélite causam efeitos destrutivos e não destrutivos em seus componentes eletrônicos, podendo levar desde falhas ao componente até a perda de subsistemas inteiros (CLARO, 2005). Isso acontece porque a tecnologia de fabricação dos componentes eletrônicos influencia diretamente nos efeitos da radiação. Com a tecnologia atual os componentes estão cada vez menores e integrados (MACHADO, 2014), fazendo com que a seção de choque da partícula de radiação seja comparativamente maior.

Ainda nas etapas de concepção de um projeto uma das principais métricas exaustivamente estudadas é a confiabilidade. Quando se envia um satélite ao espaço existe a consciência de que enviar um astronauta ou robô para fazer manutenção em um satélite, salvo raras exceções, é muito mais caro do que lançar um novo satélite substituindo o anterior, tornando a manutenção no espaço “praticamente” impossível, sendo assim, o nível de confiança deve ser alto para garantir que o mesmo cumpra sua missão até o final de seu ciclo de vida. A confiabilidade utiliza-se de ferramentas de análise para certificar-se que

um componente não irá falhar e ainda se o mesmo falhar garantir que haja redundância ou outras técnicas que impedirão que o satélite deixe de executar sua missão.

Durante o processo de análise de confiabilidade, inicialmente é feita uma análise e um levantamento qualitativo das falhas e suas consequências para o sistema como um todo, para que posteriormente essas análises possam ser convertidas numericamente através do cálculo da taxa de falhas e seja feito um modelamento matemático de confiabilidade do sistema. Neste contexto o presente trabalho visa analisar qualitativamente através da ferramenta FMEA como a radiação afeta a confiabilidade dos componentes eletrônicos que compõe os satélites posicionados em órbita.

Para estudarmos o efeito que a dose total ionizante causa nos transistores e circuitos integrados, é preciso entender quais os seus impactos nos parâmetros elétricos dos componentes, conforme será explanado a seguir.

3.1.1 Impactos da radiação de dose total ionizante - TID nos transistores

Conforme o escopo do trabalho, nesta seção apresenta-se os impactos da Dose Total Ionizante - TID nos transistores e a variação dos parâmetros elétricos que os componentes apresentam ao sofrer o efeito. Esta abordagem é importante para posteriormente realizar-se a análise **qualitativa** do impacto dessa variação de parâmetros elétricos na confiabilidade dos componentes objetivando melhorar a tecnologia dos satélites e dispositivos eletrônicos expostos constantemente à radiação ionizante.

3.1.1.1 Principais parâmetros elétricos que variam com a TID

A dose total ionizante resulta do acúmulo a longo prazo de cargas ionizantes na região do óxido do transistor causando a degradação dos parâmetros elétricos do dispositivo. Nesta seção, iremos descrever resumidamente tais parâmetros e frisar como a exposição à radiação afeta o funcionamento do dispositivo.

3.1.1.2 Tensão de limiar (V_{th}) – *Threshold Voltage*

A tensão de limiar é medida no transistor efeito de campo - FET. Definimos a tensão de limiar (V_{th}) como a tensão mínima aplicada ao terminal de porta para

que seja formada uma camada de inversão dos portadores de carga minoritários na interface entre o óxido do *Gate* e o filme de silício onde forma-se a região de canal, e sendo assim, haja passagem de corrente entre os terminais de fonte e dreno, onde a camada de inversão é denominada: canal (CIRNE, 2011).

A tensão de limiar pode ser negativa ou positiva, esse fator depende da concentração da dopagem do material utilizado para formar o terminal de porta. Se essa tensão for negativa o transistor FET de canal N estará no modo de depleção. Caso a tensão de limiar seja positiva, então o transistor estará no modo enriquecimento, transistores de canal N (N-MOS) nessa configuração precisam de uma tensão positiva aplicada à porta, esses componentes são denominados normalmente desligado (COLINGE; COLINGE, 2002).

A tensão de limiar pode ser expressa matematicamente através da Equação 3.1 apresentada a seguir:

$$V_{th} = \Phi_{ms} - \frac{Q_{ba}}{C_{ba}} + \frac{2qN_{it}\Phi_F}{C_{ba}} + 2\Phi_F + \frac{\sqrt{4q\epsilon_s N_a \Phi_F}}{C_{ba}} \quad (3.1)$$

onde:

Φ_{ms} é a diferença entre as funções de trabalho do metal e do semiconductor

C_{ba} consiste na capacitância de barreira

Q_{ba} representa a carga da barreira

q é a carga do elétron em Coulombs que equivale a $1,602 \times 10^{-19} \text{C}$

ϵ_s é a permissividade do semiconductor

W consiste na largura do canal

L representa o comprimento do canal

N_{it} é concentração de cargas armadilhadas na interface

N_a é a concentração de dopantes Φ_F é o potencial de Fermi.

3.1.1.3 Ganho de corrente - β

O termo *ganho de corrente* se refere a qualquer um dos dois parâmetros de um transistor bipolar (α ou β). Para β (ou h_{fe}) o ganho é a relação entre a corrente de coletor e a corrente de base, conforme expresso na Equação 3.2 (HOLMES-SIEDLE; ADAMS, 2007)

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (3.2)$$

Com posse do valor do ganho de corrente, ainda é possível calcular a corrente no coletor do transistor através da relação expressa em 3.3.

$$I_C = \beta \times I_B \quad (3.3)$$

Quando se trata do ganho de corrente entre os terminais de coletor e emissor, representa-se como α (alfa), conforme a Equação 3.4 (HOLMES-SIEDLE; ADAMS, 2007).

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad (3.4)$$

O parâmetro α sempre será menor do que 1, pois a corrente que sai do emissor é maior do que a corrente do coletor.

A degradação de ganho e aumento da corrente de fuga são os efeitos da radiação mais comuns em transistores bipolares. Uma das causas da degradação do ganho é o deslocamento de átomos na estrutura cristalina de um semicondutor. Esse dano aumenta o número de centros de recombinação e, portanto, reduz a vida média do portador minoritário. A outra causa principal da degradação do ganho é a ionização na camada de passivação do óxido, particularmente a parte do óxido que cobre a região da junção base-emissor. Por um processo semelhante ao dos dispositivos MOS, o aprisionamento de carga e a geração de novos estados de interface causam aumento na velocidade

de recombinação da superfície dos portadores minoritários, reduzindo o ganho. Sob irradiação de elétrons e prótons, essa degradação ligada à superfície geralmente precede os efeitos de portadores minoritários. (HOLMES-SIEDLE; ADAMS, 2007).

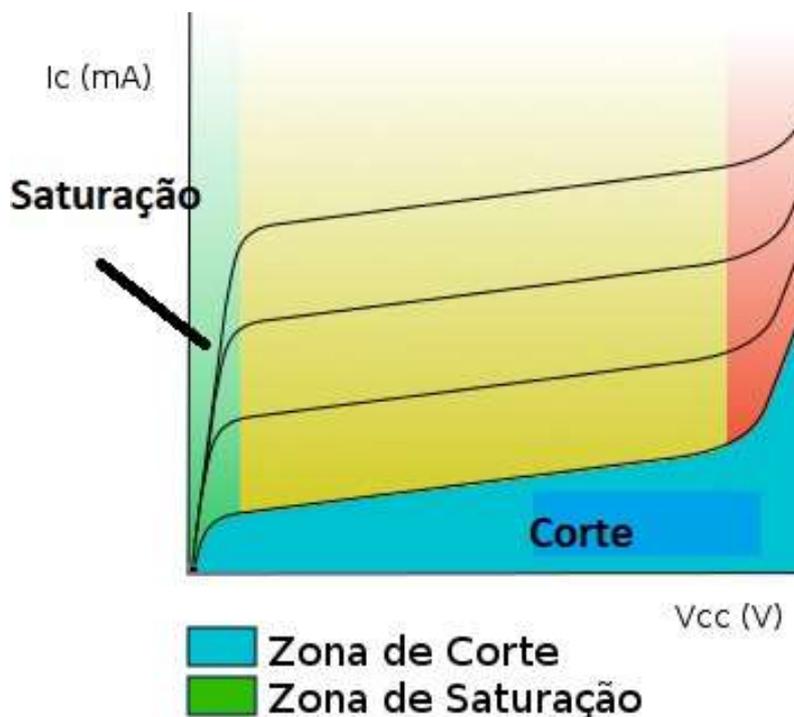
3.1.1.4 Tensão de saturação

Cada modelo de transistor possui uma região de operação que é estudada através do gráfico que expressa seu conjunto de curvas características (mais informações sobre este assunto podem ser encontradas no anexo A). Essa região fornece uma garantia de que o transistor não excederá seus limites de operação com o objetivo de evitar distorções nos sinais de saída. Cada transistor possui seus limites de operação determinados e devidamente descritos em seu *datasheet* (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Quando o transistor opera como chave, existem duas regiões de operação no transistor: **Região de Corte** e **Região de Saturação**.

Podemos localizar a região de corte no gráfico das curvas características de um transistor (Figura A.7) como sendo a região abaixo do ponto onde a curva da corrente de base intercepta a reta de carga na condição em que a corrente de base é igual a zero (WENDLING, 2009), neste caso o transistor funciona como "chave aberta", pois não há corrente nele.

Figura 3.1 - Regiões de Operação do Transistor.



Fonte: Adaptado de Clube do hardware (2015).

A Região de Saturação é a região não linear do transistor (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013), quando a reta de carga intercepta a curva característica onde a corrente de base é equivalente à corrente de saturação na base, ou seja, a corrente máxima suportada pelo dispositivo sem que ele entre no estado de saturação (WENDLING, 2009). Ambas Regiões podem ser observadas na Figura 3.1.

A Tensão de Saturação do transistor consiste no valor mínimo de tensão para que o dispositivo opere em condições normais sem cair na região de saturação, ou seja, na região não linear (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

3.1.1.5 Corrente de base

O terminal de base do transistor controla sua operação, esse controle é feito pela corrente aplicada à base (I_B). Quando a corrente de base tende a zero, o transistor tende a se encontrar na região de corte, em contrapartida, quanto

maior for a corrente de base, mais próximo o dispositivo está da região de saturação (REZENDE, 2013).

3.1.2 Efeitos da TID em transistores

Os principais efeitos que a dose total ionizante causa sobre os transistores tanto tipo MOS, quanto BJT serão descritos a seguir.

3.1.2.1 Influência da radiação na tensão de limiar

O efeito da radiação mais observado em dispositivos de tecnologia MOS é o desvio da tensão de limiar. Este é o efeito mais importante, uma vez que a tensão de limiar é necessária para criar uma camada de inversão e ligar o dispositivo, de modo que alterando esta tensão as características de operação podem ser modificadas, podendo até impedir o funcionamento (LIMA, 2006).

Quando as cargas positivas se acumulam na região do óxido, forma-se um campo elétrico que cresce verticalmente na superficial do substrato, essa condição atrai elétrons para a interface, diminuindo assim a concentração de cargas positivas próximas à superfície do substrato à medida que alteram o balanço entre os portadores de carga e o silício dopado. O aumento das cargas negativas no substrato facilita a sua inversão e conseqüentemente a diminuição da tensão de limiar nos dispositivos N-MOS, nos transistores P-MOS é necessária a aplicação de uma tensão negativa para compensar o maior volume de portadores de carga negativos (SCHRIMPF, 2007).

O efeito de desvio da tensão limiar é menos significativo em dispositivos mais modernos, pois o dielétrico de porta é fino, entretanto, esse efeito ainda afeta os transistores modernos através do aumento da corrente de fuga (SCHRIMPF, 2007).

3.1.2.2 Influência da radiação no aumento da corrente de fuga

A corrente de fuga é um efeito que ocorre em transistores quando estão operando na maioria das vezes em região de corte e em altas temperaturas (COLINGE, 2004). Esse efeito é um dos principais causadores de falhas nesses dispositivos quando expostos a variações de temperatura.

A representação matemática para a corrente de fuga quando a junção PN está reversamente polarizada pode ser vista na Equação 3.5 a seguir (COLINGE, 2004):

$$I_{fugaPN} = q \cdot A \frac{n_i \cdot W_d}{\tau_e} + q \cdot A \left(\frac{D_n}{\tau_n} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{n_i^2}{N_A} \quad (3.5)$$

onde:

q é a carga do elétron

A é a área da junção PN

D_n é o coeficiente de difusão do elétron

τ_n é o tempo de vida do elétron quando está em contato com o silício com dopagem tipo N

n_i é a concentração dos portadores de carga

N_A é a concentração de dopagem no material com dopagem tipo P

W_d é a largura da camada de depleção

τ_e é o tempo de vida efetivo que se relaciona ao processo de geração térmica na camada de depleção

O Efeito de Dose Total Ionizante - TID é responsável por ampliar a corrente de fuga em transistores, esse efeito ocorre porque as cargas ficam aprisionadas no óxido e geram uma fuga de corrente entre o dreno e a fonte do dispositivo (SCHRIMPF, 2007). Esse efeito a longo prazo pode gerar aumento de ruído e também corrente de fuga no transistor (SCHWANK et al., 2003).

Para diminuir a fuga de corrente ocasionada por esse efeito é necessário extinguir o caminho que a corrente toma, uma solução simples para este caso é mudar o *layout* de construção do transistor retirando o óxido na região entre os terminais de dreno e fonte e também acrescentar um anel de guarda com dopagem tipo P que interrompem caminhos de fuga que possam se formar. Essa construção elimina completamente o aumento da corrente de fuga e é denominada ELT - *Enclosed Layout Transistor*. (FUSCO, 2016).

3.1.2.3 Criação de armadilhas de interface

Tal como o nome já diz, as armadilhas de interface se formam na interface do óxido, durante o processo de ionização. Dependendo da proximidade das armadilhas com a interface, pode ocorrer a troca de cargas com uma camada adjacente do silício, sendo assim a armadilha captura ou emite portadores de carga. As armadilhas presentes na interface do óxido podem ter maior efeito na mobilidade dos portadores de cargas e nas taxas de recombinação na superfície do semiconductor (BARNABY, 2006). As armadilhas de interface são responsáveis por desviar a tensão de limiar.

3.1.2.4 Aumento do ruído

O aumento do ruído no transistor está ligado ao aumento do número de armadilhas de interface, e também das cargas que se encontram em sua proximidade (LIMA, 2006). O aumento do ruído pode gerar problemas em circuitos analógicos de radiofrequência, comunicadores de banda de base e quando utilizados como filtros e conversores de dados (BARNABY, 2006).

Esse problema ocorre devido a mecânica do defeito de armadilhas de interface, se dá o processo de aprisionamento e liberação de portadores de carga na interface do óxido, acontece uma flutuação de corrente no dispositivo (ROSSETO, 2014).

3.2 Abordagem para a solução

Com os problemas abordados acerca dos efeitos que a radiação provoca nos componentes eletrônicos, é importante fazer uma análise **qualitativa** desses efeitos em termos de confiabilidade dos transistores e circuitos integrados de uso espacial. Nas primeiras etapas de uma análise de confiabilidade, é importante formar um grupo de trabalho e identificar a fundo todos os modos de falha do sistema. A primeira etapa de um processo de gerenciamento é desenvolver uma análise **qualitativa**.

A análise qualitativa permite estudar a probabilidade e o impacto de cada um dos modos de falha identificados durante o desenvolvimento do projeto (FABRÍCIO SCALIONI, 2009). Esta metodologia pode ser estabelecida com o auxílio de

ferramentas, tais como: *Hazard and Operability Study*, *What if?*, *Fault Tree Analysis*, *Reliability Block Diagram* e *Failure Modes and Effects Analysis*.

3.2.1 Ferramentas de análise qualitativa

- **Hazard and Operability Study – HAZOP** – O estudo de perigos e operabilidade é uma técnica com o objetivo de identificar alterações nas variáveis de operação, tais como: temperatura, pressão, vazão, composição, viscosidade, entre outras.

É uma técnica muito utilizada na indústria química e em processos produtivos em geral, necessitando de uma equipe multidisciplinar para participar do processo de *brainstorming* para a execução da análise (MATOS, 2009).

A ferramenta HAZOP aplica-se com a utilização de *palavras-guia* que aplicadas em conjunto com as variáveis de processo norteiam o estudo, sendo elas: “nenhum”, “reverso”, “mais”, “menos”, “componentes a mais”, “mudança na composição” e “outra condição operacional”, como exemplificado na Tabela 3.1. (USP, 2022).

