CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI
MATHEUS DE MOURA SANGAR

ESTUDO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS (SOLARES) UTILIZANDO COMO ELEMENTO CONSTRUTIVO MOSFET COM GEOMETRIA DE PORTA NÃO CONVENCIONAL

São Bernardo do Campo
2022

MATHEUS DE MOURA SANGAR

ESTUDO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS (SOLARES) UTILIZANDO COMO ELEMENTO CONSTRUTIVO MOSFET COM GEOMETRIA DE PORTA NÃO CONVENCIONAL

Dissertação apresentada ao Centro Universitário da FEI como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Orientado pelo Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez.

São Bernardo do Campo

2022

de Moura Sangar, Matheus.
ESTUDO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS (SOLARES) UTILIZANDO COMO ELEMENTO CONSTRUTIVO MOSFET COM GEOMETRIA DE PORTA NÃO CONVENCIONAL / Matheus de Moura Sangar. São Bernardo do Campo, 2022.
103 p. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.
Orientador: Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez.

1. célula solar. 2. MOSFET. 3. geometria de porta não convencional. 4. leiaute do tipo Fish. 5. efeito LCE. I. Pinillos Gimenez, Salvador, orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

centro universitário FEI

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA EXAMINADORA

Mestrado

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica

PGM-10

Aluno(a): Matheus de Moura Sangar **Matrícula:** 120103-7

Título do Trabalho: Estudo de células fotovoltaicas (solares) utilizando como elemento construtivo mosfet com geometria de porta não convencional

Área de Concentração: Nanoeletrônica e Circuitos Integrados

Orientador(a): Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez

Data da realização da defesa: 29/08/2022

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

O aluno superou as expectativas na sua apresentação e respondeu adequadamente os questionamentos da banca e se comprometeu a entregar uma versão final atendendo os comentários e sugestões da banca.

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez

Prof. Dr. Rodrigo Trevisoli Doria

Prof. Dr. Luciano Mendes Camillo

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Dedico este trabalho de pesquisa aos meus pais. Sua grande força foi a mola propulsora que permitiu o meu avanço, mesmo durante os momentos mais difíceis. Agradeço do fundo do meu coração.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez, por acreditar e confiar no meu trabalho, por me mostrar o caminho para o conhecimento, por todos os ensinamentos e por sua disponibilidade de estar presente em todos os momentos de dificuldade.

Ao Doutor Egon Henrique Salerno Galembeck por todo apoio e disponibilidade nos momentos de dificuldade.

Ao Centro Universitário da FEI, por toda infraestrutura e disponibilidade de recursos essenciais no desenvolvimento deste trabalho.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”

- Isaac Newton

RESUMO

Segundo estudo realizado pela *International Energy Agency* (IEA), o uso de energia solar poderá chegar a 30% em 2022 em países com maior capacidade instalada de geração, como a China, Alemanha, Japão e EUA. No Brasil, também é crescente o volume de investimentos no ramo da energia solar. Em junho de 2021, foram anunciados investimentos privados, que somados geram um total de 4,17 bilhões de reais no estado da Paraíba para a construção de uma fábrica de módulos fotovoltaicos e um complexo solar com capacidade de 1,6GW de capacidade instalada. Tendo em vista o grande espaço que a energia solar está tomando no cenário mundial, grandes têm sido os esforços acadêmicos e das empresas relacionadas a fim de melhorar o desempenho de uma célula solar. Neste estudo, serão utilizadas simulações numéricas tridimensionais a fim de obter as figuras de mérito, como rendimento e fator de forma, de células solares utilizando como elemento construtivo dois tipos de MOSFETs, sendo um com geometria de porta convencional (retangular) e outro com formato de porta não convencional, mais especificamente do tipo *Fish*, com o intuito de analisar novas propostas de células básicas construtivas para a implementação de células solares, em busca de se obter um melhor desempenho elétrico quando comparado àquele das células solares convencionais. Simulações numéricas tridimensionais foram realizadas com dois tipos de elementos básicos para a implementação de células solares, sendo que um deles é o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta retangular convencional e o outro é semelhante a esse, porém com formato de porta do tipo *Fish*. Os principais resultados alcançados mostraram que o MOSFET, canal N, do tipo depleção com formato de porta do tipo *Fish* apresentou um rendimento de aproximadamente 54% (em porcentagem) maior do que aquele apresentado pela célula solar implementada com o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta retangular convencional, considerando as diversas condições de polarização externa consideradas por esse estudo. Além disso, os Fatores de Forma de ambos os elementos básicos formados por esses tipos de MOSFETs apresentaram praticamente os mesmos valores (variação máxima de 1,66%, sendo que o com o formato de porta do tipo *Fish* alcançou o maior valor de Fator de Forma). Dessa forma, podemos concluir que o MOSFET, canal N, do tipo depleção, com formato de porta do tipo Fish pode ser considerado como alternativa construtiva para aumentar o desempenho elétrico das células solares baseadas em transistores de efeito de campo.

