



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/04.19.14.33-TDI

ESTUDO DE METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS COTS EM AMBIENTE ESPACIAL

Bruno Carneiro Junqueira

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 15 de abril de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44H6TA2>>

INPE
São José dos Campos
2021

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



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/04.19.14.33-TDI

ESTUDO DE METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS COTS EM AMBIENTE ESPACIAL

Bruno Carneiro Junqueira

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 15 de abril de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44H6TA2>>

INPE
São José dos Campos
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Junqueira, Bruno Carneiro.

J968e Estudo de metodologia para aplicação de componentes eletrônicos COTS em ambiente espacial / Bruno Carneiro Junqueira. – São José dos Campos : INPE, 2021.

xxii + 119 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/04.19.14.33-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

Orientador : Dr. Silvio Manea.

1. COTS. 2. Radiação. 3. Metodologia para utilização de componentes. 4. Ambiente espacial. I.Título.

CDU 629.7.031.8



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 DE BRUNO CARNEIRO JUNQUEIRA
BANCA Nº 040/2021, REG 144150/2018

No dia 15 de abril de 2021, às 09h, 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 Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

Título: “ESTUDO DE METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS COTS EM AMBIENTE ESPACIAL”

Eu, Walter Abrahao dos Santos, Presidente da Banca Examinadora, assino esta ATA, em nome de todos os membros, com o consentimento dos mesmos.

Membros da banca:

Dr. Walter Abrahao dos Santos - Presidente - INPE
Dr. Silvio Manea - Orientador - INPE
Dra Ana Paula de Sá Santos Rabello - Membro Interno - INPE
Dr. Marcos Antonio Vieira da Silva - Membro Interno - INPE/PCI/CNPq
Dr. Claudio Antonio Federico - Membro Externo - IEAv/DCTA



Documento assinado eletronicamente por **Walter Abrahão dos Santos, Tecnologista**, em 22/04/2021, às 16:57 (horário oficial de Brasília), com fundamento no art. 6º do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **7043128** e o código CRC **26C1DC08**.

AGRADECIMENTOS

Ao INPE, pela oportunidade oferecida, por meio de Pós-Graduação em ETE/CSE, de formar profissionais mais qualificados e capacitados para a sociedade brasileira.

À CAPES pelo apoio financeiro, possibilitando o desenvolvimento e conclusão do mestrado.

Ao Prof. Dr. Silvio Manea, pelo incentivo constante, conhecimentos compartilhados, orientação positiva e exigente e exemplo.

Aos membros da banca examinadora.

Aos meus companheiros de sala, Dr. Marcos Antonio Vieira da Silva, Msc. Juliano de Quadro Moreira e Msc. Adilson Luiz Barbosa, que sempre deram todo apoio e incentivos e conselhos, tendo papel fundamental no desenvolvimento 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 estudo de caso do presente trabalho.

Aos professores do INPE do curso ETE/CSE, pelo conhecimento, orientação e paciência ao longo do Curso de Mestrado, e a todos os demais profissionais do INPE que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

A minha família, em especial os meus pais Wilson e Magda, pelo apoio constante a minha formação como profissional e ser humano, a minha irmã Gabriella, pelo companheirismo e amizade.

A minha namorada Mayra Alves Setala pelo apoio e compreensão.

A todos meus amigos que fiz no mestrado.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta Dissertação.

O meu muito obrigado.

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.

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

STUDY OF METHODOLOGY FOR THE APPLICATION OF COTS ELECTRONIC COMPONENTS IN SPACE ENVIRONMENT

ABSTRACT

The space environment is harsh and radiation is the main problem for space systems which causes short and long term effects on electronic systems and components. In this case the key is to use resistant components and tolerant to radiation. The COTS components (Commercial Off-The Shelf) for some decades has been supplying some characteristic functions that space components do not have. However, because components (COTS) are not designed for the space environment, they are not guaranteed to function primarily due to radiation. Thus this research dissertation developed an understanding of the radiation and its effects on electronic components, especially transistors and in other semiconductor components, and develop a method of selection and component integration into the system in order to increase the reliability of the electronic component and the system in which it is integrated according to the intended mission. As a study case, it will be analyzed the behavior of COTS transistors exposed to ionizing radiation to demonstrate the affected parameters and their resistance to radiation, evaluating how they would behave in the space environment. Finally, the proposed method will be discussed in relation to the study case. Thus, with the correct use of the COTS component, it is possible to combine the benefit of using this component with adequate reliability and system life cycle.

Keywords: COTS. Radiation. Methodology for Component Utilization. Space environment.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1–Radiação que chega à Terra.	7
Figura 2.2–Representação do Cinturão de Van Allen.	8
Figura 2.3–Esquema dos danos por radiação nos dispositivos eletrônicos.	9
Figura 2.4–Esquema representativo da Dose Ionizante Total (TID).....	10
Figura 2.5–Esquema representativo da Dose de Dano de Deslocamento (DDD).	12
Figura 2.6–Esquema representativo do Efeito de Evento Único (SEE).....	13
Figura 2.7–Esquema representativo do Tiristor formado no CMOS.....	15
Figura 2.8–Esquema representativo do transistor bipolar parasítico.....	15
Figura 2.9–Divisão dos segmentos do sistema espacial.....	19
Figura 2.10–Ciclo de vida do sistema espacial, conforme diretrizes do padrão ECSS-M-ST-10C.....	24
Figura 2.11–Curva da Banheira.	26
Figura 2.12–Estrutura atômica do Germânio (Ge) e do Silício (Si).	33
Figura 2.13–Fluxo de portadores em um semicondutor intrínseco.....	34
Figura 2.14–Portadores nos semicondutores tipo P e N.	35
Figura 2.15–Junção dos materiais semicondutores tipo P e N.....	35
Figura 2.16–Transistor de Junção Bipolar (BJT).	38
Figura 2.17–Regiões de operação do BJT.....	39
Figura 2.18–Transistor de Efeito de Campo de Junção (JFET).	42
Figura 2.19–Curvas do JFET canal N.	43
Figura 2.20–Transistor de Efeito de Campo Metal Óxido semicondutor (MOSFET).....	47
Figura 2.21–Curvas do MOSFET canal N.....	48
Figura 2.22–Transistor de Efeito de Campo Metal Óxido semicondutor (MOSFET).....	51
Figura 3.1–Exemplos de layouts especiais para os transistores.....	58
Figura 3.2–Estrutura SOI FET.....	59
Figura 4.1–Análise da missão.	66

Figura 4.2–Exemplos de missões relacionadas à incidência de radiação.....	67
Figura 4.3–Circunstâncias e Cenários.	68
Figura 4.4–Tecnologia do Componente.	71
Figura 4.5–Critérios de decisão do Componente.	76
Figura 4.6–Relação dos critérios de decisão do Componente.	78
Figura 4.7–Relação dos critérios de decisão do Componente com as possíveis mitigações.	79
Figura 5.1–Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 2.....	81
Figura 5.2–Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 3.....	82
Figura 5.3 – Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 4.....	83
Figura 5.4–Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 5.....	83
Figura 5.5–Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Coletor-Base.....	84
Figura 5.6–Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Coletor-Emissor.	85
Figura 5.7–Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Emissor-Base.....	85
Figura 5.8 – Gráfico do parâmetro Tensão de Saturação Base-Emissor 1.....	86
Figura 5.9–Gráfico do parâmetro Tensão de Saturação Base-Emissor 2.....	87
Figura 5.10–Gráfico do parâmetro Tensão de Saturação Coletor-Emissor 1...	87
Figura 5.11–Gráfico do parâmetro Tensão de Saturação Coletor-Emissor 2...	88
Figura 5.12–Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 1.....	90
Figura 5.13–Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 2.....	91
Figura 5.14–Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 3.....	92
Figura 5.15–Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Coletor-Base 1.....	92
Figura 5.16–Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Coletor-Base 2.....	93
Figura 5.17–Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Coletor-Emissor.	93
Figura 5.18–Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Emissor-Base 1.....	94
Figura 5.19–Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Emissor-Base 2.....	94
Figura 5.20–Gráfico do parâmetro de tensão de Saturação Base-Emissor 1. .	95
Figura 5.21–Gráfico do parâmetro Tensão de Saturação Base-Emissor 2.....	96
Figura 5.22–Gráfico do parâmetro Tensão de Saturação Coletor-Emissor 1...	96
Figura 5.23–Gráfico do parâmetro Tensão de Saturação Coletor-Emissor 2...	97
Figura 5.24–Polarização nas condições respectivamente OFF e ON para o ensaio TID.....	98

Figura 5.25–Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 1.....	99
Figura 5.26–Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 2.....	100
Figura 5.27–Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 3.....	100
Figura 5.28–Gráfico do parâmetro de Corrente Coletor-Emissor.....	101
Figura 5.29–Gráfico do parâmetro de Corrente Coletor-Base.....	102
Figura 5.30–Gráfico do parâmetro de Corrente Emissor-Base.	102

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Efeitos da radiação relacionadas às suas fontes.....	9
Tabela 2.2 – Definição dos níveis de abstração sistêmicas.	18
Tabela 2.3 – Definição dos segmentos espaciais.	19
Tabela 2.4 – Subsistemas do módulo de serviço.	21
Tabela 2.5 – Categorias de missões espaciais.	22
Tabela 2.6 – Eras da indústria eletrônica	28
Tabela 3.1 – Fontes de radiação para os testes em relação aos efeitos esperados.....	64
Tabela 4.1 – Parâmetros do sistema.....	69
Tabela 4.2 – Efeitos da radiação nos componentes e as soluções aplicáveis. 72	
Tabela 4.3 – Exemplificação do nó tecnológico em relação aos possíveis efeitos da radiação.	73
Tabela 4.4 – Aplicação.	75
Tabela 5.1 – Datasheet do transistor 2N2905A.....	81
Tabela 5.2 – Datasheet do transistor 2N2219A.....	89
Tabela 5.3 – Datasheet do transistor 2N2222A.....	99
Tabela 6.1 – Parâmetros relacionados aos transistores testados.	104
Tabela 6.2 – Parâmetros relacionados aos transistores testados.	105
Tabela A.1 – Relação dos critérios de decisão do Componente.	119

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BJT - Bipolar Junction Transistor

CMOS - Complementary Metal Oxide Semiconductor

COTS - Commercial Off The Shelf

DDD - Displacement Damage Dose

DMR - Dual Modular Redundancy

DoD - Departamento de Defesa

ECC - ErrorCorrecting Codes

EDAC - Error Detection And Correction

ELDRS - Enhanced Low Dose Rate Sensitivity

ESA - European Space Agency

FET - Fild-Effect Transistor

FMEA - Failure Mode and Effects Analysis

FMECA - Failure Modes, Effects and Criticality Analysis

GCR - Raios Cósmicos Galácticos

GEO - Geosynchronous Earth Orbit

IEAv - Instituto de Estudos Avançados

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

JFET - Junction Field-Effect Transistor

LDR - Low Dose Rate

LEO - Low Earth Orbit

LET - Linear Energy Transfer

MBU - Multiple Bit Upset

MEO - Medium Earth Orbit

MOSFET - Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor

MTBF - Mean time Between Failures

MTJ - Magnetic Tunnel Junction

NIEL - Non Ionizing Energy Loss

PC - Personal Computer

SCM - Specialist Component Manufacturers

SCR - Silicon Controlled Rectifier

SEB - Single Event Burnout

SEE - Single Event Effect

SEFI - Single Event Functional Interrupt

SEGR - Single Event Gate Rupture

SEHE - Single Event Hard Error

SEL - Single Event Latchup

SESB - Single Event Snapback

SET - Single Effect Transient

SEU - Single Event Upset

SOI - Silicon On Insulator

SOS - Silicon on Sapphire

SRAM - Static Random Access Memory

TID - Total Ionizing Dose

TMR - Triple Modular Redundancy

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo geral	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Metodologia	3
1.4 Estrutura da dissertação.....	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Ambiente espacial	5
2.1.1 Radiação	6
2.1.1.1 Dose Ionizante Total (TID).....	10
2.1.1.2 Dose de Dano de Deslocamento (DDD)	11
2.1.1.3 Efeito de Evento Único (SEE)	12
2.2 Sistemas espaciais	17
2.2.1 Missões espaciais	21
2.2.2 Engenharia de sistemas.....	23
2.3 Engenharia de componentes.....	25
2.3.1 Componentes semicondutores.....	25
2.3.1.1 Qualidade e confiabilidade.....	25
2.3.1.2 História dos componentes eletrônicos	28
2.3.1.3 Componentes espaciais.....	30
2.3.1.4 Componentes COTS.....	31
2.3.1.5 Semicondutores	32
2.3.1.5.1 Materiais dos Semicondutores	36
2.3.2 Transistores	37
2.3.2.1 Transistor de Junção Bipolar (BJT).....	37
2.3.2.2 Transistor de Efeito de Campo de Junção (JFET)	41
2.3.2.3 Transistor de Efeito de Campo Metal Óxido Semicondutor (MOSFET).....	45

2.3.2.4	Metal-Óxido-Semicondutor Complementar (CMOS).....	50
2.3.2.5	BiCMOS	51
2.3.2.6	Característica funcional do componente	52
2.3.2.6.1	Pequenos sinais	52
2.3.2.6.2	Alta frequência.....	52
2.3.2.6.3	Potência.....	53
3	ESTADO DA ARTE.....	54
3.1	Guias da Agencia Espacial Européia (ESA) relacionados.....	54
3.1.1	ECSS-Q-ST-20-10C (OTS Off-The-Shelf).....	54
3.1.2	ECSS-Q-ST-60-13C (Componentes EEE comerciais) e ECSS-Q-ST-60C REV2 (Componentes EEE).....	54
3.1.3	ECSS-E-HB-10-12A e ECSS-E-ST-10-12C (Radiação).....	55
3.1.4	ECSS-Q-ST-60-15C (Garantia de dureza de radiação em EEE)	55
3.2	Aquisição de componentes COTS.....	55
3.3	Técnicas de projeto de proteção contra radiação	57
3.3.1	Mitigação na integração do componente.....	57
3.3.1.1	Endurecido de radiação por dimensionamento.....	57
3.3.1.2	Projeto de layout especial para transistores	58
3.3.1.3	Silício Sobre Isolador (<i>Silicon OnInsulator</i> - SOI) / Silício Sobre Safira (<i>Silicon onSapphire</i> - SOS)	58
3.3.1.4	Anéis de guarda.....	59
3.3.2	Endurecimento de radiação por meio de design de nível de circuito ..	59
3.3.2.1	Redundância de circuitos críticos	59
3.3.2.2	Porta de proteção	60
3.3.2.3	Filtragem temporal.....	60
3.3.2.4	Cancelamento de Carga Diferencial (<i>Differential Charge Cancellation</i> - DCC)	60
3.3.2.5	Células de Armazenamento Duplas Intertravadas (Dual InterlockedStorageCells - DICE)	60
3.3.2.6	Circuitos de autocura (<i>Self-healingcircuits</i>).....	61
3.3.2.7	Proteção <i>Pipeline</i> (<i>Pipeline protection</i>)	61

3.3.2.8	Lógica de armazenamento com base magnética (<i>Magnetic-based storage logic</i>)	61
3.3.2.9	Definição de parâmetros iniciais com margem	61
3.3.3	Endurecimento de radiação por meio de design de nível de sistema .	61
3.3.3.1	Elementos redundantes	62
3.3.3.2	Recuperação de Reinicialização	62
3.3.3.3	Depuração (<i>Scrubbing</i>)	62
3.3.4	Endurecimento de radiação por meio de proteção de blindagem	62
3.4	Simulação de efeitos de radiação	63
3.5	Teste em radiação	63
3.6	Verificação e validação	65
4	METODOLOGIA	66
4.1	Condições de entrada em relação à radiação	66
4.2	Parâmetros do sistema	68
4.3	Análise do componente	71
4.3.1	Tecnologia do componente	71
4.3.2	Nó tecnológico do componente	73
4.3.3	Aplicação do componente	74
4.4	Descrição da metodologia	75
5	ESTUDO DE CASO	80
5.1	Transistor 2N2905A	80
5.1.1	Resultados do Transistor 2N2905A	88
5.2	Transistor 2N2219A	89
5.2.1	Resultados do Transistor 2N2219A	97
5.3	Transistor 2N2222A	97
5.3.1	Resultados do Transistor 2N2222A	103
5.4	Resultados gerais	103
6	AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA	104
6.1	Características dos componentes testados	104
6.2	Verificação do processo metodológico referente aos componentes testados	104
6.3	Análise do processo metodológico	107

6.4 Avaliação do processo metodológico	109
7 CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
7.1 Conclusões	110
7.2 Sugestões para trabalhos futuros	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
APÊNDICE A –TABELA DAS RELAÇÕES DOS CRITÉRIOS DE DECISÃO DO COMPONENTE.....	119

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento espacial é importante para o progresso do país, sendo cada vez mais interconectado com tecnologias de uso na Terra, além de possibilitar estudos sobre o planeta e o universo. Porém, para a construção e a operação de sistemas com esse propósito, há a necessidade de alto investimento, consequência do fato do ambiente espacial ser inóspito, principalmente na questão da radiação, sendo necessário sistemas que suportem este ambiente em órbita.

A exploração espacial nunca foi de baixo custo. Nos programas espaciais, durante a guerra fria, o custo das missões era tal que apenas as agências governamentais com bilhões de dólares disponíveis, podiam pagá-lo. Com o passar do tempo, esses custos começaram a cair, devido aos avanços, principalmente, na tecnologia de lançamento. Por outro lado, o financiamento para essas atividades se reduziu e também foi dividido para um número maior de missões. Na esteira dos cortes orçamentários para pesquisa e desenvolvimento militar e aeroespacial, tem havido muita pressão para se desenvolver sistemas e projetos que atendam às necessidades de projetos espaciais e reduzam os custos sem sacrificar a qualidade. Este é o lugar onde produtos COTS (Commercial Off-The Shelf) oferecem uma solução potencial (BLILEY TECHNOLOGIES, 2017; FRIEDLANDER, 2013).

Para o caso da indústria espacial brasileira, o orçamento sempre foi contido. No caso da aquisição de componentes espaciais a maior dificuldade está nos embargos comerciais, ou quando não ocorre esse embargo, a dificuldade está no tempo de espera. Com isto, os componentes COTS estão se tornando uma solução viável para desenvolvimento de projetos espaciais.

A utilização desses componentes necessita de cautela para que eles possam desempenhar sua função de acordo com o projeto durante o período da missão (WILSON; KIRSCH, 2014). Neste contexto, esta dissertação de mestrado apresentará um estudo de metodologia para a aplicação de COTS em ambiente espacial, analisando topologias e formas de mitigar efeitos da radiação sobre esses componentes. Podendo dessa forma, contribuir para a

aplicação de COTS em ambiente espacial, o que possibilitaria a redução de custos e tempo para o desenvolvimento de satélites.

1.1 Motivação

As missões espaciais possuem órbitas e tempo de duração determinadas, o que influencia consideravelmente o quanto de radiação o sistema espacial estará exposto.

Utilizar componentes com especificação espacial, resistente ou tolerante a radiação, é uma segurança para a missão. O custo elevado e, principalmente, a indisponibilidade, muitas vezes inviabiliza o uso dos mesmos.

A indústria espacial vem buscando a utilização de componentes COTS, possibilitando uma diminuição dos custos e tempo de projeto. O INPE, normalmente baseou seus projetos em componentes espaciais resistentes à radiação. Porém, a necessidade de utilização de COTS, acompanhando a tendência mundial, é um fator crítico para os futuros projetos da instituição.

A motivação para essa dissertação vem justamente nesse aspecto descrito, propondo uma metodologia que possibilite a utilização destes componentes no cenário espacial.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver um estudo e proposição de uma metodologia para a aplicação de componentes COTS (transistores) em missões espaciais, visando principalmente a questão da radiação.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são listados abaixo:

- Apresentar uma revisão bibliográfica abrangendo: a radiação no ambiente espacial, os componentes eletrônicos (transistores) e seu comportamento de acordo com o mecanismo de radiação observado, definição dos COTS e componentes espaciais.

- Desenvolver uma metodologia para utilização do componente COTS para missões espaciais.
- Realizar Estudo de Caso utilizando transistores COTS testados em diferentes níveis de radiação para demonstrar os parâmetros afetados e a sua resistência, avaliando como se comportariam no ambiente espacial.
- Analisar o método proposto em relação ao estudo de caso.

1.3 Metodologia

Este trabalho faz uso do método de pesquisa bibliográfica com base em trabalhos elaborados sobre o assunto, abordados e coletados nas principais bases de dados acadêmicas, em conjunto com o desenvolvimento e elaboração de um método para aquisição do componente COTS e como estudo de caso testes com transistores no IEAv (Instituto de Estudos Avançados) com radiação ionizante. Abaixo são descritos os objetivos metodológicos:

- Estudo e pesquisa da fundamentação teórica, que consistiu principalmente na questão de utilização de COTS na área espacial, radiação e componentes aqui abordados.
- Estudo e pesquisa da revisão bibliográfica, analisando o que se tem até hoje sobre metodologias de aplicação de COTS na área espacial, testes em componentes candidatos e componentes COTS utilizados em missões espaciais.
- Proposta de uma metodologia para a aplicação de componente COTS de acordo com os estudos observados sobre o componente e a missão na qual este componente atuará.
- Realização de testes no IEAv em transistores bipolares através de radiação gama por uma fonte de Cobalto 60. A avaliação foi realizada de acordo com as normas internacionais de radiação. Um conjunto completo de medições elétricas foram realizadas, juntamente, com a

representação gráfica dos parâmetros medidos com respeito à dose total irradiada em todas as amostras.

- Avaliação da metodologia proposta com relação ao estudo de caso.

1.4 Estrutura da dissertação

Capítulo 1 referente à Introdução da dissertação, apresentando a questão central que motivou a realização deste trabalho, os objetivos, e a metodologia utilizada.

Capítulo 2 referente à Fundamentação Teórica, no qual é contextualizado o assunto e entendido os fundamentos do trabalho, são descritos o ambiente espacial, em relação à radiação e seus mecanismos na estrutura dos componentes eletrônicos e também é apresentado o conceito de utilização de COTS.

Capítulo 3 referente ao Estado da Arte, onde é analisado o estado da arte do assunto tratado nesta dissertação, analisando trabalhos relacionados.

Capítulo 4 referente à Proposta da Metodologia de Aplicação COTS no Sistema Espacial, onde é desenvolvida a metodologia de aplicação de COTS no ambiente espacial.

Capítulo 5 referente ao Estudo de Caso analisando 3 transistores BJTs em testes de radiação.

Capítulo 6 referente à aplicação da metodologia aos componentes testados, analisando seu desempenho e observando suas contribuições e limitações.

Capítulo 7 dedicado às conclusões, considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas a contextualização e definições para a dissertação, com o objetivo de esclarecer sobre os assuntos tratados nos capítulos seguintes.

2.1 Ambiente espacial

O ambiente espacial possui uma série de características que os sistemas e componentes devem suportar, as principais são radiação, degaseificação, vácuo, microgravidade, oxigênio atômico, alta e baixa temperatura com variações rápidas, além da vibração durante o lançamento. E uma questão que também deve ser levada em conta é a proibição de alguns materiais que os componentes não devem conter. Abaixo são listados cada uma dessas questões (MANEA, 2018a).

- **Radiação:** Fluxo de partículas energéticas, incluindo fótons, elétrons, prótons e íons pesados, provenientes do Sol e do espaço profundo. Dependendo da altitude, latitude e longitude da órbita e ao decorrer do tempo, há consideráveis variações da fluência de partículas no material. A atmosfera para baixas altitudes e as variações do campo magnético, incluindo os cinturões de Van Allen e a anomalia do Atlântico Sul, propiciam essas variações.
- **Degaseificação:** No vácuo certos materiais, principalmente polímeros, podem passar para o estado gasoso e deteriorar demais componentes, principalmente lentes.
- **Vácuo:** A ausência de matéria, o que representa uma pressão nula ou desprezível, pode afetar alguns comportamentos físicos da matéria, para os componentes eletrônicos, o mais crítico é a degaseificação.
- **Microgravidade:** A microgravidade presente no sistema normalmente não afeta componentes eletrônicos, normalmente é mais preocupante para sistemas físicos que dependem da força gravitacional.

- Oxigênio atômico: Corresponde aos resquícios da atmosfera, além de provocar o arrasto, o oxigênio atômico reage com as superfícies externas produzindo corrosão e alterando as propriedades ópticas. Também promovem a sublimação de substâncias (em geral orgânicas) podendo contaminar outros componentes, provocando ressecamento e microsolduras.
- Temperatura: Limites máximos e mínimos e variação de temperatura são as questões críticas a serem observadas, no ambiente espacial há temperaturas máximas e mínimas extremas e variações bruscas. Porém pode-se ter um controle térmico no sistema.
- Vibração: Durante o lançamento o sistema é exposto a altas taxas de vibração, que variam de lançador para lançador.
- Materiais proibidos: Alguns materiais não podem ser usados por acordos internacionais para a segurança do espaço, mas alguns componentes comerciais os utilizam, devendo ser observados para a restrição destes.

Outra questão importante no ambiente espacial são os meteoritos e lixo espacial, presentes em quantidade suficiente para que suas dimensões, momentum, frequência e efeitos de penetração sejam considerados (MANEA, 2018a). O impacto pode causar redução das funcionalidades, do desempenho ou consequências catastróficas.

Vistas as principais circunstâncias sofridas pelo sistema espacial, a mais crítica para os componentes eletrônicos é a radiação, pelo fato da não observação no ambiente terrestre e pelas dificuldades de teste.

2.1.1 Radiação

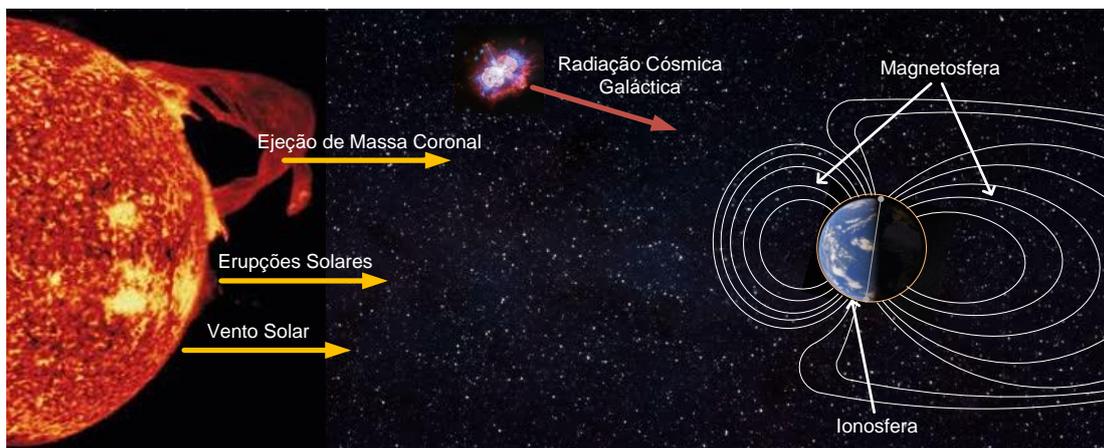
A radiação no contexto aqui estudado é a radiação ionizante, correspondendo à transferência de energia e momento por meio de uma partícula ou fóton, as radiações eletromagnéticas com energia abaixo da faixa de raios X não estão incluídas, por não gerarem danos notáveis nos componentes eletrônicos (MANEA, 2018b).

A superfície do Planeta Terra tem duas principais proteções contra a radiação do espaço, o campo magnético e a atmosfera. A radiação que chega à Terra é proveniente do Sol e do espaço profundo por raios cósmicos galácticos (GCR) (BOUDENOT, 2007). Os fenômenos observados pelo Sol são listados abaixo.

- Vento solar: Emissão contínua de partículas carregadas (plasma) provenientes da coroa solar. As principais partículas são os prótons e elétrons.
- Erupções solares: Explosões que produzem partículas com energias bem maiores como íons pesados.
- Ejeções de massa coronal: Grandes erupções de gás ionizado a alta temperatura provenientes da coroa solar. Emitem raios x, prótons e íons pesados.

Os Raios Cósmicos Galácticos possuem alta energia, originários de fora do sistema solar, em explosões de supernovas, são compostos de 85% de prótons, 14% de partículas Alfa, 1% de núcleos pesados, com energias até GeV (MANEA, 2018b). A Figura 2.1 ilustra as radiações que chegam na Terra.

Figura 2.1–Radiação que chega à Terra.

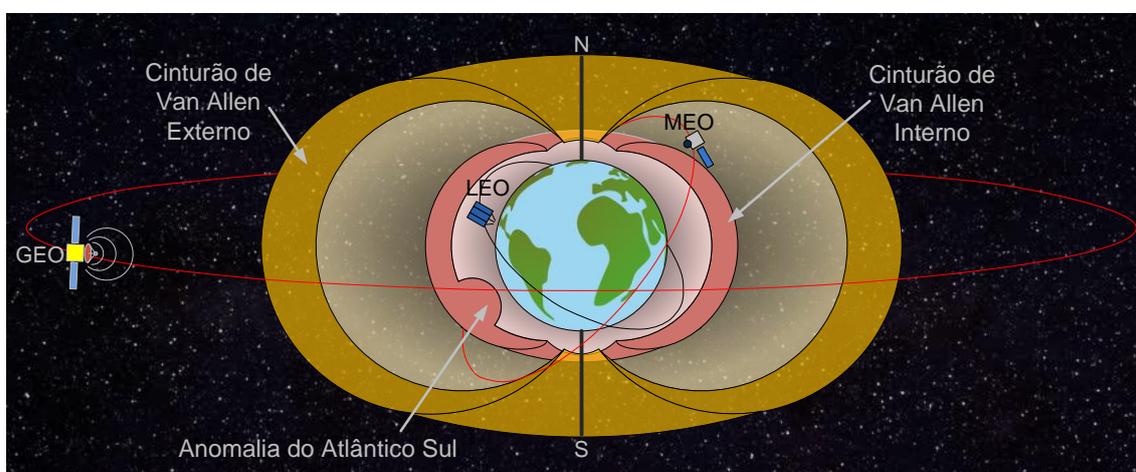


Fonte: Produção do Autor.

O campo magnético terrestre em muitos casos desvia ou aprisiona em certas regiões as partículas incidentes. As partículas de baixa energia, normalmente provenientes do vento solar, acabam presas no campo magnético terrestre, passando a ter um movimento em espiral ao redor das linhas de campo. Estas

partículas se concentram em duas regiões chamadas Cinturões de Van Allen. Os elétrons se concentram no cinturão mais externo e os prótons por serem mais energéticos se concentram no cinturão mais próximo da Terra, onde o campo magnético é forte o suficiente para capturá-los. Os elétrons presos têm energia de até 7 MeV enquanto que os prótons até algumas centenas de MeV (MANEA, 2018a). A Figura 2.2 ilustra o cinturão de Van Allen, relacionando as órbitas Geoestacionária (GEO - *Geosynchronous Earth Orbit*), média (MEO - *Medium Earth Orbit*) e baixa (LEO - *Low Earth Orbit*).

Figura 2.2—Representação do Cinturão de Van Allen.



Fonte: Produção do Autor.

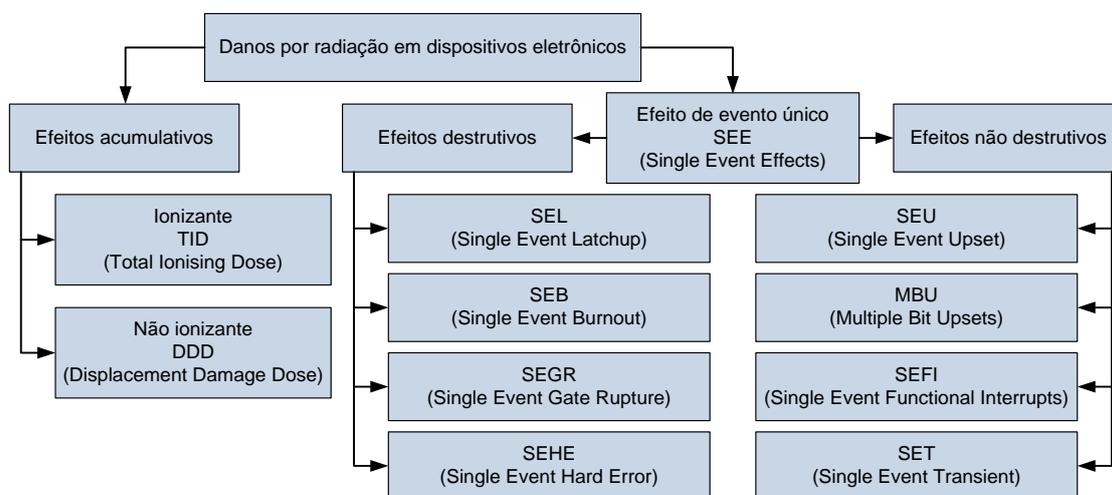
Os cinturões de Van Allen criam uma proteção contra a radiação abaixo deles, porém sistemas espaciais que estão próximos ou em seu interior sofrem drasticamente com o efeito de suas partículas.

A característica geográfica mais proeminente para as órbitas baixas da Terra é a Anomalia do Atlântico Sul, que é uma área de excepcional densidade de prótons que cobre grande parte da América do Sul e do Oceano Atlântico Sul.

Os sistemas espaciais e seus componentes eletrônicos associados estão expostos ao fluxo de partículas energéticas por todo seu período de operação. A radiação ao interagir com o material do componente eletrônico provoca diferentes efeitos, dependendo (i) do tipo de radiação, (ii) taxa de interação, (iii) tipo do material, (iv) processo e estrutura do material (MANEA, 2018b).

No momento da interação a radiação perde energia na matéria, podendo ser classificado de três formas, dependendo da interação e do tempo de exposição do componente; são eles: Dose Ionizante Total (TID - *Total Ionizing Dose*), Dose de Dano de Deslocamento (DDD – *Displacement Damage Dose*) e Efeito de Evento Único (SEE - *Single Event Effect*). Na Figura 2.3 é mostrado esquematicamente a divisão dos danos por radiação nos dispositivos eletrônicos.

Figura 2.3–Esquema dos danos por radiação nos dispositivos eletrônicos.



Fonte: Junqueira e Manea (2019).

Cada mecanismo de radiação possui suas principais fontes características, o que depende do tipo de partícula e da sua energia. A Tabela 2.1 faz esta relação.

Tabela 2.1 – Efeitos da radiação relacionadas às suas fontes.