Ao final do estudo, monta-se uma tabela que expressa os desvios, as causas, as consequências e ações para mitigar os problemas de operação.

Tabela 3.1 – Exemplos de desvios para a ferramenta HAZOP.

PALAVRA-GUIA	VARIÁVEL	DESVIO
nenhum	pressão	Nenhuma pressão
mais	Componentes	Mais componentes
mudança	vazão	Mudança na vazão

Fonte: Produção do autor.

- **What if?** – A ferramenta **E se?** consiste em uma técnica de análise qualitativa mais simplificada, entretanto, quando aplicada corretamente

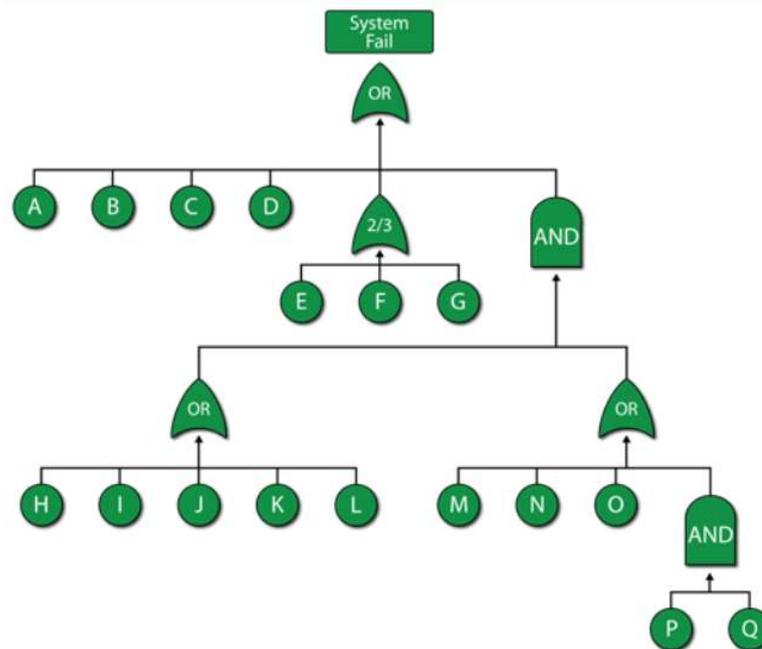
pode ser uma metodologia valiosa em uma primeira abordagem para identificar e detectar falhas e riscos do projeto.

A aplicação desta ferramenta também necessita de uma equipe multidisciplinar que avalia o processo e desenvolve um diagrama avaliando as entradas. A cada entrada do processo faz-se uma pergunta “E se?”, a fim de levantar hipóteses que levem até a causa raiz do problema. (MERCÊS et al., 2018).

- **Fault Tree Analysis – FTA** – A análise de árvore de falhas é uma metodologia construída através de um diagrama lógico que permite identificar a causa raiz de uma falha através de uma análise do tipo *top-down*.

Define-se como evento de topo a falha propriamente dita, que será analisada pela ferramenta, em seguida constrói-se a árvore lógica com eventos que supostamente causaram a falha. A árvore de falhas é construída através de portas lógicas (“E” e “OU”) para relacionar os eventos. A Figura 3.3 exemplifica uma árvore de falhas. (RELIASOFT, 2015).

Figura 3.2 – Exemplo de *Fault Tree Analysis*.

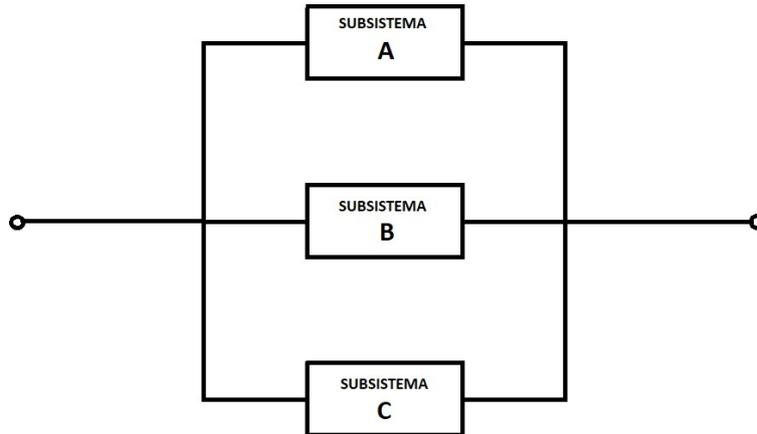


Fonte: Reliasoft (2015).

- **Reliability Block Diagram – RBD** - Diagrama de Blocos de confiabilidade é uma técnica de análise qualitativa de confiabilidade do sistema utilizando lógica analítica, representando o estado de funcionamento (sucesso ou falha) de um sistema em termos de confiabilidade.

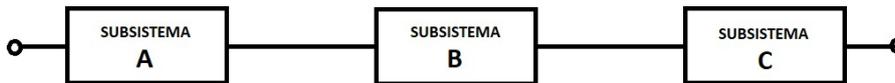
O diagrama de blocos de confiabilidade é análogo a um circuito de resistores elétricos. Quando a configuração está em paralelo como, por exemplo, na Figura 3.3, ao menos um dos componentes deve estar em funcionamento para que o sistema opere. Por outro lado, em uma configuração série como mostrada na Figura 3.4, todos os componentes do sistema devem operar para que ele obtenha sucesso (RELIASOFT, 2015).

Figura 3.3 - Diagrama de blocos de confiabilidade - configuração paralela.



Fonte: Adaptado de Reliasoft (2015).

Figura 3.4 - Diagrama de blocos de confiabilidade - configuração série.



Fonte: Adaptado de Reliasoft (2015).

4 METODOLOGIA

4.1. Escolha de uma ferramenta de análise qualitativa para o desenvolvimento da metodologia

Para escolher uma ferramenta de análise qualitativa para o desenvolvimento da metodologia proposta, utilizou-se a Figura 4.1 em que estabelece uma relação lógica entre as metodologias de análise qualitativa apresentadas no capítulo anterior. Como é possível observar, a escolha da metodologia se deu pelas características individuais de cada uma delas.

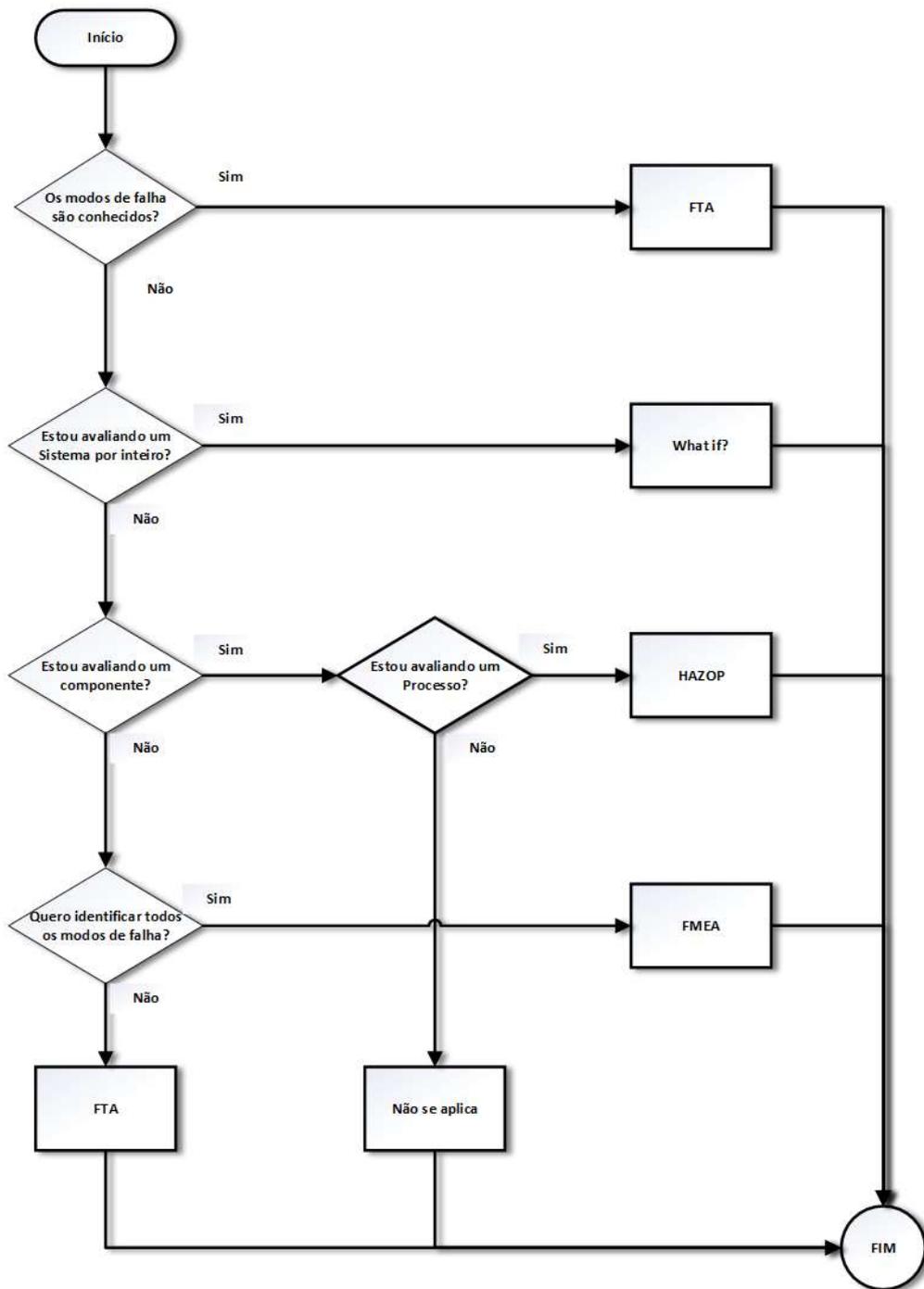
O escopo deste trabalho, parte da premissa que os modos de falha dos componentes não são conhecidos, logo, a metodologia *Fault Tree Analysis*, num primeiro momento, não seria a escolha eficaz para o desenvolvimento da dissertação, pois, parte de uma análise *top-down*, cujo evento de falha já é conhecido.

A Metodologia *What if?* faz uma abordagem generalizada do sistema, analisando os eventos como um todo, também não sendo eficaz para identificar os modos de falha nos componentes eletrônicos expostos à radiação.

A Técnica *Hazard and Operability Study*, é semelhante a *Failure Modes and Effects Analysis*, em sua construção. Baseando-se na identificação dos modos de falha e na criticidade dos modos, entretanto, é mais eficaz quando aplicada à operações e processos como um todo, o escopo deste trabalho, busca avaliar os componentes transistores e circuitos integrados individualmente, para posteriormente avaliar o impacto da falha no sistema.

A ferramenta semelhante a *Failure Modes and Effects Analysis*, foi selecionada para o desenvolvimento da dissertação, pois, avalia os modos de falha individualmente, o que é ideal para a aplicação em transistores e circuitos integrados. Outra característica importante da ferramenta, consiste no fato de que a FMEA identifica **todos** os modos de falha possíveis para o sistema e propõe medidas para mitigar as falhas. Por fim a escolha da metodologia se deu, pelo fato de que é uma ferramenta utilizada em projetos da área espacial, não somente no INPE, mas no mundo todo, sendo prevista pelas normas da ESA.

Figura 4.1 – Fluxograma para a escolha de uma análise qualitativa.



Fonte: Produção do autor.

4.2 Failure Mode and Effect Analysis – (FMEA)

A FMEA por definição é “A análise pela qual cada modo de falha potencial em um produto (ou função ou processo) é analisado para determinar seus efeitos” (ECSS, 2009a).

O objetivo de utilizar a ferramenta FMEA consiste em identificar os modos de falha nos produtos ou processos que futuramente culminarão na falha propriamente dita, e após essa identificação é possível classificar os modos de falha de acordo com sua gravidade e consequências, permitindo a realização de ações preventivas para mitigar os erros, aumentando assim a confiabilidade do produto (ECSS, 2009a). A referência europeia para descrever a FMEA é a ECSS-Q-ST-30-02C, que fornece diretrizes para a aplicação correta da ferramenta.

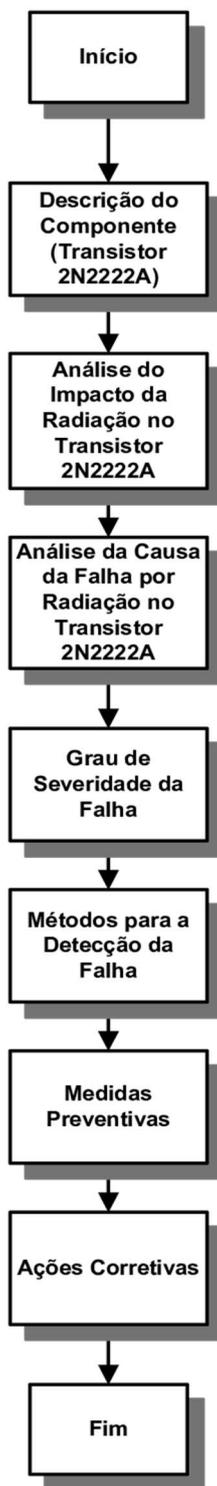
Para que a FMEA funcione corretamente, é necessário organizar um grupo de trabalho e organizar o processo seguindo cuidadosamente uma sequência de etapas que devem ser documentadas para tratar com eficiência a causa da falha e a ferramenta efetivamente funcione. A Figura 4.2 apresenta através de um fluxo de trabalho as etapas de execução da FMEA que posteriormente serão detalhadas no capítulo.

4.3. Etapas de execução da Failure Mode and Effect Analysis – (FMEA)

- a) **Descrição do Produto:** Fazer a descrição do produto ou processo que será analisado pela FMEA, e fornecer dados como: descrição de funções, interfaces, correlação com outros itens de um sistema, modos de operação e a fase da missão em que o produto está inserido.

Ao analisar os componentes e circuitos integrados de uso espacial, é importante fazer uma descrição detalhada apresentando informações extraídas do *datasheet* fornecido pelo fabricante, que facilitarão a identificação de seu comportamento quando expostos à radiação.

Figura 4.2 - Etapas para a realização da FMEA.



Fonte: Produção do autor.

- b) **Modos de Falha:** Identificar os modos de falha do produto ou processo, e investigar qual será o efeito para o sistema caso ela ocorra.

Cada modo de falha deve ser investigado individualmente para que haja uma cobertura ampla de todas as possibilidades de falhas, é importante que nesta etapa **todos** os modos de falha do componente sejam identificados, principalmente para componentes de uso espacial devido à dificuldade de realizar manutenção em sistemas funcionando no espaço.

- c) **Análise unitária:** Analisar supondo que a falha de cada item individualmente não tem impacto para o sistema como um todo. Essa análise desconsidera falhas combinada.

A análise unitária é feita com o objetivo de varrer todo o sistema identificando cada um dos modos de falha.

- d) **Severidade:** A severidade da falha é um método para avaliar os modos de falha do componente estudado individualmente em relação ao pior cenário. Com base nesta avaliação atribuir um grau de severidade para a falha. A Figura 4.3 baseia-se na referência europeia e indica os requisitos para definir o grau de severidade da falha. A Figura 4.4 apresenta uma análise lógica do grau de severidade da falha do componente.

- e) **Medidas Preventivas:** As medidas preventivas devem ser propostas para compensar a falha. Cada modo de falha apresentado individualmente deve ter medidas preventivas propostas para evitar que a falha ocorra e prejudique o sistema.

- f) **Ações Corretivas:** As ações corretivas tomadas durante o desenvolvimento da FMEA devem fornecer para os itens considerados mais críticos, ou seja, com maior probabilidade de falhar, para os quais sua falha seja mais prejudicial ao sistema, um projeto com ações para eliminar ou mitigar a falha iminente.