Palavras chave: célula solar; MOSFET; geometria de porta não convencional; leiaute do tipo *Fish*; efeito LCE

ABSTRACT

According to a study carried out by the International Energy Agency (IEA), the use of solar energy could reach 30% in 2022 in countries with greater installed generation capacity, such as China, Germany, Japan, and USA. In Brazil, the volume of investments in the solar energy sector is also increasing. For instance, in June 2021 private investments were announced, which together generated a total of 4.17 billion Reais in the state of Paraíba for the construction of a photovoltaic module factory and a solar energy complex with an installed capacity of 1.6GW. In view of the large space that solar energy is taking on the world, great efforts have been made by academics and companies in order to improve the electrical performance of a solar cell. In this study, three-dimensional numerical simulations will be used in order to obtain figures of merit, such as yield (efficiency) and form factor, of solar cells using as constructive elements two types of MOSFETs, one with conventional (rectangular) gate geometry and the other with an unconventional gate shape, more specifically the Fish type, in order to analyze new basic constructive blocks for building solar cells, aiming at a better electrical performance when compared to those found in conventional solar cells. Three-dimensional numerical simulations were performed with two types of basic elements for building the solar cells, one of them is the MOSFET, N-channel, depletion type with a conventional rectangular gate geometry and the other is similar to this one, but with a Fish-type gate geometry. The main results achieved showed that the MOSFET, N-channel, depletion type with Fish-type gate geometry has presented an efficiency of approximately 54% (in percentage) higher than that presented by the solar cell implemented with the conventional rectangular MOSFET, considering the different conditions of external gate bias evaluated in this research. Besides that, the Form Factors of both basic elements built with these types of MOSFETs presented practically the same values (maximum variation of 1,66%, with the Fish-type MOSFET reaching the highest value of Form Factor). Thus, we can conclude that the MOSFET, N-channel, depletion type, with Fish-type gate geometry can be considered as a constructive alternative to increase the electrical performance of solar cells based on field effect transistors.

Key words: solar cell; MOSFET; unconventional gate geometry; Fish-type layout; LCE effect.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Níveis de energia; do Material Isolante (a); do Material Condutor (b); do Material Semicondutor (c). 21

Figura 2: Estrutura cristalina de um Silício do tipo P dopado com átomos de Boro..... 22

Figura 3: Estrutura Cristalina de um Silício do tipo N dopado com átomos de Fósforo.... 23

Figura 4: Diagrama de bandas de energia com Nível de Fermi para o silício intrínseco (a); silício do tipo N (b); silício do tipo P (c). 24

Figura 5: Junção PN com a região de depleção formada na interface dos materiais 25

Figura 6: Efeito fotoelétrico em uma placa de metal exposta as radiações eletromagnéticas. 28

Figura 7: Espectro solar completo. 29

Figura 8: Curva da espessura de silício necessária para absorção completa da energia de um fóton em função de seu comprimento de onda. 30

Figura 9: Curva característica de corrente elétrica gerada por um diodo (I_D) em função da tensão aplicada entre o seu anodo e o seu catodo (de -0,6V e +0,6V) com o dispositivo submetido as radiações luminosas. 35

Figura 10: Curva característica típica de uma célula solar (do módulo da corrente (I) em função da tensão aplicada em seus terminais (V)) e identificação dos valores de tensão e corrente elétricas para o cálculo do fator de forma de uma célula solar. 37

Figura 11: Seção transversal de um MOSFET do tipo N, no qual n+ se trata de uma região de silício do tipo N fortemente dopada. 37

Figura 12: Curva característica de corrente elétrica entre dreno e fonte em função da tensão entre dreno e fonte de um MOSFET do tipo n. 38

Figura 13: Curva característica de I_D em função de V_{GS} de um MOSFET, canal N, para um determinado valor de V_{DS}. 39

Figura 14: Seção transversal de um MOSFET, canal N, do tipo depleção..... 39

Figura 15: Seção transversal de um SOI nMOSFET. 40

Figura 16: Vista de cima de um *FISH* SOI MOSFET. 41

Figura 17: Célula solar formada por um MOSFET, com os contatos de dreno e fonte curto circuitados e uma fonte de alimentação auxiliar externa *(*Biasing Source*)*. 42