Mecanismo / Efeito	Fonte
TID (Dose Ionizante Total)	Prótons presos, elétrons presos, prótons solares, bremsstrahlung
DDD (Dose de Dano de Deslocamento)	Prótons presos, elétrons presos, prótons solares, nêutrons
SEE (Evento de Efeito Único)	Íons pesados de raios cósmicos, prótons e íons pesados solares, prótons presos, nêutrons

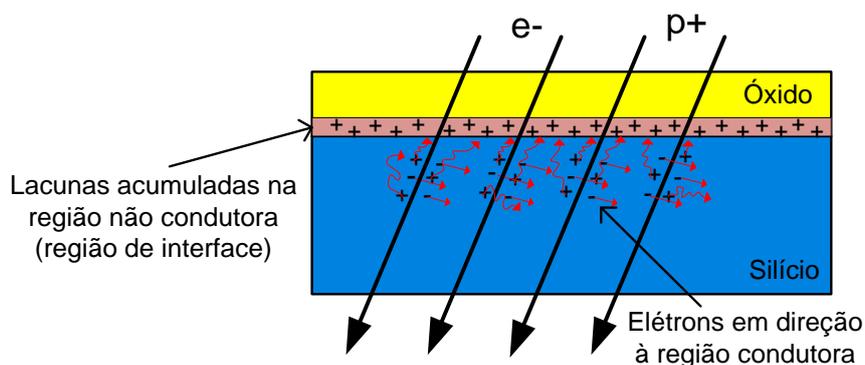
Fonte: Manea (2018b).

O **Bremsstrahlung**, citado na Tabela 2.1, corresponde à radiação eletromagnética que se origina com a desaceleração de partículas carregadas, ou seja, radiação de frenagem gerada na blindagem do dispositivo (MANEA, 2018b).

2.1.1.1 Dose Ionizante Total (TID)

Representa o total de radiação ionizante absorvido pelo componente. A dose é medida em relação ao tempo que o material ficou exposto a esta radiação. Com a interação da radiação na estrutura do material ocorre a formação de pares elétrons-lacunas, sendo que ocorrem recombinações, porém também a dispersão, onde os elétrons possuem maior mobilidade e rapidamente atingem regiões condutoras, já as lacunas, se movimentam por recombinação, que é um processo bem mais lento, acumulando principalmente no óxido que corresponde geralmente as regiões não condutoras da interface, ocorrendo perturbação na estrutura cristalina local. A consequência é a mudança das características paramétricas do dispositivo (POIZAT, 2017). A Figura 2.4 ilustra este mecanismo.

Figura 2.4—Esquema representativo da Dose Ionizante Total (TID).



Fonte: Produção do Autor.

A polarização tem uma forte influência na resposta à radiação, o campo elétrico faz com que elétrons e lacunas sejam transportados pelo óxido em direções opostas. O desligamento do dispositivo às vezes pode melhorar essa resposta (POIZAT, 2017; MANEA et al., 2020).

Em componentes mais antigos (cuja escala é maior) o acúmulo de carga leva mais tempo para apresentar efeitos relacionados à TID. Já para componentes modernos (menores em escala), não há espaço físico suficiente para acumular essas cargas. A tendência tecnológica de diminuição do tamanho dos componentes torna os efeitos da TID desprezíveis, porém ficam mais suscetíveis ao SEE para partículas menos energéticas (MANEA, 2018b).

Os efeitos da liberação de carga por ionização são dosados pela energia depositada pela unidade de massa do material (que deve ser especificado), correspondendo a J/kg ou 100 ergs/g = 1 rad.

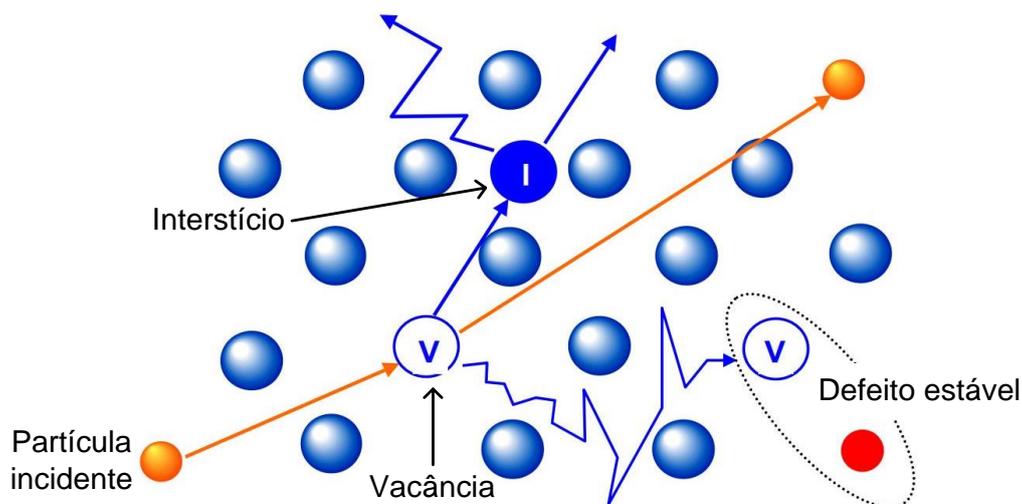
A taxa de dose também é um fator importante para alguns dispositivos, esta variação corresponde a acomodação das armadilhas de carga, ou seja, lacunas no material do semicondutor, onde com a menor taxa de dose (Low Dose Rate - LDR), estas armadilhas se acumulam de maneira mais crítica no dispositivo. A Sensibilidade Aprimorada de Baixa Taxa de Dose (*Enhanced Low Dose Rate Sensitivity* - ELDRS) é um fenômeno complexo, depende do processo de fabricação e tecnologia (POIZAT, 2017).

Outra questão importante para o TID é o **Annealing** (recozimento), que corresponde ao período de tempo que o componente não está sendo irradiado e gradualmente tende a recuperar características paramétricas. O *annealing* pode acontecer em temperaturas elevadas, o que acelera o processo.

2.1.1.2 Dose de Dano de Deslocamento (DDD)

A Dose de Dano de Deslocamento corresponde a um efeito não ionizante de longo prazo devido ao impacto de partículas com energia suficiente para liberar átomos de seu local de rede normal no semicondutor e colocá-los em um local intersticial causando a quebra da estrutura cristalina do semicondutor, levando à degradação do material. Quanto maior a energia da partícula incidente, mais desta energia é transferida para o átomo de recuo que novamente pode continuar a criar átomos adicionais de recuo, portanto gerando uma cascata de defeitos na estrutura (POIVEY, 2017; TODD, 2015). A Figura 2.5 ilustra este mecanismo.

Figura 2.5—Esquema representativo da Dose de Dano de Deslocamento (DDD).



Fonte: Poivey (2017).

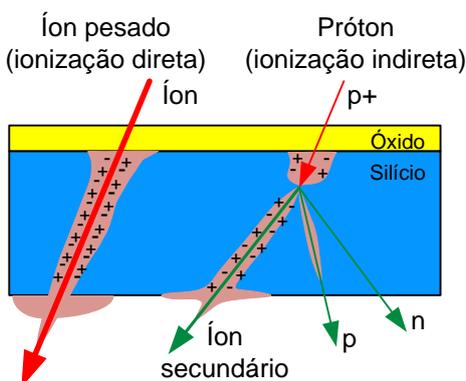
O DDD é medido pelo NIEL (*Non Ionizing Energy Loss* - Perda de Energia Não Ionizante), em MeV.cm²/g; a concentração final de defeitos depende apenas do NIEL, a energia total que entra em deslocamentos, cerca de 0,1% da perda total de energia, e não do tipo de energia inicial da partícula (POIVEY, 2017).

O DDD assim como no TID também possui o **Annealing**, podendo gradualmente tender a restabelecer características do componente, podendo ser aprimorado por temperaturas mais elevadas ou presença de portadores livres (LÖCHNER, 2011).

2.1.1.3 Efeito de Evento Único (SEE)

O Efeito de Evento Único é decorrente de uma única partícula cruzando uma área sensível do dispositivo ou circuito, podendo ser ionização direta ou indireta dependendo da partícula e de sua energia. Na ionização direta ocorre a deposição da energia diretamente pela partícula, normalmente ocorre com íons pesados, gerando uma linha de ionização no percurso do íon. Na ionização indireta ocorre um efeito de ionização em cascata, normalmente decorrente de prótons (POLO, 2017). A Figura 2.6 ilustra este mecanismo.

Figura 2.6–Esquema representativo do Efeito de Evento Único (SEE).



Fonte: Junqueira eManea(2019).

Os principais parâmetros utilizados para expressar a interação entre a partícula e os circuitos eletrônicos no efeito de evento único são descritos a seguir baseado em ECSS-E-HB-10-12C (2010) e Machado (2014).

A **Transferência Linear de Energia (*Linear Energy Transfer - LET*)** é definida como a quantidade de energia depositada no percurso da partícula ionizante no material, medida em MeV.cm²/mg. A LET é expressa em função do tipo de partícula e pode ser aproximada conforme a Equação 2.1.

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

Onde r é o alcance da partícula, ρ a densidade do material alvo (para o caso do silício é 2,32g/cm³), e dE/dx é a energia perdida pela partícula (dE) ao percorrer uma distância (dx).

A **Seção de Choque (*Cross Section*)** corresponde à probabilidade de ocorrência de SEEs, sendo medida experimentalmente como o número de eventos registrados de acordo com a fluência de partículas. A seção de choque de partículas como íons pesados, é geralmente medida em função do LET, e em função da energia da partícula para nêutrons e prótons, conforme mostrado pela Equação 2.2. A unidade típica é geralmente cm²/dispositivo ou cm² /bit.

$$\sigma_{ion}(LET) = \frac{\text{número de eventos}}{\text{fluência do íon}} \quad (2.2)$$

$$\sigma(E)_{\text{nêutron ou próton}} = \frac{\text{número de eventos}}{\text{fluência do próton ou nêutron}}$$

A **Carga Crítica (Qc)** corresponde à quantidade mínima de carga coletada por uma região sensível do componente eletrônico, através da trilha de ionização da partícula, que resulta em um SEE.

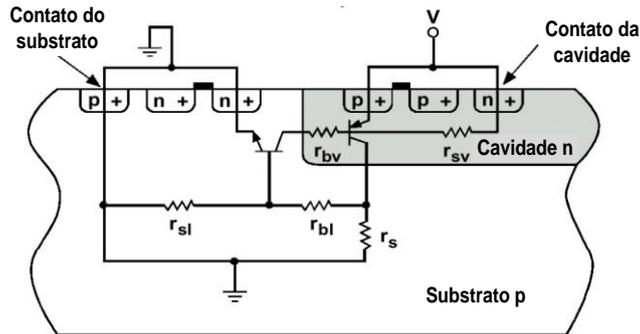
O **Volume Sensível** corresponde ao volume responsável pela coleta de carga para o SEE, é geralmente modelado como um paralelepípedo retangular onde é possível haver a coleta de carga de maneira a resultar em um SEE no componente eletrônico.

O SEE pode ser destrutivo ou não destrutivo, dependendo do componente e da área afetada, resultando em diversos efeitos. Em eventos destrutivos ocorrem danos permanentes; enquanto em eventos não destrutivos não há danos físicos, apenas perda de informações. A seguir são descritos os principais efeitos do SEE de acordo com ECSS-E-HB-10-12C (2010), Polo (2017) e Huang e Jiang (2019).

Destrutivos:

Single Event Latchup (SEL) -Accionada em CMOS e BiCMOS por uma estrutura de quatro camadas PNPN que sob excitação pode ligar um dispositivo semelhante a um tiristor, conforme ilustrado na Figura 2.7. Um travamento cria um caminho de baixa resistência entre a fonte de alimentação e o terra. Conseqüentemente, uma corrente destrutiva de alta magnitude pode ser produzida em tal caminho, o que pode danificar o dispositivo permanentemente.

Figura 2.7–Esquema representativo do Tiristor formado no CMOS.

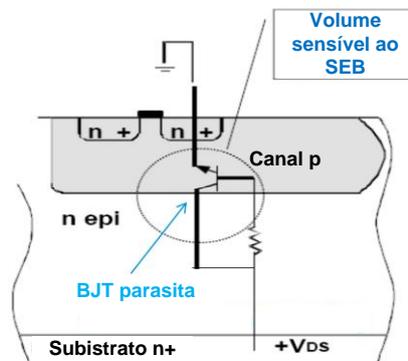


Fonte: Polo (2017).

Single Event Snapback (SESB) - Ocorre em transistores N-MOS e SOI, onde uma partícula ao atingir a região do dreno, cria um caminho de alta corrente para a fonte, a corrente induzida pode ser alta o suficiente para causar uma multiplicação de avalanche. Se esta condição permanecer longa o suficiente, um pulso de corrente de amplitude suficientemente alta será produzido e o transistor será ligado inadvertidamente. A corrente de alta amplitude resultante pode causar danos permanentes ao dispositivo.

Single Event Burnout (SEB) - Alta corrente localizada no corpo do dispositivo ativa o transistor bipolar parasítico, conforme ilustrado na Figura 2.8, criando um caminho contínuo entre dreno e fonte. O dispositivo sofrerá superaquecimento local e poderá ocorrer falha se a corrente não for removida rapidamente. Os BJTs de potência e os FETs são sensíveis ao SEB, os dispositivos com baixa dopagem são mais suscetíveis.

Figura 2.8–Esquema representativo do transistor bipolar parasítico.



Fonte: Polo (2017).

Single Event Gate Rupture (SEGR) - Geralmente causada por SEB em MOSFETs de potência quando íons pesados atingem a região da porta, dependendo do ângulo e do campo elétrico no óxido da porta. O SEGR forma um caminho condutor que resulta em correntes de fuga na porta e no dreno, o que resulta em superaquecimento local e causa danos irreversíveis na região da porta do dispositivo.

Single Event Hard Error (SEHE) - Corresponde à incapacidade de mudança de estado em células de memória, devido à trilha de ionização causada pela partícula incidente. Este efeito é considerado como semi-permanente e também é chamado de "bit preso" na memória.

Não destrutivos:

Single EffectTransient (SET) - Efeito que gera um sinal espúrio no semicondutor, disparado por uma corrente de curto prazo causada pelos pares elétron-lacuna gerados pela incidência da partícula, podendo se propagar através dos estágios subsequentes do circuito e induzir um transiente de tensão, levando à reversão nos estados lógicos. O pulso de curto prazo pode ser eliminado se as cargas depositadas forem removidas, fornecendo um caminho de condução alternativo.

Single EventFunctionalInterrupt (SEFI) - Com a incidência da partícula ionizante ocorre o disparo de um modo anormal, como modo de teste ou modo de redefinição, que pode fazer com que os ICs percam temporariamente suas funcionalidades pretendidas. Dispositivos complexos são mais propensos a exibir SEFIs.

Single EventUpset (SEU) - Corresponde a uma mudança de estado lógico ou tensão em circuitos digitais causada por uma partícula energizada que colide com o nodo sensível de um micro-circuito, tal como chips de memória, dispositivos de comunicação, circuitos de potência ou microprocessadores.

Multiple Bit Upset (MBU) - É similar ou SEU, porém causa a mudança de estado de mais de um bit de um componente digital.

2.2 Sistemas espaciais

O sistema espacial é desenvolvido para cumprir uma determinada missão em específico, definida pelos *Stakeholders*. O sistema corresponde aos diversos componentes e materiais que compõem os subsistemas que interagem entre si de forma organizada com propriedades emergentes entregando funções e objetivos.

De acordo com a ECSS-S-ST-00-01C (2012), são representados os termos genéricos na tabela abaixo (Tabela 2.2), onde inicia-se pelo mais alto nível de abstração, e desce para os níveis inferiores.

Tabela 2.2 – Definição dos níveis de abstração sistêmicas.

Termo	Significado
Segmento	Conjunto de elementos ou combinação de sistemas que preenche um subconjunto principal e autônomo dos objetivos da missão espacial. Exemplos são segmento espacial, segmento terrestre, segmento de lançamento e segmento de suporte.
Sistema	Corresponde a um conjunto de funções inter-relacionadas ou interagentes constituídas para atingir um objetivo específico.
Elemento	Combinação de equipamento integrado, componentes e peças. Um elemento preenche um subconjunto principal, autônomo de subsistema, dos objetivos de um segmento.
Subsistema	Parte de um sistema que cumpre uma ou mais das suas funções.
Equipamento	Conjunto integrado de peças e componentes. Um equipamento realiza uma função específica; é autônomo e classificado como tal para fins de fabricação, aquisição, desenhos, especificação, armazenamento, emissão, manutenção ou uso separados. O termo "unidade" é sinônimo do termo "equipamento"
Componente	Conjunto de materiais, montados de acordo com processos definidos e controlados, que não podem ser desmontados sem destruir sua capacidade e que executa uma função simples que pode ser avaliada em relação aos requisitos de desempenho esperados. O termo "componente" é preferido para dispositivos EEE.
Parte	Sinônimo a componente. Sendo o termo "parte" preferido quando se refere a dispositivos puramente mecânicos.
Material	Substâncias brutas, semi-acabadas ou acabadas (gasosas, líquidas, sólidas), com determinadas características das quais é efetuada a transformação num componente ou peça.

Fonte: Adaptado de ECSS-S-ST-00-01 (2012).

O sistema espacial corresponde a um sistema que contém pelo menos um segmento espaço, um solo ou um lançamento. Geralmente, um sistema espacial é composto de todos os três segmentos e é suportado por um segmento de missão (ECSS-S-ST-00-01, 2012). Na Tabela 2.3 são definidos os seguimentos.

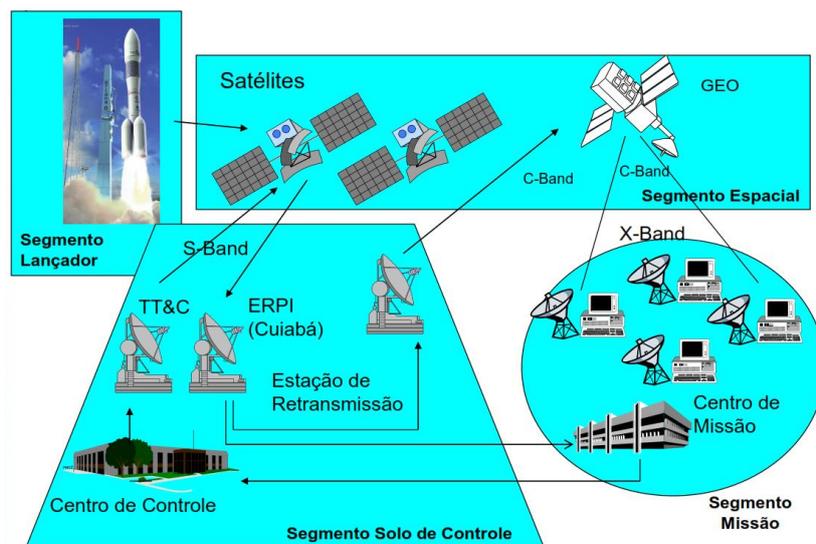
Tabela 2.3 – Definição dos segmentos espaciais.

Termo	Significado
Segmento espacial	Parte de um sistema espacial, colocado no espaço, para cumprir os objetivos da missão espacial
Segmento solo	Parte de um sistema espacial, localizado no solo, que monitora e controla o(s) elemento(s) do segmento espacial. Um segmento terrestre é composto de um ou mais elementos de segmento terrestre.
Segmento de lançamento	Parte de um sistema espacial que é usado para transportar elemento(s) de segmento espacial para o espaço. Um segmento de lançamento é composto por um ou mais elementos do segmento de lançamento. Um segmento de lançamento é composto pelo lançador integrado e pelas instalações necessárias para fabricar, testar e fornecer elementos de lançador.
Segmento de missão ou de suporte	Infra-estrutura genérica e serviços usados para apoiar o desenvolvimento e a operação de elementos do sistema espacial. Exemplos são estações terrestres e redes associadas, instalações de computação em órbita, centros de teste, centro de astronautas, instalações de lançamento. Os itens podem fazer parte de outros segmentos durante o seu desenvolvimento e, posteriormente, tornar-se parte do segmento de suporte quando utilizados, por exemplo, uma rede de rastreamento.

Fonte: Adaptado de ECSS-S-ST-00-01 (2012).

A Figura 2.9 ilustra a relação entre os segmentos, onde somente com o conjunto deles pode-se efetuar a missão pretendida.

Figura 2.9–Divisão dos segmentos do sistema espacial.



Fonte: Manea (2018a).

O segmento espaço possui seu custo agregado elevado, devido ao alto custo do lançamento e devido a complexidade de seus sistemas, que devem possuir uma boa confiabilidade. A estrutura do segmento solo é comum para os demais satélites em operação, então normalmente já estão em operação normal.

Por esta razão todas as atividades espaciais são cercadas de muito cuidado, uma falha pode representar o fim da missão. Para todo o processo de desenvolvimento do sistema espacial, deve-se ter um controle rigoroso do atendimento dos requisitos. Cada componente deve atender as especificações para a integração no sistema.

Os satélites podem ser decompostos em duas partes principais, módulo de serviço ou plataforma e módulo de carga útil. Onde o módulo de serviço corresponde aos equipamentos e componentes que determinam e mantém as condições operacionais do satélite; e o módulo de carga útil corresponde aos equipamentos e componentes específicos para executar a particular missão que o satélite foi desenvolvido (MANEA, 2018a).A composição dos subsistemas do módulo de serviço estão na Tabela 2.3.

Nos subsistemas estão equipamentos e componentes eletrônicos desenvolvidos na própria instituição ou pela indústria.

Com o avanço da tecnologia os componentes e equipamentos estão cada vez ficando menores, mais complexos e com o custo mais baixo. Com isso, os satélites, que até pouco tempo eram desenvolvidos somente pelas instituições aeroespaciais governamentais, vêm perdendo espaço para as empresas e universidades através, principalmente, de nano satélites que por serem mais leves, seus custos de lançamento são significativamente menores que dos satélites convencionais, podendo ser através de veículos lançadores menores e com o custo menor, além de poderem ser lançados em conjunto. Por esta acessibilidade e o interesse crescente na utilização de sistemas que requerem o segmento espacial, os nano satélites estão cada vez mais ganhando visibilidade e permitindo profissionais e estudantes sem muitos recursos desenvolverem sistemas espaciais (BERK, 2013).

Tabela 2.4 – Subsistemas do módulo de serviço.

Subsistema	Função
Subsistema de Controle de Atitude (ACS)	Controlar os eixos do satélite garantindo um erro máximo e a estabilidade do satélite, de acordo com as exigências da missão.
Subsistema de Suprimento de Energia	Produzir energia elétrica continuamente, armazenar energia, regular e converter as tensões requeridas pelos diversos componentes do satélite.
Subsistema de Telecomunicação de Serviço (TT&C)	Enviar dados de telemetria para o solo e receber do solo telecomandos que alteram a configuração. Permitir a realização de medidas de distância e de velocidade entre o satélite e a estação de rastreamento e controle.
Subsistema de Gestão de Bordo	Coletar informações de estado dos diversos componentes de bordo e enviá-las como Telemetria para o solo através do subsistema de TT&C. Receber os Telecomandos oriundos do solo através do subsistema de TT&C, executá-las diretamente (em tempo real ou diferenciado) ou enviá-los aos componentes inteligentes de bordo. Gere os diversos modos de operação do satélite.
Subsistema de Estrutura e Mecanismos	Fornecer o suporte mecânico e de movimento para os componentes do satélite. Também oferece proteção contra as vibrações de lançamento e evita acoplamentos com o veículo lançador.
Subsistema de Controle Térmico	Manter os equipamentos dentro de suas faixas nominais de temperatura, dentro dos limites de estabilidade e gradientes.
Subsistema de Propulsão	Fornecer o empuxo necessário para o controle de órbita e produzir os torques necessários para o controle de atitude. Normalmente é controlado pelo ACS.

Fonte: Adaptado de Manea (2018a).

2.2.1 Missões espaciais

A missão espacial corresponde ao objetivo pretendido, podendo ser um ou mais, relacionados aos pedidos estabelecidos pelos *stakeholders* para o sistema a ser desenvolvido. Os satélites ou outros artefatos colocados no espaço são os meios para atingir o(s) objetivo(s) e efetuar a missão. (MANEA, 2018a).

Tabela 2.5 – Categorias de missões espaciais.

Missão		Definição
Observação da Terra	Sensoriamento remoto	Observação da superfície da Terra para o estudo de elementos da geografia (natural e artificial) e da vegetação.
	Meteorologia	Observação dos elementos relativos ao clima, tais como nuvens, ventos e temperaturas.
	Oceanografia	Observação de elementos que caracterizam a dinâmica dos oceanos tais como correntes, temperaturas e elevação de sua superfície.
	Espionagem	Observação de instalações militares, industriais e estratégicas, bem como da movimentação de tropas e equipamentos.
	Alarme e reconhecimento	Descoberta de incêndios e acidentes nucleares.
Observação astronômica	Objetivam posicionar telescópios em diversas órbitas para operar em diversos comprimento de onda.	
Comunicações	Telecomunicações a partir da órbita geoestacionária: telefonia fixa, transmissão de dados, rádio e televisão.	
	Telecomunicações a partir de órbitas baixas: telefonia celular mundial, pager mundial, transmissão de dados.	
	Navegação por satélite (satélites do tipo GPS, Galileo e Glonass).	
	Resgate - aviões, navios, veículos terrestres e pessoas.	
	Satélites de coleta de dados.	
Recuperáveis	Executam experimentos de curta duração e retornam à superfície terrestre.	
Militares	Têm o propósito de contribuir por meio de satélites com sistemas de defesa para a execução de missões de interceptação e destruição.	
Científicas	Observação astronômica, medidas do campo magnético da Terra, química da atmosfera, efeitos da microgravidade, potencial terrestre, atividade solar e meio ambiente espacial.	

Fonte: Adaptado de Manea (2018a).

A Tabela 2.5 mostra as categorias de missões espaciais observadas. Dependendo das missões há diferentes critérios de necessidades, interferindo nas decisões de escolhas e desenvolvimento.

Por meio da missão se inicia o projeto, onde os *stakeholders* estarão interessados em quanto da missão foi cumprida e quanto custou para isso. Desta forma, as premissas básicas serão o custo, tempo de desenvolvimento e operação, qualidade e confiabilidade.

Lembrando que através do desenvolvimento do projeto há uma série de benefícios, como a capacitação de pessoas e desenvolvimento de recursos materiais, porém também podem ocorrer prejuízos e perdas.

2.2.2 Engenharia de sistemas

Devido à complexidade do sistema espacial, mesmo para satélites mais simples, o projeto deve ser abordado de forma sistêmica. Neste contexto, a Engenharia de Sistemas é a arte e a ciência de desenvolver um sistema operacional capaz de atender aos requisitos dentro de restrições impostas (NASA, 2016).

A Engenharia de Sistemas é definida como uma abordagem multidisciplinar e metódica para o projeto, realização, gerenciamento técnico, operações e descarte de um sistema. Um sistema por ser a combinação de elementos que funcionam juntos com funções inter-relacionadas, para produzir a capacidade necessária para atender a uma necessidade (NASA, 2016) (ECSS-S-ST-00-01C) deve em todo seu ciclo de vida ser acompanhado pela abordagem da engenharia de sistemas.

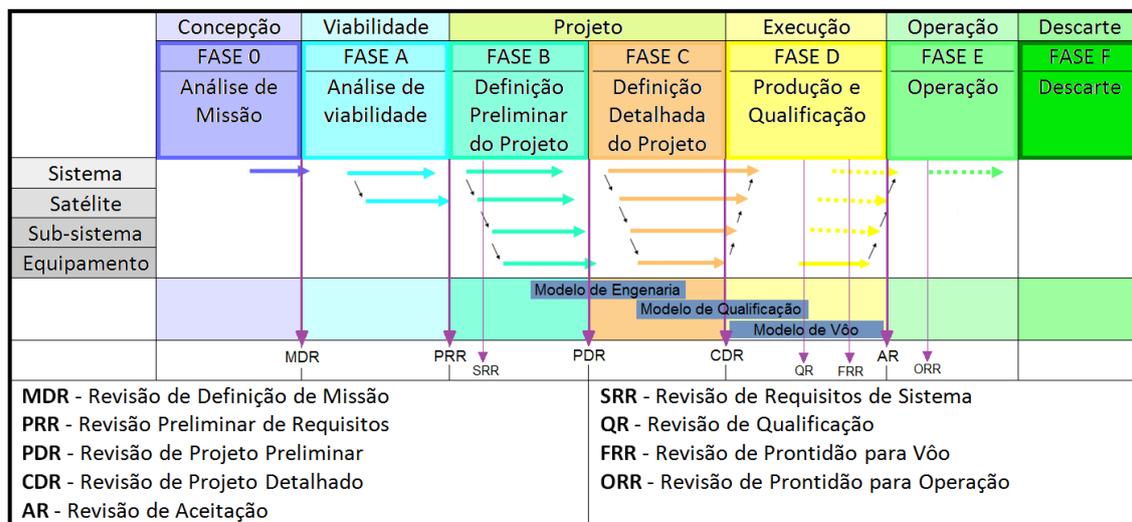
Os elementos incluem todo o hardware, software, equipamento, instalações, pessoal, processos e procedimentos necessários para esse fim. Os resultados incluem qualidades, propriedades, características, funções, comportamento e desempenho do nível do sistema (NASA, 2016).

No presente trabalho nos concentraremos no hardware. Na utilização dos componentes é de extrema importância que estes desempenhem sua função de modo satisfatório pelo tempo esperado da missão.

A missão corresponde a solução do problema, não sendo ligada diretamente a como será implementado, porém a forma da implementação da solução interferirá na missão. O sistema espacial corresponderá há uma parta da missão no seu período de operação e deve estar de acordo com os requisitos e restrições dos *stakeholders*.

O processo de projeto consiste em muitos elementos interdependentes, com diversas interações, em vários estágios. Conforme estipulado pela engenharia de sistemas, o projeto se inicia em alto nível de abstração, de acordo com seu avanço, os níveis de abstração descem, porém podem ocorrer inconformidades e mudanças. Ao integrar o sistema, ocorre o processo inverso de abstração, onde são verificadas as conformidades, e por fim em operação é validado (NASA, 2016). A Figura 2.10 ilustra esse desenvolvimento.

Figura 2.10–Ciclo de vida do sistema espacial, conforme diretrizes do padrão ECSS-M-ST-10C.



Fonte: Adaptado de ECSS-M-ST-10C Rev. 1 (2009).

As fases são bem definidas e em determinados pontos ocorrem as revisões do projeto. Os elementos-chave do planejamento e implementação do projeto e a identificação dos requisitos e produtos de nível superior, em conjunto, proporcionam um planejamento de projetos coerente e integrado (ECSS-M-ST-10C Rev. 1, 2009). Desta forma, é de suma importância o desenvolvimento do projeto em agregação construtiva e compatível do sistema, com a devida sequência de desenvolvimento.

2.3 Engenharia de componentes

A Engenharia de componentes se concentra no desenvolvimento das partes, de modo a otimizá-las. Para o presente trabalho existe o direcionamento para os componentes discretos, mas de forma a abranger o sistema para as soluções aplicáveis e o cumprimento da missão.

2.3.1 Componentes semicondutores

O sistema espacial é constituído a partir dos componentes eletrônicos discretos e/ou integrados. No presente trabalho será observado os transistores, que representam a base da eletrônica moderna. Este padrão também aplica-se aos demais componentes semicondutores.

2.3.1.1 Qualidade e confiabilidade

A qualidade representa a totalidade de características de uma entidade que lhe confere a capacidade de satisfazer as necessidades explícitas e implícitas do consumidor (BRITO, 2018).

Na área espacial, conforme a (NBR 14857-2:2002), a disciplina denominada "Garantia do Produto dedica-se ao estudo, planejamento e implementação de atividades destinadas a assegurar que o projeto, controles, métodos e técnicas de um projeto resultem num nível satisfatório de qualidade no produto".

Neste aspecto a qualidade possui uma grande abrangência para determinação dos parâmetros do produto e equipamento.

Para este trabalho o aspecto mais importante será a confiabilidade, porque se relacionará ao componente COTS que estará em operação integrado ao sistema, onde este não sofrerá manutenção nem será recuperado.

A confiabilidade corresponde, conforme a (NBR 5462:1994), a "capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo".

Neste sentido a confiabilidade refere-se a três parâmetros básicos, (i) a probabilidade, relacionando-se a certeza do item estar desempenhando sua

função, (ii) o tempo estipulado pela missão e (iii) as condições ambientais definidas, ou seja, de acordo com o estresse aplicado ao item.

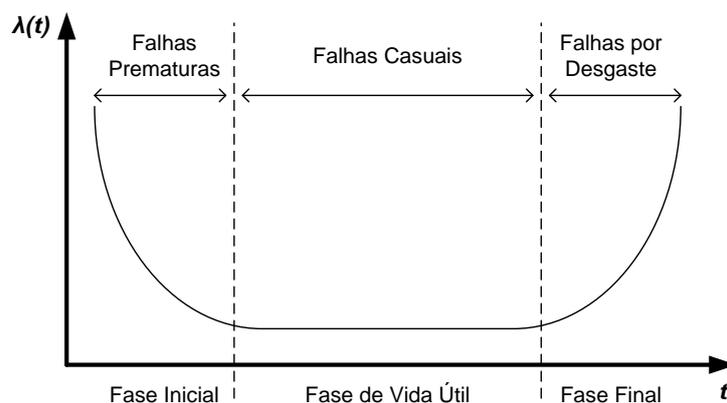
No momento que o equipamento deixa de desempenhar sua função requerida, este encontra-se no estado de falha. Neste aspecto o momento ou os critérios que definem uma falha devem ser nitidamente estabelecidos (OLIVEIRA, 2013).

O Tempo Médio Entre Falhas (MTBF - Mean Time Between Failures) é a média aritmética dos tempos decorridos entre as falhas de um equipamento durante sua operação. A Taxa de Falhas (λ) corresponde ao inverso do MTBF. E para o cálculo da função da confiabilidade ($R(t)$) fica conforme a Equação 2.3, admitindo que para população de componentes a taxa de falha seja constante, onde o t representa o tempo para projeção (MARTINS; SOUZA; RABELLO, 2013).

$$R(t) = e^{-\lambda.t} \quad (2.3)$$

A maioria dos componentes eletrônicos possuem o modelo de ciclo de vida conhecido como “curva da banheira”, que representa as taxas de falha (λ) ao longo do tempo (t) conforme pode ser visto na Figura 2.11.

Figura 2.11–Curva da Banheira.



Fonte: Adaptado de Lafraia (2001).

A curva da banheira é dividida em três fases, a inicial é relativamente curta e com numerosas falhas, normalmente está relacionada com problemas associados aos processos de fabricação e montagem ou a matéria-prima da fabricação do produto (FELIX, 2006; OLIVEIRA, 2013). Estas são as falhas operacionais menos custosas de reparar, no entanto o reparo fica consideravelmente mais caro no nível do sistema do que no nível do componente (WALL; SINNADURAI, 1998).

Na fase seguinte as taxas de falha se estabilizam e são denominadas falhas aleatórias, normalmente originam-se de carregamentos inevitáveis e inesperados, dificilmente sendo devido a defeitos inerentes ao equipamento (FELIX, 2006; MARTINS; SOUZA; RABELLO, 2013).