- g) **Documentação:** Documentar toda a análise e criar um relatório mostrando os resultados, ressaltando os problemas resolvidos e aqueles que não podem ser corrigidos através de ações determinadas para este

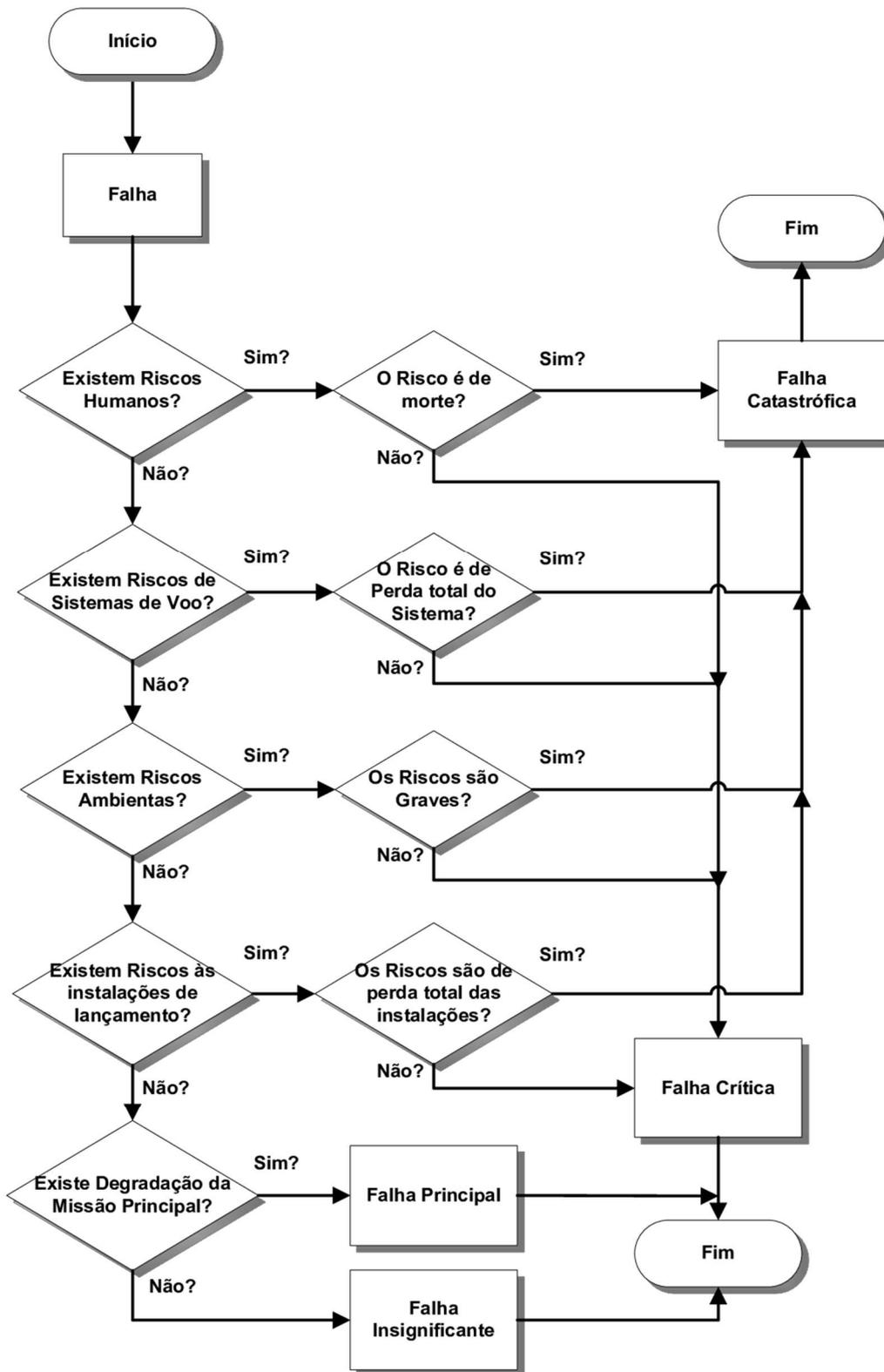
fim. A Figura 4.5 apresenta um exemplo de tabela que pode ser utilizada para a aplicação da Ferramenta FMEA em sistema. Essa figura foi desenvolvida pela autora com base na tabela proposta pela norma ECSS-Q-ST-30-02C.

Figura 4.3 - Grau de Severidade das falhas.

Categoria de Severidade	Nível de Severidade	DESCRIÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS (EFEITOS DA FALHA)	
		Efeitos na Dependabilidade	Efeitos na Segurança
Falha Catastrófica	1	Propagação da Falha	Perda de vida, risco de vida, risco de lesão permanente ou doença ocupacional.
			Perda de um sistema de voo tripulado.
			Graves efeitos ambientais prejudiciais.
			Perda de instalações do local de lançamento.
Falha Crítica	2	Perda da Missão	Perda de um Sistema.
			Desativa temporariamente a missão, mas não há riscos de perdas de vida, lesão permanente ou doença ocupacional.
			Efeitos prejudiciais ao meio ambiente.
			Danos graves a propriedades públicas e privadas.
Falha Grave	3	Degradação Significativa da Missão	Grandes danos ao sistema de voo.
			Danos graves às instalações de lançamento.
Falha Pequena ou Insignificante	4	Pouca Degradação ou qualquer outro efeito	

Fonte: Adaptado de ECSS (2013).

Figura 4.4 - Análise lógica do grau de severidade da falha.



Fonte: Produção do autor.

5 ESTUDOS DE CASO

Com o objetivo de validar a metodologia de análise qualitativa selecionada e proposta para o desenvolvimento deste trabalho, este capítulo irá abordar dois estudos de caso aplicando a ferramenta FMEA para analisar qualitativamente qual o impacto da radiação nos modos de falha dos transistores e circuitos integrados de uso espacial. O primeiro deles é aplicado ao Transistor de Junção Bipolar 2N2222A utilizado na área espacial como COT. O segundo estudo de caso é aplicado ao Circuito Integrado LVDS, um componente desenvolvido no âmbito do projeto CITAR do qual o INPE faz parte.

5.1 Estudo de caso no transistor de junção bipolar 2N2222A

5.1.1 Ensaio de Dose Total Ionizante realizado no transistor TJB 2N2222A

Realizou-se nas instalações do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), um ensaio de Dose Total Ionizante, no qual dispôs-se de uma amostra de 11 transistores de junção bipolar NPN 2N2222A. Expostos à uma fonte de radiação gama de colbato 60 com uma temperatura de 25°C (VAZ et al., 2016).

A dose acumulada na execução do teste foi de 150 krad, aplicada em 9 etapas de irradiação. Ao fim do processo de irradiação, realizou-se um processo de recozimento nos transistores, mantendo todos os terminais do componente aterrados e expondo-os à temperatura de 100°C durante um período de 7 dias (VAZ et al., 2016).

As condições de polarização das amostras são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Condições de polarização.

Amostra	Condição	Grupo
1	Polarização ON	ON - TID
2	Polarização ON	ON - TID
3	Polarização ON	ON - TID
4	Polarização ON	ON - TID
5	Polarização ON	ON - TID
6	Polarização OFF	OFF - TID
7	Polarização OFF	OFF - TID
8	Polarização OFF	OFF - TID
9	Polarização OFF	OFF - TID
10	Polarização OFF	OFF - TID
11	Amostra de controle	Referência

Fonte: Adaptado de Vaz et al. (2016).

A Tabela 5.2 ilustra as condições de ensaio nos períodos de irradiação, apresentados os dados das etapas de irradiação, taxa de dose de radiação utilizada, tempo de recozimento e finalmente a temperatura do ensaio.

Tabela 5.2 - Condições de ensaio.

Etapas de irradiação	Taxa de Dose	Recozimento	Temperatura
krad	krad	Horas	°C
0	1	-	Ambiente
5	1	-	Ambiente
11	1	-	Ambiente
25	1	-	Ambiente
35	1	-	Ambiente
48	1	-	Ambiente
74	1	-	Ambiente
100	1	-	Ambiente
125	1	-	Ambiente
150	1	-	Ambiente
-	-	24	Ambiente
-	-	168	100

Fonte: Adaptado de Vaz et al. (2016).

Os parâmetros elétricos analisados durante o teste de radiação são apresentados pelo fabricante através do *datasheet* do componente, mostrando

as condições consideradas limites para que o transistor opere com segurança. A Tabela 5.3 apresenta tais dados.

Tabela 5.3 - Condições Limites de Operação dos Parâmetros Elétricos do Transistor.

Simbologia	Parâmetro	Condições de Teste	Min.	Máx.
I_{cbo}	Corrente de Corte Coletor-Base	$V_{cb} = 75V$	-	$10\mu A$
I_{ces}	Corrente de Corte Coletor - Emissor	$V_{ce} = 50V$	-	$10nA$
I_{ebo}	Corrente de Corte Emissor-Base	$V_{eb} = 4V$	-	$10nA$
Hfe 1	Ganho de Corrente	$I_c = 0,1mA, V_{ce} = 10V$	30	-
Hfe 2	Ganho de Corrente	$I_c = 1,0mA, V_{ce} = 10V$	75	325
Hfe 3	Ganho de Corrente	$I_c = 10mA, V_{ce} = 10V$	100	-
Hfe 4	Ganho de Corrente	$I_c = 150mA, V_{ce} = 10V$	100	300
Hfe 5	Ganho de Corrente	$I_c = 500mA, V_{ce} = 10V$	30	-
V_{bSat1}	Tensão de Saturação Base-Emissor	$I_c = 150mA, I_b = 15mA$	0,6	1,2
V_{bSat2}	Tensão de Saturação Base-Emissor	$I_c = 500mA, I_b = 50mA$	-	2
V_{cSat1}	Tensão de Saturação Coletor-Emissor	$I_c = 150mA, I_b = 15mA$	-	0,3
V_{cSat2}	Tensão de Saturação Coletor-Emissor	$I_c = 500mA, I_b = 50mA$	-	1

Fonte: Adaptado de Philips (1997).

5.1.2 Aplicação da ferramenta FMEA na análise qualitativa do impacto da radiação de dose total ionizante no transistor TJB 2N2222A

Conforme destacado pelo capítulo anterior na Figura 4.1 a aplicação da FMEA necessita seguir algumas etapas para que a ferramenta seja funcional para o componente. As etapas seguidas serão detalhadas na sequência.

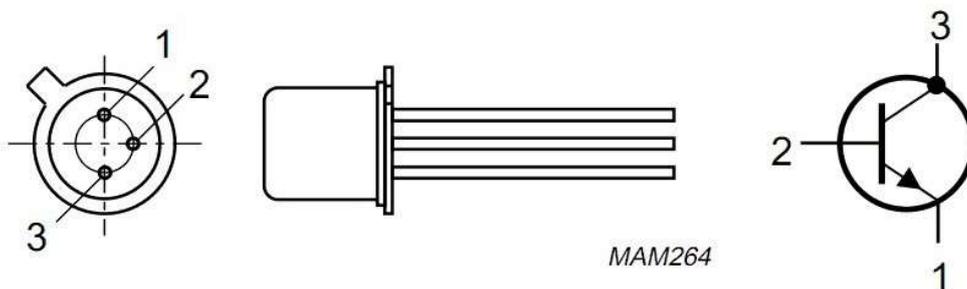
a) Descrição do Componente: Transistor 2N2222A

O Transistor 2N2222A é um transistor de junção bipolar do tipo *npn*, utilizado como amplificador linear e para chaveamento. É um transistor muito usado pela indústria devido ao seu tamanho e simplicidade.

Uma das características mais marcantes deste componente é a capacidade de funcionamento com valores de corrente elevados da ordem de 800mA e baixa tensão até 40V (PHILIPS SEMICONDUCTORS, 1997).

A Figura 5.1 ilustra de maneira simplificada o transistor 2N2222A e seus pinos, sendo o pino 1 o emissor, o pino 2 a base e o pino 3 o coletor.

Figura 5.1 - Construção do Transistor 2N2222A.



Fonte: Philips (1997).

b) Análise do Impacto da Radiação no Transistor 2N2222A

Grande parte dos parâmetros analisados durante o ensaio de radiação e comparados com as especificações encontraram-se dentro dos números previstos pelo datasheet do fabricante. Quanto aos parâmetros que foram afetados pelo impacto da dose total ionizante no transistor encontram-se resumidos na Tabela 4.4, apresentada a seguir.

Tabela 5.4 - Parâmetros afetados pela radiação.

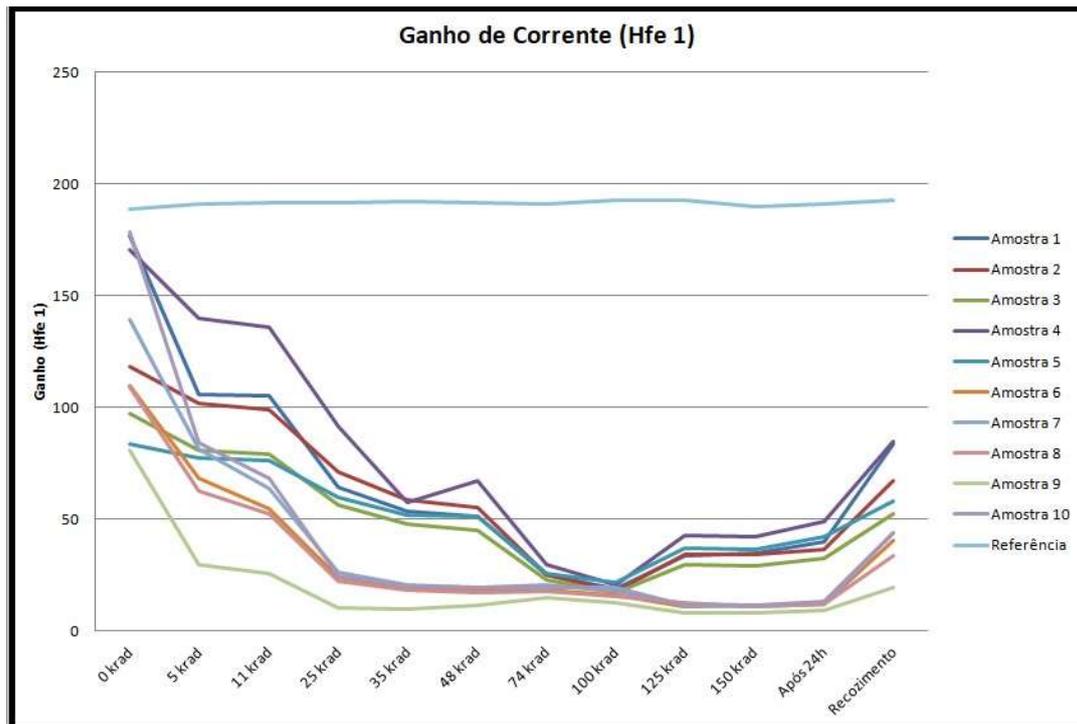
Parâmetro	Polarização	Intervalo de Falha	Recuperação
hfe 1	ON	48 - 74krad(Si)	Parcial
	OFF	11 - 25krad(Si)	Nenhuma
hfe 2	ON	48 - 74krad(Si)	Parcial
	OFF	11-25 krad(Si)	Nenhuma
hfe 3	ON	48 - 74 krad(Si)	Parcial
	OFF	11 - 25 krad(Si)	Nenhuma

Fonte: Adaptado de Vaz et al. (2016).

Conforme observado na Tabela 6.4, o parâmetro afetado pelo impacto da radiação no componente foi o Ganho (hfe). Tal impacto é observado graficamente conforme as Figuras 5.2; 5.3 e 5.4.