Figura 18: Curva característica de corrente elétrica gerada (I_D) pela região de depleção formada pelas regiões n+ e P em função da tensão sobre a carga "Load" (V_{BD}) em células solares baseadas em dispositivos MOSFETs, canal N, do tipo depleção que foi submetia ao espectro AM1.5G. 43

Figura 19: Estrutura tridimensional de um MOSFET, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta retangular, que foi gerada através do arquivo SDE descrito no Apêndice A que será utilizado como célula básica de uma célula solar. 45

Figura 20: Curva característica da I_D em função da V_G, para V_{DS} igual a 1V para diferentes comprimentos de onda de luz monocromática de um MOSFET, canal N, do tipo depleção funcionando como um elemento básico de uma célula solar. 47

Figura 21: Curva característica da I_D em função da V_G, para V_{DS} igual a 1V para diferentes ângulos de incidências das irradiações no MOSFET, canal N, do tipo depleção, funcionando como elemento básico de uma célula solar. 48

Figura 22: Estrutura tridimensional simulada de um MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta retangular durante o processo de irradiação de energia luminosa do espectro de luz AM 1.5G, indicando a incidência da energia luminosa no dispositivo em W/m^2. 49

Figura 23: Figura 23: Curva característica da ID em função da VBD, para uma tensão de porta igual a 0V(preto) e dispositivo sem radiação (vermelho) do MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta retangular.

. 49

Figura 24: Gráfico de I_D em função de V_{BD} para diferentes valores de V_G do MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional, operando como célula solar, sendo irradiado pelo espectro AM 1.5G. 50

Figura 25: Gráfico da I_D em função da V_{BD} para obtenção das I_{SCs} do dispositivo. 51

Figura 26: Gráfico da I_D em função da V_{BD} visando a obtenção das V_{OCs} do dispositivo. 51

Figura 27: Gráfico da I_D em função da V_{BD}, visando a obtenção da V_{OC} para uma V_G igual a 0 V. 52

Figura 28: Gráfico da I_D em função de V_{BD} visando a obtenção da Potência Máxima do MOSFET, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta convencional operando como célula solar, considerando-se uma tensão V_G igual a 0 V e sendo irradiado pelo espectro AM 1.5G. 53

Figura 29: Gráfico do Rendimento do MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional em função da tensão de polarização externa aplicada no seu terminal de porta. 54

Figura 30: Gráfico do Fator de Forma em função da polarização externa aplicada ao terminal de porta do MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional. 55

Figura 31: Estrutura tridimensional do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish* gerada através do arquivo SDE descrito no Apêndice C, que será utilizada como célula básica de uma célula solar. 56

Figura 32: Estrutura tridimensional simulada do MOSFET do tipo *Fish* que foi irradiado pelo espectro de luz AM 1.5G, indicando a incidência de energia luminosa no dispositivo em W/m^2. 57

Figura 33: Gráfico da corrente no dreno em função da tensão entre substrato e dreno com a tensão de porta (V_G) igual a 0 V do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish*. 57

Figura 34: Gráfico da corrente no dreno em função da tensão entre substrato e dreno variando a tensão de porta V_G do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish*. 58

Figura 35: Gráfico da corrente no dreno em função da diferença de potencial entre substrato e dreno, visando a obtenção das correntes de curto-circuito, considerando-se os diferentes valores de V_G. 59

Figura 36: Gráfico da corrente no dreno em função da diferença de potencial entre susbtrato e dreno, visando a obtenção das tensões de circuito aberto, considerando-se os diferentes valores de V_G. 59

Figura 37: Gráfico da corrente no dreno em função da diferença de potencial entre substrato e dreno visando a obtenção da tensão de circuito aberto do dispositivo para V_G igual a 0 V. . 60

Figura 38: Gráfico da I_D em função da V_{BD} visando a obtenção da Potência Máxima do MOSFET do tipo *Fish* operando como célula solar, levando-se em conta uma V_G igual a 0V. 60

Figura 39: Gráfico do Rendimento do MOSFET do tipo *Fish* em função da tensão de polarização externa aplicada no seu terminal de porta. 62

Figura 40: Gráfico do Fator de Forma em função da polarização externa aplicada a porta do MOSFET do tipo *Fish*. 63

Figura 41: Plano de corte realizado na estrutura 3D do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional retangular com a indicação do campo elétrico longitudinal resultante. 65

Figura 42: Plano de corte realizado na estrutura 3D do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish* com a indicação do campo elétrico longitudinal resultante.....65

Figura 43:Linha de corte na estrutura 2D do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo convencional retangular, com indicação do campo elétrico longitudinal resultante 65