Por último, na fase final, nota-se o aumento crescente de falhas, em função do próprio desgaste do equipamento com o acúmulo de interferências externas e internas ao equipamento. O desgaste depende dos materiais, tecnologias e regras de projeto; podendo levar a falhas prematuras ou aumento da expectativa de vida (WALL; SINNADURAI, 1998).

Os componentes eletrônicos usados em um satélite estão sujeitos a degradação, principalmente por meios térmicos, mecânicos e radiação. Entre estes, o estresse com menos informação é devido à radiação espacial (RABELLO; MANEA; SOUZA, 2011). Existem dificuldades de realizar testes de solo ou mesmo de espaço devido ao custo, falta de partes construtivas do componente, restrições técnicas e comerciais (RABELLO; MANEA; SOUZA, 2011).

De acordo com NASA (Practice No. Pd-Ed-1260, 1996) existe uma grande dificuldade de quantificar a suscetibilidade à radiação de um componente eletrônico, porque existem pelo menos cinco fatores que podem contribuir para essa incerteza: 1) variação estatística nos componentes de uma linha de produção específica, 2) o tipo de componente, 3) processo de fabricação, 4) projeto do circuito e 5) aplicação do circuito.

Essas incertezas são difíceis de quantificar e o único método confiável para determinar a resistência à radiação é o campo de teste em condições que

simulam o ambiente espacial (RABELLO; MANEA; SOUZA, 2011). Geralmente, as taxas de falha dos componentes eletrônicos não incluem os efeitos da radiação (a menos que esses dados sejam adquiridos, e geralmente sofrem restrições com os Regulamentos Internacionais de Tráfego em Armas - ITAR / EUA) (RABELLO; MANEA; SOUZA, 2011).

2.3.1.2 História dos componentes eletrônicos

Para entender o contexto da utilização dos componentes eletrônicos é importante entender sua história. A indústria eletroeletrônica, desde seu surgimento passou por algumas mudanças. Conforme Zedníček (2016), pode-se distinguir cerca de quatro eras fundamentais na história da indústria eletroeletrônica com diferentes fatores-chave que influenciaram fortemente o comportamento “típico” da entidade em toda a cadeia de suprimentos naquele momento conforme a Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Eras da indústria eletrônica

Eras da indústria eletrônica	Definição
Pioneiros (~1800 - ~1920)	Desde as primeiras descobertas e experiências de indivíduos até uma produção “real” por empresas.
Militar, Estado, Espacial (~20 - ~70)	A indústria eletrônica é impulsionada por ordens de necessidades de competição militar, Estado e espacial.
Empresas (~70 - 90)	Automação industrial, PCs para uso comercial, etc. estão dominando os pedidos e requisitos do setor da indústria eletrônica.
Indivíduos (~90 - hoje)	PCs pessoais, DCR, celulares, etc., indivíduos e seu poder de compra estão controlando a indústria

Fonte: Zedníček (2016).

O primeiro mercado "real" foi lentamente desenvolvido durante o início do século XX, quando as descobertas no campo da eletricidade encontraram suas aplicações práticas de uso diário(ZEDNÍČEK, 2016).

Com o início das Guerras Mundiais, ocorreu o aceleração do desenvolvimento e a fabricação de novos dispositivos elétricos e requisitos para componentes eletrônicos. Os principais impulsionadores para a indústria naquela época eram ordens de Estados. Em seguida com a Guerra Fria iniciaram a competição espacial. As necessidades de aplicações espaciais

tornaram-se significativamente influentes, incluindo requisitos para os dispositivos e componentes eletrônicos espaciais (ZEDNÍCEK, 2016).

Durante os anos 70, os principais consumidores da indústria eletrônica mudaram passo a passo para os negócios, máquinas industriais, PCs de escritório, controladores, automação, etc. A indústria espacial também, sob o clima político mais quente, não era mais o principal cliente final, com poder de decisão chave para definir as tendências e necessidades para o mercado de componentes de volume de massa (ZEDNÍCEK,2016).

Dos anos 90 até os dias de hoje, os dispositivos eletrônicos individuais, como PCs pessoais, notebooks, câmeras digitais, telefones celulares etc., começaram a dominar claramente as necessidades de produção de alto volume. A mudança do poder para “consumidores individuais” causou uma mudança drástica no modelo de negócios. Os impulsionadores do “sucesso do mercado de massa” tornaram-se o custo, alcançado pela alta flexibilidade, tempo curto para o mercado, produção de alto volume com alto rendimento (ZEDNÍCEK, 2016).

Como consequência começou-se a declinar a influência da indústria espacial sobre os fabricantes globais, mas SCM (*SpecialistComponentManufacturers* - Fabricantes de Componentes Especializados) tornaram-se de importância crítica, trazendo inovações, flexibilidade e soluções especiais (ZEDNÍCEK, 2016).

Porém mesmo com as SCMs pode-se haver a necessidade da utilização de COTS por parte direta da indústria aeroespacial, sendo os principais fatores a disponibilidade para aquisição e a evolução tecnológica muito acelerada, pois normalmente para o componente ser classificado como de uso espacial demora-se um tempo, e o desempenho é a principal característica desse avanço. Para as missões mais disruptivas, estar no ápice da tecnologia é um fator crítico (PIGNOL,2010).

2.3.1.3 Componentes espaciais

Os componentes de classe espacial ou endurecidos à radiação (*radhardened components*) são projetados por seu fabricante para fornecer desempenho específico em ambiente de radiação. Isto é conseguido geralmente por projeto do componente ou realizando determinadas alterações de processo no nível de fundição de silício, fabricação com rigoroso controle de qualidade, incluindo testes periódicos à dose de radiação nominal e triagem ambiental em nível parcial para defeitos latentes e mortalidade infantil (SINCLAIR, 2013).

Os componentes de classe espacial tendem a ter as seguintes propriedades de acordo com Sinclair (2013):

- Dose nominal de radiação de 100 krad a superior de 1 Mrad;
- Sem SEL, devido à desativação de estruturas SCR parasitas;
- Efeitos de evento único caracterizados;
- Pacotes herméticos;
- Baixo grau de integração e tecnologia madura (~ 10 anos atrás da vanguarda);
- Nenhum estoque de fornecedor e prazos de entrega longos;
- Alto custo de componente.

Além destas questões citadas outro fator importante é o embargo tecnológico que países produtores desses componentes impõem sobre os países que têm interesse na aquisição, mas são impossibilitados.

Contudo, mesmo com a possibilidade do uso destes componentes endurecidos à radiação, estes provocam o aumento do custo do projeto devido à baixa densidade de produção e aos longos prazos de entrega que levam a longos ciclos de projeto de engenharia / construção e desempenho relativamente baixo quando comparados aos projetos comerciais (SINCLAIR, 2013).

Para ambientes com doses muito altas, como, órbitas de alta altitude, naves espaciais operando perto dos planetas externos e dispositivos militares

destinados a sobreviver à guerra nuclear, os componentes endurecidos a radiação se fazem necessários; assim como para programas extremamente avessos ao risco, como vôos espaciais humanos, onde provar a segurança de outros componentes seria absurdamente caro (SINCLAIR, 2013).

2.3.1.4 Componentes COTS

A ideia de adquirir produtos COTS para aplicações militares iniciou-se em meados da década de 70, o Departamento de Defesa (DoD) formou vários comitês de especialistas para estudar as práticas de aquisição militar, mas foram amplamente ignoradas. No final dos anos 80, a maior oportunidade de mudança ocorreu devido às severas reduções nos orçamentos militares. O Departamento de Defesa teve que encontrar maneiras de reduzir os custos de seus sistemas ou poderia ter o risco do Congresso proibir a aquisição de novos sistemas. As práticas de COTS foram consideradas mais baratas do que procedimentos militares equivalentes e, portanto, prováveis candidatos para ajudar o DoD a alcançar seus objetivos (AMRAM, 1996).

Em 1994, o Secretário de Defesa dos Estados Unidos, William Perry, emitiu uma diretiva que priorizou o uso de componentes COTS em aplicações militares pela primeira vez. O movimento marcou uma verdadeira transformação da filosofia de aquisição militar. Embora o DoD precisasse anteriormente de uma renúncia de alto nível para usar os padrões comerciais, agora seria necessário usar padrões militares somente na aquisição de componentes sensíveis à radiação, que foram especificamente citados como estando isentos da diretiva de isenção (AMRAM, 1996).

Embora muitos estivessem preocupados com uma possível queda na qualidade e confiabilidade, o tempo provou que esses temores eram infundados. Os componentes COTS agora são usados em todos os ramos das Forças Armadas com grande sucesso (BLILEY TECHNOLOGIES, 2017).

Neste contexto, fatores relativos a custos e disponibilidade, tem impulsionado o uso desses componentes incluindo os sensíveis à radiação na área espacial. Porém é necessário ser consistente com os critérios e padrões adotados para evitar imprevistos e gerar danos maiores.

Alguns dos componentes comerciais irão falhar antes de 1 krad, porém a maioria desses componentes são tolerante à radiação de 5 krad e muitos são tolerantes à radiação de 20 krad ou mais (SINCLAIR, 2013). Sem testes, é não é possível prever exatamente em qual categoria uma peça se encaixará.

Sendo que os fornecedores comerciais podem mudar seus processos de fabricação ou até a fundição de silício que produz suas peças. Uma peça específica fabricada em um período pode ser tolerante à radiação, enquanto as peças fabricadas posteriormente podem não ser (SINCLAIR, 2013; MANEA, 2018b).

O que acontece, são diversas formas da utilização dos componentes COTS de acordo com os critérios dos usuários dos componentes. Dentre as formas estão principalmente o uso cuidadoso de COTS (*Careful COTS*) e o compre e use (*Buy-and-Fly*).

Projetos *Careful COTS* são adequados para muitas missões de satélites, onde uma alta probabilidade de sucesso da missão é necessária e acesso a vanguarda da tecnologia comercial é crítica. Eles não são baratos e podem estar fora do alcance de missões de educação ou de demonstração (SINCLAIR, 2013).

O *Buy-and-Fly* é adequado para missões com dose de radiação extremamente baixa, como órbitas baixas ou tempo de vida curto, e também para missões com custos limitados em que o risco de falha é tolerado (SINCLAIR, 2013).

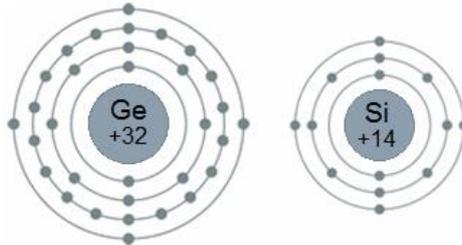
2.3.1.5 Semicondutores

O princípio de todos os transistores está nos semicondutores, a partir dos quais são construídos, além de também serem a matéria prima para diversas outras tecnologias.

Os condutores possuem poucos elétrons na camada de valência, o que gera facilidade para perde-los, os isolantes, o oposto, possuem muitos elétrons em sua camada de valência, facilitando para recebê-los. Os semicondutores possuem propriedades elétricas entre os condutores e os isolantes com quatro

elétrons em sua camada de valência. Os dois principais semicondutores utilizados na eletrônica são o germânio e o silício conforme mostrado na Figura 2.12, está representado a sua estrutura atômica. Para a estabilidade, necessitam de oito elétrons em sua camada de valência, o que é conseguido pela ligação covalente entre os átomos formando um cristal estável.

Figura 2.12–Estrutura atômica do Germânio (Ge) e do Silício (Si).

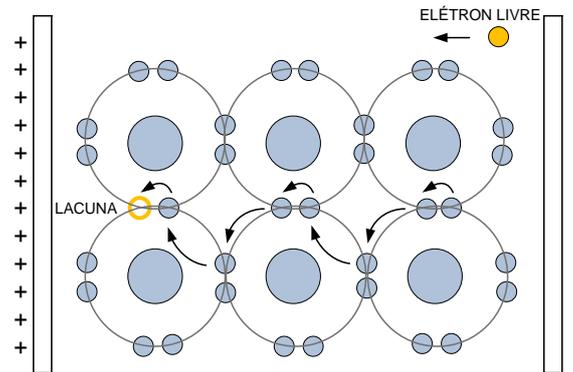


Fonte: Produção do Autor.

Quando a temperatura ambiente está acima do zero absoluto, ocorre uma agitação no cristal semicondutor, onde a temperatura é proporcional a vibração mecânica, podendo deslocar elétrons da órbita de valência para uma órbita superior pelo ganho de energia, tornando-se elétron livre. Com a saída do elétron cria uma lacuna, que por sua vez atrai e captura outro elétron mais próximo, o que é chamado de recombinação, este processo varia de alguns nanossegundos até vários microssegundos, dependendo de alguns fatores (MALVINO, 2007). A existência de lacunas é o diferencial dos semicondutores em relação aos condutores, possibilitando diversas aplicações aos semicondutores.

Ocorrem dois tipos de fluxos de portadores em um semicondutor intrínseco, o fluxo de elétrons livres através da banda de condução e o fluxo de lacunas através da banda de valência. Conforme mostrado na Figura 2.13.

Figura 2.13—Fluxo de portadores em um semiconductor intrínseco.



Fonte: Produção do Autor.

Como pode-se observar na figura acima as lacunas serão sempre preenchidas por um elétron, se movimentando pela recombinação, enquanto os elétrons livres possuem maior mobilidade elétrica, movendo-se nas camadas mais energéticas.

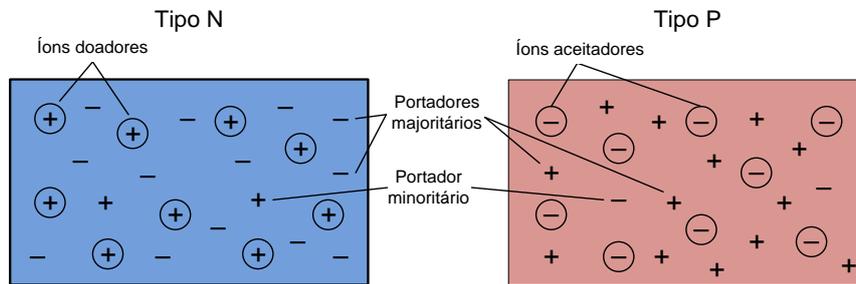
Uma forma de aumentar a condutividade de um semiconductor é pelo processo de dopagem. O processo consiste em fundir um cristal intrínseco de silício ou germânio, quebrando as ligações covalentes para assim misturar átomos de impureza a estrutura do material, transformando-o em um semiconductor extrínseco, o que altera sua condutividade elétrica. Controlando a quantidade de impureza, há o controle preciso das propriedades do semiconductor (MALVINO, 2007).

Material tipo N: semiconductor dopado com átomos pentavalentes, arsênio, antimônio, bismuto e fósforo, apresentam elétrons como portadores majoritários, e lacunas como portadores minoritários.

Material tipo P: semiconductor dopado com átomos trivalentes, alumínio, boro, gálio, índio e tálio, apresentam lacunas como portadores majoritários, e elétrons como portadores minoritários.

A Figura 2.14 ilustra os portadores majoritários e minoritários dos materiais de dopagem tipo N e P.

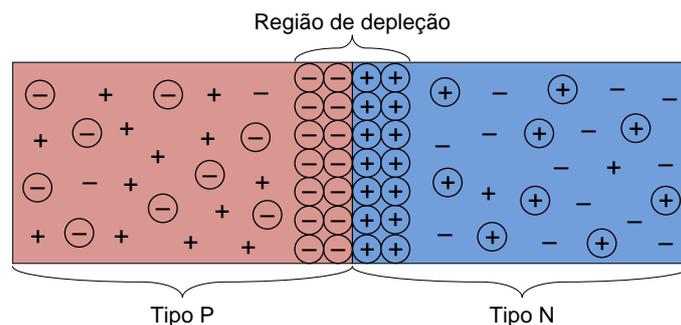
Figura 2.14–Portadores nos semicondutores tipo P e N.



Fonte: Produção do Autor.

A junção dos materiais P e N formam uma camada de depleção, região vazia de portadores de carga, devido às combinações de elétrons com lacunas na região de interface, criando uma barreira de potencial, conforme a Figura 2.15.

Figura 2.15–Junção dos materiais semicondutores tipo P e N.



Fonte: Produção do Autor.

Na Polarização direta, a diferença de potencial da fonte conduz as lacunas e os elétrons livres em direção à junção. Se essa tensão for menor que a barreira de potencial, os elétrons livres não possuem energia suficiente para penetrar na camada de depleção. Quando a tensão da fonte for maior que a barreira de potencial, os elétrons livres têm energia suficiente para passar pela camada de depleção e recombinar com as lacunas (MALVINO, 2007).

Já na polarização reversa ocorre o afastamento tanto dos elétrons como das lacunas da junção, alargando a camada de depleção. Porém há uma pequena corrente com a polarização reversa, causada pela própria energia térmica e por impurezas da superfície e imperfeições na estrutura do cristal. Acima de uma

determinada tensão de polarização reversa ocorre a ruptura da junção PN, ao atingi-la, uma grande quantidade de portadores minoritários aparece na camada de depleção e a junção PN conduz intensamente(MALVINO,2007).

2.3.1.5.1 Materiais dos Semicondutores

A distância entre a banda de valência e a banda de condução é chamada de faixa de energia. Para a energia térmica produzir elétrons livres e lacunas é necessário fornecer aos elétrons de valência energia suficiente para subir à banda de condução. A faixa de energia representa um obstáculo para a energia térmica produzir pares elétron-lacuna. O silício possui uma larga faixa de energia, o que dificulta a energia térmica na sua produção de pares elétron-lacuna na temperatura ambiente (MALVINO, 2007).

Os átomos de germânio por outro lado, possuem uma faixa de energia muito menor do que a do silício, por este motivo a energia térmica produz maior quantidade de pares elétron-lacuna em dispositivos a base de germânio. Em vista disso a corrente inversa excessiva desses dispositivos impede seu uso em larga escala (MALVINO, 2007).

O Arseneto de Gálio (GaAs) também é utilizado na eletrônica, porém não é tão utilizado na indústria por conta de seu alto custo e maior dificuldade de processamento. Trata-se de uma solução de reserva, ou seja, quando não é possível aplicar o silício, a indústria recorre a este material semicondutor. Possui resistência a danos causados por exposição à radiação, luz ultravioleta e umidade, por conta disso, esse material é uma excelente opção para aplicações aeroespaciais.

O Carbeto de Silício (SiC), o Nitreto de Gálio (GaN) e o Diamante, são os principais exemplos de semicondutores de banda larga (WBS, wide band semiconductors) que representam um grupo de novos elementos e compostos que visam superar os limites do silício. Estes elementos e compostos têm melhor desempenho em relação ao manuseio de tensão e potência, possuem menores perdas e maior velocidade de comutação. Estas melhoras são baseadas no fato que os semicondutores de banda larga possuem uma menor concentração de portadores intrínsecos, maior velocidade de deriva de elétrons

saturados, maior campo elétrico de ruptura e maior condutividade térmica do que o silício (BUENO; SILVA, 2014).

Por fim, o Grafeno que é uma estrutura planar do carbono, é outro material que está em estudo e há grande expectativa da sua utilização na eletrônica.

2.3.2 Transistores

Os transistores correspondem a uma peça fundamental dos dispositivos eletrônicos modernos. Suas funções principais são a amplificação e o chaveamento de sinais elétricos.

Este componente é produzido a partir de uma fatia de um semicondutor, chamado de “*wafer*” que possui aproximadamente 0,1mm de espessura. Estas fatias passam então por um complicado processo de fotolitografia que permite fazer a gravação do transistor através de radiação ultravioleta. A forma e dimensões que as regiões vão ter determinam as características básicas de um transistor (MALVINO, 2007).

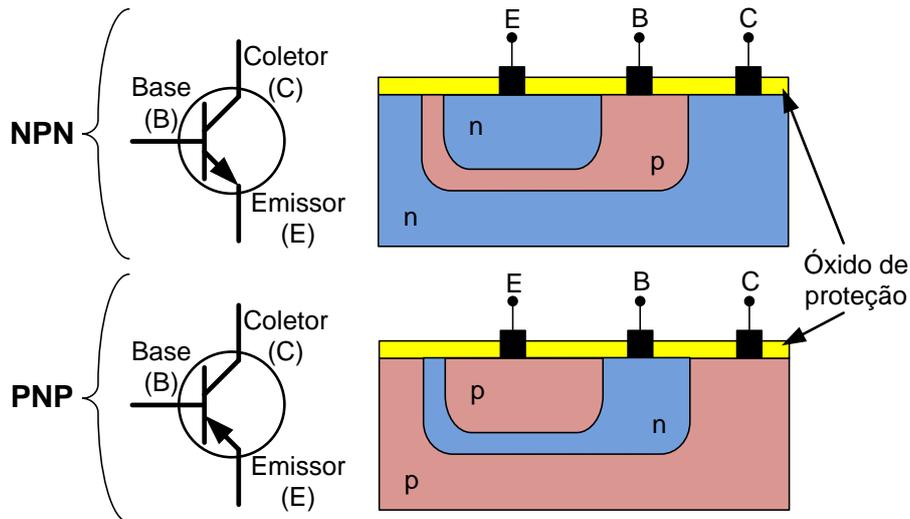
Nos próximos tópicos exploraremos os tipos de transistores mais utilizados.

2.3.2.1 Transistor de Junção Bipolar (BJT)

O transistor de junção bipolar (BJT - *Bipolar Junction Transistor*) foi o primeiro tipo de transistor a ser produzido comercialmente, baseia-se em dois tipos de cargas, elétrons livres e lacunas, daí deriva o seu nome bipolar.

O BJT possui duas camadas de material com dopagem tipo N e uma tipo P, transistor NPN, ou duas do tipo P e uma do tipo N, transistor PNP. Onde estas três camadas são o Coletor, a Base e o Emissor, conforme mostrado na Figura 2.16.

Figura 2.16–Transistor de Junção Bipolar (BJT).



Fonte: Produção do Autor.

O emissor é fortemente dopado, a base é fracamente dopada e o coletor tem dopagem intermediária, porém o coletor é fisicamente a região mais larga e a base a mais estreita das três (MALVINO, 2007).

Como pode-se observar há duas junções no transistor, uma entre emissor e a base e a outra entre o coletor e a base, onde formam duas regiões de depleção, a barreira de potencial é cerca de 0,7V para o transistor de silício e 0,3V para o germânio ambos na temperatura de 25°C. Dessa forma o BJT não polarizado é equivalente a dois diodos de lados opostos em série compartilhando um terminal P ou N. Ao conectar uma fonte de tensão externa no transistor, obtém a circulação de corrente em diferentes partes deste.

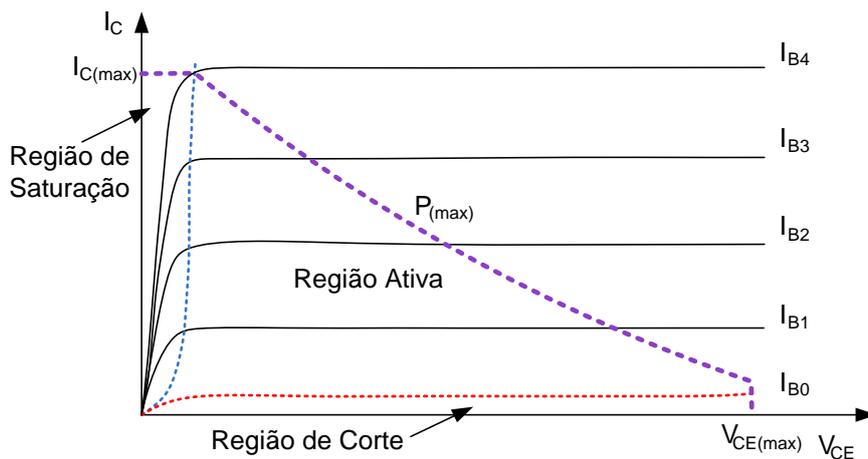
O denominado ganho de corrente do transistor (β), permite a baixa corrente da base controlar uma corrente muito maior no coletor, conforme a Equação 2.4.

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (2.4)$$

Pode-se estabelecer três estados do transistor, corte, saturação e região ativa. Na região ativa pode-se fazer o controle da corrente coletor-emissor pela injeção de corrente na base, funcionando como amplificador. O estado de corte corresponde à faixa onde a corrente do coletor-emissor é zero, e no estado de

saturação a corrente no coletor-emissor permanece máxima mesmo com variação da corrente da base. A utilização do transistor nos seus estados de saturação e corte, de modo a conduzir corrente entre emissor e coletor, é conhecido por operação de chaveamento. A Figura 2.17 mostra graficamente as regiões do transistor.

Figura 2.17–Regiões de operação do BJT.



Fonte: Produção do Autor.

Corte

Se $v_{BE} < 0$ e $v_{BC} < 0$, não tem corrente para percorrer o transistor, então $i_B = i_C = 0$, ou seja, funciona como circuito aberto.

Saturação

Se $v_{BE} > 0$ e $v_{BC} > 0$, o transistor conduz corrente e como a junção coletor-base é polarizada diretamente, tem-se $i_C < \beta i_B$.

Considera-se que o transistor está plenamente saturado quando $v_{CE} \approx 0,2V$.

Região Ativa Direta

Se $v_{BE} > 0$ e $v_{BC} < 0$, o transistor encontra-se na região ativa, onde ocorre a amplificação do sinal da base.

Nesta região $i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$, onde, $V_T =$ tensão térmica $= \frac{kT}{q} \approx 25mV$ em temperatura ambiente; e I_S é inversamente proporcional ao tamanho da base do transistor é diretamente proporcional à área de junção de base-emissor.

A seguir são mostrados os efeitos de cada mecanismo de radiação neste componente.

Dose Ionizante Total - TID

Conforme a dose de radiação ionizante se acumula, as armadilhas ficam presas em áreas não condutoras correspondentes à área de interface. O BJT possui a camada de óxido de proteção mais espessa que os demais transistores, resultando em maior concentração de armadilhas de carga e estados de interface nessas regiões. O resultado paramétrico deste efeito é o aumento da corrente de base e por consequência degradação do ganho, além das fugas de carga (POIZAT, 2017; LÖCHNER, 2011).

A carga presa no óxido de base fará com que a base se reverta parcialmente, resultando em um aumento na corrente do coletor (mesmo se a base não estiver polarizada). Óxidos de qualidade inferior causarão maiores danos aos componentes (POIZAT, 2017). Quando a base é ligada, o aumento na corrente do coletor é menor que o esperado, então o ganho diminui.

A degradação em relação à TID é semelhante para NPN e PNP, porém o PNP é mais sensível, devido ao óxido mais espesso e à alta corrente fluindo perto da interface Si / SiO₂, onde os defeitos estão concentrados (POIZAT, 2017).

O BJT possui Sensibilidade de Baixa Taxa de Dose Aprimorada (*Enhanced Low Dose Rate Sensitivity- ELDRS*), principalmente o PNP. Os transistores discretos dificilmente são afetados por esse fenômeno (POIZAT, 2017), porém deve ser uma preocupação ao estar integrado aos dispositivos.

Dose de Dano de Deslocamento - DDD

Como o TID, o DDD causa a redução de ganho e aumento de corrente de fuga nos transistores bipolares devido à degradação da estrutura cristalina do material. Os transistores bipolares PNP também são os mais afetados por esse mecanismo pelos mesmos motivos que no TID (LÖCHNER, 2011).

Evento de Efeito Único - SEE

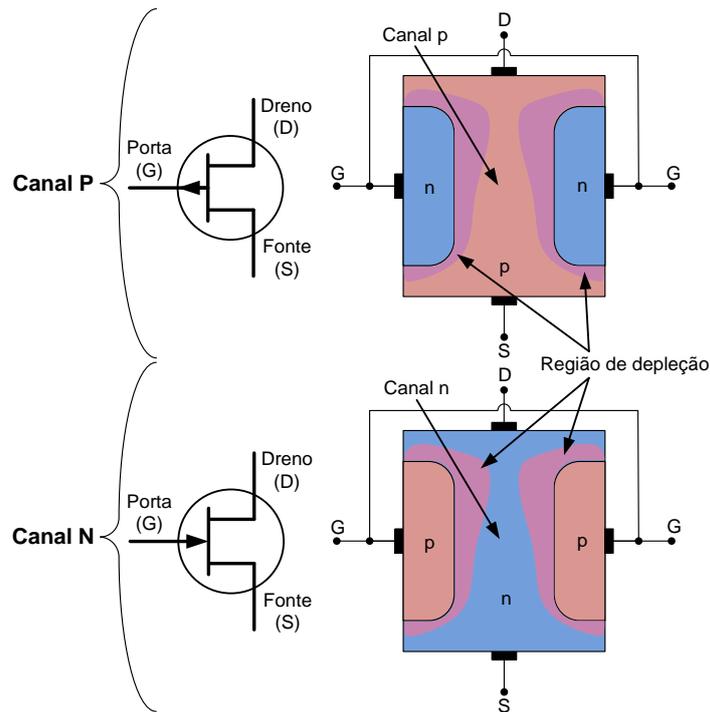
Para o SEE em BJTs é observado SEB, SET e SEU (ECSS-E-ST-10-12C, 2008). Em operação analógica será observado o SEB, e digital os três.

2.3.2.2 Transistor de Efeito de Campo de Junção (JFET)

O transistor de efeito de campo de junção, abreviado por JFET (Junction Field-Effect Transistor), diferente do BJT que é controlado por corrente, os transistores de efeito de campo, FETs (Field-Effect Transistor) – JFET e MOSFET, que será visto a frente – são controlados por tensão. Também diferentemente do BJT, os FETs são dispositivos unipolares, ou seja, dependem somente da condução realizada por elétrons (canal n) ou por lacunas (canal p). Para a maioria das aplicações lineares, o BJT é preferido, devido à maior sensibilidade às variações de sinal deste, porém há algumas aplicações lineares em que o FET é a melhor escolha principalmente devido à alta impedância de entrada, com valores superiores a $10^6\Omega$. Além do mais, o FET é preferido para a maior parte das aplicações em chaveamento, devido à não existência de portadores minoritários em um FET, podendo entrar em corte mais rápido visto que não há carga armazenada para ser removida da área de junção. Outros fatores importantes do FET em relação ao BJT são, maior resistência a temperaturas mais elevadas e possuem tipicamente o tamanho bem menor.

A estrutura do JFET consiste em uma barra de material semiconductor com uma dopagem, envolvido no centro com o semiconductor de dopagem oposta. A região central é chamada de canal, onde faz o controle da corrente em seu fluxo. A Figura 2.18 ilustra este componente juntamente com sua simbologia.

Figura 2.18–Transistor de Efeito de Campo de Junção (JFET).



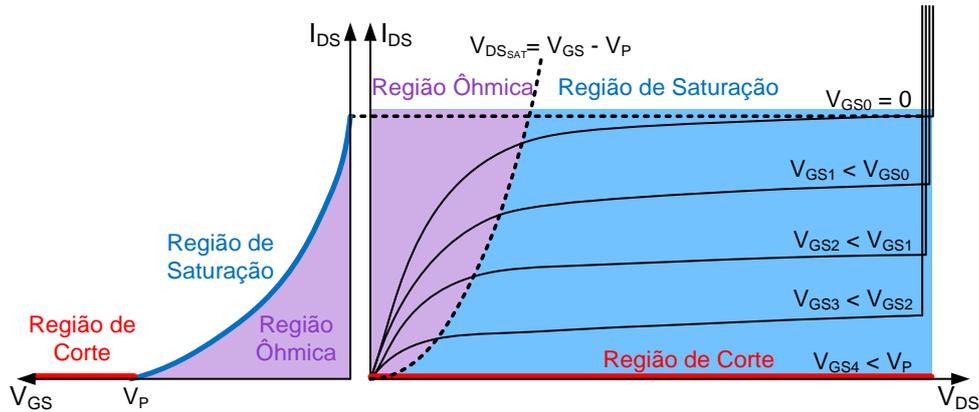
Fonte: Produção do Autor.

Este dispositivo possui três terminais, o Dreno e a Fonte conectados aos extremos do canal, e a Porta correspondendo às duas camadas laterais conectadas. Portanto, ocorre um fluxo, de elétrons para o canal n e de lacunas para o canal p, entre a Fonte e o Dreno, onde este fluxo é controlado por um potencial aplicado pela Porta.

A expressão efeito de campo corresponde a região de depleção em torno de cada camada lateral ligada à porta. Essa região ocorre devido ao potencial elétrico aplicado à porta.

A Figura 2.19 mostra as curvas características do JFET, onde há as regiões de corte, saturação e ôhmica. Esta curva se relaciona ao JFET de canal n, a de canal p é similar, porém de forma oposta, a tensão porta-fonte (V_{GS}) ao invés de decrescer, cresce para aumentar corrente dreno-fonte (I_{DS}) pela tensão dreno-fonte (V_{DS}).

Figura 2.19–Curvas do JFET canal N.



Fonte: Adaptado de Wikiwand (2019).

Corte

Na tensão porta-fonte (V_{GS}) em que as regiões de depleção se tocam ocasionam o corte do canal de condução, (I_{DS}) fica quase igual a zero.

A tensão pinch-off ou tensão de constricção (V_P), é o ponto em que aumentos maiores em V_{DS} são compensados por um aumento proporcional na resistência do canal, resultando no estrangulamento do canal.

Saturação

A região de saturação do JFET está entre V_P e V_{DS} máximo, ou seja a região quase horizontal do gráfico do lado direito da Figura 2.17, $V_{DS(máx)}$ corresponde a tensão de ruptura. O JFET funciona como uma fonte de corrente entre o estrangulamento e a ruptura, de aproximadamente I_{DSS} quando $V_{GS} = 0$

O I_{DSS} corresponde à corrente dreno-fonte de saturação com tensão entre a fonte e a porta em curto. Este é o máximo valor de corrente de dreno para a fonte que pode ser produzido pelo JFET.

A corrente de dreno na região de saturação é muitas vezes uma aproximação em termos de polarização do canal e dada conforme a Equação 2.5.

$$I_{DS} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \quad (2.5)$$

Por esta equação é traçada a curva de transcondutância, representada do lado esquerdo da Figura 2.19.

Região Ôhmica

A região Ôhmica corresponde a parte mais próxima de vertical do gráfico do lado direito da Figura 2.19. Quando operado nessa região, o JFET é equivalente a um resistor.

A corrente de um JFET-N devido a uma pequena tensão V_{DS} , isto é, na região linear ôhmica, é dada pelo canal, sendo um material retangular com condutividade elétrica dada $qN_d\mu_n$, temos pela Equação 2.6.

$$I_{DS} = \frac{bW}{L} qN_d\mu_n V_{DS} \quad (2.6)$$

Onde,

I_{DS} = Corrente entre fonte e dreno

b = Espessura do canal para uma dada tensão do canal

W = Largura do canal

L = Comprimento do canal

q = Carga do elétron = $1,6 \times 10^{-19}C$

μ_n = Mobilidade dos elétrons

N_d = Concentração da dopagem do tipo n (doador)

Se o canal de dopagem é uniforme, de tal modo que a espessura da região de depleção vai crescer proporcionalmente à raiz quadrada (o valor absoluto) da tensão entre o canal e fonte, em seguida, a espessura do canal b pode ser expressa em termos da espessura do canal a quando a tensão tende para zero, conforme a Equação 2.7.

$$b = a \left(1 - \sqrt{\frac{V_{GS}}{V_P}} \right) \quad (2.7)$$

Onde,

V_p corresponde a tensão pinch-off ou tensão de constrição, a tensão entre o canal e fonte, esta é a tensão a qual resulta no estrangulamento do canal, $V_p = V_{DS}$.

a corresponde a espessura do canal devido a tensão entre canal e fonte.