Para o ganho nas condições de $I_c = 0,1\text{mA}$ e $V_{ce} = 10\text{V}$

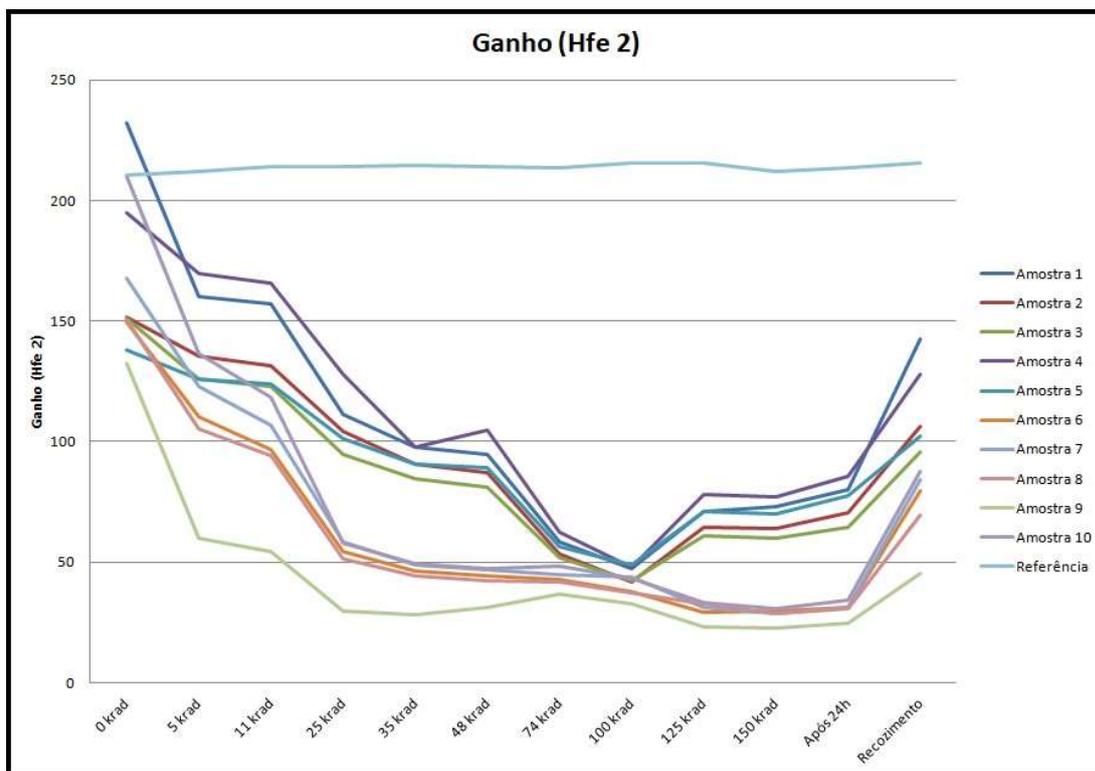
Figura 5.2 - Ganho - hfe 1.



Fonte: Adaptado de Vaz et al. (2016).

Para o Ganho nas condições de $I_c = 1,0\text{mA}$ e $V_{ce} = 10\text{V}$

Figura 5.3 - Ganho - hfe 2.

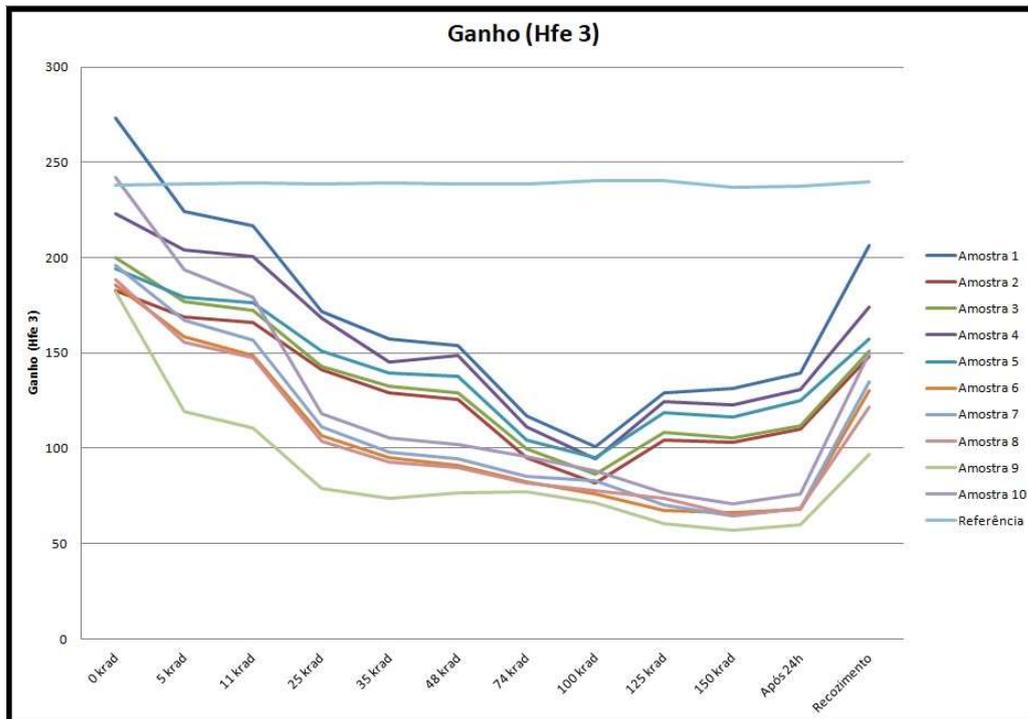


Fonte: Adaptado de Vaz et al. (2016).

Análise: Conforme observado, a mesma condição repetiu-se nos três valores de ganho de corrente medidos durante o ensaio, sendo inversamente proporcional, ou seja, à medida que a dose de radiação aumentou o ganho de corrente caiu. É importante ressaltar que em alguns momentos este valor esteve abaixo do limite estabelecido pelo *datasheet* fornecido pelo fabricante do componente. Observa-se ainda, que após o tratamento de recozimento, usado para casos de Dose Total Ionizante, houve recuperação de ganho de corrente no transistor 2N2222A.

Para o Ganho nas condições de $I_c = 10\text{mA}$ e $V_{ce} = 10\text{V}$

Figura 5.4 - Ganho - hfe 3.



Fonte: Adaptado de Vaz et al. (2016).

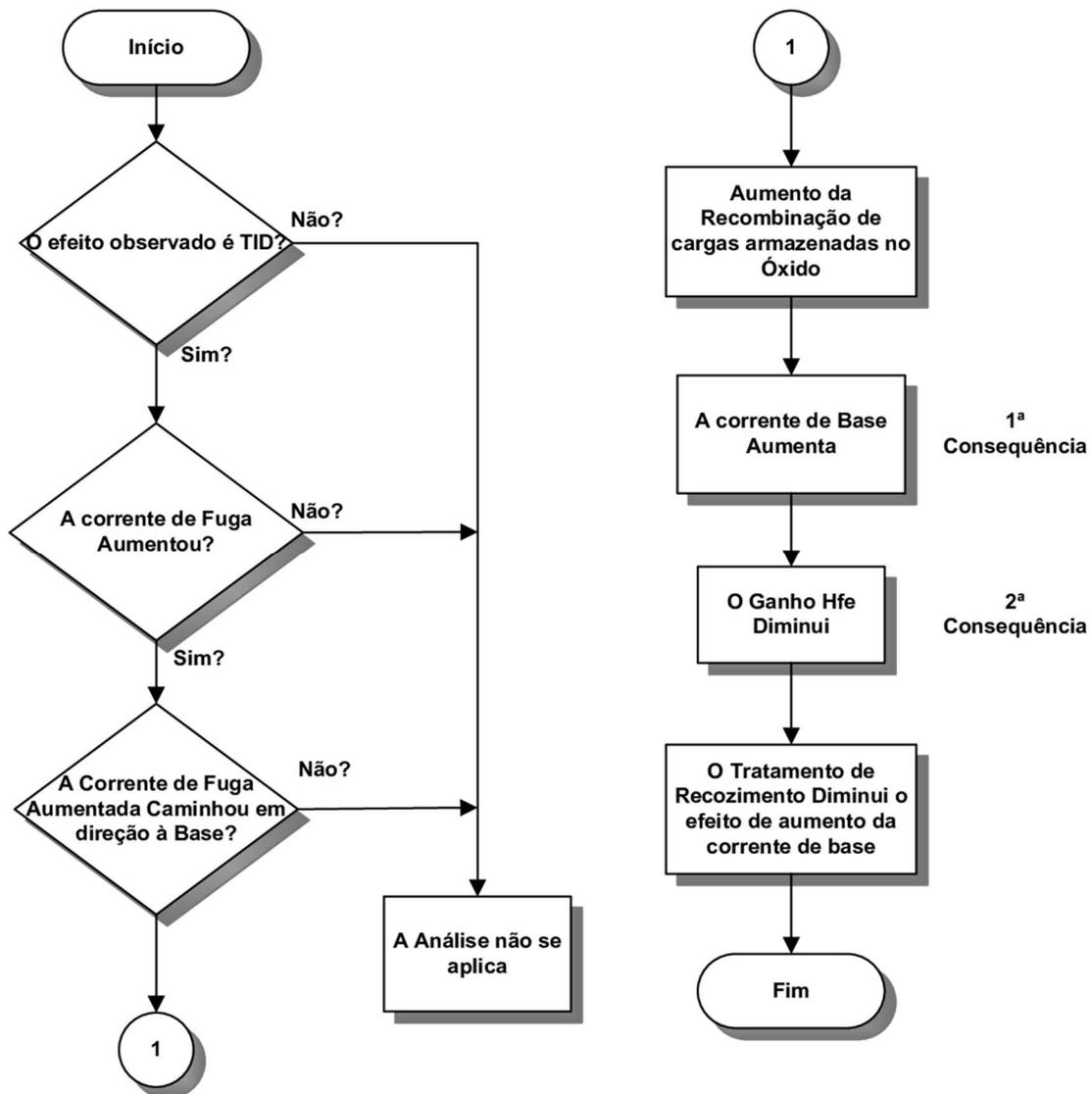
c) Análise da Causa da Falha e identificação dos modos de falha no Transistor 2N2222A

Nesta etapa da FMEA, analisa-se a causa da falha no transistor 2N2222A, para que seja possível tomar medidas para mitigar e/ou extinguir a falha. De acordo com a Figura 5.5 é possível definir a causa da falha em transistores devido ao impacto da radiação, através da sequência lógica fornecida pelo fluxograma apresentado.

Analisando o diagrama exposto, definimos que o principal modo de falha neste transistor é devido ao aumento da corrente de fuga no transistor, que conseqüentemente gera um aumento na recombinação das cargas armazenadas no óxido.

Como conseqüências dessa falha, a corrente no terminal de base aumenta, esse aumento culmina na diminuição do ganho (hfe) do transistor, prejudicando seu funcionamento como amplificador.

Figura 5.5 - Análise lógica da causa da falha.



Fonte: Produção do autor.

d) Define-se o Grau de Severidade da Falha

O grau de severidade escolhido levou em consideração que a falha ocorre em nível de subsistema. Apesar do efeito ser prejudicial, o processo de recozimento traz um nível parcial de recuperação que pode ser suficiente durante o período da missão. Com relação à segurança da missão é

importante lembrar que em sistemas críticos existem redundâncias para que não haja prejuízos para o sucesso.

A categoria de severidade definida é: **Falha Insignificante**

O nível de severidade é: **4**

A Definição do grau de severidade se deu de acordo com o Diagrama apresentado na Figura 4.3.

f) Métodos para a detecção da falha.

Neste momento explora-se os métodos utilizados para a detecção do efeito da radiação que causam a falha, o ensaio no transistor BJT 2N2222A foi realizado em bancada, deste modo obteve-se os parâmetros de corrente, nos terminais de base, de emissor e de coletor através da utilização de instrumentos de medição, como por exemplo, o amperímetro. Com base nesses parâmetros calcula-se o ganho hfe, que conforme análises feitas anteriormente é o principal parâmetro afetado pela radiação neste caso.

g) Medidas Preventivas

Define-se métricas que trabalhem para diminuir as consequências ou até mesmo possam mitigar a falha.

Com o objetivo de diminuir a incidência de radiação sobre o transistor 2N2222A uma solução é implementar uma camada de blindagem no componente.

Quando se trata do desempenho do transistor no sistema, por exemplo no sistema do satélite em operação no espaço, pode-se utilizar um transistor com uma margem de ganho maior do que o estipulado em projeto, de modo que ao longo do tempo com a degradação do componente a missão não seja prejudicada (JUNQUEIRA et al., 2020).

Outra medida para amenizar o efeito de TID no sistema, é a configuração de montagem da placa, com transistores Darlington, que combina dois

transistores bipolares, aumentando o ganho de corrente do transistor com um espaço reduzido.

Por fim é importante ressaltar que circuitos críticos para satélites, possuem redundâncias capazes de ser acionadas em caso de falhas, ou para que seja possível um processo de descanso para recozimento com o objetivo de fazer com o que o componente recupere parcialmente suas características elétricas.

f) Ações corretivas

Pode-se tomar ações corretivas com a finalidade de melhorar o impacto da radiação no transistor 2N2222A e conseqüentemente melhorar a confiabilidade do subsistema como um todo.

O transistor BJT 2N2222A operando no espaço não fornece condições para manutenção e substituição, logo pode-se utilizar como técnica para recuperação parcial das características elétricas do transistor sem prejuízos para a missão o **Recozimento** do Componente. O recozimento no espaço se dá a partir de um processo simples deixando o componente desenergizado por um período de tempo, para que as armadilhas de interface liberem as cargas acumuladas.

Após realizar-se todas as etapas da análise **qualitativa** utilizando a ferramenta FMEA, resume-se toda a documentação em uma tabela para tornar o trabalho mais claro e organizado, em seqüência observa-se na Figura 5.6 a estrutura da tabela FMEA montada resumindo toda a análise qualitativa do impacto da Radiação de dose total ionizante no transistor 2N2222A apresentada anteriormente.

Figura 5.6 - FMEA dos efeitos da TID no transistor 2N2222A.

Failure Mode and Effects Analysis – FMEA do Impacto da Dose Total Ionizante nos modos de falha do Transistor 2N2222A									
Componente	Descrição do Componente	Função	Efeito da Radiação Observado	Modo de Falha	Causa da Falha	Severidade da Falha	Métodos para a Detecção da Falha	Medidas Preventivas	Ações Corretivas para Mitigar a Falha
Transistor de Junção Bipolar – TJB 2N2222A	<p>O Transistor 2N2222A é um transistor de junção bipolar utilizado como amplificador linear para chaveamento, cujas principais características são:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A capacidade de funcionar com correntes elevadas da ordem de 800mA; • Baixa tensão com o máximo de 40V. 	<p>As principais utilizações do Transistor 2N2222A são para chaveamento e amplificação linear.</p>	<p>O Efeito da Radiação sobre o componente estudado é o de Dose Total Ionizante</p>	<p>O principal modo de falha neste transistor é devido ao aumento da corrente de fuga no transistor que consequentemente gera um aumento na recombinação de cargas armazenadas no óxido. Como consequências dessa falha, a corrente no terminal de base aumenta, esse aumento culmina na diminuição do ganho (Hfe) do transistor, prejudicando seu funcionamento como amplificador.</p>	<p>Aumento da Corrente de Fuga que consequentemente gera um aumento na recombinação de cargas armazenadas no óxido.</p>	4	<p>Para ensaios de bancada, os parâmetros de corrente, nos terminais de base, de emissor e de coletor podem ser medidos através da utilização de um amperímetro, e com base nesses parâmetros é possível calcular o ganho Hfe.</p>	<p>Blindagem do componente;</p> <p>Redundância;</p> <p>Solução por Layout.</p>	<p>Recozimento</p>

Fonte: Produção do autor.

5.2 Estudo de caso no circuito integrado LVDS

5.2.1 Ensaio de dose total ionizante realizado no circuito integrado LVDS

Conforme o escopo do projeto CITAR, realizou-se no Laboratório de Radiação Ionizante (LRI), localizado no Instituto de Estudos Avançados (IEAv) um ensaio de dose total ionizante com duas amostras comerciais e duas amostras projetadas pelo CITAR, conforme a Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Amostras de ensaio de radiação ionizante do LVDS.

Amostra	Identificação	Fabricante
T1	MDRI9049	Milandr
T3	Dare-LVDST2	CITAR IPs IMEC
T4	CITAR-LVDST2	Projeto CITAR
T6	RHFLVDS31A e RHFLVDS32A	ST Microelectronics

Fonte: Moreira e Manea (2020).

As amostras foram testadas à uma taxa de emissão de 920,72 rads/h de uma fonte de cobalto 60, submetidas a estímulos de 12,5Mbps, 25Mbps, 50Mbps, 100Mbps e 200Mbps e finalmente a fonte de alimentação foi variada em três valores, 3V, 3,3V e 3,6V.