Figura 44: Linha de corte na estrutura 2D do MOSFE, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish,* com indicação do campo elétrico longitudinal resultante. ...66

Figura 45: Perfis dos campos elétricos longitudinais resultantes de ambos dispositivos (linha vermelha representando o MOSFET, canal N, do tipo depleção do tipo *Fish* e Linha verde representando o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional). 67

Figura 46: Perfis de densidade de corrente elétrica de ambos dispositivos (Linha vermelha representando o MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta do tipo *Fish* e Linha verde representando o MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional).....68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de V_{OC}, I_{SC} e Potência Máxima para diferentes valores de V_G aplicados no MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional.....58

Tabela 2:Valores dos Rendimentos e dos Fatores de Forma obtidos para diferentes valores de tensão aplicadas na porta do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta retangular. 58

Tabela 3: Valores das V_{OC}, das I_{SC} e das Potências Máximas para os diferentes valores de V_G considerados para a polarização do MOSFET do tipo *Fish*.. 68

Tabela 4: Valores dos Rendimentos e dos Fatores de Forma para os diferentes valores das tensões aplicadas na porta do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish.* 69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

EUA Estados Unidos da América

HBTSC célula solar a base de Transistor Bipolar de Heterojunção (*Hetero-Junction Bipolar Transistor Solar Cell)*

IEA Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*)

LED Diodos emissores de luz (*Light Emitting Diode*)

NASA Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (*National Aeronautics and Space Administration*)

SOI Silício-Sobre-Isolante (*Silicon-On-Insulator*)

LISTA DE SÍMBOLOS

MW	Mega Watts
GW	Giga Watts
MOS	Metal-Óxido-Semicondutor (*Metal-Oxide-Semiconductor*)
Si	Silício
Ge	Germânio
B	Boro
P	Fósforo
$\emptyset_F$	Potencial de Fermi-Dirac [V]
E_C	Energia de Condução [V]
E_V	Energia de Valência [V]
E_G	Energia de banda proibida [V]
N_A	Concentração de impurezas aceitadoras $[cm^{-3}]$
N_D	Concentração de impurezas doadoras $[cm^{-3}]$
n_i	Concentração intrínseca de portadores $[cm^{-3}]$
ε_0	Permissividade elétrica do vácuo $[\frac{F}{m}]$
ε_R	Permissividade elétrica relativa do material $[\frac{F}{m}]$
q	Carga do elétron [eV]
V_{Bi}	Potencial de contato [V]
V_D	Tensão aplicada aos terminais da junção PN [V]
x_p	Extensão da região de depleção no material tipo P [V]
x_n	Extensão da região de depleção no material tipo N [V]
Φ	Função Trabalho [V]
eV	Elétron Volt
E_C	Energia Cinética [J]
T’	Coeficiente de transmissão
R	Coeficiente de reflexão
λ	Comprimento de onda [m]
ñ	Índice de refração do material
k	Constante de absorção $[cm^{-1}]$
x	Espessura do semicondutor [m]
α	Coeficiente de absorção de luz por unidade de área $[m^{-1}]$

EQ_T Eficiência quântica total

I_{FG} Corrente de anodo gerada [A]

I_{FGMAX} Corrente de anodo gerada máxima [A]

I_P Corrente foto-geradora [A]

η Rendimento

Popt Potência luminosa incidente [W]

μ Mobilidade dos portadores de carga no semicondutor [$\frac{V}{m}$]

τ Tempo de vida do portador de carga [s]

ξ Intensidade do campo elétrico [$\frac{V}{m^2}$]

L Comprimento do semicondutor [m]

I_{Ph} Corrente primária gerada [A]

GaAs Arseneto de gálio

V Tensão [V]

I Corrente elétrica [A]

P_{MAX} Potência máxima na saída do circuito [W]

P_{in} Potência incidente [W]

W Watts

V_{OC} Tensão de circuito aberto [V]

I_{SC} Corrente de curto-circuito [A]

V_{MP} Tensão elétrica gerada pela célula solar [V]

I_{MP} Corrente elétrica gerada pela célula solar [A]

P_{MP} Potência elétrica gerada pela célula solar [W]

MOSFET Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (*Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*)

nMOSFET Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor com canal do tipo N

SiO_2 Dióxido de Silício

V_{GS} Tensão entre os terminais de porta e fonte do MOSFET [V]

V_T Tensão de limiar do MOSFET [V]

V_t Tensão de limiar do MOSFET [V]

L Comprimento de canal do MOSFET

W Largura de canal do MOSFET

V_{DS} Tensão entre os terminais de dreno e fonte do MOSFET [V]