Em seguida, a corrente de dreno na região linear ôhmica pode ser expressa conforme a Equação 2.8.

$$I_D = \frac{bW}{L} qN_d\mu_n V_{DS} = \frac{aW}{L} qN_d\mu_n \left(1 - \sqrt{\frac{V_{GS}}{V_p}}\right) V_{DS} \quad (2.8)$$

Ou em termos de I_{DSS} conforme a Equação 2.9.

$$I_D = \frac{2I_{DSS}}{V_p^2} \left(V_{GS} - V_p - \frac{V_{DS}}{2}\right) V_{DS} \quad (2.9)$$

Efeitos da Radiação no JFET

Com o TID, ocorrendo a criação de pares elétrons-lacunas, prejudica o estrangulamento do canal, aumentando correntes de fuga entre fonte e dreno (POIZAT, 2017). Para o canal N é pior, devido ao controle do canal pela região de depleção ser por material tipo p, sendo mais afetado pela radiação.

Para o mecanismo DDD o JFET não é muito afetado. E para o SEE são observados SEB, SEU, SEFI e SET.

2.3.2.3 Transistor de Efeito de Campo Metal Óxido Semicondutor (MOSFET)

O Transistor de Efeito de Campo Metal Óxido Semicondutor, abreviado por MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor), usa metais para o material da porta, óxido (SiO_2) para isolador e semicondutor para

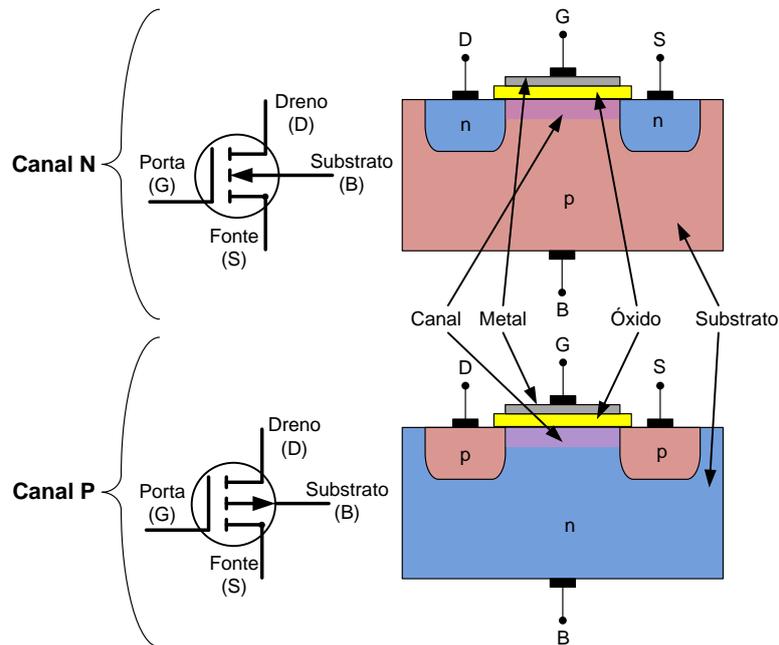
substrato, por esse motivo, este dispositivo foi nomeado transistor MOS. Também chamado de IGFET, que significa FET de porta isolada. Diferentemente do JFET, possui a porta isolada do canal, por isso a corrente na porta do MOSFET é ainda menor que no JFET, a impedância de entrada está na ordem de 10^{12} a $10^{15}\Omega$ (MORAES, 2017).

O MOSFET corresponde ao transistor mais comum hoje utilizado em circuitos digitais e analógicos. Por suas vantagens de tamanho, velocidade, consumo de potência e possui uma estrutura planar, o que facilita em sua construção.

Existem dois tipos de MOSFET, o de modo de depleção e o modo de crescimento. O modo de depleção é menos utilizado, mas ainda são muito encontrados no estágio inicial dos circuitos de comunicação como amplificadores de RF (MALVINO, 2007). Já o modo crescimento é mais utilizado nos circuitos discretos, principalmente em chaveamento de potência, e circuitos integrados, principalmente em chaveamento digital (MALVINO, 2007).

A Figura 2.20 ilustra a simbologia do MOSFET canal N e P, e o esquema construtivo do MOSFET modo crescimento, a diferença construtiva para o modo depleção corresponde à somente no canal, sendo que o modo depleção possui a ligação entre dreno e fonte do mesmo tipo de material no canal, ou seja, possui um canal previamente formado.

Figura 2.20–Transistor de Efeito de Campo Metal Óxido semiconductor (MOSFET).



Fonte: Produção do Autor.

Ao aplicar tensão positiva na porta (V_{GS}) do MOSFET Canal N (NMOS) em um valor superior ao valor mínimo de especificação, elétrons minoritários do substrato P se aproximam da camada isolante formando um canal com alta quantidade de elétrons ligando a fonte e o dreno. Esse canal induzido proporciona um caminho da fonte para o dreno, quanto maior a tensão V_{GS} maior o enriquecimento do canal com portadores de corrente, aumentando a condução de corrente. E devido à camada isolante, a corrente da porta é nula.

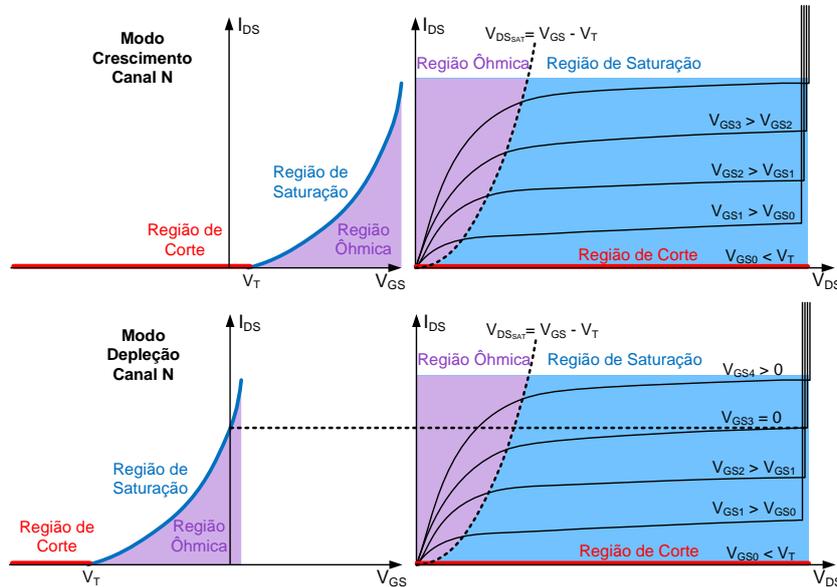
Para o caso do MOSFET Canal P (PMOS) o pulso na porta deve ser negativo para a formação do canal, que ao invés de elétrons será de lacunas.

A região do canal possui um comprimento L e uma largura W , dois parâmetros importantes para o MOSFET. O W relaciona-se a passagem da corrente, tipicamente possui valores entre 1 e 10 μm . E o L relaciona-se com o tempo de trânsito dos elétrons no canal, restringindo assim a resposta em frequência do dispositivo, tipicamente possui entre 2 e 500 μm (FERREIRA 1999).

A operação do MOSFET pode ser dividida em três diferentes regiões, dependendo das tensões aplicadas sobre seus terminais, conforme ilustrado na

Figura 2.21. A seguir será discutido o funcionamento referente ao NMOS, para o PMOS as referências de tensões e corrente são complementares.

Figura 2.21–Curvas do MOSFET canal N.



Fonte: Adaptado de Wikiwand (2019).

Região de Corte

Quando $V_{GS} < V_T$

Onde, V_T é a tensão de *threshold* (limiar) de condução do dispositivo.

O transistor permanece desligado, com a corrente entre dreno e fonte praticamente nula.

Região Ôhmica (ou de Triodo)

Quando $V_{GS} > V_T$ e $V_{DS} < V_{GS} - V_T$

Onde, V_{DS} corresponde à tensão entre dreno e fonte.

O transistor é ligado, através da tensão na porta, e cria-se o canal permitindo o fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. O MOSFET opera como um resistor, controlado pela tensão na porta. A corrente do dreno para a fonte (I_{DS}) é obtida conforme a Equação 2.10.

$$I_{DS} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2 L} (2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2) \quad (2.10)$$

Nesta região de operação pode-se destacar duas subdivisões, uma aproximadamente linear, quando $V_{DS} \ll V_{GS}$, e outra sublinear, quando $V_{DS} \approx V_{GS}$.

Porém apesar desta região possuir um comportamento linear, a utilização como amplificador em circuitos analógicos não é nesta região.

Região de Saturação

Quando $V_{GS} > V_T$ e $V_{DS} > V_{GS} - V_T$

O transistor ligado e o canal criado permitem o fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. Como a tensão de dreno é maior do que a tensão na porta, uma parte do canal é desligado. A criação dessa região é chamada de pinçamento (pinch-off). A corrente de dreno é agora relativamente independente da tensão de dreno (numa primeira aproximação) e é controlada somente pela tensão da porta conforme a Equação 2.11.

$$I_{DS} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2 L} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (2.11)$$

Nos MOSFETs em circuitos digitais preferencialmente são utilizadas as regiões de corte e região ôhmica, e em circuitos analógicos é usado em modo de saturação.

Dose Ionizante Total - TID

A principal influência da radiação ionizante nos transistores MOS está relacionada ao desvio da tensão de limiar. A parte mais sensível dos transistores MOS à radiação ionizante é o óxido de silício (SiO₂), que causa a migração de pares de elétrons-lacunas. Considerando uma polarização positiva em um NMOS, as lacunas tendem a se mover em direção à área de interface (Si / SiO₂). Os elétrons que são removidos do óxido tendem a se deslocar para a porta do transistor (MANEA et al., 2020).

Se o deslocamento for significativo o suficiente, o transistor NMOS não pode ser desligado mesmo com a tensão de porta igual a zero. No caso do PMOS ocorre o mesmo processo, porém ao contrário, o transistor não pode ser ligado mesmo com a tensão de porta máxima (POIZAT, 2017; LÖCHNER, 2011).

Dose de Dano de Deslocamento - DDD

A tecnologia MOS é amplamente imune ao mecanismo DDD, devido a ocorrer somente em uma região muito pequena, o que não afeta o componente (LÖCHNER, 2011).

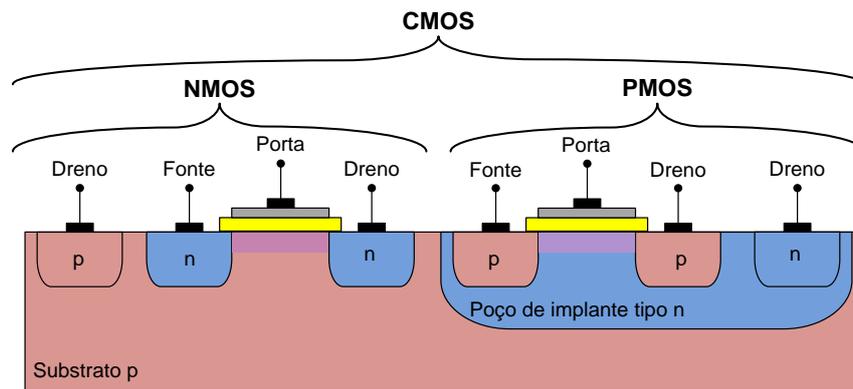
Evento de Efeito Único - SEE

Para o SEE são observados SEL, SEB, SEGR, SEHE, SEU, MBU, SEFI e SET (ECSS-E-ST-10-12C, 2008). Dependendo da tecnologia, família e função do componente este estará sujeito a diferentes efeitos do SEE.

2.3.2.4 Metal-Óxido-Semicondutor Complementar (CMOS)

A tecnologia MOS complementar (CMOS) utiliza transistores MOS das duas polaridades. Apesar dos circuitos CMOS serem um pouco mais difíceis de fabricar do que os NMOS, o fato de se dispor de dispositivos complementares torna viáveis muitas possibilidades interessantes de projeto de circuitos. Possui como principais vantagens o baixo consumo de energia, a possibilidade de alta densidade de integração e boa relação sinal-ruído devido à baixa interferência de sinais eletrônicos. Atualmente, CMOS é a mais útil de todas as tecnologias de circuitos integrados MOS, tanto em circuitos analógicos, quanto digitais. A Figura 2.22 ilustra o dispositivo CMOS.

Figura 2.22–Transistor de Efeito de Campo Metal Óxido semiconductor (MOSFET).



Fonte: Produção do Autor.

Nesse caso note-se que enquanto o transistor NMOS é implementado diretamente no substrato do tipo p, o transistor PMOS é fabricado numa região n especialmente criada, conhecida como um poço n. Os dois dispositivos são isolados um do outro por uma espessa região de óxido que funciona como um isolante (BRAGA, 2019). Porém pode-se criar outras configurações desse dispositivo.

O processo de radiação no CMOS corre de forma similar ao MOSFET, porém com o agravante da maior proximidade entre os dispositivos complementares.

2.3.2.5 BiCMOS

Corresponde à união das tecnologias Bipolar e CMOS, integrando-as no mesmo *wafers*, com isso une o benefício do CMOS de alta impedância de entrada e o benefício do BJT de baixa resistência de saída. E também para certas configurações, especialmente em cascata, também tem a característica de baixa capacitância; o que se traduz em amplificadores com alta largura de banda e circuitos lógicos com alta velocidade de comutação (ALVAREZ et. al., 2002).

A principal desvantagem dessa tecnologia é o ajuste das características dos componentes BJT e MOS separadamente. Isso aumenta o número de etapas do processo de fabricação e, conseqüentemente, seu custo. Além disso, atendendo aos critérios de desempenho, a tecnologia BiCMOS nem se aproxima de oferecer os baixos níveis de consumo da tecnologia CMOS. E por

fim, assim como o CMOS, possui alta sensibilidade à eletricidade estática (ALVAREZ et. al., 2002).

Em relação a radiação apresentam características similares ao CMOS.

2.3.2.6 Característica funcional do componente

Os componentes são desenvolvidos para três categorias funcionais, que serão descritas abaixo.

2.3.2.6.1 Pequenos sinais

Os transistores de pequenos sinais são usados principalmente para amplificar sinais de baixo nível, mas também podem funcionar bem como chaves. Os valores típicos de ganho para transistores de sinal pequeno variam de 10 a 500mA, com valores máximos de corrente de coletor de cerca de 80 a 600 mA nos BJTs.

MOSFET em baixa frequência, nesta derivação assume-se que a variação de tensão é muito pequena e com isso a corrente varia linearmente com a tensão (MONTORO; SCHNEIDER,2007).

2.3.2.6.2 Alta frequência

Os transistores não se comportam do mesmo modo quando trabalham com sinais de altas frequências. O ganho de um transistor começa a ser cada vez mais influenciado à medida que a frequência aumenta além de certo valor.

Pode-se aumentar a resposta de frequência de um transistor, capacitando-o a operar com sinais de frequências elevadas com a diminuição da espessura da região que forma a base, mas para isso existem limitações.

Os portadores de cargas N e P possuem velocidades diferentes de propagação, o material N é mais rápido (BRAGA, 2003). Desta forma os BJTs NPN operam em frequências mais altas. Nos FETs quanto menor a tecnologia e respectivamente o tamanho, maior a frequência de operação.

A geometria do cristal semicondutor, a sua formação, o material semicondutor e os tipos de impurezas agregadas alteram as características do transistor quanto a frequência de operação (BRAGA, 2003).

2.3.2.6.3 Potência

O que diferencia um transistor de potência, de um transistor comum, é a sua capacidade de trabalhar com correntes intensas ou com tensões elevadas, e em alguns casos com ambos.

Transistores BJT com correntes de coletor acima de 1 A são normalmente considerados BJTs de potência, e as tensões de operação podem superar os 1000 V (BRAGA, 2003).

Ao conduzir a corrente entre o coletor e o emissor, o transistor apresenta certa resistência e conseqüentemente geração de calor. Se esse calor gerado não for dissipado, o transistor se aquece para além da temperatura máxima que suporta e com isso é destruído pelo efeito joule. Então o calor deve ser transferido para o meio ambiente. E para isso são utilizados invólucros, onde se destacam o metálico e o plástico.

Os BJTs de material silício e germânio, os portadores de carga (elétrons e lacunas) são lentos em relação a outros materiais como o GaAs (Arseneto de Gálio) e GaN (Nitreto de Gálio). Assim, transistores de alta potência com a capacidade de operar em altas frequências, fazem uso desses substratos (BRAGA, 2003).

Para o caso dos MOSFETs há diversas estruturas de construção, entre elas, as principais são: Lateral, Dupla Difusão, Vertical, T.

3 ESTADO DA ARTE

Nesta seção será abordado sobre os principais aspectos da utilização dos COTS e as formas dessa utilização, incluindo os mecanismos de verificação e validação dos componentes e suas consequências. Também estão relacionados os principais documentos para as determinações a respeito da utilização de COTS em ambiente de radiação.

3.1 Guias da Agencia Espacial Européia (ESA) relacionados

Os guias da ESA relacionados representam uma base metodológica para o entendimento para desenvolver a dissertação.

3.1.1 ECSS-Q-ST-20-10C (OTS Off-The-Shelf)

Os Itens OTS (Off-the-Shelf - de prateleira) de acordo com esta norma, são aqueles que, mesmo que não necessariamente desenvolvidos para aplicações espaciais, podem ser adquiridos do mercado e utilizados em um sistema espacial. Esta Norma considera itens OTS complexos, contendo os requisitos para a utilização de Itens OTS, em termos de sua seleção, caracterização e aquisição para uso do sistema espacial.

Os OTS são mais genéricos que os COTS, desta forma esta norma possibilita uma visão da utilização de COTS já formados em um equipamento.

3.1.2 ECSS-Q-ST-60-13C (Componentes EEE comerciais) e ECSS-Q-ST-60C REV2 (Componentes EEE)

A norma ECSS-Q-ST-60-13C é baseada e complementar à norma ECSS-Q-ST-60C. Sendo a primeira aplicável apenas aos componentes comerciais, que satisfaçam os parâmetros técnicos definidos que estão ao nível da aplicação do sistema, demonstrados como inatingíveis com componentes espaciais existentes ou apenas alcançáveis com penalidades qualitativas e quantitativas. A norma exige que as penalidades qualitativas e quantitativas sejam especificadas, conforme aplicável, como parâmetros mínimos quantificáveis.

O objetivo dos requisitos de seleção, controle, aquisição e uso de componentes EEE é garantir que estes componentes usados em um projeto espacial permitam que o projeto atenda aos requisitos de sua missão.

3.1.3 ECSS-E-HB-10-12A e ECSS-E-ST-10-12C (Radiação)

Estas normas abrangem os métodos para o cálculo da radiação recebida e seus efeitos, além de uma política para as margens do projeto. Aplica-se à avaliação dos efeitos da radiação em todos os sistemas espaciais, incluindo todos os tipos de produtos que existem ou operam no espaço, bem como a equipes de missões espaciais tripuladas. O padrão visa implementar um processo de engenharia de sistemas espaciais que garanta o entendimento comum dos participantes no processo de desenvolvimento e operação e o uso de métodos comuns na avaliação dos efeitos da radiação.

3.1.4 ECSS-Q-ST-60-15C (Garantia de dureza de radiação em EEE)

Esta norma especifica os requisitos para assegurar a garantia da dureza da radiação (RHA) de projetos espaciais. Esses requisitos formam a base para um programa RHA necessário para todos os projetos espaciais em conformidade com ECSS-QST-60. Este padrão trata dos três principais efeitos de radiação nos componentes eletrônicos: Dose Ionizante Total (TID), Dano por Deslocamento ou Dose Não Ionizante Total (TNID) e Efeitos de Evento Único (SEE).

3.2 Aquisição de componentes COTS

A partir da necessidade de utilização de COTS se inicia o processo de seleção do componente, esta etapa consiste em fazer um levantamento dos possíveis produtos e fornecedores que atendem aos requisitos necessários de acordo com o projeto, e dependendo do caso também existem os critérios de aceitabilidade dos usuários (COTS PROCESS, 2002; TETZLAFF; WIEYNK; BERGE, 2003).

A etapa seguinte corresponde a aquisição do componente, onde devem ser estipulados e gerenciados os lotes, triagem, quantidade e documentação de testes e controle, de forma atender aos próximos passos da utilização do

componente, visto que os fornecedores comerciais podem mudar sua fabricação, processo, ou mesmo a fundição de silício que produz a partes do componente (SINCLAIR; DYER, 2013).

O recebimento, inspeção, manuseio, armazenamento e montagem devem ser muito bem planejados e executados para que não ocorra degradação e perdas de componentes. Estas tarefas podem ser críticas, devendo ter um controle e medidas adequadas de segurança (TETZLAFF; WIEYNK; BERGE, 2003).

Os testes permitirão ao usuário a análise do componente quanto ao atendimento aos requisitos que foram declarados pelo fabricante e aos que não foram declarados, principalmente em relação a radiação (TETZLAFF; WIEYNK; BERGE, 2003). Porém demandam de tempo e custos, podendo não corresponder a um nível satisfatório de confiabilidade.

Ao fazer os testes e observar que os resultados estão em conformidade com os requisitos de projeto, de desempenho e funcionalidade, a etapa de verificação do componente fica concluída, podendo ser integrado ao seu respectivo subsistema, que também deverá ser testado e verificado, para finalmente ser integrado ao sistema que também terá suas verificações. Já validação se dará com a conformidade do produto final fabricado em relação ao conjunto de expectativas dos *stakeholders*.

Por fim, após a conclusão do programa, deve-se estabelecer um relatório de experiência para melhorar a eficiência e possíveis reduções de custos para futuros programas, demonstrar a viabilidade da abordagem de aquisição conforme definido neste documento e também fazer recomendações com base na experiência adquirida e nas lições aprendidas durante a aquisição de peças comerciais (TETZLAFF; WIEYNK; BERGE, 2003).

A aquisição de um componente COTS não é uma tarefa fácil, exige um processo que deve ser muito bem planejado e executado. O custo global do componente COTS (custo de aquisição + custo de teste de aceitação de lote + custo de mecanismos tolerantes a falhas + validação) em grande parte das vezes não é menor que dos componentes Hi-Rel ou Rad-Tol. Porém a necessidade e a estratégia em determinado prazo de tempo certamente podem

recompensar, e o aumento do desempenho pode ser um disruptivo para o futuro próximo.

3.3 Técnicas de projeto de proteção contra radiação

Os sistemas eletrônicos podem ser decompostos de baixo para cima em vários níveis: níveis de dispositivo, circuito e sistema. Durante o projeto do sistema, tanto o projeto de hardware quanto o desenvolvimento de software, técnicas endurecidas por radiação idealmente devem ser adotadas em cada nível para minimizar os impactos dos efeitos potenciais da radiação. No entanto, é preciso considerar a complexidade do projeto resultante e outras restrições práticas, como tamanho, peso e custo. A seguir serão descritas as principais técnicas baseado em Huang e Jiang (2019).

3.3.1 Mitigação na integração do componente

Representam os componentes endurecidos por radiação (radhardened components) conforme foi explicado no capítulo anterior em Componentes Espaciais (Seção 2.2.1.3), estes componentes possuem de fato maior resistência à radiação ionizante, porém, devido ao processo especial envolvido, bem como ao pequeno volume de produção para atender à pequena demanda do mercado, esses dispositivos tornam-se excessivamente caros. As Técnicas de endurecimento por radiação em nível de dispositivo geralmente se concentram em aumentar a resistência à radiação de um projeto, alterando e melhorando fundamentalmente os processos de fabricação (HUANG; JIANG, 2019). Algumas destas técnicas são descritas a seguir:

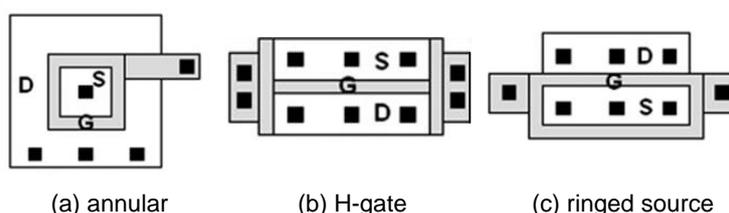
3.3.1.1 Endurecido de radiação por dimensionamento

Uma vez que a área de porta fica maior, tem maior capacidade de transporte de corrente e maior capacitância de nó do que a área menor, aumentar a relação de aspecto (W / L) do transistor pode melhorar a tolerância à radiação. Além disso, aumentar o tamanho do transistor pode efetivamente reduzir a amplitude e encurtar a duração do pulso de tensão transiente (HUANG; JIANG, 2019).

3.3.1.2 Projeto de layout especial para transistores

Por meio de um projeto de layout especial, conforme ilustrado na Figura 3.1, por exemplo, no transistor *annular*, pode-se fechar a fonte ou o dreno em transistores para evitar a acumulo de carga em óxidos de isolamento. O uso de layouts *H-gate* e *ringedsouce* também pode aumentar a corrente de fuga de dreno e tornar a tensão de limiar mais alta, o que pode aumentar a capacidade de tolerância à radiação dos transistores (HUANG; JIANG, 2019).

Figura 3.1–Exemplos de layouts especiais para os transistores.



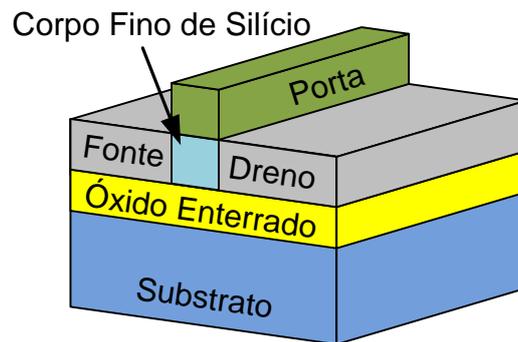
Fonte: Adaptado de LIU et al. (2010).

3.3.1.3 Silício Sobre Isolador (*Silicon OnInsulator - SOI*) / Silício Sobre Safira (*Silicon onSapphire - SOS*)

Substratos isolantes também podem ser usados para reduzir a sensibilidade de dispositivos à radiação ionizante. No SOI, a camada isolante separa a região ativa e o substrato inativo, este método resulta em menor capacitância parasitária e aumenta a resistência ao latchup, além de aumentar o desempenho e diminuir o consumo de energia (VORA, 2017). A figura 3.2 ilustra a estrutura SOI. Silício sobre safira (*Silicon on Sapphire (SOS)*) é uma técnica heteroepitaxial da família SOI para fabricação de IC, que consiste em um filme de silício cultivado em um substrato de safira (Al₂O₃) (HUANG; JIANG, 2019).

Dentro desta técnica de projeto existem algumas variações, como por exemplo, o FinFET (Fin Field Effect Transistor - Transistor de Efeito de Campo de Aleta) que consiste em uma aleta fina do corpo de silício em um substrato. A porta é fixada ao redor do canal, oferecendo excelente controle a partir de três lados do canal (VORA, 2017).

Figura 3.2–Estrutura SOI FET.



Fonte: Adaptado de Vora (2017).

3.3.1.4 Anéis de guarda

Os anéis de guarda fazem isolamento em determinadas regiões do componente para evitar SEL, reduzir a fuga de carga e gerar um limiar de tensão mais elevado (HUANG; JIANG, 2019).

3.3.2 Endurecimento de radiação por meio de design de nível de circuito

Em nível de circuito também há técnicas especiais para melhorar as capacidades de prevenção de falhas e para reduzir a vulnerabilidade a danos por radiação. Algumas destas técnicas são descritas a seguir:

3.3.2.1 Redundância de circuitos críticos

Consiste na duplicação para melhorar a confiabilidade e tolerância a falhas. Além disso, os conceitos de espaço local e redundância de tempo podem ser eficazes para evitar travas de erro não destrutivo (HUANG; JIANG, 2019).

Esta mitigação para o caso do SEE é muito útil, porém não é muito relevante para o DDD e o TID, devido ao fato da radiação que provoca esses efeitos está sendo depositada ao longo do tempo de forma equivalente no sistema, mas caso seja redundância por componentes diferentes pode ser útil. As redundâncias podem ser:

- A quente: funcionamento em paralelo dos componentes. Sistema de votação.

- Stand-by ou modo de espera: o componente reserva fica parcialmente desligado. O componente não estando sob polarização, não sofrendo SEE, e o TID é minimizado pelo fato dos pares elétrons-lacunas não serem separados.
- A frio: somente com a parada do principal componente será acionado o reserva. Assim como no modo espera efeitos minimizados, ainda com maior eficiência.

3.3.2.2 Porta de proteção

A porta de proteção pode ser usada para evitar SETs de uma trava (*latch*). Por exemplo, para sinais defasados no tempo, a saída da porta de guarda se tornará flutuante e manterá o valor de tensão anterior para evitar que ocorram SETs (HUANG; JIANG, 2019).

3.3.2.3 Filtragem temporal

A filtragem temporal consiste em gerar diversas versões do mesmo sinal, mas as separa por elementos de retardo. Esses elementos são então submetidos a um eleitor majoritário para produzir o resultado (HUANG; JIANG, 2019).

3.3.2.4 Cancelamento de Carga Diferencial (*Differential Charge Cancellation - DCC*)

O layout de cancelamento de carga diferencial aumenta a rejeição de modo comum inerente de circuitos diferenciais para mitigar transientes de tensão induzidos por SEE (HUANG; JIANG, 2019).

3.3.2.5 Células de Armazenamento Duplas Intertravadas (*Dual InterlockedStorageCells - DICE*)

As células de armazenamento duplas intertravadas utilizam uma estrutura redundante de quatro nós para mitigar SEUs. Podem substituir travas e flip-flops distribuídos dentro de blocos lógicos em dispositivos CMOS e também são utilizadas para implementar SRAMs resistentes à SEU (HUANG; JIANG, 2019).

3.3.2.6 Circuitos de autocura (*Self-healing circuits*)

Os circuitos de autocura utilizam outros blocos de circuito para monitorar o comportamento do circuito principal. De forma simplificada, contém *feedback* para ajustar os parâmetros do circuito em um circuito fechado para detectar eventuais alterações no circuito principal (HUANG; JIANG, 2019).

3.3.2.7 Proteção *Pipeline* (*Pipeline protection*)

As técnicas de Proteção *Pipeline* usam a arquitetura de registro de autoverificação para combater a ocorrência de SEUs dentro de um registro e SETs capturados pelo registro (HUANG; JIANG, 2019).

3.3.2.8 Lógica de armazenamento com base magnética (*Magnetic-based storage logic*)

A memória SRAM (*Static Random Access Memory*) é muito suscetível a erros não destrutivos induzidos por radiação. A junção de túnel magnético (Magnetic Tunnel Junction - MTJ) terá resistência relativamente maior a erros não destrutivos induzidos por radiação devido às suas características inerentes (HUANG; JIANG, 2019).

3.3.2.9 Definição de parâmetros iniciais com margem

Válido para danos de longo prazo, para o caso do bipolar utilizar o ganho do componente um pouco acima do estipulado, para melhorar a margem ao longo da degradação do componente; para o MOS considerar o NMOS com a degradação fica com vazamento, e PMOS fica com bloqueio; implementar de modo a considerar esses fatos.

3.3.3 Endurecimento de radiação por meio de design de nível de sistema

As técnicas de endurecimento de radiação no nível do sistema geralmente correspondem à detecção de falhas e mecanismos de tolerância para aumentar a resistência à radiação do sistema. Algumas destas técnicas são descritas a seguir:

3.3.3.1 Elementos redundantes

Os elementos redundantes podem ser de hardware, de informação, de tempo e de software. A redundância de hardware depende da duplicação de subsistemas para detectar e corrigir um único erro e alcançar tolerância a falhas para SEE, como redundância modular dupla (DMR - Dual Modular Redundancy) e redundância modular tripla (TMR - Triple Modular Redundancy). A redundância de informações utiliza técnicas de códigos de correção de erros (ECC – *Error Correcting Codes*) e métodos de detecção e correção de erros (EDAC – *Error Detection And Correction*), retribuindo valores corrigidos para evitar o acúmulo de erros. Redundância de tempo utiliza folga na programação do sistema para melhorar a capacidade de tolerância a falhas transitórias, realizando execuções de recuperação sempre que a falha ocorrer. E por fim, a redundância de software dependendo de várias versões de software desenvolvido de forma independente para tolerar falhas em ambientes operacionais de software (HUANG; JIANG, 2019).

3.3.3.2 Recuperação de Reinicialização

A recuperação de reinicialização utiliza um circuito temporizador externo, atuando como um watchdog, para realizar um reset forçado para o sistema (HUANG; JIANG, 2019).

3.3.3.3 Depuração (*Scrubbing*)

A depuração pode ser usada para evitar o acúmulo de erros e reduzir a probabilidade de erros múltiplos, podendo ser de dois tipos diferentes de algoritmos de depuração, preventivo e corretivo (HUANG; JIANG, 2019).

3.3.4 Endurecimento de radiação por meio de proteção de blindagem

A blindagem contra radiação de forma ideal é eficaz para mitigação dos efeitos da radiação, aumentando a confiabilidade e prolongando a vida útil dos sistemas eletrônicos. Porém, para sistemas espaciais gera aumento de massa significativo, a aplicação desta mitigação protege de partículas de baixa energia, porém partículas muito energéticas não são bloqueadas, sendo

utilizado para o combate à TID e menos eficiente ao SEE. A eficácia da blindagem depende das propriedades dos materiais de blindagem e do tipo de radiação e do nível de tolerância à radiação do semicondutor. A Implementação de placas ao redor de componentes são aplicados em áreas específicas ou não, e uma técnica utilizada corresponde à localização do componente no satélite para que os demais componentes sirvam de blindagem (HUANG; JIANG, 2019).

3.4 Simulação de efeitos de radiação

Na fase de projeto do sistema, é importante ter diferentes ferramentas para auxiliar no projeto e avaliar a eficácia de várias técnicas de endurecimento contra a radiação.

Diversos pacotes de modelagem e simulação foram desenvolvidos para o propósito de melhorar o entendimento dos efeitos da radiação nos materiais e dispositivos. Normalmente são divididos em DDD, TID e SEE.

Os resultados da simulação podem concordar bem com os resultados experimentais, mas a simulação geralmente não pode substituir o teste físico. Isso ocorre porque os erros e incertezas nos modelos usados na simulação não podem ser completamente eliminados. No entanto, como uma ferramenta auxiliar, a simulação fornece um método excelente para selecionar componentes eletrônicos e avaliar a tolerância à radiação durante a fase de projeto do sistema (HUANG; JIANG, 2019).