Neste teste monitorou-se as correntes para a fonte principal (variável) e a corrente secundária (fixa em 1,8V para as amostras T3 e T4 e através do osciloscópio obteve-se os sinais de *slew rate*, *rise time*, *fall time*, tensão de pico a pico (V_{pp}), Δt_{Driver} e $\Delta t_{Receiver}$, medidos através da sobreposição de pulsos de dados das amostras T1, T3 e T6 através de ponteiras diferenciais. E por fim obteve-se os sinais digitais de todas as amostras por um cabo de captura digital para o osciloscópio (MOREIRA; MANEA, 2020).

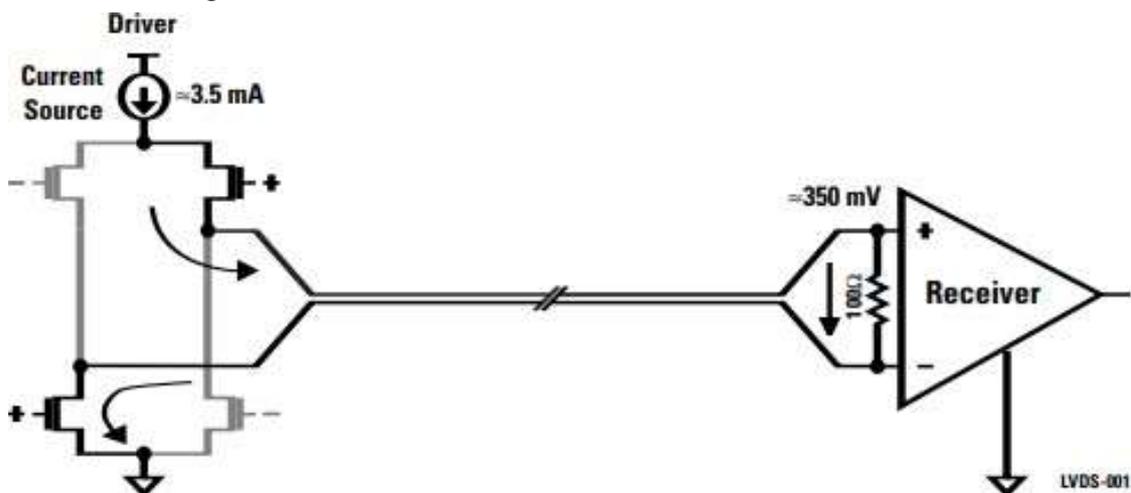
a) Descrição do Componente: Low Voltage Differential Signaling - LVDS

O LVDS é um sistema de transmissão de dados capaz de enviar dados em alta velocidade com um baixo consumo de energia e imune a interferências, tendo como características principais: compatibilidade com

suprimentos de energia de baixa tensão; geração de baixo ruído; rejeição ao alto ruído; transmissão robusta de sinais; pode ser integrado em CIs em nível de sistema. (NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2004).

O sinal gerado pelo LVDS é um sinal diferencial, ou seja, isto é, um sinal transmitido por dois condutores próximos (por exemplo, um par trançado), com polaridades opostas em cada um deles, aumentando assim sua imunidade a interferências externas. O transmissor libera uma corrente de 3,5mA que passa por um resistor de 100Ω a 120Ω no receptor, o que gera um sinal diferencial de 350mV. O transmissor gerencia a polaridade do sinal, gerando níveis lógicos 0 ou 1. O sistema opera no modo *current loop*. A estrutura básica do funcionamento do LVDS pode ser observada na Figura 5.7.

Figura 5.7 - Estrutura básica de funcionamento do LVDS.



Fonte: National Semiconductor (2004).

b) Análise do impacto da radiação no CI LVDS

Durante o ensaio variou-se as tensões, entre os valores de 3V, 3,3V e 3,6V e para as amostras T3 e T4 utilizou-se a tensão de 1,8V e também se variou as taxas de transmissão de dados, entre 12Mbps, 25Mbps, 50Mbps, 100Mbps e 250Mbps e então plotou-se gráficos mostrando o comportamento dos parâmetros listados de acordo com a dose de radiação recebida e a taxa de transmissão de dados. Para fins de análise qualitativa, utiliza-se apenas os valores de corrente, as Figuras 5.8, 5.9 e

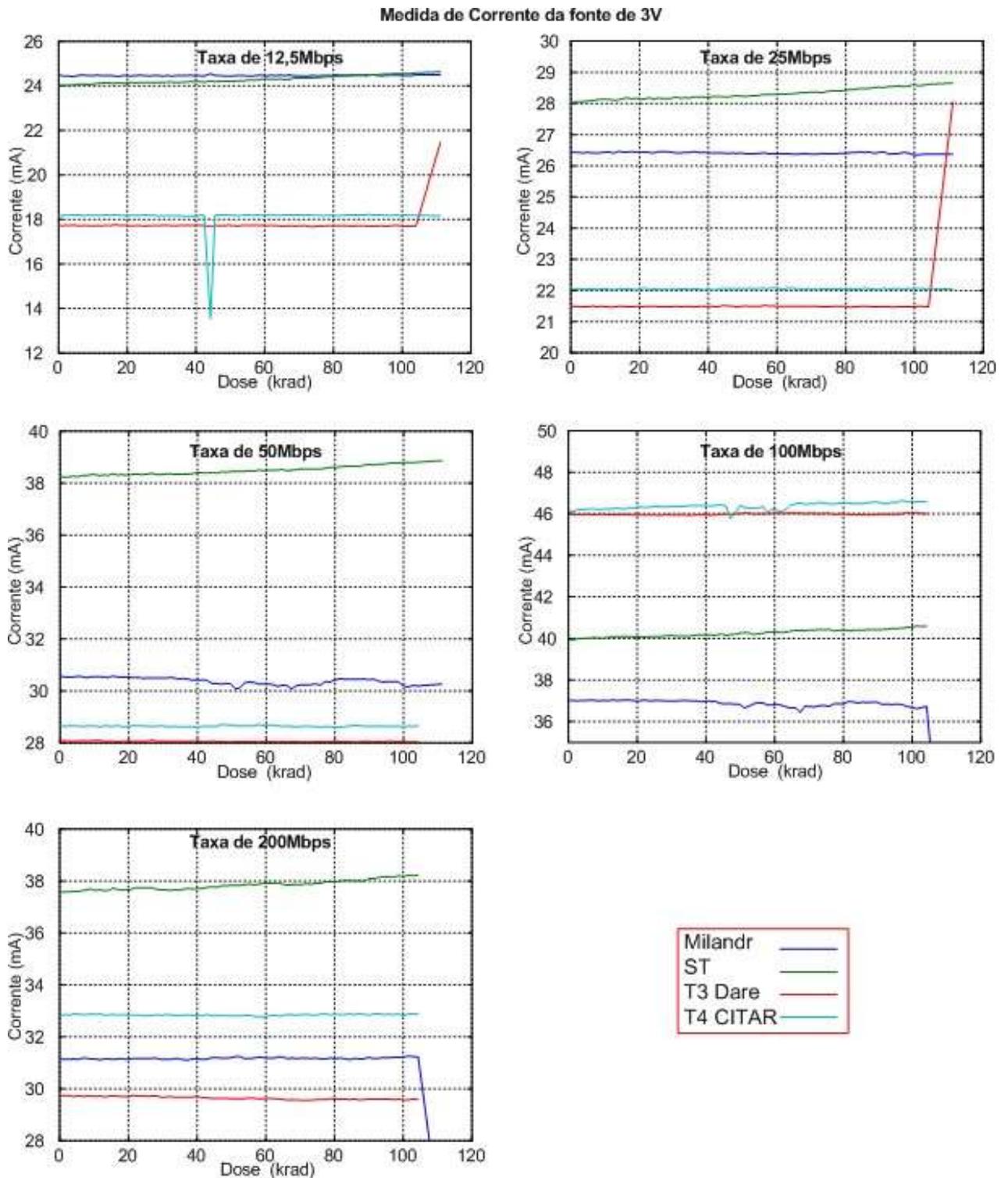
5.10 apresentam os gráficos e suas variações que posteriormente poderão culminar nas falhas.

Pode-se observar na Figura 5.8, as medidas de corrente quando a fonte alimenta o circuito com um valor de 3V. Neste primeiro momento é possível observar que mesmo pequena, existe uma variação no consumo de todos os componentes.

Para as taxas de dados abaixo de 100Mbps em todas as tensões de fonte medidas (3V, 3,3V e 3,6V) ocorreu um aumento no consumo de corrente das amostras, sendo que a amostra T6 da *ST Microelectronics* apresentou uma variação maior com um crescimento constante de aumento de corrente. Observando o crescimento da curva, supõe-se que em algum momento no futuro este componente falhará antes das outras amostras.

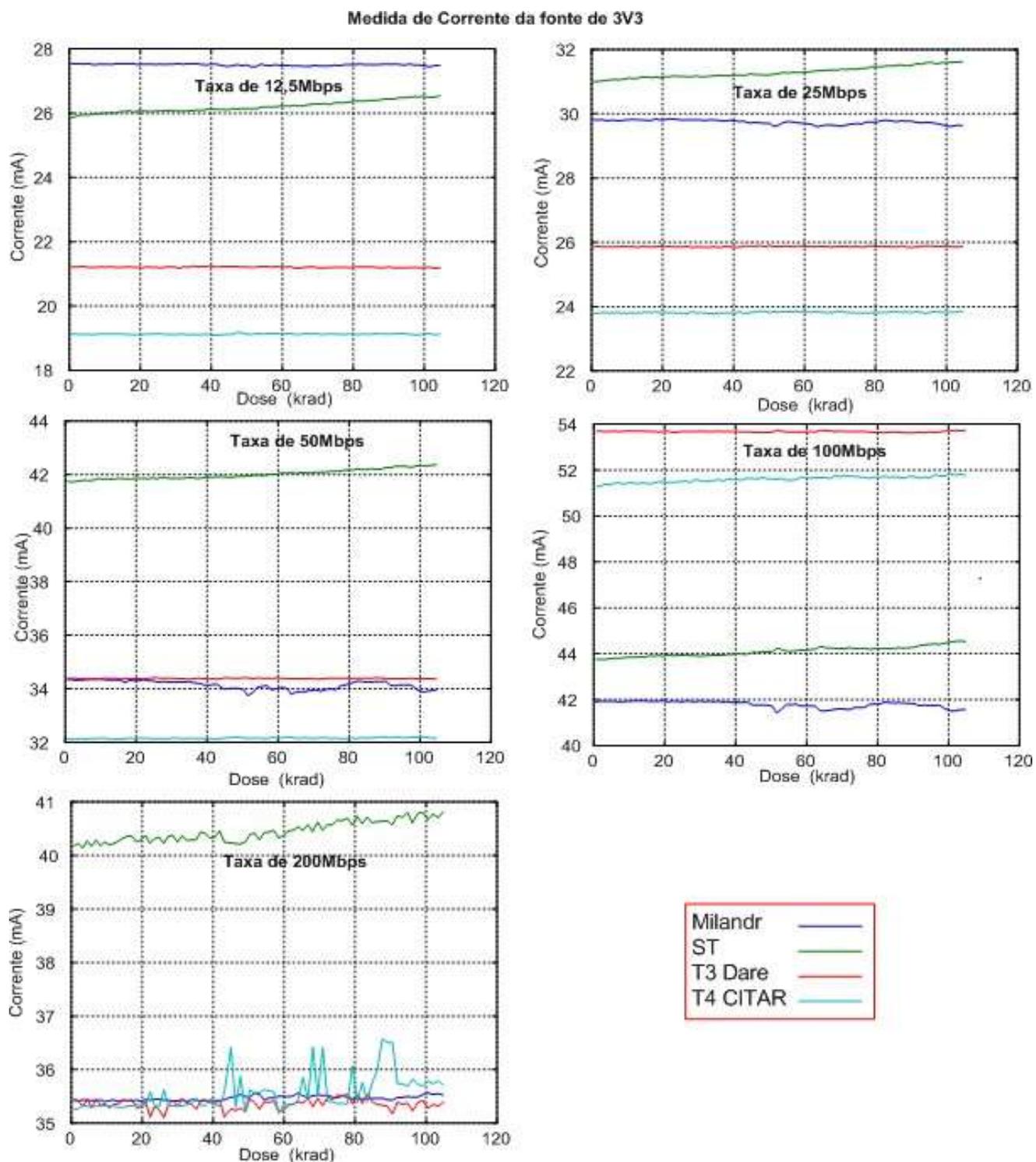
No primeiro gráfico que expressa a taxa de transmissão de dados de 12,5Mbps nota-se que na Amostra T4 houve uma queda brusca, pode-se considerar esse "ponto" como um erro de medição, o mesmo ocorre para a amostra T3 - *Dare LVDS* nos gráficos com a taxa de transmissão de 12,5Mbps e 25Mbps onde ocorre um pico de corrente, este pico pode ser ao momento do desligamento do sistema e por fim o mesmo fenômeno é notado na amostra T1 - *Milandr* nos gráficos com a taxa de 100Mbps e 200Mbps quando aconteceu uma queda brusca que também é atribuída ao momento de desligamento do sistema para finalização do ensaio.

Figura 5.8 - Medidas de corrente da fonte de 3V.



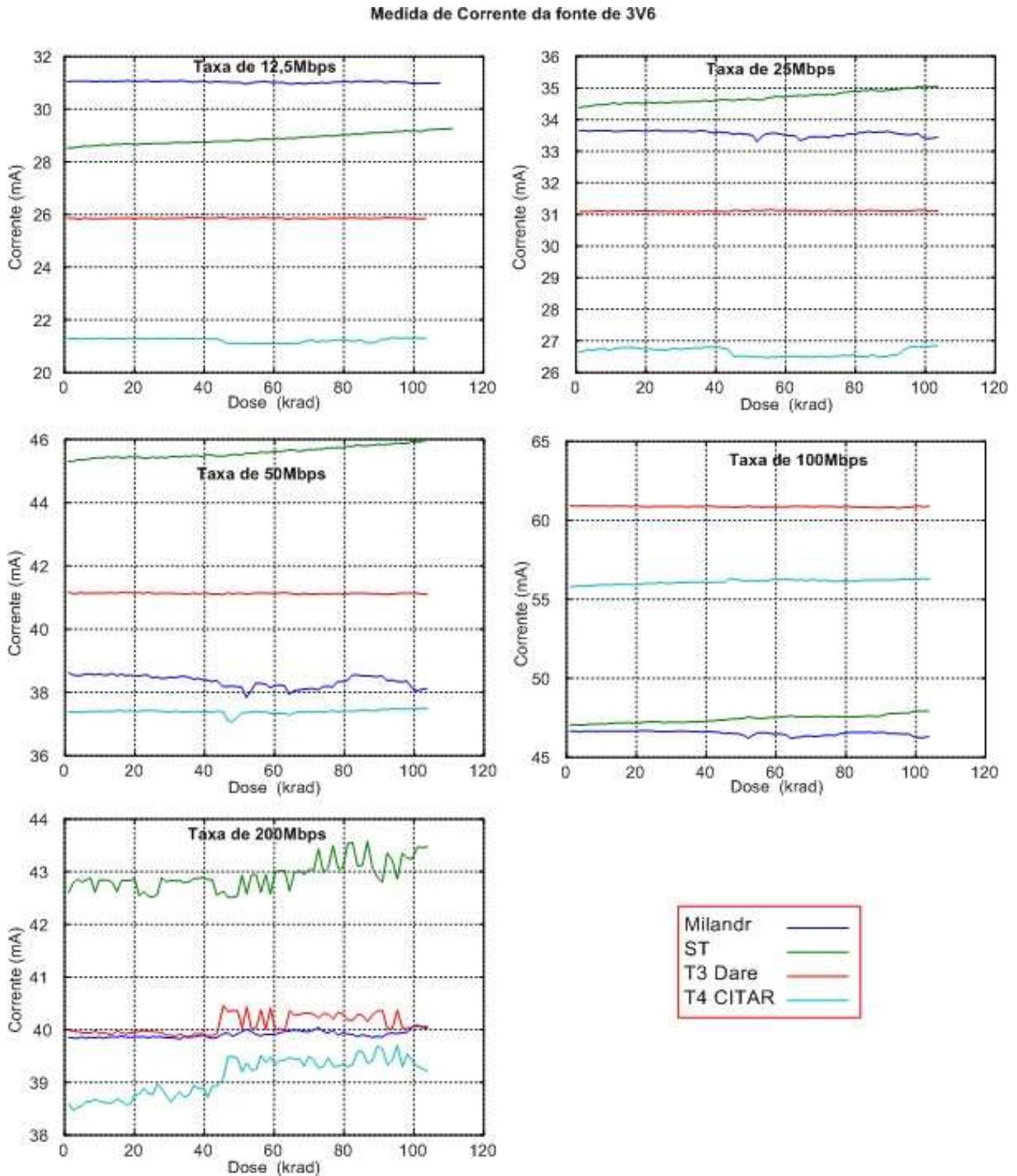
Fonte: Moreira e Manea (2020).