3.5 Teste em radiação

Os testes correspondem à forma de verificar os efeitos da radiação no componente ou dispositivo, analisando o momento e a forma da falha. Neste sentido são importantes considerar (MANEA, 2018b):

- Escolha da fonte de radiação
- Especificações e padrões
- Pior caso ou polarização de aplicação
- Software de teste

- Números de amostras
- Rastreabilidade
- Banco de dados

O objetivo de cada teste é avaliar o componente enquanto irradiado monitorando a resposta de saída apropriada para determinar se e quando ocorrem anomalias, que tipo de modos de erro / falha são produzidos e qual ação é necessária para recuperar a operação normal. A criticidade do componente, o cronograma da missão e qualquer redundância aplicável são levados em consideração.

Na análise de erros deve-se observar o tipo, frequência e gravidade de erro, em relação ao teste de radiação observado, e analisar esses resultados com o ambiente de radiação esperado para se estabelecer o MTBF (Tempo Médio Entre Falhas) e a probabilidade de sucesso do componente. Este método é utilizado pela NASA (KOUBA, 2006). As fontes de radiação são mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Fontes de radiação para os testes em relação aos efeitos esperados.

Efeitos	Fontes		
TID	Raio gama por Cobalto-60		Elétrons de 1 à 3 MeV
DDD	Prótons de 10 à 20 MeV	Nêutrons acima de 1 MeV	Elétrons de 3 à 5 MeV
SEE	Íons pesados	Prótons acima de 15 MeV	Nêutrons acima de 20 MeV

Fonte: Manea(2018b).

Conforme padrões e diretrizes da ESA (ESCC 22900, 2016), para testes TID a dose no dispositivo em teste deve possuir uniformidade de campo e precisão de medição de radiação acumulada conforme especificações de normas. Existem muitas variações dos níveis de radiação e quantidade de etapas de medições, onde dependerão das especificações adotadas.

O acelerador de partículas para testes de SEE deve ser capaz de fornecer o fluxo e a fluência necessários de íons pesados ou prótons de LET e energia adequados. O campo de radiação deve ser uniforme a $\pm 10\%$ sobre a área do dispositivo em teste em termos de fluência e energia (ESCC 25100, 2014).

Na prática, os testes de radiação para eletrônica espacial geralmente ficam nas três categorias (SINCLAIR, 2013):

Teste de Cobalto 60 gera raios gama de alta energia com excelente penetração. Causa dose ionizante total, mas nenhum evento de efeito único. É um teste barato e prontamente acessível (SINCLAIR, 2013).

Teste de Prótons requer um ciclotron capaz de acelerar prótons à energias iguais ou superiores 50 Mev. Causa dose ionizante e iterações de evento único com LET de até 25 Mev.cm²/mg. O custo e disponibilidade do teste são moderados (SINCLAIR, 2013).

Testes de Íons Pesados pode ser feito com acelerador ou com uma fonte de radioisótopo. Podem ser gerados LETs muito altos, o que simula os piores eventos no espaço. Este teste tende a ser caro e a disponibilidade é ruim (SINCLAIR, 2013).

Com base nos resultados dos testes, é necessário avaliar o sucesso do dispositivo para determinar se atende os requisitos e como ele deve ser implementado no sistema. Isso vai depender do projeto e da missão.

3.6 Verificação e validação

Ao fazer os testes necessários, tanto de radiação como os demais testes aplicáveis e observar que os resultados estão em conformidade com os requisitos de projeto, de desempenho e funcionalidade, a etapa de verificação do componente fica concluída, podendo ser integrado ao seu respectivo subsistema, que também poderá ser testado e verificado, para por fim ser integrado ao sistema que também terá suas verificações.

Contudo, o projeto deverá avaliar quais testes devem ser realmente efetuados, de acordo com critérios bem definidos, para não gerar gastos de tempo e dinheiro além do esperado, mas também ter a confiabilidade adequada com o projeto, analisando as menores perdas e maiores acréscimos de acordo com o benefício da missão.

Já a validação é o resultado da conformidade do produto final fabricado em relação ao conjunto de expectativas dos *stakeholders*.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia desenvolvida na presente dissertação, correspondendo desde a missão até a integração do componente ao sistema, de forma a ser o mais eficiente possível, visando a ocorrência de degradação dos componentes devido a radiação no ambiente espacial.

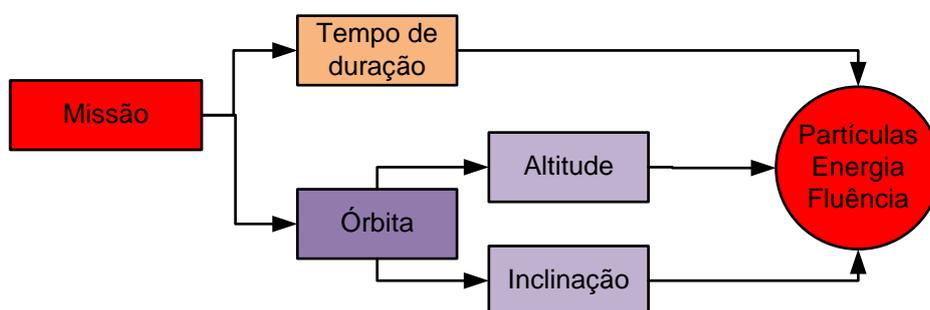
A metodologia tem o direcionamento aos componentes eletrônicos discretos, em especial aos transistores, que representam a base da eletrônica, porém a metodologia pode servir como base para outros componentes, discretos ou integrados.

4.1 Condições de entrada em relação à radiação

A metodologia desenvolvida prevê a necessidade das entradas para determinar a radiação em que estarão sujeito os componentes.

A missão determinará o tempo de duração pretendido e a órbita que o satélite ficará, o que representa a altitude e inclinação do satélite. A altitude corresponde à distância que o satélite está da Terra, já a inclinação define a orientação da órbita em relação ao Equador. Existem outros elementos orbitais que também iram interferir na radiação incidente, influenciando na posição e tempo que o satélite estará em cada instante da órbita. De forma simplificada é mencionado somente a altitude e inclinação para facilitar o entendimento.

Figura 4.1–Análise da missão.



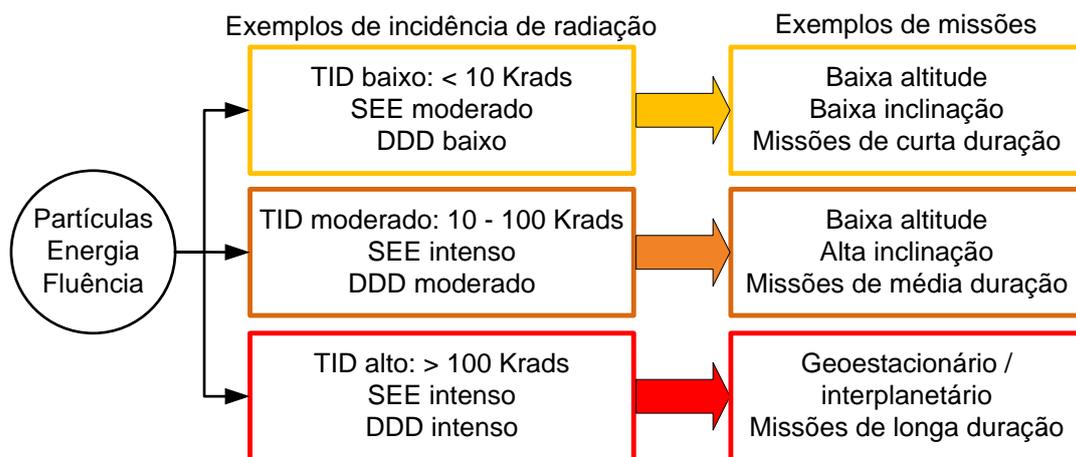
Fonte: Produção do Autor.

Através destas métricas, possibilita-se a determinação das partículas predominantes, energias e a frequência de impactos (fluência). A Figura 4.1

ilustra a relação descrita, esta determinação permitirá a obtenção do índice de probabilidade de ocorrência de TID, DDD e SEE de acordo com o componente.

A missão fará as determinações referentes ao nível de radiação que o sistema deverá suportar. A Figura 4.2 ilustra alguns exemplos possíveis de missões relacionadas à radiação, mostrando o quanto de radiação é observado nos exemplos de missões citados.

Figura 4.2–Exemplos de missões relacionadas à incidência de radiação.



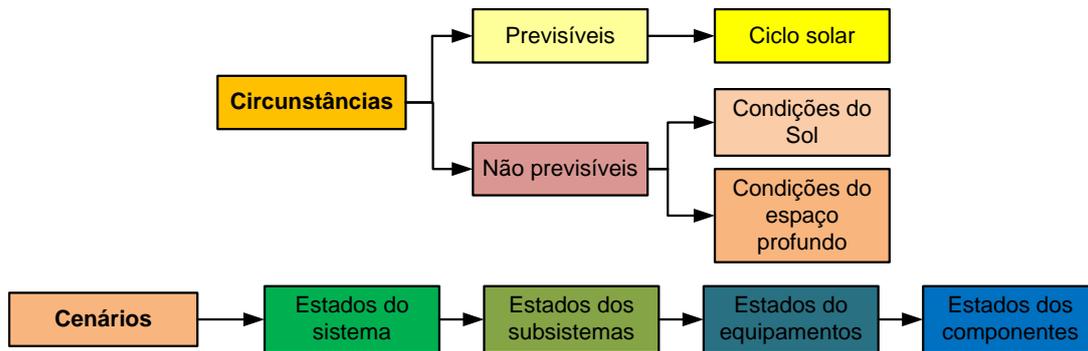
Fonte: Adaptado de Manea (2018b).

Dentro da missão existirão circunstâncias e cenários aplicáveis ao longo da vida útil do sistema. As circunstâncias estão relacionadas às condições do ambiente no qual o sistema estará inserido, onde as variações em relação à radiação correspondem às oscilações das partículas provenientes do Sol ou do espaço profundo, podendo ser previsíveis ou não.

Já os cenários correspondem aos diversos estados do sistema, que representam as possíveis características de funcionamento e operação dos diversos níveis de abstração do sistema, alterando as características funcionais do satélite conforme as necessidades provenientes das circunstâncias ou dos objetivos da missão.

O componente é integrado ao sistema de forma que atenda aos requisitos de acordo com todas as circunstâncias e cenários aplicáveis ao longo da sua vida útil. A Figura 4.3 ilustra as condições das circunstâncias e dos cenários.

Figura 4.3–Circunstâncias e Cenários.



Fonte: Produção do Autor.

A missão em relação à radiação também será alimentada pelas eventuais circunstâncias e os cenários que impactarão nos componentes quanto a sua utilização, variando o seu acionamento e criticidade.

4.2 Parâmetros do sistema

Para o desenvolvimento da metodologia foram listados parâmetros para indicar as características necessárias dos componentes, porém estes parâmetros também se relacionam aos diversos níveis de abstração do sistema.

Então o processo de seleção até a integração dos componentes ao sistema devem ser analisados referentes aos seguintes parâmetros, conforme são descritos e caracterizados na Tabela 4.1. Alguns destes parâmetros são estipulados pela própria missão, podendo possuir margens e possibilidades de mudanças, representando os critérios iniciais para decisão do componente a ser escolhido. Nos passos seguintes estes parâmetros continuarão a ser observados.

Conforme observado na Tabela 4.1, esses parâmetros são qualitativos ou quantitativos. Para a metodologia cada um dos parâmetros descritos devem ser verificados e relacionados ao componente ou ao nível de abstração que se relaciona.

Tabela 4.1 – Parâmetros do sistema.

Parâmetros	Descrição	Caracterização
Custo	Corresponde aos valores de aquisição de bens e serviços.	Valor em dinheiro, porém também relacionado a pessoas e estruturas presentes no projeto, com um custo não calculável.
Tempo de desenvolvimento	Corresponde ao período de tempo requerido para completar o desenvolvimento do projeto.	Unidade de tempo. Há possibilidade de atrasos que podem gerar problemas sérios para a missão, aumentando custo e degradação do projeto, além de prejuízos na satisfação dos <i>stakeholders</i> e inviabilidade da missão.
Criticidade	Representa qual o grau de interferência acarretará o mau funcionamento ou a perda do respectivo componente.	Potencial de risco: à missão; ao sistema; aos estados. Quanto maior a criticidade mais recursos para diminuir o eventual prejuízo, porém é necessário um equilíbrio.
Função	A atividade que o componente desempenhará.	Amplificação ou chaveamento, para o caso dos transistores.
Desempenho	Execução das tarefas dentro das exigências estipuladas.	Velocidade de atuação e precisão.
Obsolescência	Representa a condição que o componente deixa de ser útil, devido ao surgimento de outros mais avançados e incompatibilidade, ou obsolescência programada.	Unidade de tempo. É um fator crítico principalmente para componentes integrados.
Peso	Ocupação da massa.	Medido em gramas, o aumento do peso acarreta em maiores custos para lançamento e pode inviabilizá-lo caso não satisfaça as especificações do lançador.

Continua

Tabela 4.1 – Conclusão.

Volume	Ocupação de espaço.	Medido em centímetros cúbicos, está ligado a estrutura do satélite, devendo satisfazer os limites das medidas para que ocorra a acomodação adequada das partes.
Consumo de energia	Potência consumida em um determinado tempo.	Medido em Watt hora, está ligado a divisão do consumo de energia para cada setor do sistema.
Complexidade do dispositivo	Número de elementos ou partes e interligações entre elas.	Alto, médio ou baixo. Quanto maior a complexidade, maiores são as possibilidades de falhas e maior a dificuldade de resolução destas falhas.
Conhecimento sobre o componente	Qualidade do dispositivo e testes realizados.	Alto, médio ou baixo. Aplicação do componente com maior confiabilidade e possibilidade de redução de margens de confiança.
Disponibilidade	Representa possibilidade de aquisição do componente.	Sim ou Tempo de espera (rápido, demorado). Se relaciona ao tempo de desenvolvimento do projeto.
Teste em radiação	Corresponde aos testes de radiação mencionados na seção 3.5.	Testes TID, DDD e SEE, podendo corresponder a diferentes níveis de radiação para cada tipo de teste. A partir dos testes há o aumento de conhecimento a respeito dos componentes.
Mitigações	Formas de minimizar os problemas decorrentes.	Blindagem (localização ou proteções); redundância (a frio, a quente ou standby); detecção e correção de erros; definição de margens.

Fonte: Produção do Autor.

Neste trabalho são observados comparativamente os componentes e as possíveis implementações quanto a esses parâmetros, de modo que fiquem melhor alinhados à missão.

4.3 Análise do componente

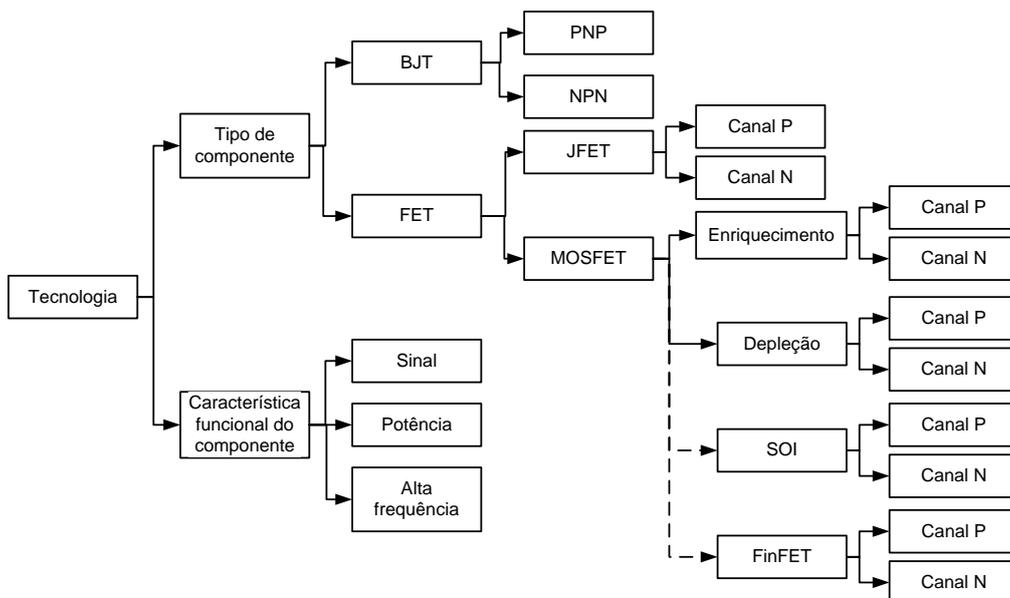
Na presente metodologia os componentes são divididos em três critérios que indicam as características básicas dos componentes em relação à radiação. Essa divisão permite uma análise das características de degradação, do tipo de radiação mais prejudicial e da resistência em relação à qualidade do componente. Esta divisão é estendida para os componentes integrados.

Desta forma é possível classificar as características dos componentes em relação a radiação para depois ligar essas características aos parâmetros do sistema, conforme será visto a frente.

4.3.1 Tecnologia do componente

Dependendo da tecnologia do componente, há diferentes formas de degradação deste. Neste trabalho, os componentes analisados serão os principais tipos de transistores. Conforme mostrado na Figura 4.4, as categorias dos transistores são divididas e ramificadas; em paralelo, estão as características funcionais do componente, pois são fatores importantes nas características internas do componente.

Figura 4.4–Tecnologia do Componente.



Fonte: Produção do Autor.

Cada tecnologia possui diferentes formas de degradação e a Tabela 4.2 faz uma relação entre as categorias de componentes com os mecanismos de radiação.

Tabela 4.2 – Efeitos da radiação nos componentes e as soluções aplicáveis.

Componente	Mecanismo	Efeitos
BJT	TID	Degradação do fator de ganho, principalmente para condições de baixa corrente, o tipo PNP é mais sensível. Baixa taxa de dose de radiação provoca efeitos piores.
	DDD	Degradação do fator de ganho, principalmente para condições de baixa corrente, o tipo PNP é mais sensível.
	SEE	SEB / SET / SEU.
JFET	TID	Corrente de fuga fonte-dreno aumentada.
	DDD	Amplamente imune.
	SEE	SEB / SEU / SEFI / SET.
MOSFET	TID	Mudança de tensão de acionamento ou desligamento.
	DDD	Amplamente imune.
	SEE	SEL / SEB / SEGR / SET / SEFI / SEU / SEHE.
SOI	TID	Corrente de fuga por baixo e nas laterais do canal.
	DDD	Amplamente imune.
	SEE	SEB / SEGR / SEHE / SEFI / SET.

Fonte: Produção do Autor.

Normalmente as tecnologias indicam os modos de falha do componente. As diferenças da forma construtiva e de operação de cada uma das tecnologias geram diferenças nos parâmetros que foram listados no presente trabalho.

A característica funcional do componente, apesar de estar dentro da tecnologia, é um critério independente. Esta característica está associada ao desempenho do componente, incluindo velocidade e a energia que o transistor operará.

4.3.2 Nó tecnológico do componente

O nó tecnológico ou densidade do componente está relacionado ao seu tamanho físico, onde quanto menor o nó tecnológico do dispositivo, mais resistente à alguns mecanismos de radiação, porém são mais suscetíveis a outros. Em componentes antigos (cuja escala é maior) o acúmulo de carga leva mais tempo para apresentar efeitos relacionados à TID. Já para componentes modernos (menores em escala), não se tem espaço físico suficiente para o acúmulo dessas cargas. A tendência tecnológica de redução do tamanho dos componentes torna os efeitos da TID desprezíveis. Em compensação para a radiação que causa o SEE, o dano é muito mais intenso, podendo gerar falhas com maior intensidade.

Os dispositivos eletrônicos, principalmente algumas tecnologias como o MOSFET vem diminuindo significativamente com a evolução da tecnologia, porém os fenômenos físicos da incidência da radiação são semelhantes. O afinilamento ocorrerá proporcionalmente em uma área muito maior do componente gerando danos mais severos. Em tecnologias MOS avançadas, a perturbação devido a um disparo de íons pode cobrir os contatos de fonte, dreno e substrato, ou até mais que um único transistor (MANEA, 2018b).

A Tabela 4.3 relaciona de forma exemplificada os nós tecnológicos com suas características em relação aos mecanismos de radiação. Porém essa característica dependerá da tecnologia e da característica construtiva do componente.

Tabela 4.3 – Exemplificação do nó tecnológico em relação aos possíveis efeitos da radiação.

Densidade	Característica
300n	Sensível à TID.
180n	Ponto intermediário TID SEE.
100n	Suscetível à SEE. Resistente à TID.
22n	Muito sensível à SEE. TID inexistente.

Fonte: Produção do Autor.

A densidade do componente está associada ao mecanismo de radiação e com as formas de utilização do componente. Em muitas situações é de grande importância que o componente seja o mais denso possível, o que implica em maior capacidade de desempenho e menor peso e volume.

4.3.3 Aplicação do componente

Outro fator importante é a aplicação do componente, ou seja, para qual utilização foi desenvolvido, o que pode representar uma informação sobre o nível de qualidade e de testes necessários. Dependendo da aplicação para a qual o componente foi desenvolvido, uma série de requisitos são cobertos por estes componentes ou dispositivos, porém a radiação não é uma delas, exceto para os componentes tolerantes e resistentes a radiação (PENHALIGON, 2007).

De acordo com Penhaligon (2007), os mercados de partes reconhecidos para o uso espacial são:

- Espaço e Militar
 - Partes de Nível Espacial Militar-QML-V-K
 - Partes de nível militar-QML-H-S-M-Q
 - Equivalente militar do fabricante – 883
 - Especificação Interna do Fabricante
 - Agência ou especificação do cliente
- Automotivo
- Médico
- Industrial
- Comercial

Devido ao declínio do mercado de partes militares, as fontes alternativas são uma solução viável (PENHALIGON, 2007).

Dependendo da categoria do dispositivo, este possui tolerância a falha, o que representa maior confiabilidade, e muitas vezes possuem maior qualidade.

Na Tabela 4.4, são descritas as aplicações e relacionadas às suas características.

Tabela 4.4 – Aplicação.

Aplicação	Descrição	Características
Militar	Desenvolvido para ambientes agressivos e devem possuir alta confiabilidade.	Tolerância a falha. Resistência a vibração. Resistência à variações e altas temperaturas.
Automotivo	Desenvolvidos para ambiente com médio grau de agressividade e devem possuir considerável grau de confiabilidade.	Tolerância a falha. Resistência a vibração. Resistência às variações e altas temperaturas.
Médico	Constituem equipamentos médicos, falhas nestes componentes colocam em risco a vida do paciente.	Tolerância a falha.
Industrial	Desenvolvidos para trabalhar em ambientes com certo grau de perigo e com altos valores financeiros em risco.	Tolerância a falha. Resistência a vibração. Resistência às variações e altas temperaturas.
Comercial	Desenvolvidos para ambientes estáveis e sem preocupação com confiabilidade	Não possui rigor de segurança.

Fonte: Produção do Autor.

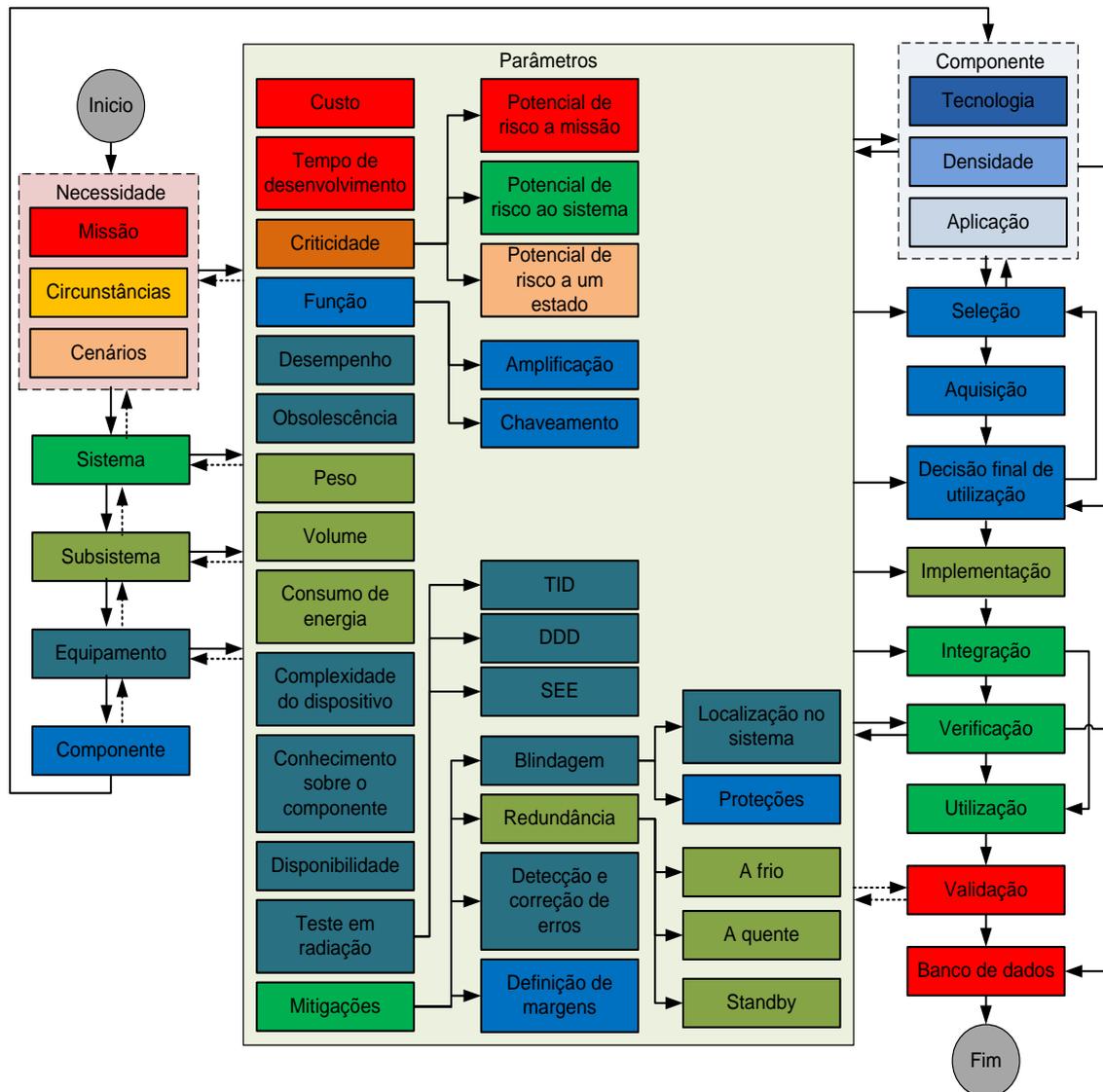
4.4 Descrição da metodologia

Através da definição das necessidades, parâmetros e características do componente, pode-se estabelecer a forma de utilização deste. O presente trabalho está relacionado à questão da radiação, porém os demais efeitos devem ser analisados para o desenvolvimento do sistema espacial.

A relação das definições sempre ocorre do nível mais alto de abstração para os níveis mais baixos, porém esta relação é recursiva. A definição dos parâmetros

com o componente será direta, porém com relação à necessidade estará mais distante. A Figura 4.5 ilustra a relação mencionada em conjunto com as etapas seguintes que também irão interagir com os critérios de decisão. As setas pontilhadas representam as relações que possuem menor imposição. As cores representam o aspecto de mais alto nível que o parâmetro pode representar.

Figura 4.5–Critérios de decisão do Componente.



Fonte: Produção do Autor.

O projeto parte da necessidade com a definição da missão, alimentada pelas circunstâncias (ambiente) e cenários (sistema), sendo recursivos à missão, pois dependem do sistema e das situações ambientais durante o período da missão.

Há uma hierarquia das soluções até chegar ao componente, todos estes elementos estarão diretamente ligados aos parâmetros de forma a atender a necessidade.

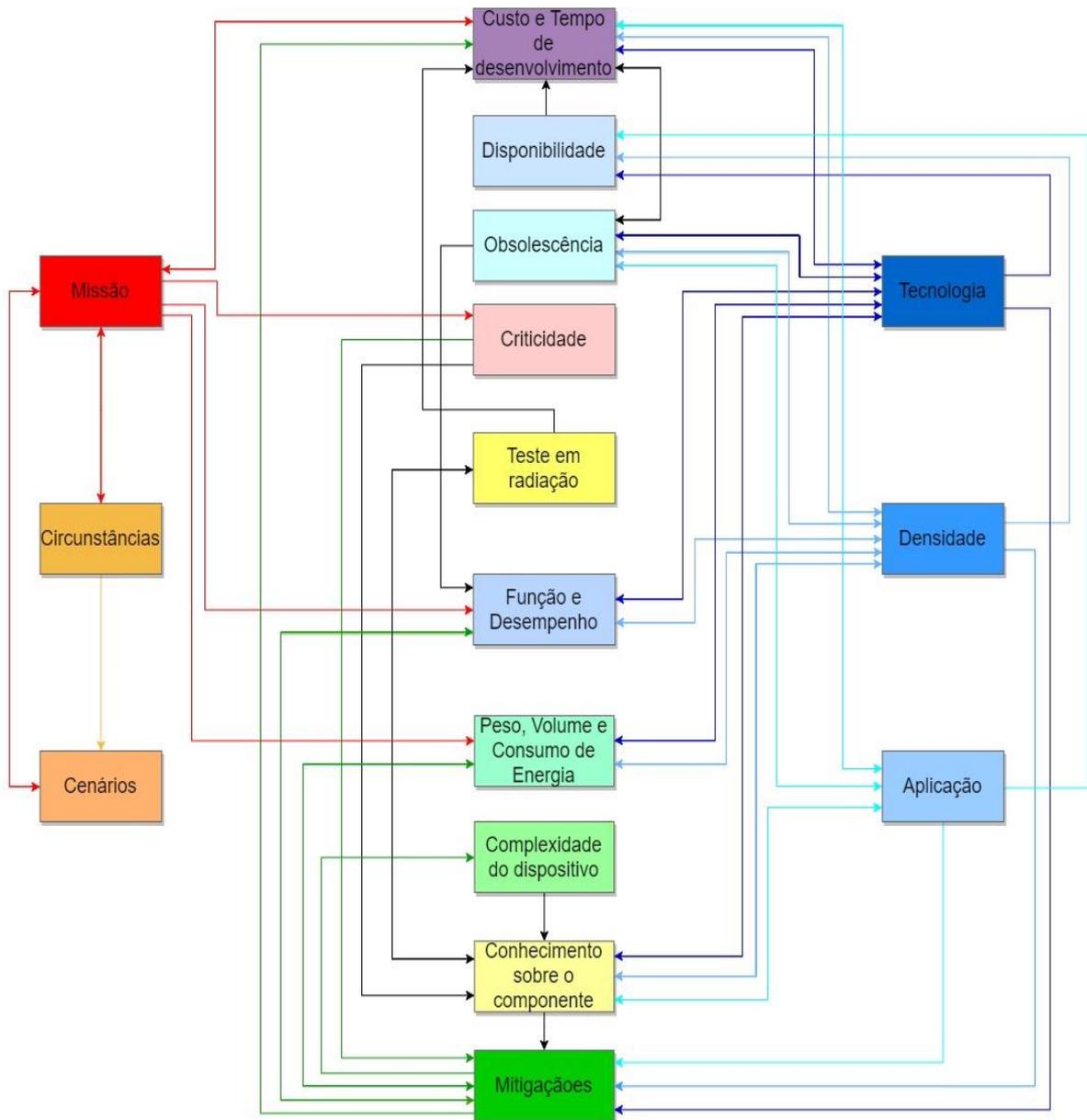
O processo de implementação do componente também interagirá com os parâmetros de forma a obedecê-los de acordo com o modelo escolhido de aquisição e integração. Através de verificações e validação será determinado o comportamento do respectivo componente, desta forma contribuindo para projetos futuros.

A missão irá fazer os primeiros requisitos (requisitos de *stakeholders*), que correspondem às entradas iniciais. Estes requisitos serão repassados para o sistema (requisitos de sistema), que por sua vez irá passar para o subsistema, equipamento e componente. De acordo com estes requisitos, serão decididos pela tecnologia, densidade e aplicação do componente, que retornarão com a informação dos parâmetros para cada caso aplicável.

A partir destes retornos serão determinados os mais indicados para a missão em específico e serão satisfeitas as necessidades quanto a radiação e as demais necessidades observadas. Caso não satisfaça, deverão ser abertas as margens possíveis, sendo um processo recursivo, principalmente em relação a alguns parâmetros que por sua vez retornarão a outros parâmetros. A Figura 4.6 ilustra essa relação das entradas e saídas dos critérios, porém de forma resumida.

A missão aqui observada está representando os requisitos do sistema para a definição do componente necessário. Este padrão foi observado para o desenvolvimento relativo aos transistores e ao processo normal de desenvolvimento de missões observado, porém pode sofrer mudanças de acordo com as especificações de cada caso. A Tabela no Apêndice A define de forma isolada cada um dos critérios com suas respectivas entradas e saídas.

Figura 4.6—Relação dos critérios de decisão do Componente.

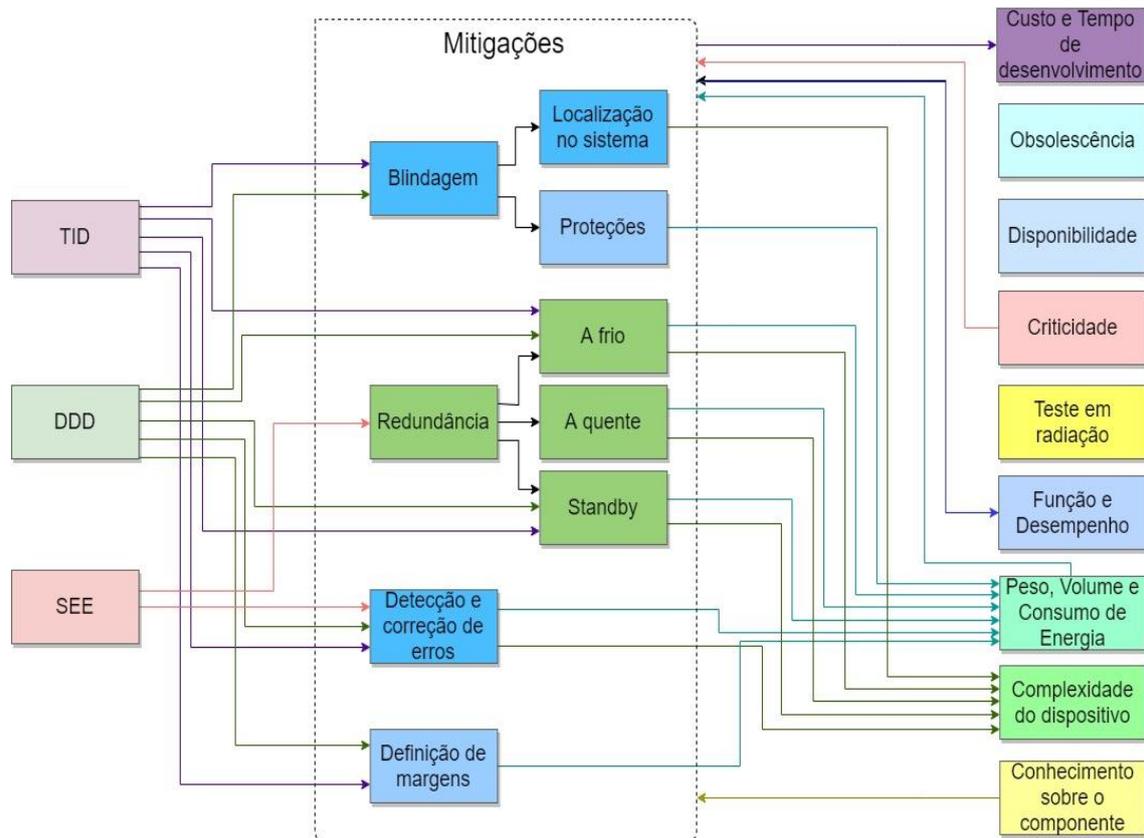


Fonte: Produção do Autor.

Dentro das mitigações (um dos parâmetros representados na Figura 4.5) existem diversos subconjuntos aplicáveis, sendo estes relacionados a cada mecanismo de radiação conforme são ilustrados na Figura 4.6. Para cada caso de utilização dos componentes existirão as mitigações que melhor se aplicarão. Estas mitigações aplicadas resultarão em outros aspectos que deverão ser analisados, podendo ser uma contribuição relevante de acordo com as necessidades ou ser pouco relevante frente aos prejuízos causados.

A Figura 4.7 se limita às conexões diretas com as mitigações, sendo que as demais conexões já foram representadas na Figura 4.6. Dentro de cada ícone representado nas mitigações pode-se desmembrar em mais formas de mitigações.

Figura 4.7–Relação dos critérios de decisão do Componente com as possíveis mitigações.



Fonte: Produção do Autor.

Assim como as mitigações foram desmembradas, os outros parâmetros também podem ser desmembrados, aumentando as definições das decisões a serem tomadas.

A escolha e integração adequadas do componente, analisando os parâmetros afetados e a forma de falha, são de suma importância para melhor implementação dos COTS ao sistema, o que pode aumentar consideravelmente a vida útil do satélite.

5 ESTUDO DE CASO

Este capítulo corresponde ao estudo de caso, onde são analisados transistores expostos à radiação, para desta forma, analisar sua degradação e verificar o quanto o processo metodológico pode contribuir para otimizar a escolha e integração do componente ao sistema espacial.

Os componentes escolhidos são os transistores bipolares 2N2905A, 2N2219A e o 2N2222A, utilizados em aplicações de baixa potência, tanto como comutadores (chave) como amplificadores.

O Experimento foi realizado no LRI (Laboratório de Radiação Ionizante) do IEAv (Instituto de Estudos Avançados) à temperatura ambiente de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Os transistores foram expostos à radiação gama de uma fonte de Cobalto 60, à taxa de dose de 1Krad/h.

5.1 Transistor 2N2905A

O primeiro transistor testado foi 2N2905A junção PNP. A Tabela 5.1 mostra algumas informações do datasheet deste dispositivo, que serão analisados nos gráficos seguintes.

O teste foi realizado com uma dose total acumulada de 300 krad, sendo aplicada em 6 etapas de irradiação, com 14 transistores inseridos em uma placa de teste permanecendo em uma polarização DC, onde a base do transistor permaneceu com alimentação. Após o término da irradiação ficaram 24h à temperatura ambiente ($25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) nas mesmas condições de polarização. Os resultados obtidos ao longo das doses de radiação e do *annealing* de 24 horas estão representados nos gráficos a seguir.

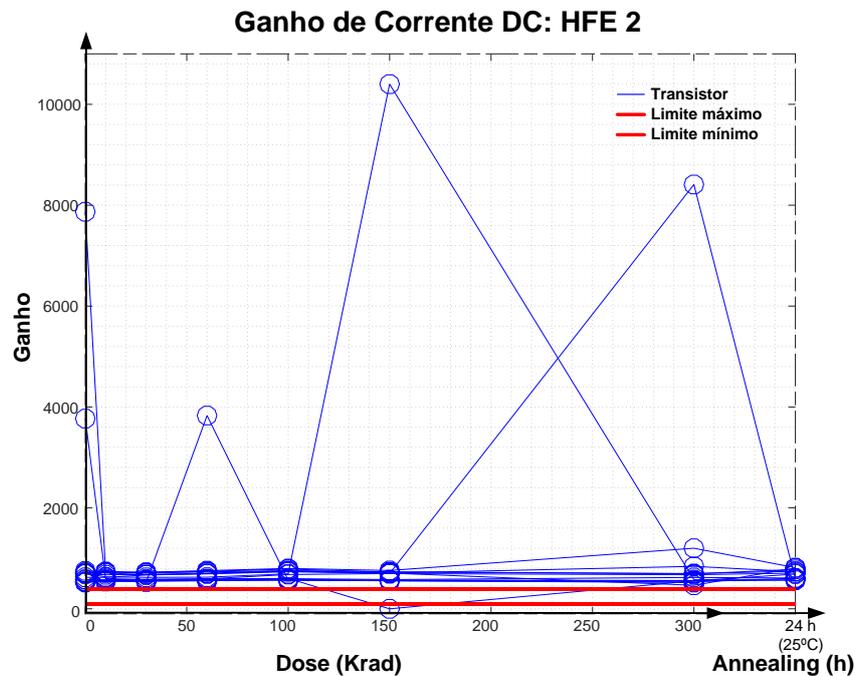
Na Figura 5.1, está representado o parâmetro de Ganho de Corrente DC HFE 2, a maioria dos transistores permaneceram acima do limite máximo e alguns valores chegaram muito alto.

Tabela 5.1 – Datasheet do transistor 2N2905A.

Parâmetro	Símbolo	Condição de teste	Min.	Max.
Corrente de Corte Coletor-Base	Icbo	Vcb = -50 V		20 nA
Corrente de Corte Coletor-Emissor	Ices	Vce = -40 V		1 µA
Corrente de Corte Emissor-Base	Iebo	Veb = -3,5 V		50 nA
Ganho de Corrente DC	HFE 1	Ic = -0.1 mA, Vce = -10 V	30	
	HFE 2	Ic = -1.0 mA, Vce = -10 V	100	400
	HFE 3	Ic = -10 mA, Vce = -10 V	50	
	HFE 4	Ic = -150 mA, Vce = -10 V	100	300
	HFE 5	Ic = -500 mA, Vce = -10 V	50	
Tensão de Saturação Base-Emissor	Vbesat1	Ic = -150 mA, Ib = -15 mA		0,4 V
	Vbesat2	Ic = -500 mA, Ib = -50 mA		1,6 V
Tensão de Saturação Coletor-Emissor	Vcesat1	Ic = -150 mA, Ib = -15 mA		1,3 V
	Vcesat2	Ic = -500 mA, Ib = -50 mA		2,6 V

Fonte: Datasheet Microsemi 2N2905A (2020).

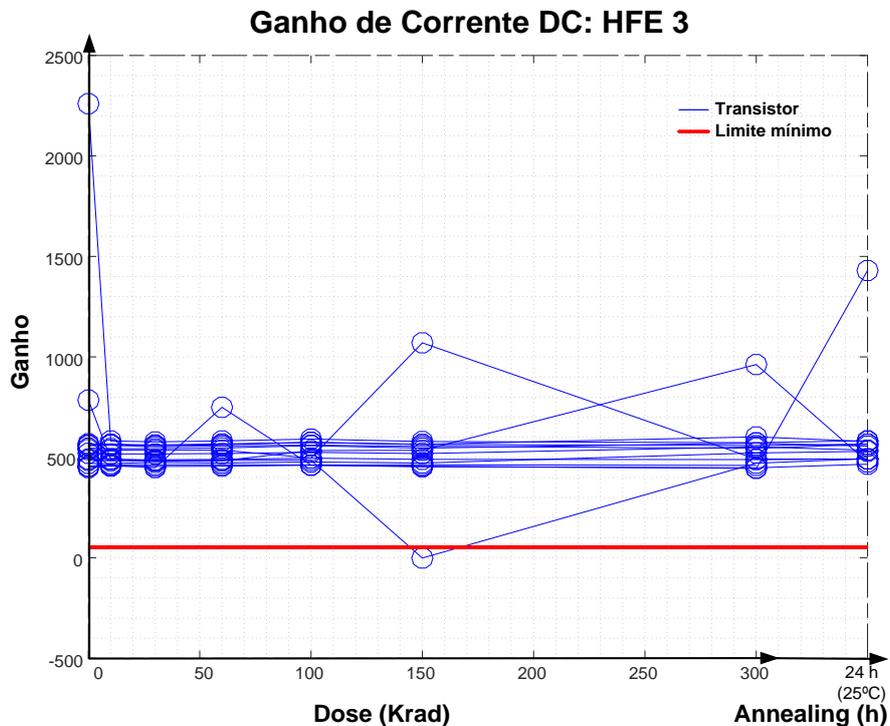
Figura 5.1–Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 2.



Fonte: Produção do Autor.

O Ganho de Corrente DC HFE 3 está representado na Figura 5.2, a maioria dos transistores permaneceram acima do limite mínimo com estabilidade dos valores.

Figura 5.2–Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 3.

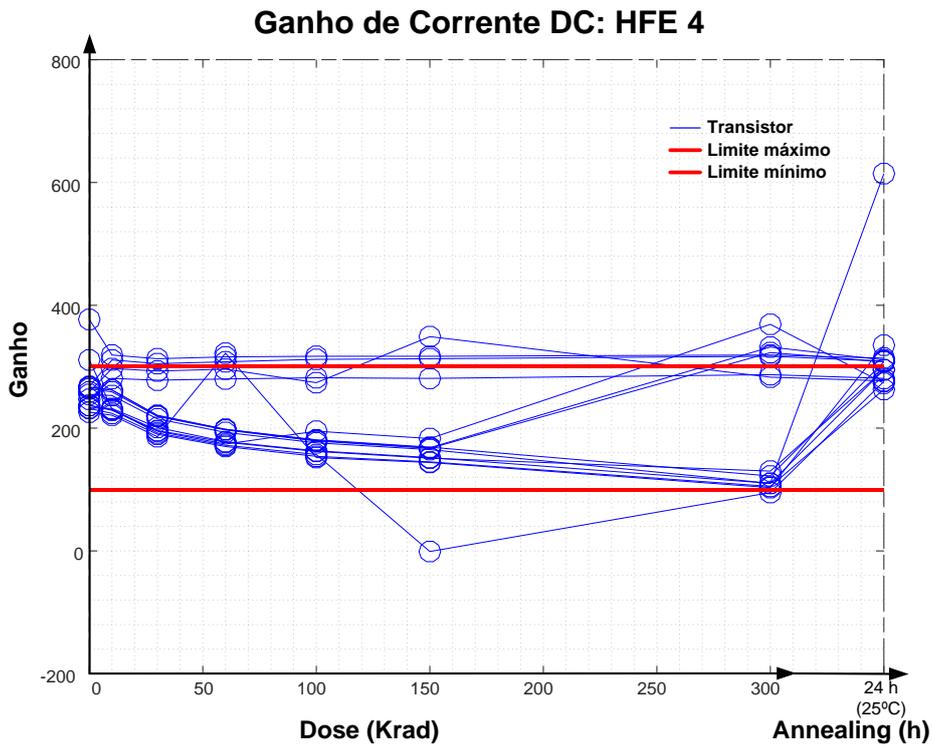


Fonte: Produção do Autor.

O Ganho de Corrente DC HFE 4 está representado na Figura 5.3, todos os transistores ficaram próximos da região das limitações, porém alguns deles não ficaram dentro desses limites referentes à todas as etapas de radiação. Em muitos transistores é possível observar o declínio do ganho ao longo das etapas de irradiação, e a retomada nas etapas de *annealing*, demonstrando os efeitos da radiação neste parâmetro de ganho.

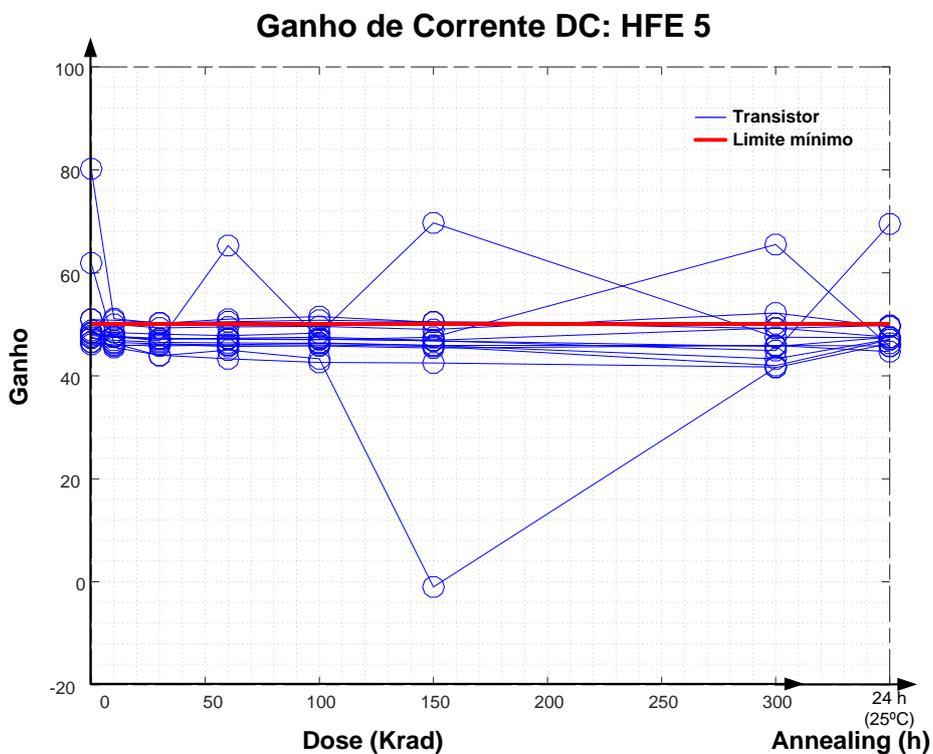
O ganho de Corrente DC HFE 5 está representado na Figura 5.4, a maioria dos transistores permaneceram um pouco abaixo do limite mínimo em todas as medições, mas é possível observar que ao longo das doses de radiação houve um pequeno declínio do ganho da maioria dos transistores e retomada durante o período de *annealing*. Em alguns transistores ocorreu uma pequena oscilação de aumento de ganho.

Figura 5.3 – Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 4.



Fonte: Produção do Autor.

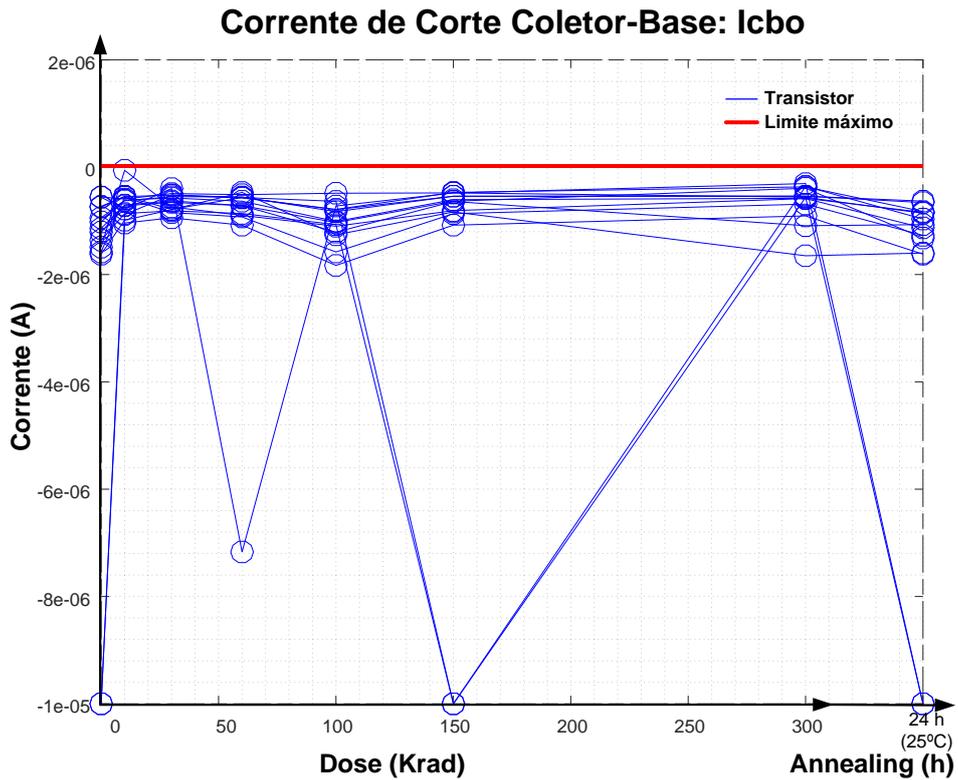
Figura 5.4 – Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 5.



Fonte: Produção do Autor.

Para o parâmetro de Corrente de Corte, pode-se observar que ocorrem oscilações, porém os valores permanecem inferiores ao limite máximo durante todo o período de teste. A Figura 5.5 ilustra o parâmetro Corrente de Corte Coletor-Base, a Figura 5.6 ilustra o parâmetro Corrente de Corte Coletor-Emissor e a Figura 5.7 ilustra o parâmetro Corrente de Corte Emissor-Base.

Figura 5.5—Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Coletor-Base.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.6–Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Coletor-Emissor.

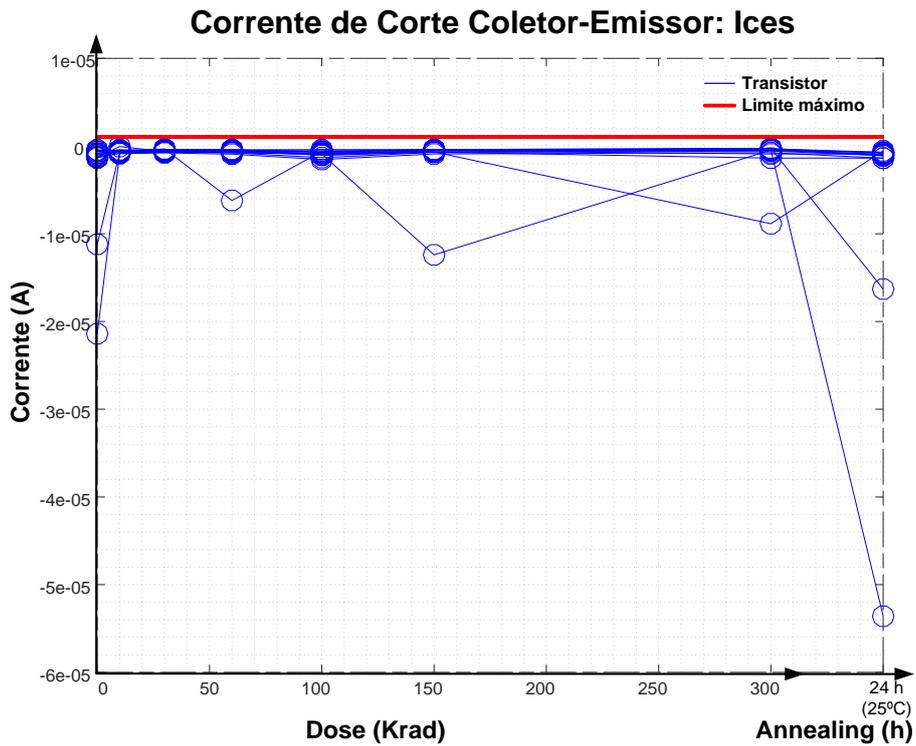
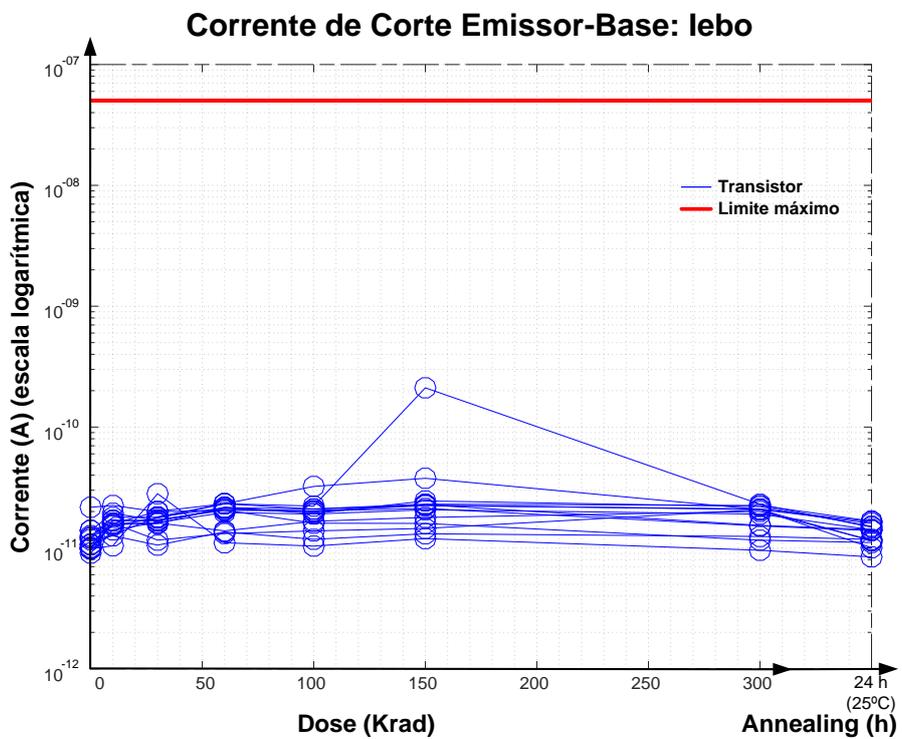
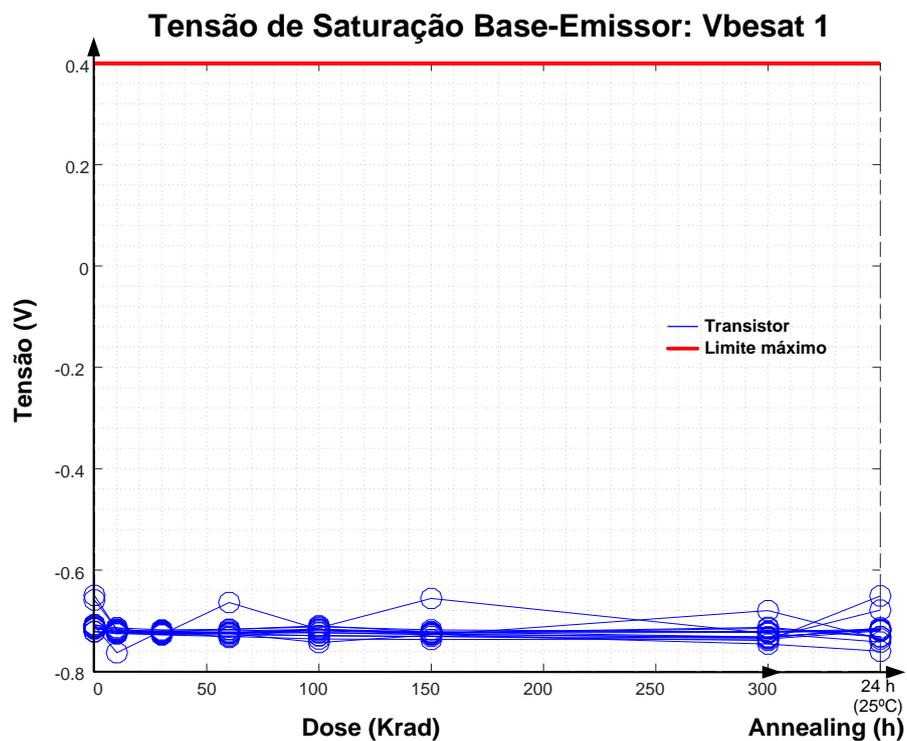


Figura 5.7–Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Emissor-Base.



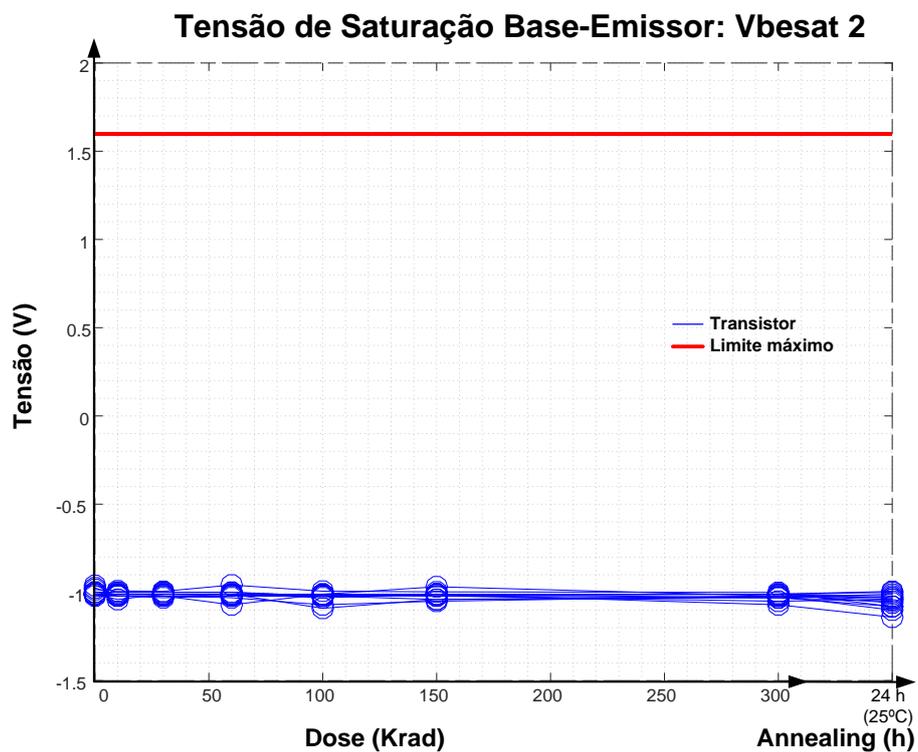
Os gráficos das curvas referentes à Tensão de saturação Base-Emissor 1 e 2 e Coletor-Emissor 1 e 2, estão representados nas Figuras 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11, pode-se observar que os valores permanecem estáveis e inferiores ao limite máximo.

Figura 5.8 – Gráfico do parâmetro Tensão de Saturação Base-Emissor 1.



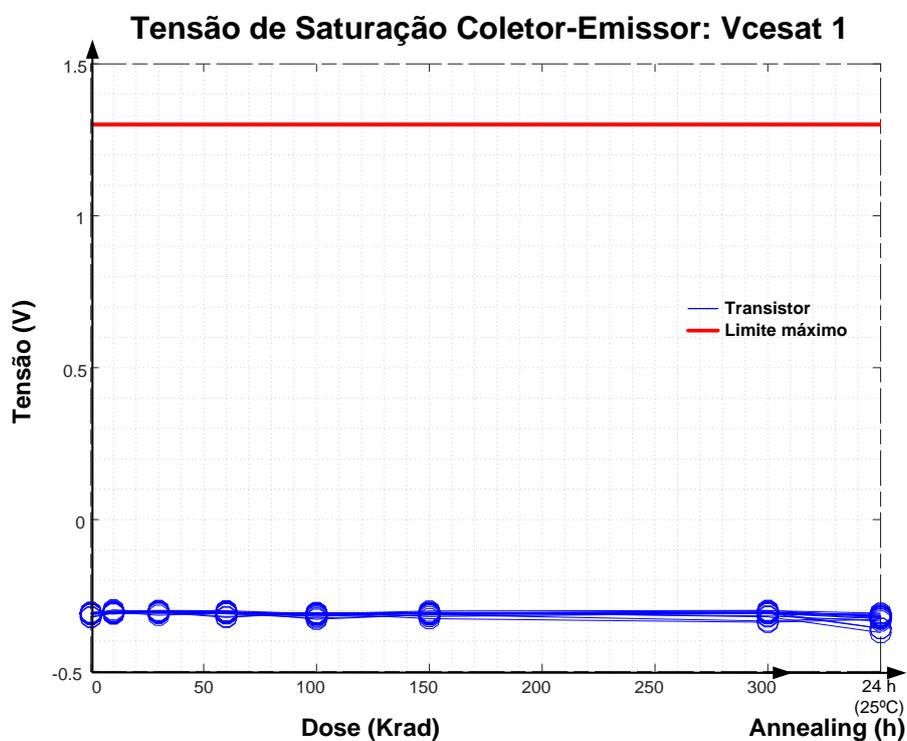
Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.9–Gráfico do parâmetro Tensão de Saturação Base-Emissor 2.



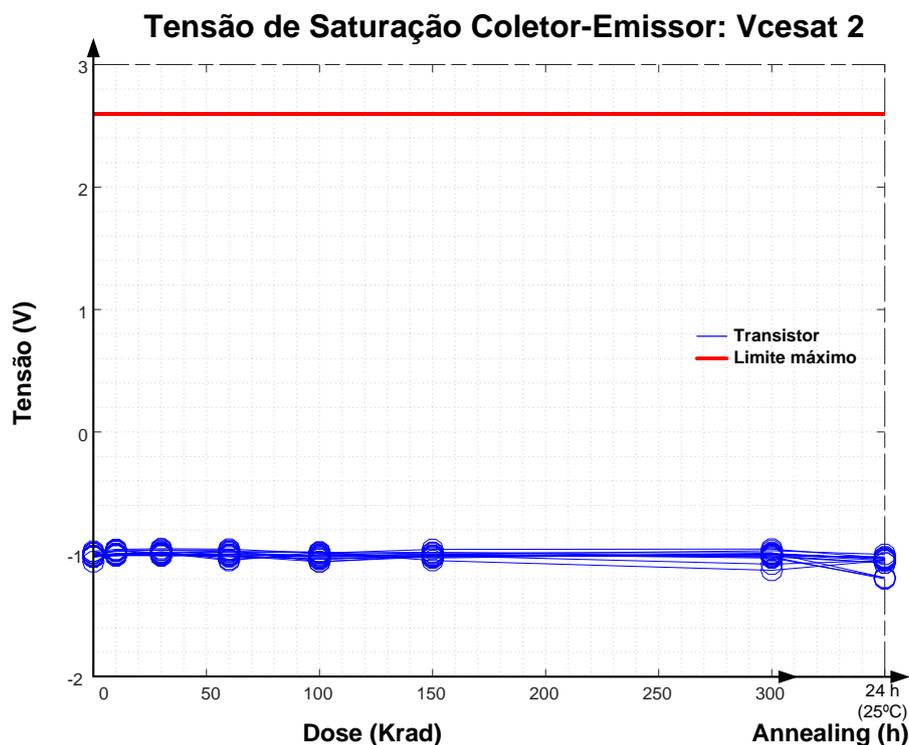
Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.10–Gráfico do parâmetro Tensão de Saturação Coletor-Emissor 1.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.11—Gráfico do parâmetro Tensão de Saturação Coletor-Emissor 2.



Fonte: Produção do Autor.

5.1.1 Resultados do Transistor 2N2905A

Um transistor ficou abaixo dos limites mínimos de ganho na etapa de 150 Krads e ficou consideravelmente abaixo no parâmetro de Corrente de Corte Coletor-Emissor e nos parâmetros de Tensões de Saturação, indicando uma possível condição anômala do componente, por este motivo seus valores extremos foram suprimidos.

Conforme foi observado pelos gráficos, o parâmetro do ganho permaneceu instável, porém pode-se notar as variações com o decorrer das doses aplicadas aos transistores, ocorrendo o decaimento do ganho e a retomada durante o *annealing*. Para os parâmetros de corrente de corte e tensão de saturação, os valores permaneceram dentro dos limites e tiveram estabilidade parcial em grande parte das amostras ao longo do acúmulo de doses.

5.2 Transistor 2N2219A

O transistor 2N2219A, junção NPN, corresponde ao complementar do anterior. A Tabela 5.2 mostra algumas informações do *datasheet* deste dispositivo, que serão analisados nos gráficos seguintes.

O ensaio foi realizado com uma dose total acumulada de 90 krad, sendo esta aplicada em 3 etapas de irradiação, com 10 transistores inseridos em uma placa de teste permanecendo em uma polarização DC, onde a base do transistor permaneceu com alimentação. Após o término da irradiação ficaram 24h à temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) nas mesmas condições de polarização. Depois os transistores ficaram com todos os seus terminais aterrados e expostos há $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante uma semana (168 horas). Dois transistores não irradiados serviram como referência. Os resultados obtidos ao longo das doses de radiação e do recozimento estão representados nos gráficos a seguir.

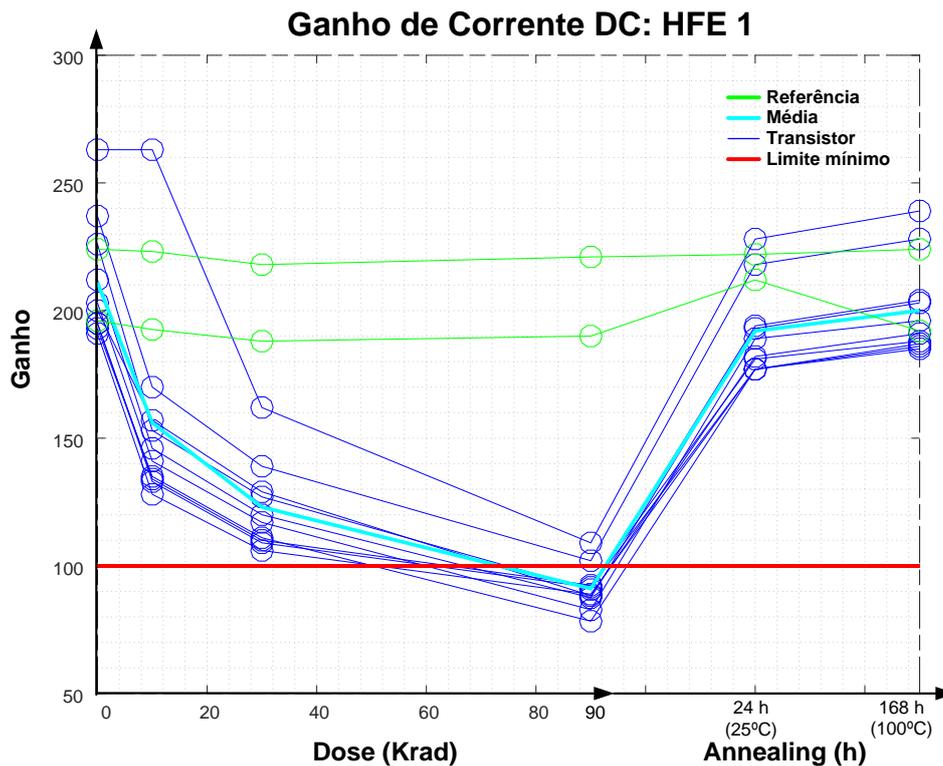
Tabela 5.2 – Datasheet do transistor 2N2219A.