Figura 5.9 - Medidas de corrente da fonte de 3,3V.



Fonte: Moreira e Manea (2020).

Figura 5.10 - Medidas de corrente da fonte de 3,6V.



Fonte: Moreira e Manea (2020).

Durante o desenvolvimento do T4 *CITAR*, notou-se que este componente não apresenta uma boa resposta a transmissões acima de 100Mbps, de modo que acima desses valores de taxa não é possível fazer uma análise coerente do seu comportamento.

Outra informação importante que deve ser considerada é que com o aumento da Tensão da Fonte para 3,3V e 3,6V e com taxas mais elevadas de transmissão de dados, houve uma mudança mais significativa na corrente do circuito.

Conforme observado nas Figuras 5.9 e 5.10, em ambos casos com a taxa de 200Mbps a variação da corrente tornou-se instável com picos mais expressivos. É importante notar que em todos os gráficos a amostra T6 continua a tendência de crescimento constante devido ao impacto da radiação, independentemente de sua taxa de transmissão de dados.

Nos gráficos 3 e 4, nota-se que com as tensões de 3,3V e 3,6V a partir da taxa de 200Mbps houve um comportamento mais instável da corrente em algumas amostras, apresentando momentos de pico. Vale lembrar que a curva da amostra T4 que mais apresenta variações não pode ser considerada devido aos problemas de resposta do componente.

A amostra T1 da *Milandr* resiste bem à radiação e mesmo com a tensão maior e nas taxas mais altas de transmissão de dados permaneceu com uma característica de estabilidade.

Por fim, a amostra T3 do *CITAR* também apresenta um comportamento de instabilidade da corrente, com momentos de pico, entretanto a amostra não falhou, sendo assim ela pode ser considerada tolerante à radiação conforme o ensaio aplicado.

c) Análise da Causa da Falha e identificação dos modos de falha no Transistor 2N2222A

O componente LVDS é construído por transistores, de modo que os efeitos da dose total ionizante observados que podem culminar em falhas são os mesmos que acontecem no transistor TJB 2N2222A, e são explicados no diagrama da Figura 5.5. Em suma, o aumento da corrente de fuga provoca o aumento da corrente que atua no circuito como um todo e em algum momento no futuro o LVDS não irá suportar provocando uma falha.

d) Define-se o Grau de Severidade da Falha

Da mesma maneira que o transistor 2N2222A, o grau de severidade do CI LVDS levou em consideração que a falha ocorrerá a nível de subsistema, por ser um circuito integrado de construção muito simples, dentro do contexto no qual estará inserido no espaço não apresentará prejuízos para o sucesso da missão. Baseando-se novamente no diagrama de fluxo, encontrado na Figura 4.3, desenvolvido para auxiliar na tomada de decisões quanto à escolha do grau de severidade da falha. O grau de severidade escolhido foi falha insignificante.

A categoria de severidade definida é: **Falha Insignificante**

O nível de severidade é: **4**

e) Métodos para a detecção da falha.

Durante o ensaio de dose total ionizante realizado no CI LVDS o parâmetro elétrico estudado para avaliar os efeitos da radiação foi a corrente elétrica. A variação do consumo de corrente no circuito foi medida através da fonte utilizada no *setup* de testes do tipo SMU que realiza as medições de correntes apresentadas. Outro método de detecção que seria possível no caso da ausência de uma fonte deste tipo é através de instrumentos de medição como o amperímetro.

f) **Medidas Preventivas.**

O sistema LVDS é muito simples em comparação a outros, como o *SpaceWire* (no qual o LVDS está inserido) que armazena dados e apresenta mais condições de falha, neste caso, pode-se considerar como medidas para endurecimento aquelas tomadas para tornar o *SpaceWire* tolerante à radiação, sendo algumas delas:

- **Layout de construção:** De modo que os transistores tem certo distanciamento entre si durante a montagem do circuito integrado para evitar que o impacto de uma partícula atinja mais de uma região sensível do componente.
- **Redundância tripla com votador:** Para este caso quando uma partícula produz uma mudança de bit, a informação é lida três vezes e passa por um votador que indica qual valor se repete em pelo menos duas saídas, sendo assim, sendo assim o circuito tem condições de continuar sua leitura com o dado correto;
- **Embaralhamento de bits:** Os bits de uma mesma palavra não ficam próximos uns dos outros evitando que mais de um bit de uma mesma palavra seja afetado ao ser atingido pela radiação e um algoritmo para correção de bits que é capaz de corrigir as palavras quando algum bit foi afetado pela radiação.

g) **Ações corretivas**

Caso o sistema falhe devido ao aumento da corrente, uma técnica a ser utilizada para recuperação parcial é o recozimento. Com o aumento da recombinação de cargas armazenadas no óxido devido ao surgimento de armadilhas de interface, acontece o aumento da corrente no sistema, os elétrons aprisionados tendem a sair de suas armadilhas quando há um tempo de descanso ou quando existe um estímulo, por exemplo, o aumento da temperatura, em sistemas que operam no espaço o ideal é que haja uma redundância para que o componente possa “descansar” e

liberar as cargas aprisionadas sem prejudicar funcionamento. É importante lembrar que redundâncias são aplicadas à sistemas críticos para a missão do satélite, pois o custo para levar matéria ao espaço ainda é muito alto.

Após realizar-se todas as etapas da análise **qualitativa** utilizando a ferramenta FMEA, resume-se toda a documentação em uma tabela para tornar o trabalho mais claro e organizado, em sequência observa-se na Figura 5.11 a estrutura da tabela FMEA montada resumindo toda a análise qualitativa do impacto da Radiação de dose total ionizante no circuito integrado LVDS apresentada anteriormente.

Figura 5.11 - FMEA dos efeitos da TID no LVDS.

Failure Mode and Effects Analysis – FMEA do Impacto da Dose Total Ionizante nos modos de falha do LVDS									
Componente	Descrição do Componente	Função	Efeito da Radiação Observado	Modo de Falha	Causa da Falha	Severidade da Falha	Métodos para a Detecção da Falha	Medidas Preventivas	Ações Corretivas para Mitigar a Falha
Sinal Diferencial de Baixa Tensão <i>Low Voltage Differential Signaling – LVDS</i>	O Sinal Diferencial de Baixa Tensão é um sistema de transmissão de dados capaz de enviar dados em alta velocidade com um baixo consumo de energia e imune à interferências, tendo como características principais: Compatibilidade com Suprimentos de energia de baixa tensão; Geração de baixo ruído; Rejeição a alto ruído ; Transmissão robusta de sinais; Pode ser integrado em CIs em nível de sistema.	O LVDS é usado para transmissão de dados.	O Efeito da Radiação sobre o componente estudado é o de Dose Total Ionizante	Considerando que o LVDS é um circuito integrado composto por transistores, logo supomos que o efeito que culminou no efeito de aumento de corrente que posteriormente pode se transformar numa falha é o aumento da corrente de fuga e consequentemente o aumento na recombinção de cargas armazenadas no óxido.	Aumento da Corrente de Fuga que consequentemente gera um aumento na recombinção de cargas armazenadas no óxido.	4	Para o caso apresentado, a detecção do aumento da corrente que supomos culminar na falha foi medida através da fonte do tipo SMU que realiza as medições de correntes apresentadas.	O sistema LVDS é muito simples em comparação a outros, como o SpaceWire (no qual o LVDS está inserido) que armazena dados e apresenta mais condições de falha, neste caso, podemos considerar como medidas para endurecimento aquelas tomadas para tornar o SpaceWire tolerante à radiação.	Recozimento

Fonte: Produção do autor.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Uma série de conclusões podem ser tiradas da dissertação apresentada conforme citado a seguir:

–Considerando o alto custo das missões espaciais e o aumento da suscetibilidade dos componentes (cada vez menores e mais integrados) aos efeitos da radiação é necessário avaliar os impactos da radiação nos modos de falha dos componentes para fazer as escolhas mais assertivas durante o projeto para garantir o sucesso da missão.

–A metodologia de análise qualitativa FMEA é eficiente nas primeiras etapas das análises de confiabilidade do sistema, pois fornece um panorama geral dos modos de falha críticos e catastróficos dos componentes do sistema e sugere métodos para a correção e mitigação da falha nos estágios iniciais, antes que ela ocorra.

–Com relação ao segundo estudo de caso, podemos tirar as seguintes conclusões:

- a) Três das amostras estudadas (T1, T3 e T6) são tolerantes à radiação, podendo-se estimar que serão capazes de cumprir seu ciclo de vida sem prejudicar a missão.
- b) Conforme conclusões anteriores do projeto CITAR, sabe-se que a amostra T4 não suporta uma taxa de transmissão de dados acima de 100Mbps.
- c) A Amostra T6 apresentou uma curva crescente de consumo de corrente, independente da taxa de transmissão de dados e da corrente aplicada, podendo-se supor que em algum momento futuro tal componente irá falhar antes dos outros.
- d) O Estudo apresentado foi feito com base no ensaio de quatro amostras, por isso é possível fazer apenas uma análise

qualitativa para estimar os prejuízos da radiação na confiabilidade, para que os estudos sejam mais assertivos é necessário repetir os testes com uma população maior de amostras que indicarão estatisticamente quais componentes são mais tolerantes à radiação, e quais tem maior confiabilidade.

- e) Por fim, é importante ressaltar que técnicas de prevenção à radiação como blindagem ou redundância precisam ser avaliadas cuidadosamente pelo projetista devido às limitações de massa dos satélites e cabe ao profissional ponderar sobre as consequências da perda de um sistema para a missão. Em alguns casos é mais “vantajoso” perder apenas um sistema do que toda a missão.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Conforme dito anteriormente, a análise qualitativa utilizando a metodologia FMEA faz parte das fases iniciais de uma análise de confiabilidade, por se tratar de uma ferramenta qualitativa, de modo que podemos sugerir como trabalhos futuros:

–Realizar um Estudo dos Efeitos de Dose Total Ionizante no padrão *Low Voltage Differential Signaling* com uma população maior de amostras e realizar o experimento por um tempo maior até que as amostras atinjam a falha, tornando possível a realização uma análise de confiabilidade quantitativa indicando como os efeitos da radiação afetam a taxa de falhas do componente.

–Propor uma metodologia que considere quantitativamente os efeitos da radiação no cálculo da taxa de falhas dos componentes eletrônicos, fornecendo um guia passo-à-passo para realizar uma predição de confiabilidade que considere esses efeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. **Benefícios da exploração espacial**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/aeb/pt-br/programa-espacial-brasileiro/aplicacoes-espaciais/beneficios-da-exploracao-espacial>. Acesso em: 9 dez. 2021.

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. **Política, organizações, programa e projetos**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/aeb/pt-br/programa-espacial-brasileiro/politica-organizacoes-programa-e-projetos>. Acesso em: 19 fev. 2022.

ALVES, P. **Diodo: o que é e qual a sua aplicação?** 2019. Disponível em: <https://www.manualdaeletronica.com.br/diodo-o-que-e-qual-a-sua-aplicacao/>. Acesso em: 18 maio 2021.

AUSTRALIAN RADIATION PROTECTION AND NUCLEAR SAFETY AGENCY. **Beta particle**. 2020. Disponível em: <https://www.arpsa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/ionising-radiation/beta-particles>. Acesso em: 1 ago. 2020a.

AUSTRALIAN RADIATION PROTECTION AND NUCLEAR SAFETY AGENCY. **Gamma radiation**. 2020. Disponível em: <https://www.arpsa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/ionising-radiation/gamma-radiation>. Acesso em: 4 ago. 2020b.

AUSTRALIAN RADIATION PROTECTION AND NUCLEAR SAFETY AGENCY. **X-rays**. 2020. Disponível em: <https://www.arpsa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/ionising-radiation/x-ray>. Acesso em: 2 ago. 2020c.

ARRUDA, T. M. **Análise da influência da radiação em circuitos eletrônicos**. 2006. 213 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2006.

BARNABY, H. J. Total-ionizing-dose effects in modern CMOS technologies. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 53, n. 6. p. 3103–3121, 2006.

BARTH, J. L.; DYER, C. S.; STASSINOPOULOS, E. G. Space, atmospheric, and terrestrial radiation environments. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 50, n. 3, p. 466–482, 2003.

BAUMANN, R.; KRUCKMEYER, K. **Radiation handbook for electronics**. Texas Instruments, n. SGZY002A, 2019. Disponível em: www.ti.com/radbook. Acesso em: 13 jun. 2021.

BHARDWAJ, A. et al. X-rays from solar system objects. **Planetary and Space Science**, v. 55, n. 9, p. 1135–1189, 2007.

BIANCHINI, M.; DAGRELLA, M.; HODO, F. **O campo magnético externo**. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciência – USP, 2018. Disponível em: <https://www.iag.usp.br/~agg110/moddata/GEOMAGNETISMO/CAMPOGEOMAGNETICOEXTERNO.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2021.

BOYLESTAD, R. L. – **Introdução à análise de circuitos**. 12.ed. [S.l.]: Prentice Hall; Pearson, 2012. 980p.

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11.ed. [S.l.]: Prentice Hall; Pearson, 2013. 784p.

CAMPOLA, M. J.; PELLISH, J. A. **Radiation hardness assurance: evolving for new space**. NASA, 2019. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190031733/downloads/20190031733.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2021.

CIRNE, K. H. **Estudo e fabricação de MOSFETs robustos à radiação para aplicações espaciais de circuitos integrados**. 2011. 229 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2011. Disponível em: <https://repositorio.fei.edu.br/handle/FEI/396>. Acesso em: 13 nov. 2021.

CLARO, L. H.; SANTOS, J. A. Danos de radiação em componentes eletrônicos nas aplicações aeroespaciais. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE (INAC), 2005, Santos, Brazil. **Proceedings...** 2005.

COLINGE, J.-P. **Silicon-on-insulator technology: materials to VLSI: materials to Vlsi**. 3.ed. New York: Springer Science, 2004. 375p.

COLINGE, J.-P.; COLINGE, C. A. **Physics of semiconductor devices**. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002. 451p.

COSTA, J. E.; NARDIN, C. M. Em que escala os efeitos do clima espacial afetam a sociedade? In: WORKSHOP DO PROGRAMA DE CLIMA ESPACIAL DO INPE COM USUÁRIOS, 2011, São José dos Campos – SP. **Anais...** 2011. p. 1–13.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **ECSS-S-ST-00-01C: space system: glossary of terms**. Noordwijk, Holanda, 2012a. 63 p.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **ECSS-E-ST-10-12C: space engineering: methods for the calculation of**

radiation received and its effects, and a policy for design margins. Noordwijk, Holanda, 2008. 105 p.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS).

ECSS-Q-ST-30-02C: space product assurance - failure modes, effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA). Noordwijk, Holanda, 2009. 74 p

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS).

ECSS-E-HB-10-12A: space engineering: calculation of radiation and its effects and margin policy handbook. Noordwijk, Holanda, 2010. 174 p.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS).

ECSS-Q-ST-30C: space product assurance: dependability, Noordwijk, Holanda, 2009b. 54p.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS).

ECSS-Q-ST-60C: space product assurance radiation hardness assurance-EEE components. Noordwijk, Holanda, 2012b. 101p.

FOGLIATO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011. 229p.

FORTES, M.A.B. et al. **Resultados e discussões sobre medidas da radiação ionizante em voo sob o espaço aéreo brasileiro**. 2012. Disponível em: <http://conexaosipaer.cenipa.gov.br/index.php/sipaer/article/view/441>. Acesso em: 03 abr. 2021.

FUSCO, D. A. **Efeitos da radiação ionizante e eventos singulares em circuitos analógicos de baixo e ultra baixo consumo**. 2016. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

GALDINO, J. C. S. **Transistores**. [S.I.]: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2012. Notas de aula.

HARDEVELD, T. V.; KIANG, D. **Practical application of dependability engineering**. [S.I.]: ASME Press, 2012. 334p.