Parâmetro	Símbolo	Condição de teste	Min.	Max.
Corrente de Corte Coletor-Base	Icbo 1	Vcb = 75 V		10uA
Corrente de Corte Coletor-Base	Icbo 2	Vcb = 60 V		10nA
Corrente de Corte Coletor-Emissor	Ices	Vce = 50 V		10nA
Corrente de Corte Emissor-Base	Iebo 1	Veb = 6 V		10μA
Corrente de Corte Emissor-Base	Iebo 2	Veb = 4 V		10nA
Ganho de Corrente DC	HFE 1	Ic = 10 mA, Vce = 10 V	100	
	HFE 2	Ic = 150 mA, Vce = 10 V	100	300
	HFE 3	Ic = 500 mA, Vce = 10 V	30	
Tensão de Saturação Base-Emissor	Vbesat 1	Ic = 150 mA, Ib = 15 mA	0,6	1,2
	Vbesat 2	Ic = 500 mA, Ib = 50 mA		2
Tensão de Saturação Coletor-Emissor	Vcesat 1	Ic = 150 mA, Ib = 15 mA		0,3
	Vcesat 2	Ic = 500 mA, Ib = 50 mA		1

Fonte: Datasheet Microsemi 2N2219A (2020).

Na Figura 5.12, está representado o parâmetro de Ganho de Corrente DC HFE 1, onde fica claro que a medida que o componente foi recebendo dose de radiação seu ganho foi reduzindo, ficando abaixo do limite mínimo. Com o *annealing* houve uma recuperação deste parâmetro, chegando próximo aos valores medidos antes da irradiação.

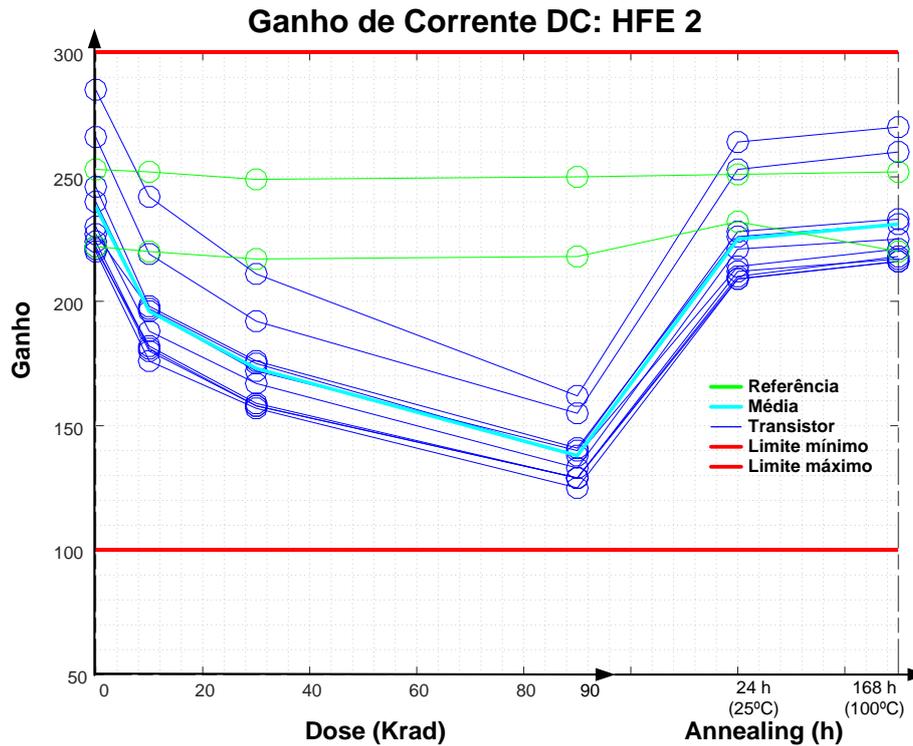
Figura 5.12–Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 1.



Fonte: Produção do Autor.

Na Figura 5.13, está representado o parâmetro de Ganho de Corrente DC HFE 2, nota-se que a medida que o componente foi recebendo dose de radiação seu ganho foi reduzindo, porém, até o termino do teste, os valores não ficaram abaixo do limite mínimo. Também nota-se a recuperação dos valores durante o *annealing*.

Figura 5.13—Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 2.

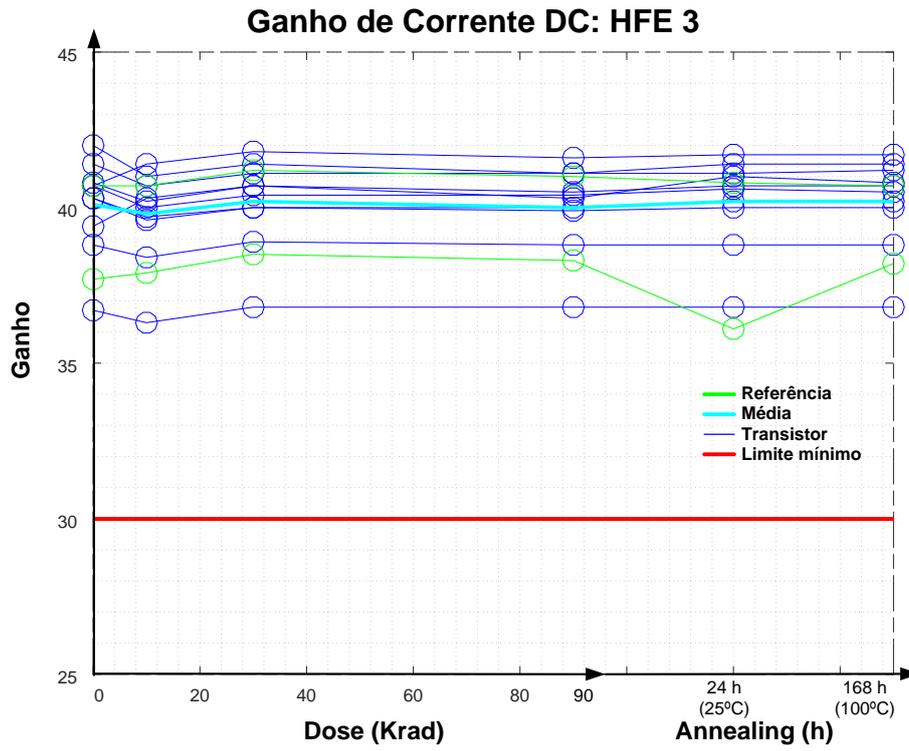


Fonte: Produção do Autor.

Na Figura 5.14, está representado o parâmetro de Ganho de Corrente DCHFE 3, nota-se que o ganho permaneceu bem estável durante todo o período de radiação, demonstrando que para essa característica de ganho há maior estabilidade do componente. Existem determinados pontos de polarização que ficam mais estáveis, este é um exemplo.

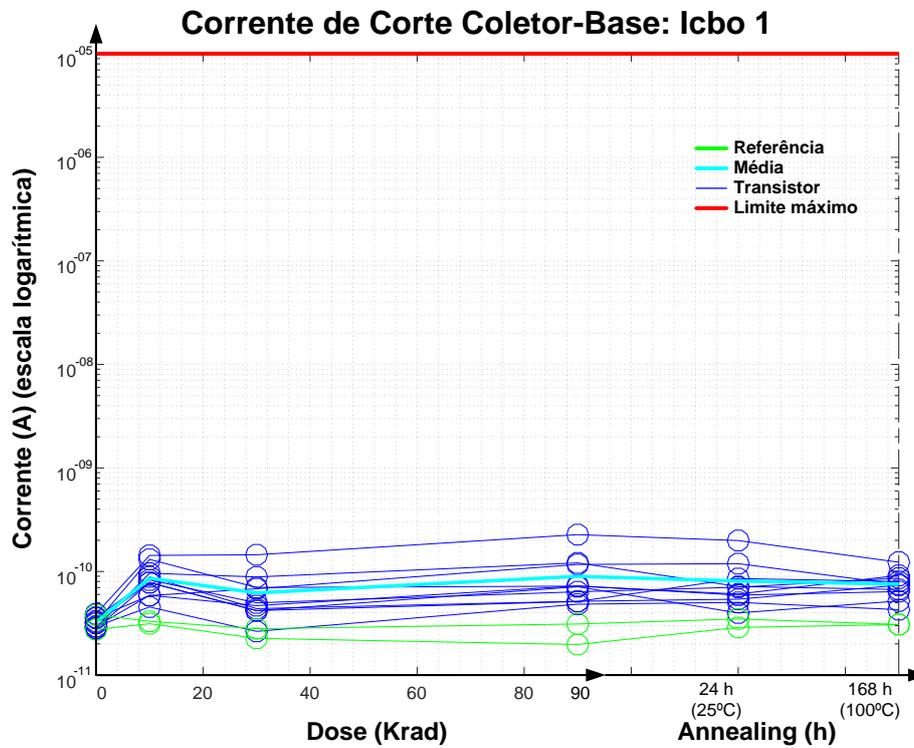
Para o parâmetro de Corrente de Corte Coletor-Base 1 e 2 Coletor-Emissor e Emissor Base 1 e 2, ilustrados nas Figuras 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19, os valores permaneceram estáveis e não ultrapassaram os limites.

Figura 5.14—Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 3.



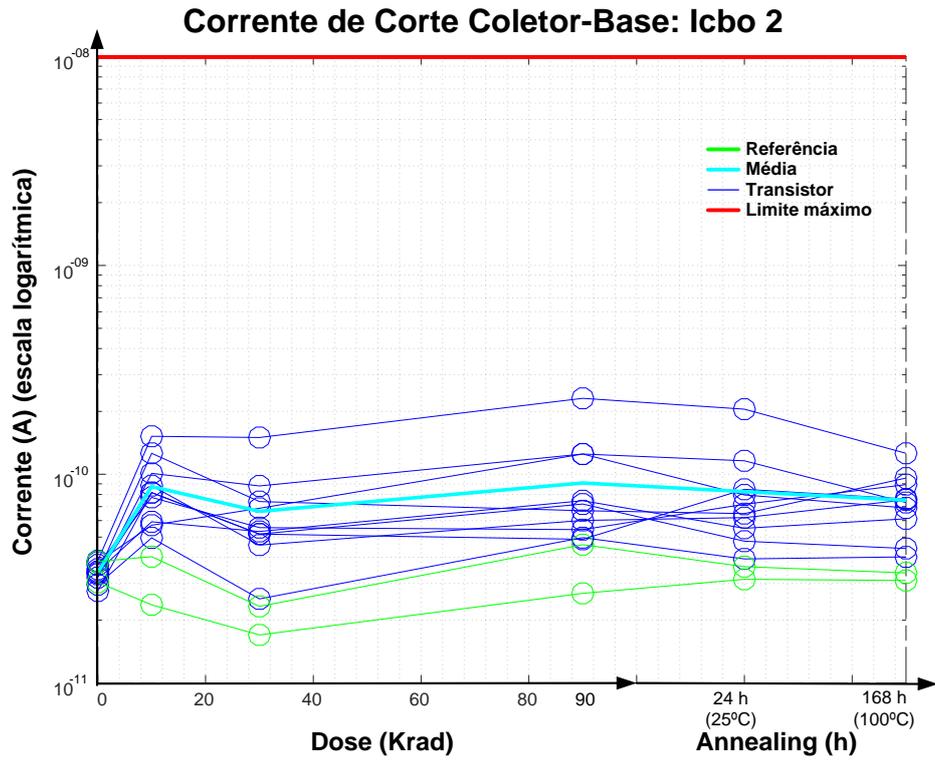
Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.15—Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Coletor-Base 1.



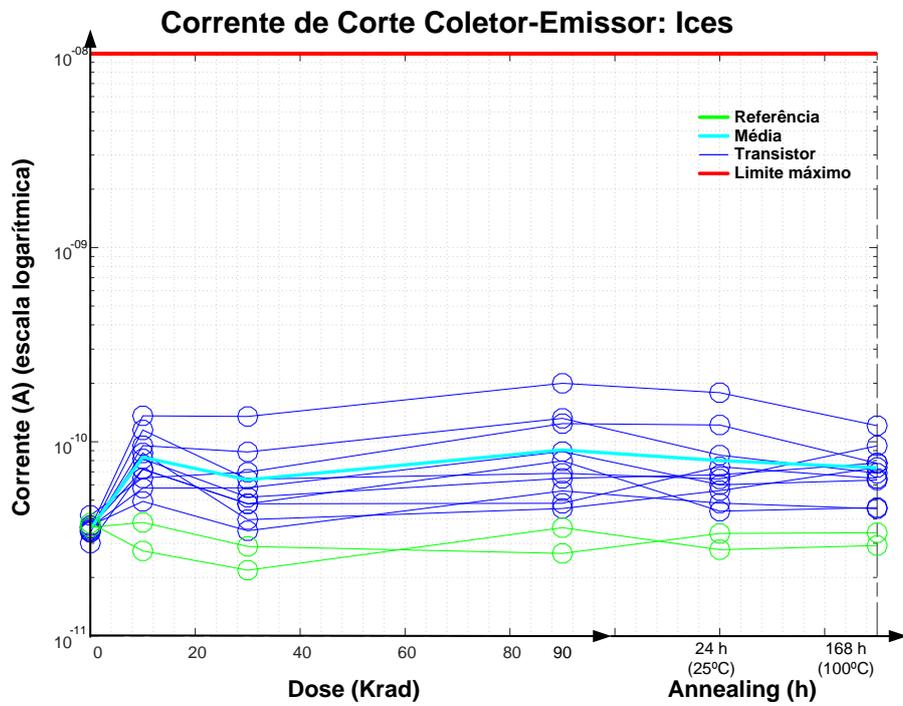
Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.16–Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Coletor-Base 2.



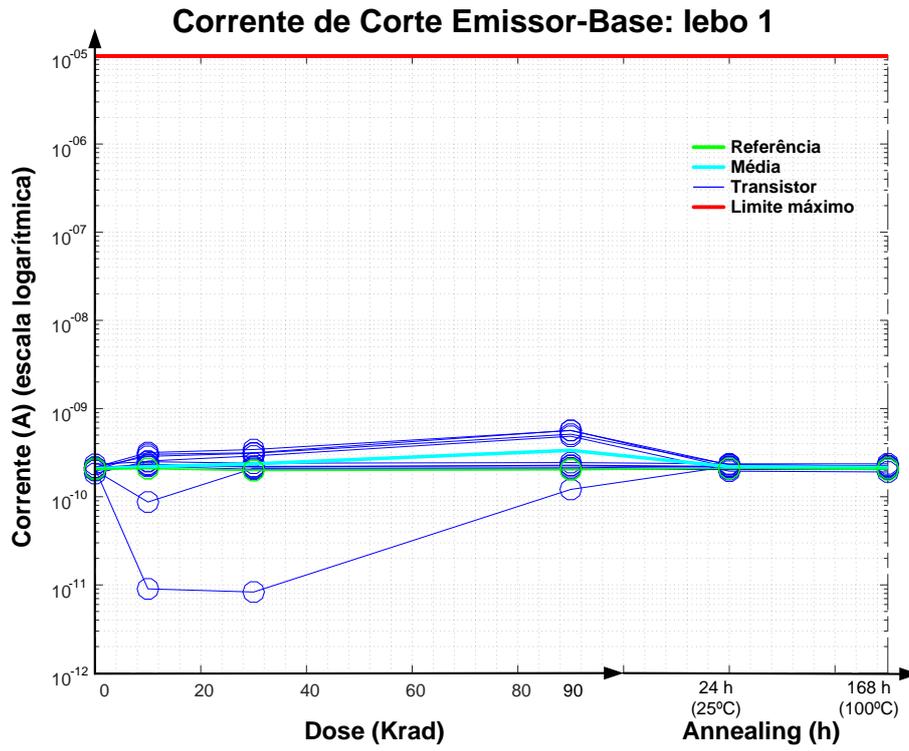
Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.17–Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Coletor-Emissor.



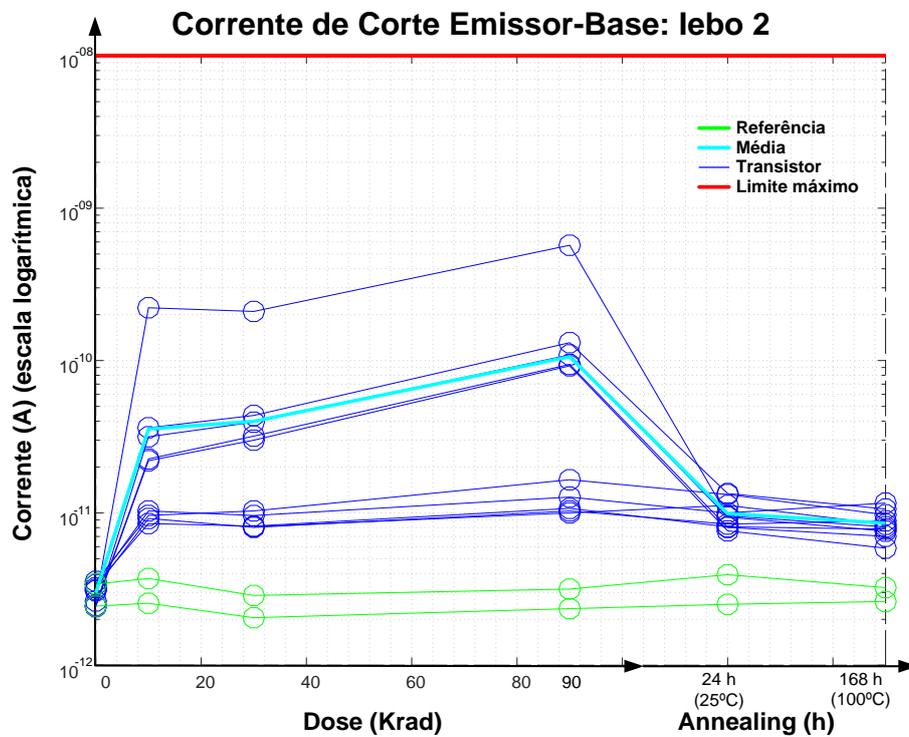
Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.18—Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Emissor-Base 1.



Fonte: Produção do Autor.

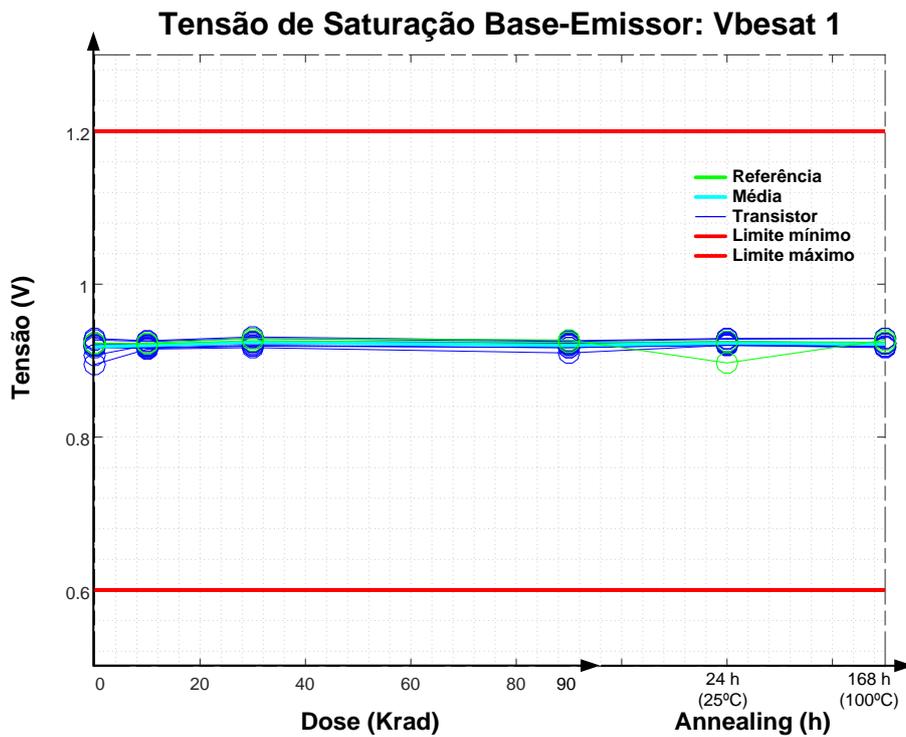
Figura 5.19—Gráfico do parâmetro de Corrente de Corte Emissor-Base 2.



Fonte: Produção do Autor.

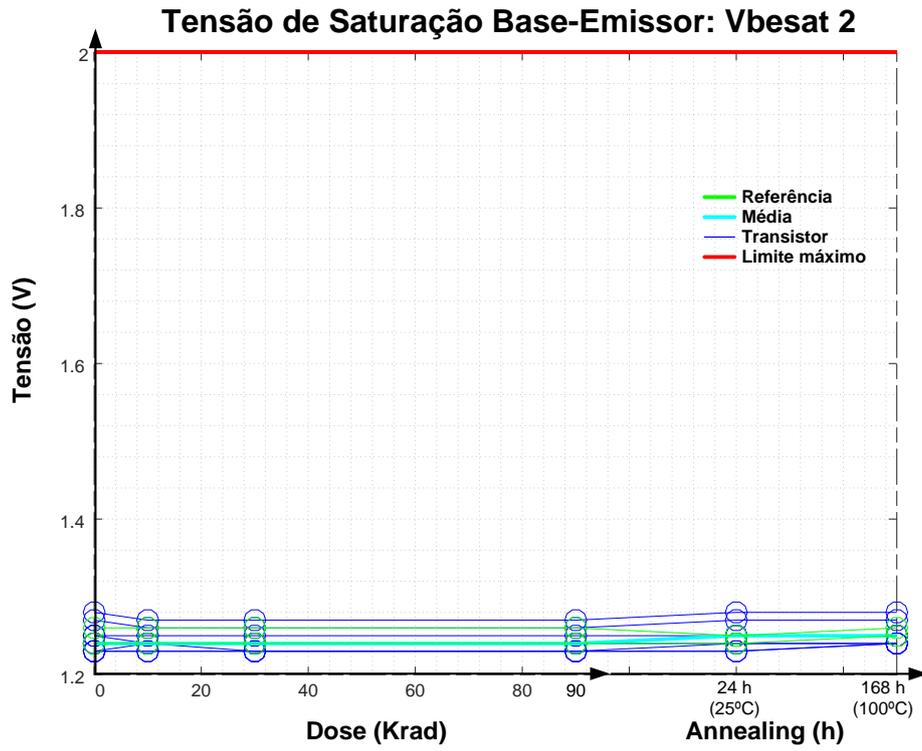
Os gráficos das curvas referentes à Tensão de saturação Base-Emissor 1 e 2 e Coletor-Emissor 1 e 2 estão representados nas Figuras 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23, pode-se observar que os valores permanecem entre os limites, não sendo observados variações significativas ao decorrer das doses de radiação.

Figura 5.20—Gráfico do parâmetro de tensão de Saturação Base-Emissor 1.



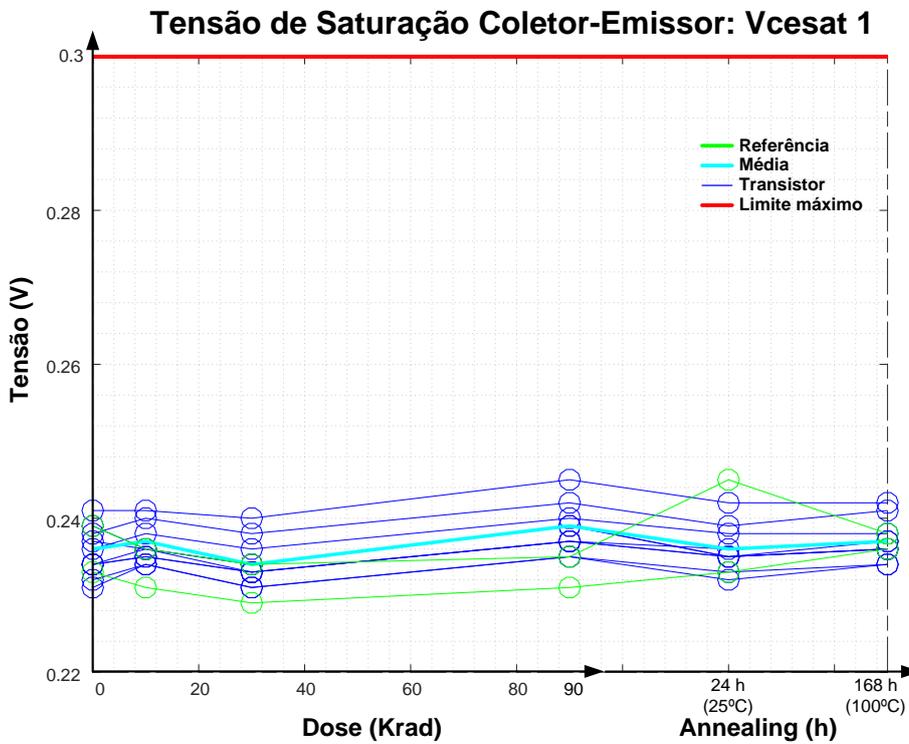
Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.21–Gráfico do parâmetro Tensão de Saturação Base-Emissor 2.



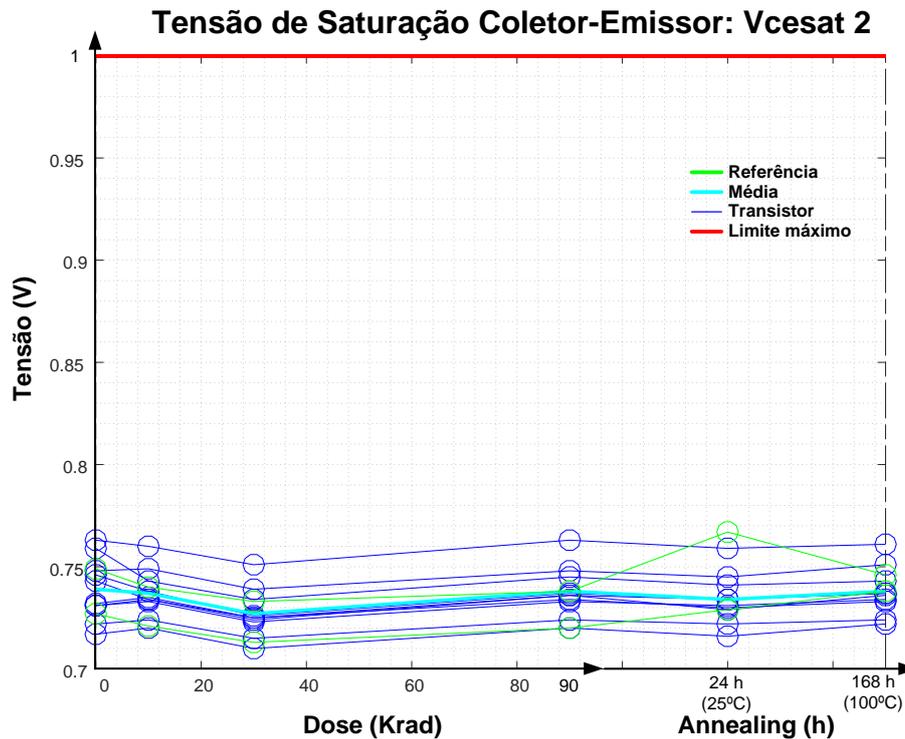
Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.22–Gráfico do parâmetro Tensão de Saturação Coletor-Emissor 1.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.23—Gráfico do parâmetro Tensão de Saturação Coletor-Emissor 2.



Fonte: Produção do Autor.

5.2.1 Resultados do Transistor 2N2219A

Neste componente, verifica-se claramente que para o parâmetro do ganho ocorreu degradação ao longo das doses de radiação, e é possível notar que para determinados pontos de polarização ocorre a estabilidade. Durante o *annealing* ouve uma recuperação parcial das características paramétricas dos transistores logo no período de 24 horas.

Para as tensões de saturação e corrente de corte os valores ficaram de acordo com os limites e permaneceram estáveis, não sofrendo mudanças significativas ao longo das doses de radiação.

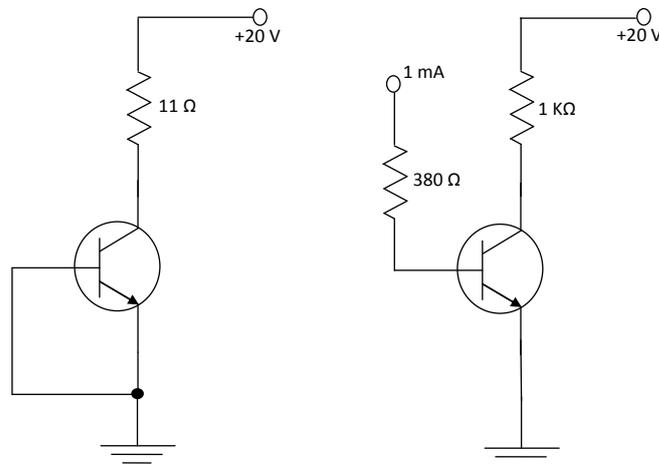
5.3 Transistor 2N2222A

O transistor 2N2222A junção NPN foi o último a ser testado, consistiu na avaliação dos parâmetros elétricos de 11 amostras, 5 amostras foram polarizadas na configuração ON e 5 em OFF (Figura 5.24) e irradiadas. A peça

restante ficou como amostra de controle e não foi irradiada e nem alimentada, servindo como referência para as outras amostras.

O teste foi realizado com uma dose total acumulada de 150 krad, sendo aplicada em 9 etapas de irradiação. Após o término da irradiação ficaram 24h à temperatura ambiente ($25\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$) nas mesmas condições de polarização. Depois os transistores tiveram todos os seus terminais aterrados e expostos há 100 °C durante uma semana (168 horas).

Figura 5.24–Polarização nas condições respectivamente OFF e ON para o ensaio TID.



Fonte: Produção do Autor.

A tabela 5.3 mostra algumas informações do *datasheet* deste dispositivo, que serão analisados nos gráficos seguintes.

Os resultados obtidos ao longo das doses de radiação e do *annealing* estão representados nos gráficos a seguir, com as médias das polarizações ON e das polarizações OFF, o transistor de referência e os limites dos parâmetros.

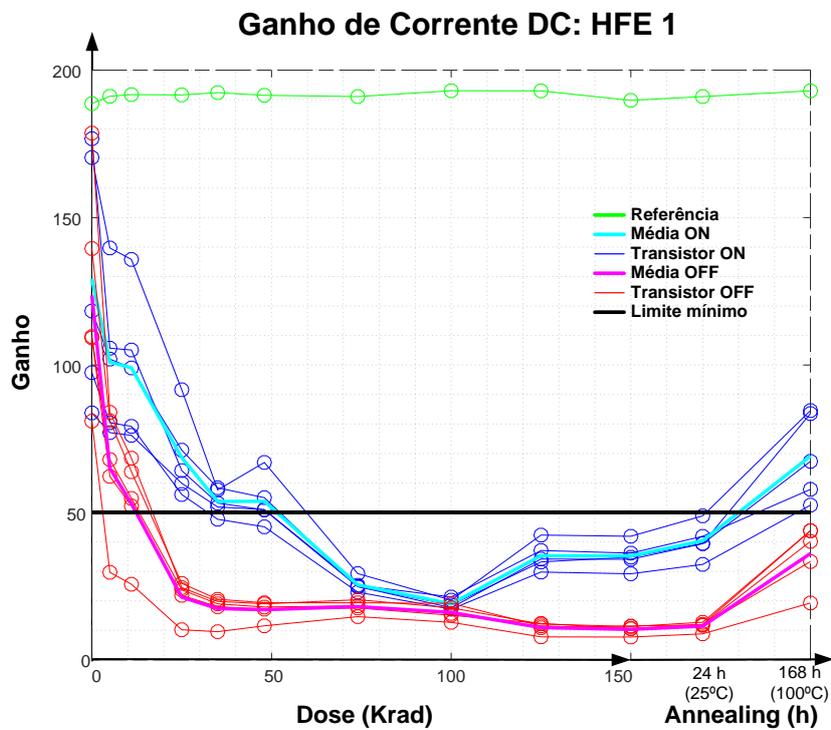
Nas Figuras 5.25, 5.26 e 5.27, estão representados os parâmetros de Ganho de Corrente DC HFE, onde fica claro que a medida que o componente foi recebendo dose de radiação seu ganho foi reduzindo. Pode-se notar que os transistores de polarização OFF sofreram mais com a radiação que os transistores de polarização ON. Durante o *annealing* principalmente em temperatura elevada ouve uma recuperação das características paramétricas dos transistores, porém para muitos deles não foi o suficiente para ficar acima do limite mínimo.

Tabela 5.3 – Datasheet do transistor 2N2222A.

Parâmetro	Símbolo	Condição de teste	Min.	Max.
Corrente de Corte Coletor-Base	Icbo	Vcb = 75 V		10uA
Corrente de Corte Coletor-Emissor	Ices	Vce = 50 V		50nA
Corrente de Corte Emissor-Base	Iebo	Veb = 4 V		10nA
Ganho de Corrente DC	HFE 1	Ic = 0.1 mA, Vce = 10 V	50	
	HFE 2	Ic = 1.0 mA, Vce = 10 V	75	325
	HFE 3	Ic = 10 mA, Vce = 10 V	100	
	HFE 4	Ic = 150 mA, Vce = 10 V	100	300
	HFE 5	Ic = 500 mA, Vce = 10 V	30	
Tensão de Saturação Base-Emissor	Vbesat 1	Ic = 150 mA, Ib = 15 mA	0,6	1,2
	Vbesat 2	Ic = 500 mA, Ib = 50 mA		2
Tensão de Saturação Coletor-Emissor	Vcesat 1	Ic = 150 mA, Ib = 15 mA		0,3
	Vcesat 2	Ic = 500 mA, Ib = 50 mA		1

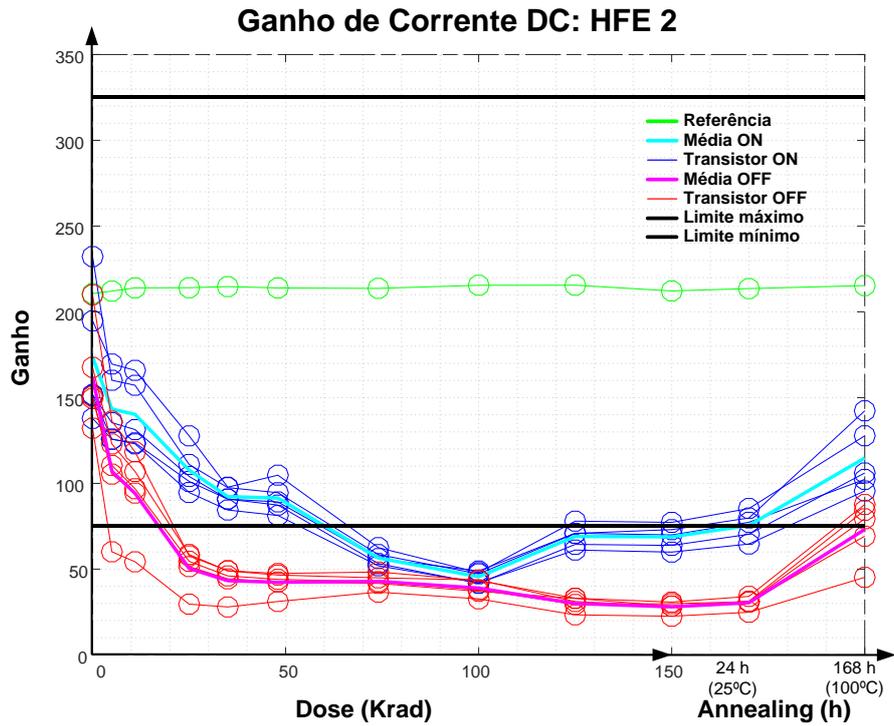
Fonte: Datasheet Microsemi 2N2222A (2020).

Figura 5.25–Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 1.



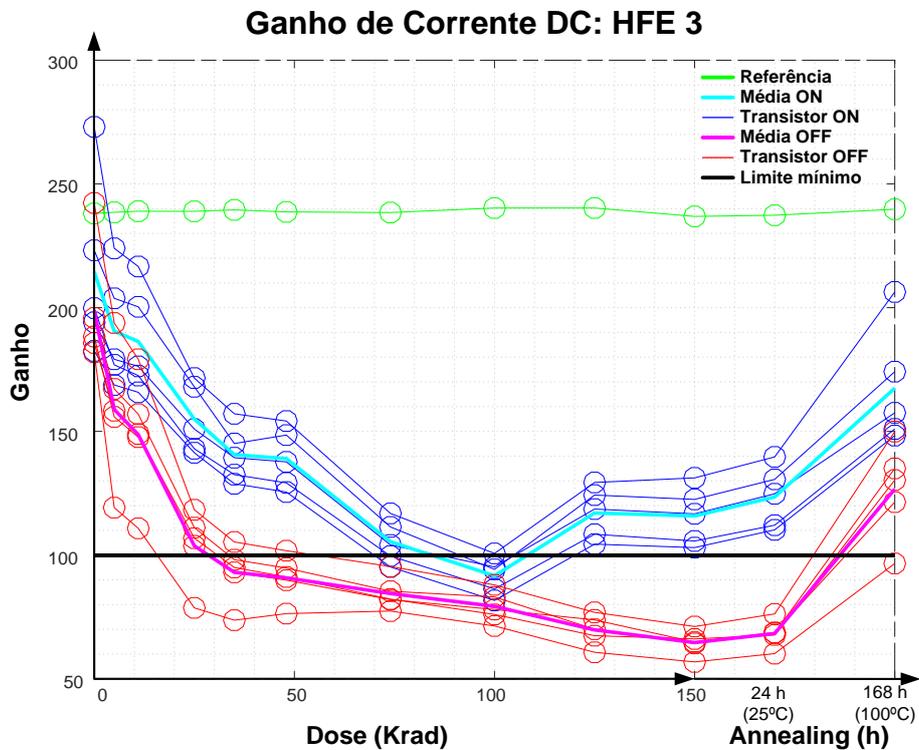
Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.26—Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 2.



Fonte: Produção do Autor.

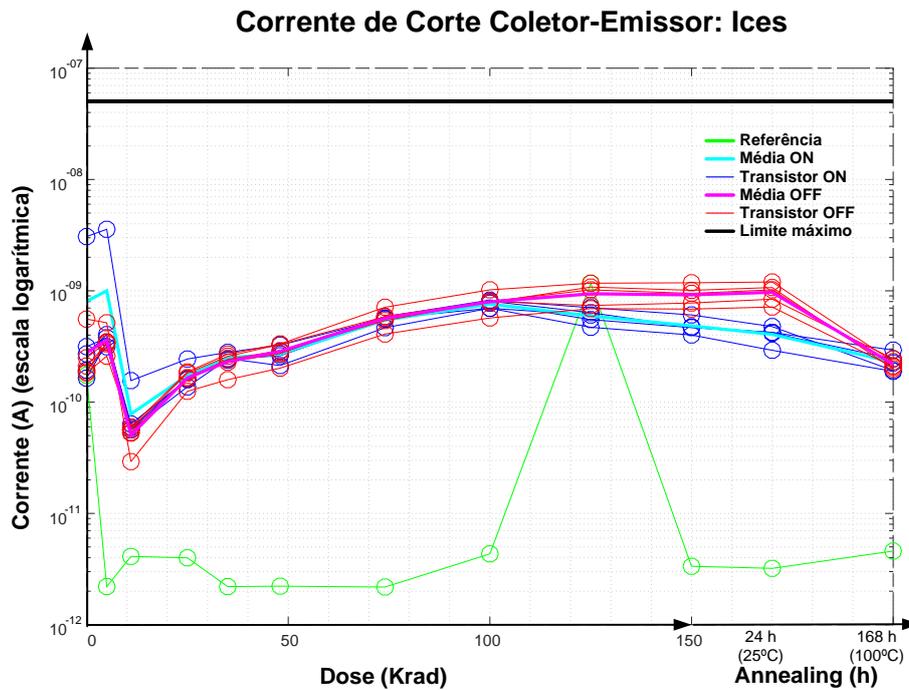
Figura 5.27—Gráfico do parâmetro de Ganho de Corrente DC 3.



Fonte: Produção do Autor.

Nas Figuras 5.28 e 5.29 estão representados os parâmetros de Corrente de Corte Coletor-Emissor e Corrente de Corte Coletor-Base, conforme observado, os valores dos transistores não ultrapassam o limite estipulado para o componente.

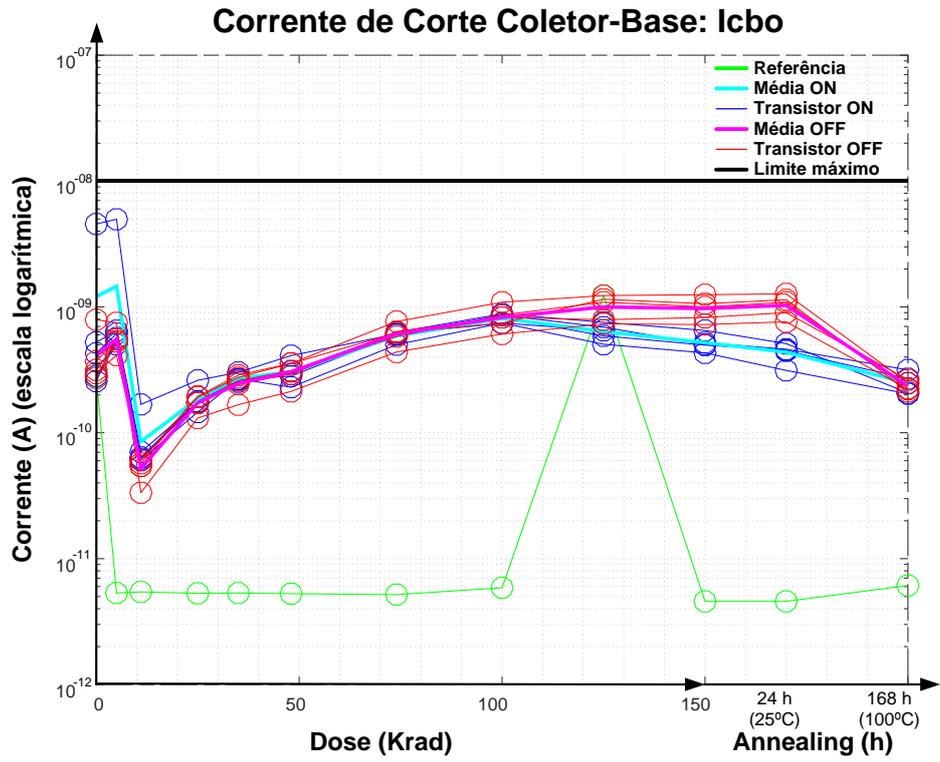
Figura 5.28—Gráfico do parâmetro de Corrente Coletor-Emissor.



Fonte: Produção do Autor.

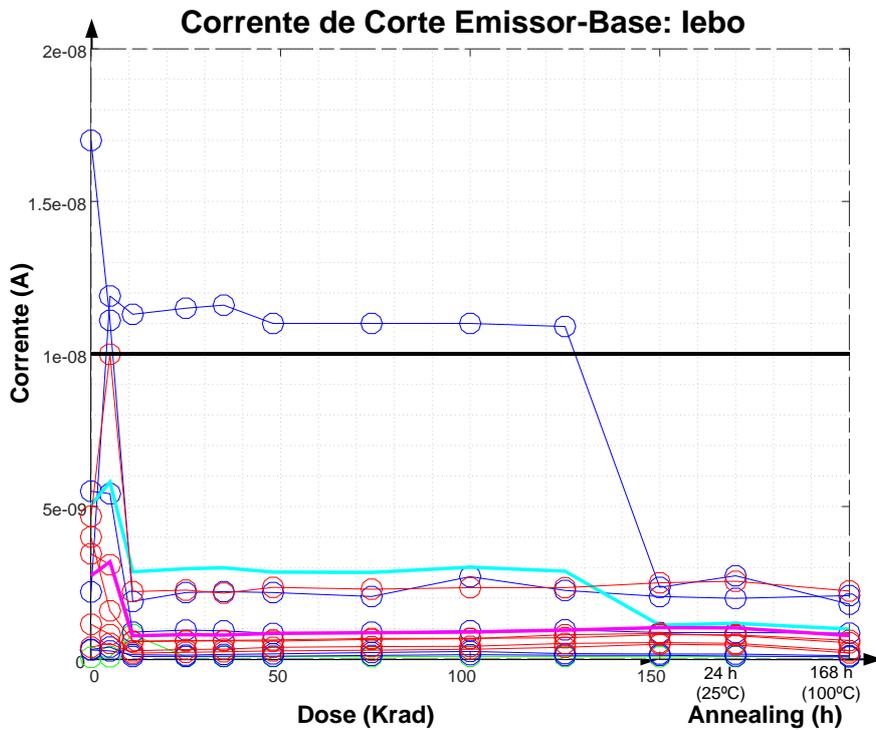
Na Figura 5.30 está representado o parâmetro de Corrente de Corte Emissor-Base, neste caso um transistor antes de ser irradiado teve seu valor medido para este parâmetro acima do limite máximo, porém depois suas medidas retornaram a normalidade. E um outro transistor ficou com as medidas acima do limite máximo durante o período de radiação retornado em 150 krad.

Figura 5.29—Gráfico do parâmetro de Corrente Coletor-Base.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.30—Gráfico do parâmetro de Corrente Emissor-Base.



Fonte: Produção do Autor.

5.3.1 Resultados do Transistor 2N2222A

Neste componente também verifica-se a degradação com a radiação no parâmetro do ganho, onde praticamente todas as amostras ficaram abaixo do limite mínimo em algum momento. É possível observar que em muitos componentes ao chegarem no seu mínimo de ganho, invertem a inclinação da curva, ocorrendo uma pequena recuperação ainda dentro das etapas de radiação, isso ocorre porque os transistores são mais susceptíveis a um determinado nível de radiação, onde os pares elétrons-lacunas geram o desvio das características paramétricas máximas.

Durante *annealing* é possível observar que a maior recuperação paramétrica dos transistores ocorreu durante o período a 100 °C, demonstrando que depois dos transistores chegarem em seu ponto mínimo de ganho e continuarem a serem irradiados, demoraram mais tempo para a tendência de retomada das características paramétricas.

Para as Correntes de Corte os valores ficaram de acordo com os limites e permaneceram estáveis, não sofrendo mudanças significativas ao longo das doses de radiação, exceto no caso do parâmetro de Corrente de Corte Emissor-Base que durante a irradiação um transistor ficou acima do limite máximo, mas foi um caso isolado.

5.4 Resultados gerais

A Dose Ionizante Total em transistores de tecnologia bipolar está relacionada principalmente ao aumento da corrente de base, que é causado pelo acúmulo de carga na base e o aumento da corrente de fuga fluindo para a base, especialmente quando há um óxido na superfície, gerando um acúmulo de cargas nas interfaces. Este aumento na corrente de base resulta em uma diminuição do ganho, demonstrando que para a função de amplificação os transistores testados não são tolerantes aos níveis de radiação aplicados.

Para o chaveamento a variação dos parâmetros não interferiu significativamente na operação, demonstrando que o componente atende ao uso como chave no sistema eletrônico com as doses TID apresentadas.

6 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA

Este capítulo fará uma análise da metodologia relacionada ao estudo de caso, avaliará a contribuição da metodologia relacionando ao estudo de caso e apontará a relação com outros componentes.

6.1 Características dos componentes testados

Os três componentes testados são bem similares possuindo pequenas diferenças paramétricas como consumo de energia, ganho e tempo de acionamento, que dependem do circuito que estarão inseridos. O transistor 2N2219A é muito semelhante ao transistor 2N2222A, podendo operar com tensões um pouco mais altas que o 2N2222A, ambos NPN, já o transistor PNP 2N2905A é complementar ao 2N2219A. No geral, são pequenos transistores de sinal comumente usados na comutação e amplificação de circuitos. A Tabela 6.1 mostra as características de cada um dos transistores testados.

Tabela 6.1 – Parâmetros relacionados aos transistores testados.

	Tecnologia	Densidade	Aplicação
2N2905A	BJT PNP de sinal	Componente discreto, não sendo muito denso	Comercial
2N2219A	BJT NPN de sinal	Componente discreto, não sendo muito denso	Comercial
2N2222A	BJT NPN de sinal	Componente discreto, não sendo muito denso	Comercial

Fonte: Produção do Autor.

6.2 Verificação do processo metodológico referente aos componentes testados

Depois de já determinado a missão e suas características, o sistema, os subsistemas e os equipamentos, deve-se então determinar o componente. Os parâmetros devem ser analisados em relação a cada componente pretendido conforme mostrado na Tabela 6.2.

Os parâmetros são importantes para fazer uma ligação entre as características dos componentes e as necessidades para sua integração ao circuito e sistema. Como pode-se observar na Tabela 6.2, os componentes referentes ao estudo de caso apresentam parâmetros similares, a principal diferença será referente aos resultados dos testes.

Tabela 6.2 – Parâmetros relacionados aos transistores testados.

Parâmetros	2N2905A / 2N2219A / 2N2222A
Custo	Baixo custo.
Tempo de desenvolvimento	Entrega rápida e tempo de desenvolvimento rápido, porém dependerá de eventuais mitigações.
Criticidade	Depende da aplicação.
Função	Amplificação e chaveamento, conforme foi observado nos teste e é um fato conhecido, a amplificação é mais propensa a falha para os BJTs
Desempenho	Todos os três tiveram um desempenho um pouco menor que 3 MHz de acordo com seus respectivos datasheets.
Obsolescência	Obsolescência baixa, componentes muito usados e com alta produção.
Peso	Peso considerável em relação a outras tecnologias.
Volume	Volume considerável em relação a outras tecnologias.
Consumo de energia	Consumo de energia considerável em relação a outras tecnologias.
Complexidade do dispositivo	Componente discreto, baixa complexidade.
Conhecimento sobre o componente	Alto conhecimento sobre os BJTs. Para estes componentes conhecimento muito alto em relação a TID depois dos testes.
Disponibilidade	Alta disponibilidade
Teste em radiação	Teste em radiação TID efetuado, gerando conhecimento sobre os componentes. Outros testes aplicáveis seriam o DDD que apresentam efeitos similares ao TID, porém por mecanismo diferente, e o SEE que pode gerar SET e SEU que não são destrutivos e o SEB que pode ser danoso ao componente e circuito, sendo necessário um estudo referente ao circuito que o componente será inserido.
Mitigações	Blindagem, definição de margens no circuito, redundância, detecção e correção de erros principalmente em relação ao SEB.

Fonte: Produção do Autor.

A partir dos testes é possível analisar as características de degradação dos componentes em relação a radiação TID.

No transistor 2N2905A o ganho ficou muito instável e com valores fora dos limites especificados pelo *datasheet*, porém foi o transistor que recebeu maior Dose Total Acumulada, 300 Krad, e muitos dos transistores foram decaindo o ganho mais não de forma drástica.

O transistor 2N2219A recebeu menor Dose Total Acumulada, 90 Krad, em relação ao ganho foi observado que em certas polarizações o ganho permaneceu mais estável ao longo das doses de radiação, demonstrando sua aplicação adequada se a polarização for bem controlada.

O transistor 2N2222A em relação ao ganho foi observado que na condição de polarização OFF os componentes tiveram maior degradação ao longo das doses de radiação, porém em ambas as condições houve a degradação do ganho, em média com valores de irradiação não ultrapassando muito acima de 50 Krad. E também foi observado assim como no transistor 2N2219A, quanto maior a corrente de coletor (I_c), menor a redução do ganho com as doses de radiação.

Já para a função de chaveamento, a variação dos parâmetros não interferiu significativamente na operação de nenhum dos três componentes, demonstrando que estes atendem ao uso como chave.

Os demais testes de radiação provavelmente não seriam de grande relevância para o caso destes transistores, para o DDD os efeitos são similares ao TID para o BJT, através de mecanismos diferentes, mas provocam principalmente a degradação do ganho. E para o SEE, provocariam SET, SEU e SEB, onde os testes indicariam a partícula e sua energia para a ocorrência destes efeitos, o que agregaria conhecimento sobre os componentes, mas gerariam muitos custos.

Muitas vezes com o tempo e custos apertados, testes não são viáveis, mas através de análises é possível aplicar o componente da forma mais segura aumentando assim a vida útil do sistema. Porém dependerá no nível de confiabilidade aceitável para cada parte do sistema.

As mitigações correspondem a uma solução no âmbito de componente, circuito e sistema, aumentando a confiabilidade, porém devem ser muito bem

analisadas para a implementação, pois representam um aumento de complexidade, o que pode causar mais pontos de falha, aumentam o peso, volume, consumo de energia e geram maior trabalho para o desenvolvimento do satélite.

Para este caso as mitigações aplicáveis poderiam ser blindagem para proteção contra o TID e DDD, sendo aplicados nos componentes ou circuito e também podendo ser referente a localização no interior do satélite. Definição de margens em relação ao ganho principalmente já se sabendo as características dos componentes com o acúmulo de dose. Redundância para proteção contra o SEE. E detecção e correção de erros principalmente em relação ao SEB, para detectar o aumento súbito de corrente para efetuar o desligamento do circuito.

De acordo com as observações citadas, sabendo pela missão a radiação que deverá ser suportada, o grau de importância do circuito no qual o componente será implementado, as condições de operação do componente, e as margens possíveis para mitigações é possível implementar os componentes COTS ao satélite, podendo aumentar a vida útil e confiabilidade do sistema sem agregar muitos custos.

Para os três componentes analisados verifica-se que é possível o uso destes componentes em missões de satélites de baixa órbita (LEO) de até 5 anos de vida útil, correspondendo à aproximadamente 30Krad, em média, dependendo do ciclo solar, como chave e *driver* para correntes médias ou maiores. O transistor 2N2905A exige maiores cuidados.

A escolha do componente que será embarcado deve considerar e analisar fatores relacionados a missão, circunstâncias e cenários aplicáveis. Para condições de órbitas médias e altas, o SEE passa a ser um fator de maior preocupação.

6.3 Análise do processo metodológico

Para cada etapa de desenvolvimento do sistema até chegar aos componentes existe uma série de possibilidades em aberto, sendo decidido à medida que o projeto vai evoluindo.

A metodologia faz uma organização dos principais aspectos a serem observados em relação à radiação nos componentes e os relaciona. Para os três componentes o grande diferencial foram os testes realizados, possibilitando um bom entendimento da degradação ao longo das doses de radiação TID.

Foi observado em relação aos componentes testados que todos os três atenderiam a função de chaveamento quando submetidos a radiação TID moderada no ambiente espacial. Já para a função de amplificação demonstraram resultados diferentes, sendo que o transistor 2N2219A apresentou maior sucesso e estabilidade para polarizações de ganho com correntes de coletor (I_c) mais elevadas, mas o transistor 2N2222A também demonstrou que apesar de não permanecer dentro dos limites em todas as etapas de radiação para os ganhos, possui maior resistência para corrente de coletor mais elevada.

Caso não ocorressem os testes, pela literatura é conhecido que o BJT PNP é mais sensível a radiação TID e DDD (POIZAT, 2017; LÖCHNER, 2011), indicando que a disputa ficaria entre os dois NPN, representando uma difícil escolha. Também pela literatura é conhecido que os BJTs são melhores para a função de chaveamento, visto que seu ganho tende a reduzir com a incidência de radiação (POIZAT, 2017; LÖCHNER, 2011).

No entanto pode-se considerar outros componentes, desde que sejam compatíveis para o circuito pretendido, ou que se mude o circuito, lembrando que existem as características operacionais para cada categoria de componentes.

Em relação a radiação os FETs, por exemplo, poderiam representar uma boa solução para amplificação, uma vez que normalmente possuem maior tolerância a TID, porém dependendo do componente podem ser mais afetados por SEE. Em relação aos demais parâmetros poderiam representar uma redução de peso, volume e consumo de energia.

6.4 Avaliação do processo metodológico

A metodologia foi um processo de analisar as características importantes para os componentes e relacioná-las de forma que se obtenha o melhor resultado para a integração do sistema. No entanto, são inúmeras as possibilidades de componentes e deve-se analisar as características de cada componente candidato para efetuar comparações e determinar qual representa a melhor solução.

A contribuição desta metodologia foi a formulação de características que devem ser analisadas em relação ao componente e os parâmetros importantes que devem ser considerados para a escolha e implementação dos componentes candidatos.

As limitações correspondem a dificuldade de avaliar as características para cada componente, onde em grande parte das vezes os componentes possuem seus prós e contras, e para definir qual representa a melhor solução não é uma tarefa fácil. Além disso, existem muitas incertezas, referente ao componente, circuito e sistema que só serão esclarecidas por testes, representando aumento de custos e tempo, e referente as reais condições operacionais.

7 CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

A partir da proposta de desenvolver um estudo e elaborar uma metodologia para a utilização de componentes COTS analisando as necessidades, os parâmetros importantes e o componente, visando os efeitos da radiação, têm-se diversas escolhas e decisões que devem ser analisados.

Este processo metodológico foi verificado e desenvolvido, mas possui variações de acordo com a missão e realidade da construção do projeto.

A compreensão da radiação no ambiente espacial juntamente com seus mecanismos nos componentes eletrônicos possibilitou o entendimento das características e consequências da radiação na eletrônica embarcada nos satélites.

Também foi abordado a utilização dos componentes COTS na área espacial juntamente com as formas de sua utilização e o quanto é importante para a área espacial a forma de utilização destes componentes, visto algumas dificuldades e desvantagens em relação aos componentes de uso espacial.

No estudo de caso foram testados e analisados transistores bipolares em relação à dose ionizante total, onde foram observados a degradação e os parâmetros afetados destes componentes, constatando o que é mostrado na literatura, e ficou muito visível que a forma de utilização do componente pode influenciar drasticamente suas consequências no sistema. Em seguida foi feito a análise da metodologia proposta em relação aos componentes testados verificando-se a funcionalidade desta.

Desta forma o presente trabalho através da metodologia destacou as principais questões que devem ser analisadas e decididas, sendo mutáveis, mas de forma genérica de grande importância para o êxito da missão. Podendo-se concluir que a utilização dos componentes COTS podem muito bem suprir as necessidades do projeto, desde que seja adequadamente escolhido e implementado ao sistema.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Ao longo do desenvolvimento do presente trabalho foi necessário colocar alguns limites por conta da extensão dos conteúdos abordados. Dentro desta situação o foco da presente dissertação foi para característica observada a radiação espacial e para os componentes estudados, os transistores. Então para os trabalhos futuros as principais indicações são:

- Além da radiação existem os meios térmicos e mecânicos que também causam degradação nos componentes eletrônicos no ambiente espacial e devem ser analisadas, pela extensão deste conteúdo não foi desenvolvido no presente trabalho, o que pode ser explorado em trabalhos futuros.
- Estender para demais componentes eletrônicos com especificações diretamente relacionadas a estes para a metodologia desenvolvida.

Além destas recomendações principais outras recomendações mais pontuais também são pertinentes:

- Verificar a metodologia para outros transistores além dos bipolares.
- Fazer maiores extensões da metodologia, expandindo-a e especificando os critérios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, A. R.; PAI, S. Y.; RATNAKUMAR, K. N.; GIBBS, G.; RAMIREZ, R.; KOH, Y. J.; LUTZ, R. C. An overview of BiCMOS technology and applications. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS, 1990. **Proceedings...** IEEE, 1990. doi:10.1109/iscas.
- AMRAM, A. L.; NAKAMURA, K. T.; BOUCHER, R. H. A system analysis approach for the insertion of commercial off-the-shelf (COTS) microelectronics into spacecraft. In: AIAA, SPACE PROGRAMS AND TECHNOLOGIES CONFERENCE, 1996, Huntsville, AL. **Proceedings...** AIAA, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14857-2:2002**: sistemas espaciais - gerenciamento do programa parte 2: garantia do produto. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5462:1994**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- BERK, J.; STRAUB, J.; WHALEN, D. The open prototype for educational NanoSats: fixing the other side of the small satellite cost equation. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2013. **Proceedings...** IEEE, 2013.
- BLILEY TECHNOLOGIES. **The benefits of COTS in space applications**. 2017. Disponível em: <https://blog.bliley.com/benefits-cots-in-space-applications>. Acesso: 2 dez. 2019.
- BOUDENOT, J.-C. **Radiationspace environment**. Berlin: Springer, 2007.
- BRAGA, N. C. **Curso de eletrônica: eletrônica digital – a família de circuitos integrados CMOS (CUR5004)**. 2019. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/eletronica-digital/16307-curso-de-eletronica-eletronica-digital-a-familia-de-circuitos-integrados-cmos-cur5004.html>.

BRAGA, N. C. **Curso de eletrônica analógica: parte 3 – os transistores bipolares**. 2003. Disponível em:

<https://www.newtonbraga.com.br/index.php/analogica/14266-curso-de-eletronica-analogica-parte-3-os-transistores-bipolares-cur2003.html>.

BRITO, A. C. **Garantia do produto de sistemas espaciais**. São José dos Campos, INPE, 2018. Notas de Aula.

BUENO, D. A. A.; SILVA, E. R. C. Dispositivos de carboneto de silício na eletrônica de potência: uma revisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA BELO HORIZONTE, 20., 2014. **Anais...** 2014.

COTS PROCESS. **Commercial-Off-The-Shelf (Cots): evaluation, selection, and qualification process**. San Diego, CA: Systems Engineering Process Office, 2002.

DATASHEET MICROSEMI. **2N2219A**. Disponível em:

<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/76178/MICROSEMI/2N2219A.html>. Acesso em: 10 out. 2020.

DATASHEET MICROSEMI. **2N2222A**. Disponível em:

https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/8898-lds-0060-datasheet. Acesso em: 20 jul. 2018.

DATASHEET MICROSEMI. **2N2905A**. Disponível em:

<https://html.alldatasheet.com/html-pdf/91454/MICROSEMI/2N2905A/406/1/2N2905A.html>. Acesso em: 10 out. 2020.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS).

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

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARIZATION (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, The Netherlands, 2008.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARIZATION (ECSS).

ECSS-E-ST-10-12C: space product assurance – Methods for the calculation of radiation received and its effects, and a policy for design margins. Noordwijk, The Netherlands, 2008.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARIZATION (ECSS).

ECSS-M-ST-10C Rev.1: space project management – project planning and implementation. Noordwijk, The Netherlands, 2009.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARIZATION (ECSS).

ECSS-Q-ST-20-10C: space product assurance – off-the-shelf items utilization in space systems. Noordwijk, The Netherlands, 2010.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARIZATION (ECSS).

ECSS-Q-ST-60-15C: space product assurance – radiation hardness assurance - EEE components. Noordwijk, The Netherlands, 2012.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARIZATION (ECSS).

ECSS-Q-ST-60-13C: space product assurance – commercial electrical, electronic and electromechanical (EEE) components. Noordwijk, The Netherlands, 2013.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARIZATION (ECSS).

ECSS-S-ST-00-01C: ECSS system – glossary of terms. Noordwijk, The Netherlands, 2012.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARIZATION (ECSS).

ECSS-Q-ST-60C Rev.2: space product assurance – electrical, electronic and electromechanical (EEE) components. Noordwijk, The Netherlands, 2013.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARIZATION (ECSS). **ESCC**

basic specification No. 22900: total dose steady-state irradiation test method. Noordwijk, The Netherlands, 2016.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARIZATION (ECSS). **ESCC**

basic specification no. 25100: single event effects test method and guidelines. Noordwijk, The Netherlands, 2014.

FELIX, E. P. **Análise de confiabilidade de sistemas eletrônicos complexos baseada em ensaios acelerados de vida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FERREIRA, F. F. **Electrónica I**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~fff/Homepage/Ficheiros/E1_Cap5.pdf. Acesso em: 5 jan. 2019.

FRIEDLANDER, D. **COTS EEE parts in space applications: evolution overview**.2013. Disponível em: <https://wpo-altertechnology.com/cots-eee-parts-in-space-applications-evolution-overview/>. Acesso em: 10 maio 2018.

HUANG, Q.; JIANG, J. An overview of radiation effects on electronic devices under severe accident conditions in NPPs, rad-hardened design techniques and simulation tools. **Progress in Nuclear Energy**, v.114, p. 105–120, 2019. doi:10.1016/j.pnucene.2019.02.008.

JUNQUEIRA, B. C.; MANEA, S. Utilização de COTS em nano satélites. In: CONGRESSO AEROESPACIAL BRASILEIRO (CAB),2., 2019. **Anais...** 2019.

KOUBA, C. K.; NGUYEN, K.; O'NEILL, P.; BAILEY, C. Proton radiation test results on COTS-based electronic devices for NASA-Johnson Space Center Spaceflight Projects. In: IEEE RADIATION EFFECTS DATA WORKSHOP, 2006. **Proceedings...** IEEE, 2006.

LAFRAIA, J.R.B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LIU, J.; ZHOU, J.; LUO, H.; KONG, X.; EN, Y.; SHI, Q.; HE, Y. Total-dose-induced edge effect in SOI NMOS transistors with different layouts. **Microelectronics Reliability**, v. 50, n.1, p. 45–47, 2010. doi:10.1016/j.microrel.2009.09.003.

LÖCHNER, S. **Radiation damages to electronic components**. [S.l.]: Strahlungsschädigungen an Elektronischen Bauteilen, 2011.

MACHADO, S. R. F. **Estudo de um processo de garantia da confiabilidade de sistemas eletrônicos embarcados a single eventupsets causados por partículas ionizantes**. 2014. 222 p. Dissertação (Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014.

MALVINO, A. P.; BATES, D. J. **Eletrônica**. 7.ed. [S.I.]: AMGH, 2007. v.1, 672 p.

MANEA, S. **Introdução à tecnologia de satélites**. São José dos Campos: INPE, 2018a. Notas de Aula.

MANEA, S. **Introduction to the space radiation effects on satellites**. São José dos Campos: INPE, 2018b. Classnotes.

MANEA, S.; MOREIRA, J.; SILVA, M.; BARBOSA, A. **CCRAD - Cubesat's Cots Radiation Detector**. Sept. 2020. Disponível em:
[https://www.researchgate.net/publication/344433669_CCRAD - CUBESAT'S COTS RADIATION DETECTOR](https://www.researchgate.net/publication/344433669_CCRAD_-_CUBESAT'S_COTS_RADIATION_DETECTOR).

MARTINS, I. A.; SOUZA, M. L. O.; RABELLO, A. P. S. S. Modelagem e simulação da confiabilidade de componentes e sistemas espaciais. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO INPE (SICINPE), 2013, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013.

IBI:<8JMKD3MGP7W/3EPCM7J>. Disponível em:<<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP7W/3EPCM7J>>.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION –NASA. **Systems engineering handbook** - NASA SP-2016-6105 Rev2. Disponível em:
https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_systems_engineering_handbook_0.pdf. Acesso em: 5 abr. 2019.

OLIVEIRA, G. S. **Modelagem da confiabilidade de produtos eletrônicos a partir de dados de garantia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

PENHALIGON, G. **Presentation**: using commercial parts, understanding the risks and associated mitigating actions. Japan: Alter Technology Group, 2007.

PIGNOL, M. **COTS-based applications in space avionics**. Toulouse, France: CNES, 2010.

POIVEY, C. TNID: Total Non Ionizing Dose or DD Displacement Damage. In: ESA – CERN – SCC WORKSHOP, 2017. **Proceedings...** 2017.

POIZAT, M. **Radiation environment and its effects in EEE components and hardness assurance for space applications: TID Total Ionizing Dose**. [S.I.]: European Space Agency, 2017.

POLO, C. B. Radiation environment and its effects in EEE components and hardness assurance for space applications: SEE Single Event Effects. In: ESA-CERN-SCC WORKSHOP, 2017. **Proceedings...** CERN, 2017.

RABELLO, A. P. S. S.; MANEA, S.; SOUZA, M. L. O.A discussion on the use of model based reliability for improving the results of the reliability analysis and FMEA/FMECA of a satellite program. In: SAE BRASIL CONGRESS AND EXHIBIT, 2011.**Proceedings...** 2011.

SINCLAIR, D.; DYER, J. Radiation effects and COTS parts in SmallSats. In: ANNUAL AIAA/USU CONFERENCE ON SMALL SATELLITES, 27., 2013. **Proceedings...** 2013.

TETZLAFF, J.; WIEYNK, R.; BERGE, K. **General requirements for the use of commercial EEE parts in space applications**. [S.I.]: Centre National d'Etudes Spatiales (CNES); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2003.

TODD, B.; UZNANSKI, S. **Radiation risks and mitigation in electronic systems**. [S.I.]: CERN, 2015.

VORA, P.H.; LAD, R. **A review paper on CMOS, SOI and FinFET Technology**. EinfochipsPvt, 2017. Disponível em: <https://www.design-reuse.com/articles/41330/cmos-soi-finfet-technology-review-paper.html>. Acesso em: 15 ago. 2019.

WALL, J.; SINNADURAI, N. The past, present and future of EEE components for space application; COTS-the next generation. In: IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM, 1998, Pasadena, CA, USA.

Proceedings... 1998.p. 392-404.

WIKIWAND. **Transistor de efecto campo**. Disponível em:

https://www.wikiwand.com/es/Transistor_de_efecto_campo. Acesso em: 10 jul.2019.

WILSON, T. R.; KIRSCH, M. T. **The NESCOTS components in spacecraft systems**: understanding the risk. 2014. Disponível em:

<https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/cots.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2018.

ZEDNÍČEK, T. **Commercial versus COTS + versus qualified passive components in space applications**. Noordwijk, The Netherlands: SA/ESTEC, 2016.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o International Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São assequências de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.