HASSAN, A.; SAVARIA, Y.; SAWAN, M. Electronics and packaging intended for emerging harsh environment applications: a review. **IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems**, v. 26, n. 10, p. 2085–2098, 2018.

HOLMES-SIEDLE, A.; ADAMS, L. **Handbook of radiation effects**. 2.ed. New York: Oxford University Press, 2007. 642p.

INTEL. **Gordon Moore**: raising the bar for silicon technology and innovation. Disponível em: <https://www.intel.com.br/content/www/br/pt/history/museum-gordon-moore-law.html>. Acesso em: 11 jun. 2022.

JUNQUEIRA, B. C. et al. Teste em componente crítico de uso espacial: ensaio de dose ionizante total (TID - Total Ionizing Dose) em transistores 2N2222A. In: TULLIO, F. M. B.; MACHADO, L. M. B. (Org.). **A aplicação do conhecimento científico nas engenharias 4**. Ponta Grossa: Athena, 2020. p. 24.

JUNQUEIRA, B. C.; MANEA, S. Utilização de cots em nano satélites. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 1476–1490, 2020.

LARSON, W. J.; WERTZ, J. R. **Space mission analysis and design**. 3.ed. Bloomington, IN: Microcosm, 1999. 969p.

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.

LIMA, K. G. **Estruturas APS resistentes á radiação para aplicações espaciais**. 2006. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MACHADO, S. R. F. **Estudo de um processo de garantia da confiabilidade do sistemas eletrônicos a single event upsets causados por partículas ionizantes**. 2014. 222p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos – SP, 2014.

MACK, C. A. Fifty years of Moore's law. **IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing**, v.24, n.2. p. 202–207, 2011.

MALVINO, A.; BATES, D. **Eletrônica I**. 8ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 624p.

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, 20 ago 2019. Notas de aula.

MELO, P. R.; RIOS, E. C. S. D.; GUTIERREZ, R. M. V. **Componentes eletrônicos: perspectiva para o Brasil**. Rio de Janeiro: BNDES, 2015. 299p.

MOREIRA, J. Q.; MANEA, S. **Relatório de teste de radiação ionizante para o CI LVDS**, CGETE-R-RPT-00272., nº 1. São José dos Campos – SP: INPE, 2020.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Gamma rays**. 2010. Disponível em: https://science.nasa.gov/ems/12_gammarays. Acesso em: 19 fev. 2022a.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Infrared waves**. 2010. Disponível em: http://science.nasa.gov/ems/07_infraredwaves. Acesso em: 22 fev. 2022b.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Microwaves**. 2010. Disponível em: http://science.nasa.gov/ems/06_microwaves. Acesso em: 24 fev. 2022c.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Ultraviolet waves**. 2010. Disponível em: http://science.nasa.gov/ems/10_ultravioletwaves. Acesso em: 17 out. 2020d.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Visible light**. 2010. Disponível em: http://science.nasa.gov/ems/09_visiblelight. Acesso em: 17 out. 2020e.

NATIONAL SEMICONDUCTOR. **LVDS owner's manual**. 3.ed. Texas: Instruments, 2004. 94p.

NIKOLAYENKO, A. P.; SHVETS, A.; HAYAKAWA, M. Extremely Low Frequency (ELF) radio wave propagation: a review. **International Journal of Electronics and Applied Research (IJEAR)**, v. 3, n. 2, p. 1–91, 2016.

NORBERG, C. **The space environment**. Human Spaceflight and Exploration, 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. Acesso em: 13 set. 2019.

OSER, P.; MEKKI, J. **Radiation analysis on COTS components for the next LHC generation**. Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire. 10 set. 2020. Disponível em: <https://slidetodoc.com/radiation-analysis-on-cots-components-for-the-next/>. Acesso em: 27 fev. 2022.

PEASE, R. L. Total ionizing dose effects in bipolar devices and circuits. **IEEE Radiation Effects Data Workshop**, v. 50, n. 3, p. 144–148, 2003.

PEREIRA, J. **Transistores bipolares I**. Natal: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2021. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/jonathanpereira/disciplinas/eletronica-analogica/aula-5-transistor>. Acesso em: 14 maio 2021.

PHILIPS SEMICONDUCTORS. **2N2222 NPN switching transistors**. Netherlands, 1997.

PINTO, L. F. T.; ALBUQUERQUE, R. O. **Eletrônica analógica 2**. São Paulo: Instituto Paula Souza, 2011. v. 2. 167p.

RABELLO, A.P.S.S. **Um novo processo para melhorar a entre as fases de planejamento e projeto detalhado incluindo extensões do diagrama de Markov (DMEP) e da FMECA (FMEP) a projetos**. 2017. 346p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016.

RELIASOFT. **System analysis reference**: reliability, availability and optimization. 2015. Disponível em: http://www.synthesisplatform.net/references/System_Analysis_Reference.pdf. Acesso em: 10 jan. 2020.

REZENDE, S. M. **Materiais e dispositivos eletrônicos**. 4.ed. São Paulo - SP: Livraria da Física, 2013. 440p.

ROSSETO, A. C. **Análise dos defeitos de dose total ionizante nos circuitos analógicos CMOS**. 2014. 104p. Dissertação (Mestrado em Microeletrônica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 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.

SCHRIMPF, R.D. **Radiation effects in microelectronics**. In: VELAZCO, R.; FOUILLAT, P.; REIS, R. (Ed.). **Radiation effects on embedded systems**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007. p. 11-30.

SCHWANK, J. R. et al. Radiation effects in SOI technologies. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 50, n. 3, p. 522–538, 2003.

SEXTON, F. W. Destructive single-event effects in semiconductor devices and ICs. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 50, n. 3, p. 603–621, 2003.

SHEA, M.A.; SMART, D.F. A summary of major solar proton events. **Solar Physics**, v. 127, p. 297–320, 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00152170>. Acesso em: 18 maio 2022.

STANDFORD SOLAR CENTER. **UV light**. 2015. Disponível em: <http://solar-center.stanford.edu/about/uvlight.html>. Acesso em: 18 maio 2022.

TURNER, J. E. **Atoms, radiation, and radiation protection**. 3.ed. Oak Ridge: Wiley, 2007. 595p.

VAZ, R. G.; GONÇALEZ, O. L.; MANEA, S. **Relatório de ensaio: dose total acumulada**. São José dos Campos: Instituto de Estudos Avançados, 2016.

WENDLING, M. **Transistores II**. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2009. Notas de aula.

WOJTCZAK, M.; PIOTROWSKI, Z. Radiation standards review concerning non-ionizing radiation. In: RADIOELECTRONIC SYSTEMS CONFERENCE, 2019. Jachranka, Poland. **Proceedings...** 2020.

APÊNDICE A – TRANSISTORES

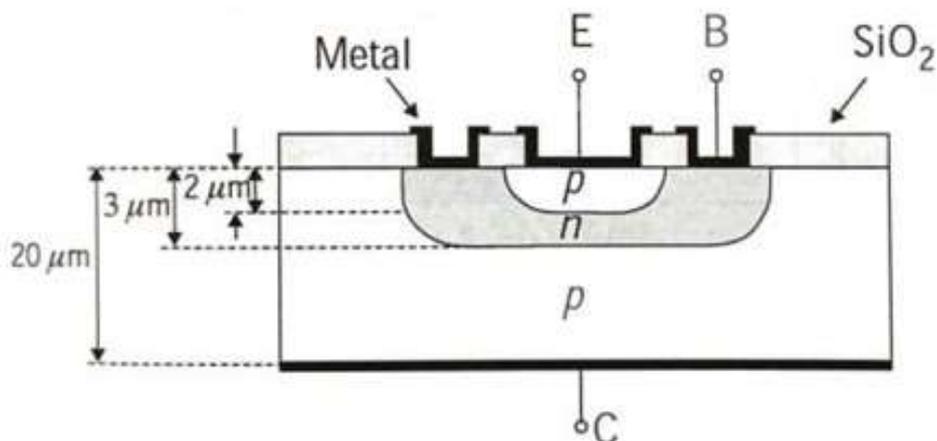
A.1 Transistor de Junção Bipolar (TJB)

A.1.1 Construção e operação do transistor de junção bipolar

Os Transistores de Junção Bipolar são dispositivos semicondutores que podem ser manufacturados em uma única unidade que contém três terminais denominados, Base, Emissor e Coletor, ou podem ser construídos em um invólucro que contém outros transistores, conhecido como circuito integrado (REZENDE, 2013). Os transistores do tipo TJB são formados por uma *junção p-n*, tal configuração é montada de forma análoga a um “sanduíche”, sendo uma camada de material do tipo *p* entre duas camadas do tipo *n* caracterizando um transistor *npn* ou uma camada de material Tipo *n* entre duas camadas de material tipo *p*, formando assim um transistor *pnp* conforme ilustrado na Figura 4.1. As camadas externas do transistor são espessas e feitas de material semicondutor fortemente dopado, enquanto que a camada interna é menos dopada e com uma largura menor (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Tanto o transistor npn quanto o transistor pnp podem executar as mesmas funções dentro de um circuito, o que difere ambos é a forma como as fontes de alimentação são ligadas ao circuito (GALDINO, 2012).

Figura A.1 - Estrutura interna do Transistor de Junção Bipolar tipo pnp.



Fonte: Rezende (2013).

O emissor do TJB é altamente dopado, enquanto que a base do transistor é levemente dopada e terminal do coletor tem uma dopagem intermediária, possui mais volume e conseqüentemente sua dissipação de potência é maior.

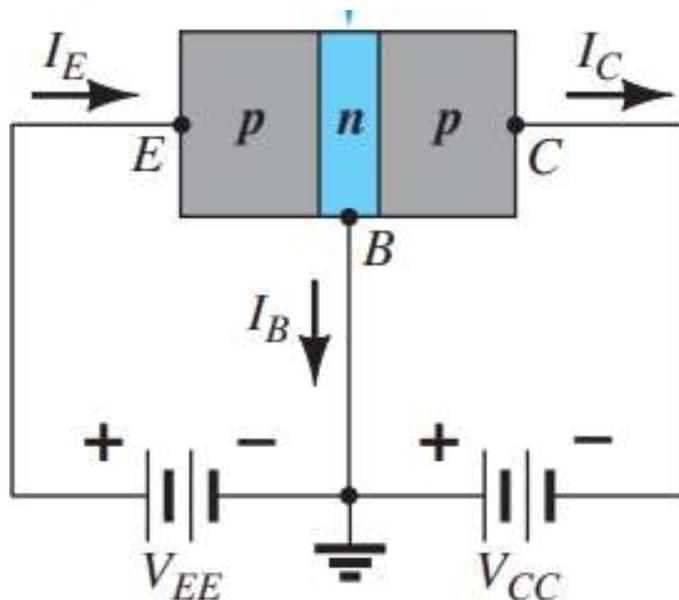
O transistor funciona basicamente devido ao movimento de elétrons livres e lacunas no interior do seu material. Essa atividade ocorre devido à aplicação de tensões aos terminais de acordo com a configuração de polarização. Ao se unir as pastilhas semicondutoras, existe uma difusão de portadores que gera uma barreira de potencial nas junções, devido aos diferentes níveis de dopagem e espessura das camadas, as regiões de depleção também terão larguras diferentes, sendo a do emissor pequena e a do coletor grande (GALDINO, 2012).

A.1.2 Configurações de funcionamento

Existem três configurações de funcionamento de um transistor TJB: configuração base comum, configuração emissor comum e configuração coletor comum.

Configuração base comum: A configuração de montagem com base comum utiliza o terminal de base como conexão do transistor, ou seja, o terminal estará conectado tanto à entrada quanto à saída do circuito. Essa configuração caracteriza-se por ter um elevado ganho de tensão, um ganho de corrente menor do que 1, ganho de potência intermediário, baixa impedância de entrada e alta impedância de saída(BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). A Figura A.2 ilustra a configuração base comum.

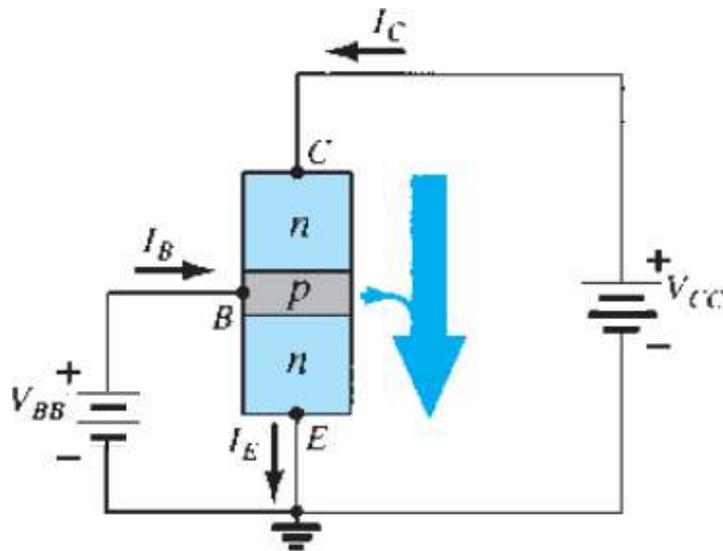
Figura A.2 - Configuração de funcionamento Base-Comum pnp.



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013).

- **Configuração de funcionamento Emissor-Comum:** A configuração de montagem com emissor comum utiliza o terminal emissor como conexão do transistor, ou seja, o terminal estará conectado tanto à entrada quanto à saída do circuito. É a configuração de montagem mais utilizada nos transistores (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013), suas características são: Ganho de tensão maior do que 1, elevado ganho de corrente, ganho de potência intermediário, impedância de entrada baixa e impedância de saída alta (PEREIRA, 2021). A configuração emissor-comum é ilustrada na Figura A.3.

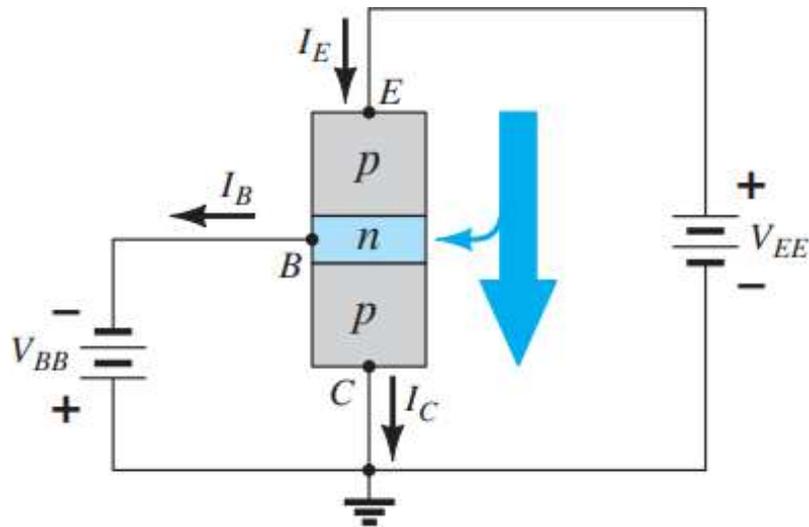
Figura A.3 - Configuração de funcionamento Emissor-Comum pnp.



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013).

- **Configuração Coletor-Comum:** A configuração de montagem com coletor comum utiliza o terminal coletor como conexão do transistor, ou seja, o terminal estará conectado tanto à entrada quanto à saída do circuito (Figura A.4). Essa configuração possui alta impedância de entrada e baixa impedância de saída, ao contrário das outras configurações, sendo assim é utilizada para o “casamento” de impedâncias (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). Outras características dessa configuração são: Baixo ganho de tensão (ganho quase unitário), elevada impedância de entrada e baixa impedância de saída (PEREIRA, 2021).

Figura A.4 - Configuração de funcionamento Coletor-Comum pnp



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013).

A.1.3 Polarização do transistor de junção bipolar

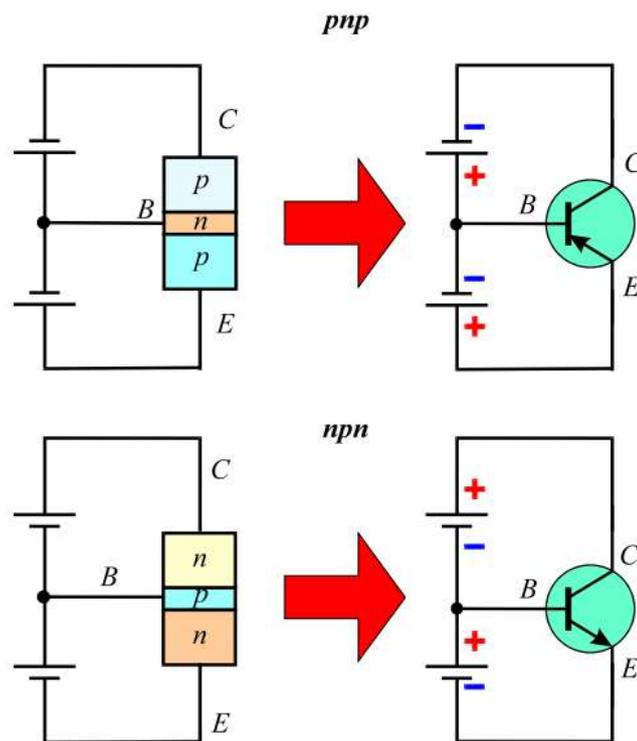
Para que um transistor opere ele precisa ser energizado, sendo assim, polarizar um transistor, refere-se genericamente, ao ato de aplicar tensões aos terminais de um dispositivo para que ele estabeleça valores fixos de tensão e corrente (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). Para o transistor TJB existem três tipos básicos de polarização que serão descritas a seguir: **Polarização junção base-emissor**, **Polarização junção base-coletor**, **Polarização Simultânea das Junções**:

Polarização de junção base-emissor: Neste tipo de polarização, são aplicadas tensões nos terminais da base e do emissor do transistor de forma direta, ou seja, aplicando-se um potencial positivo ao terminal ligado ao material tipo p para o caso de um transistor pn p, ou aplicando-se um potencial negativo ao terminal conectado ao material tipo n quando o transistor é do tipo n pn. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Polarização de junção base-coletor: Quando é feita a polarização base-coletor o transistor é inversamente polarizado, ou seja, para o transistor do tipo *pnp* é aplicado um potencial negativo ao terminal do coletor ligado ao material tipo *p* e da mesma forma, para um transistor do tipo *npn* é aplicado um potencial positivo ao terminal de coletor conectado ao material do tipo *n* (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Polarização simultânea das junções: Nesta configuração, ambas junções são polarizadas ao mesmo tempo através da aplicação de tensões externas. Conforme ilustrado na Figura A.5, podemos observar um transistor com polarização simultânea tanto do tipo *pnp* quanto do tipo *npn*.

Figura A.5 - Polarização simultânea para transistores *pnp* e *npn*.



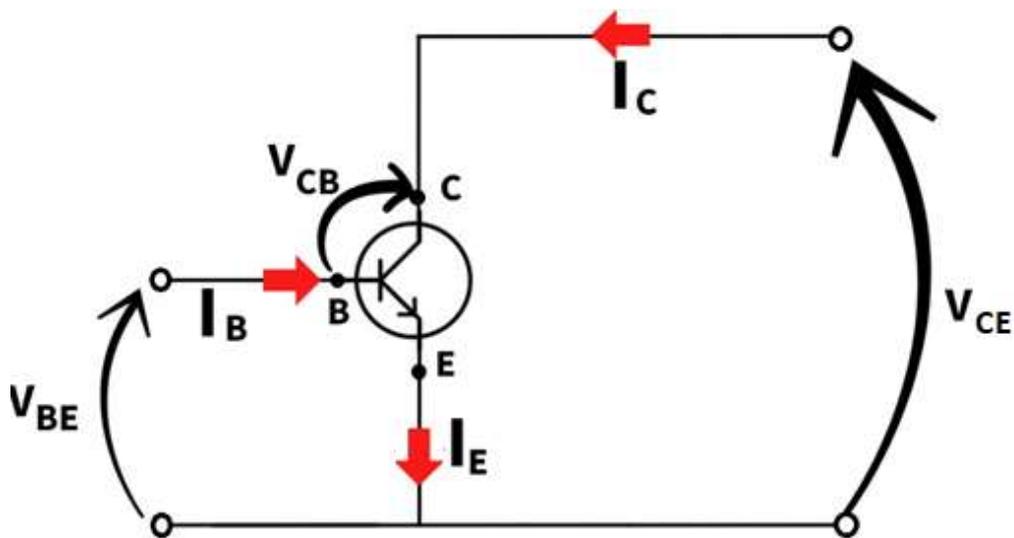
Fonte: SENAI (2018).

A.2 Curvas características do transistor TJB

As curvas características dos transistores demonstram o comportamento elétrico dos mesmos. A curva é traçada a partir dos dados obtidos após a aplicação de tensão entre os terminais do transistor, de acordo com a configuração de polarização escolhida. Os resultados obtidos a partir dessa polarização são suficientes para traçar um gráfico demonstrando várias curvas que apresentam o comportamento do componente (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

O transistor é composto por três terminais, sendo assim, a cada terminal é associada uma corrente e a cada par de terminais é associada uma tensão, logo, pode utilizar-se seis parâmetros elétricos, que junto com outros dados, como temperatura e nível de radiação demonstram o comportamento do componente através de uma curva. Tais parâmetros podem ser observados esquematicamente na Figura A.6.

Figura A.6 - Parâmetros elétricos do transistor.



Fonte: Produção do autor.

Onde:

- I_B - Corrente de Base
- I_C - Corrente de Coletor
- I_E - Corrente do Emissor
- V_{CB} - Tensão Coletor - Base
- V_{CE} - Tensão Coletor - Emissor
- V_{BE} - Tensão Base – Emissor

Considerando como exemplo a configuração de emissor comum, apenas os parâmetros V_{BE} , I_B , V_{CE} e I_C são necessários, de modo que os demais parâmetros podem ser obtidos utilizando as Leis de Kirchhoff.

Para o caso em questão, os parâmetros V_{BE} e I_B , são chamados **parâmetros de entrada**, já os parâmetros V_{CE} e I_C são os **parâmetros de saída**.

Concluimos então que para caracterizar o comportamento do transistor nesta configuração representada é fundamental que haja dois conjuntos de curvas características: A **curva característica de entrada**, onde são relacionados os parâmetros da entrada, e a **curva característica de saída**, onde são relacionados os parâmetros de saída do transistor (PINTO; ALBUQUERQUE, 2011).

A.2.1 Curvas características de saída do transistor TJB

As curvas características de saída possuem maior importância ao definir as propriedades elétricas do transistor, isso se dá devido ao fato da corrente da base influenciar na corrente do emissor. As curvas características de saída também são chamadas de curvas características de coletor. (PINTO; ALBUQUERQUE, 2011)

Ainda seguindo o exemplo de polarização com configuração de emissor comum, a curva característica representa graficamente a relação entre a corrente de coletor (I_C) e a tensão entre o coletor e o emissor (V_{CE}), para determinados valores de corrente de base (I_B).

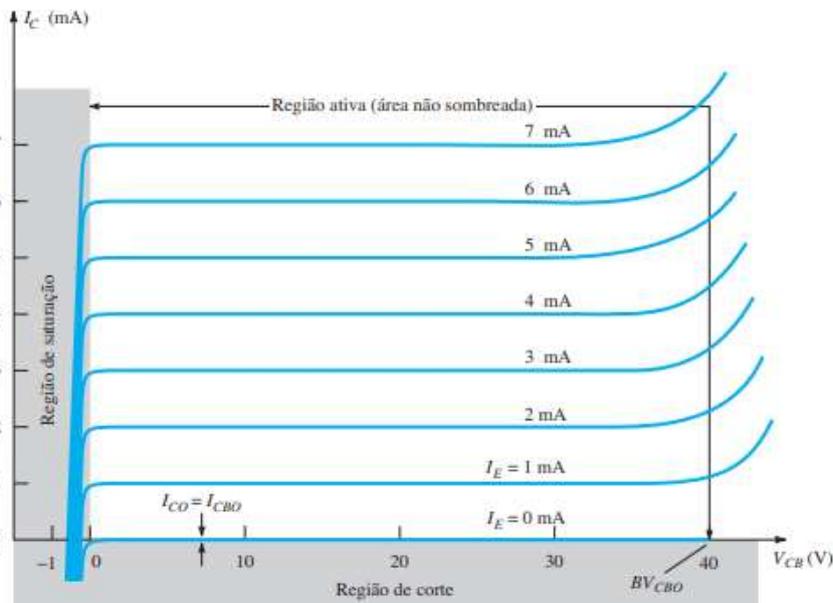
A Figura A.7 ilustra as curvas características de saída de um transistor amplificador polarizado na configuração base comum.

Considerando o valor da corrente de base constante, nota-se que a corrente do coletor e a tensão entre os terminais de coletor e emissor dependem do parâmetro (I_B), logo a corrente de coletor estará em função da tensão entre o coletor e o emissor.

Considerando I_B um parâmetro, podemos representar matematicamente essa situação através da Equação A.1, apresentada a seguir:

$$I_B = f(V_{CE}) \quad (A.1)$$

Figura A.7 - Curvas características de saída de um transistor.



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013).

É importante lembrar que as curvas características demonstradas no *datasheet* do fabricante ilustram a média comportamental de uma amostra de transistores da mesma especificação, logo, pode-se observar na prática um pequeno desvio de suas propriedades elétricas em relação ao previsto (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

A.3 Transistor de Efeito de Campo – FET

Os transistores de efeito de campo são semelhantes aos transistores bipolares, a principal diferença entre os dois tipos é que enquanto o Transistor de Junção Bipolar é controlado por uma corrente de entrada, o Transistor de Efeito de Campo é controlado por tensão de entrada (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). Os Transistores de efeito de campo também são utilizados para chaveamento e amplificação e assim como os transistores do tipo TJB possuem três terminais: Fonte (*Source*), Dreno (*Drain*) e Porta (*Gate*), que serão melhor descritos a seguir. Existe dois tipos de transistores de efeito de campo, os **Junction Field Effect Transistor (JFET)** e o **Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)** (REZENDE, 2013).

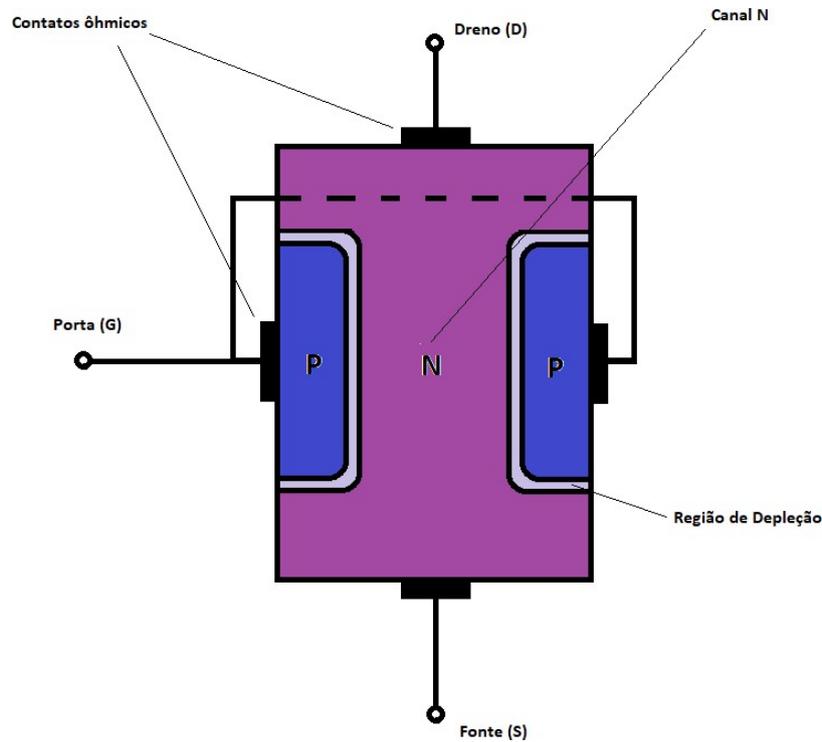
A.3.1 Construção e operação do JFET

Junction Field Effect Transistor (JFET): O transistor do Tipo JFET possui três terminais: Fonte (*source*) o terminal de entrada dos elétrons, o Dreno (*drain*) terminal de saída dos elétrons e por fim o terminal de Porta (*gate*) por onde a passagem de elétrons é controlada.

Os transistores de efeito de campo são unipolares, de modo que se ele for um canal de condução por elétrons é chamado canal *n*, e se ele for um dispositivo com condução feita por lacunas é chamado canal *p*. O princípio de funcionamento deste transistor consiste em controlar a corrente I_D que circula entre a fonte e o dreno através da aplicação de uma tensão negativa no terminal de porta (REZENDE, 2013). Quando aplicada a uma tensão do dreno para a fonte ela estabelecerá um fluxo de elétrons e com a aplicação de um potencial no terminal de porta ela controlará o fluxo da carga para o terminal de dreno (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

A construção do transistor JFET é da seguinte forma: o corpo é construído de material tipo N do qual nas extremidades estão ligados os terminais de Dreno e Fonte e na região central estão inseridas duas pastilhas de material tipo P que estão ligadas entre si e também ao terminal de Porta conforme ilustrado na Figura A.8.

Figura A.8 - Construção do transistor JFET.



Fonte: Adaptado de Boylestad e Nashelsky (2013).

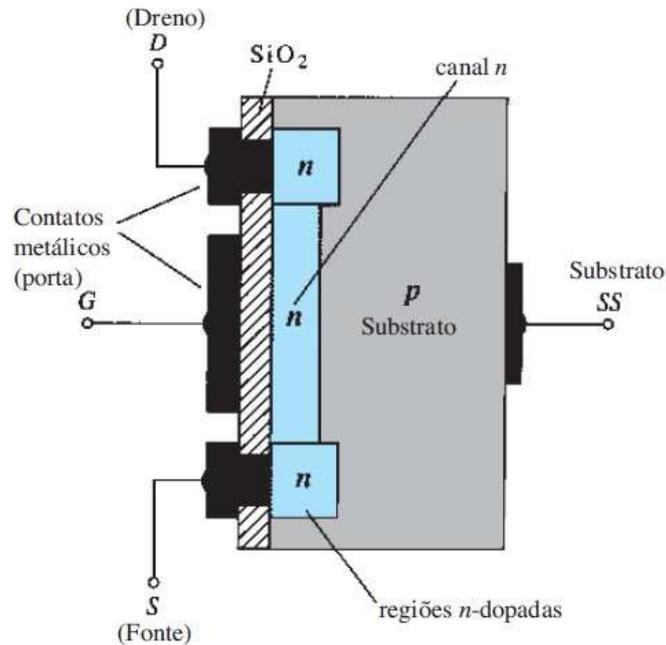
A.3.2 Construção e operação do transistor MOSFET

Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET): O transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor, assim como o JFET possui os três terminais, **fonte, comporta e dreno**.

Na estrutura do transistor MOSFET uma película de óxido isola a região da **comporta** da região do canal que liga o dreno e a fonte, conforme ilustrado pela Figura A.9. **Para o transistor MOSFET do tipo depleção N-MOS, o eletrodo ligado ao substrato é também conectado ao terminal da fonte. Com uma tensão entre gate e source nula no gate a corrente do dreno tem um valor que depende da tensão de alimentação até o ponto de saturação, para controlar a corrente, o terminal de porta deve ser negativo em relação à tensão da fonte, tanto mais**

negativa ela for, menor é a corrente que flui entre o dreno e a fonte (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Figura A.9 - Construção do transistor MOSFET.



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013).

O transistor MOSFET tem certas propriedades que o diferem dos outros tipos de transistores, dentre elas podemos citar:

- Atuam como elementos resistivos controlados por tensão;
- Por ter uma resistência alta na entrada, a constante de tempo do circuito de entrada é grande o suficiente para que a carga presente na capacitância de entrada fique armazenada pelo tempo necessário para que o dispositivo possa ser utilizado como elemento de memória em circuitos digitais.
- Capacidade de dissipar potências elevadas e comutar grandes correntes em poucos segundos, sendo mais rápido que os demais transistores, dessa forma pode ser usado como chave de alta velocidade e alta potência.

- Difere do Transistor JFET por ter capacitâncias menores e impedâncias de entrada mais altas (REZENDE, 2013).