I_D	Corrente de dreno [A]
SOI	Silício-Sobre-Isolante (*Silicon-On-Isulator*)
t_{oxb}	Espessura do óxido enterrado [nm]
t_{Si}	Espessura da região de canal [nm]
t_{oxf}	Espessura do óxido de porta [nm]
μ_{eff}	Mobilidade efetiva máxima [$\frac{V}{m}$]
g_m	Transcondutância [$\frac{A}{V}$]
R_{on}	Resistência entre fonte e dreno no estado ligado [Ω]
I_{off}	Corrente de estado desligado do MOSFET [A]
LCE	Efeito de Canto Longitudinal (*Longitudinal Corner Effect*)
A_G	Área de porta
ITO	Eletrodo de porta transparente
DC	Fonte de tensão de corrente contínua (*Direct Current*)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14
1.1. CENÁRIO ATUAL 14
1.2. TRABALHOS RELACIONADOS 15
1.3. MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS 16
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS 18
2.1. MATERIAL SEMICONDUTOR 18
2.2. SILÍCIO EXTRÍNSECO 19
2.2.1. Silício do tipo P 20
2.2.2. Silício do tipo N 21
2.2.3. Nível de Fermi e Diagrama de Bandas de Energia 22
2.3. JUNÇÃO PN 23
2.4. EFEITO FOTOELÉTRICO 26
2.5. ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR E POTÊNCIA LUMINOSA 27
2.6. PROPRIEDADES ÓPTICAS DOS SEMICONDUTORES 29
2.6.1. Eficiência Quântica 30
2.7. CÉLULAS SOLARES CONVENCIONAIS 31
2.7.1. Principais células solares comercializadas, suas vantagens e desvantagens 32
2.7.2. Região de operação de células solares atuando como geradoras de energia 33
2.7.3. Rendimento 34
2.7.4. Fator de Forma 35
2.8. MOSFET, canal N, do tipo Enriquecimento 36
2.8.1. MOSFET, Canal N, do Tipo Depleção 39
2.8.2. Transistor SOI MOSFET 40
2.8.3. FISH SOI MOSFET 41

2.9. CÉLULA SOLAR BASEADA EM UM MOSFET, CANAL N, DO TIPO DEPLEÇÃO 43

2.10. SIMULADOR *SYNOPSYS SENTAURUS* 45

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS 47

3.1. ESTRUTURA DO MOSFET, CANAL N, DO TIPO DEPLEÇÃO COM GEOMETRIA DE PORTA CONVENCIONAL 47

3.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA TRIDIMENCIONAL 48

3.3. RESULTADOS OBTIDOS 48

3.4. ESTRUTURA DO DISPOSITIVO COM GEOMETRIA DE PORTA NÃO CONVENCIONAL DO TIPO *FISH* 60

3.5. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CÉLULAS SOLARES BASEADAS EM MOSFETs, CANAL N, DO TIPO DEPLEÇÃO E COM GEOMETRIAS DE PORTA CONVENCIONAL E NÃO CONVENCIONAL (*FISH*) 71

3.6. TRABALHOS FUTUROS 78

4. CONCLUSÕES 79

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 82

APÊNDICE A – ARQUIVO SDE DO MOSFET COM GEOMETRIA DE PORTA CONVENCIONAL 85

APÊNDICE B - ARQUIVO SDEVICE DE UM MOSFET COM GEOMETRIA DE PORTA CONVENCIONAL 91

APÊNDICE C - ARQUIVO SDE DO MOSFET COM GEOMETRIA DE PORTA NÃO CONVENCIONAL 96

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é apresentada uma contextualização do cenário atual do uso das energias renováveis, principalmente aquela relacionada à energia solar e à demanda pela melhoria do seu desempenho elétrico. Em seguida, são apresentados os trabalhos relacionados a esse projeto de pesquisa e, por fim, é apresentada a motivação e os seus principais objetivos (gerais e específicos) desse projeto de pesquisa.

1.1. CENÁRIO ATUAL

Segundo estudo realizado pela *International Energy Agency* (IEA), o uso de energia solar poderá chegar a 30% (da matriz energética) em 2022 nos países que já possuem uma maior capacidade instalada de geração de energia elétrica, como a China, a Alemanha, o Japão e os Estados Unidos da América (EUA) (1).

Para ilustrar, em 2016, o Japão ampliou sua capacidade instalada e se tornou o segundo país que mais utiliza energia solar (fotovoltaica) do mundo, chegando a uma produção de 42.750 MW de energia elétrica. A Alemanha estima uma produção de 35% de sua energia elétrica baseada em fontes de energia renováveis e busca atingir 100% até 2050. O EUA busca, em 2022, chegar à marca de 30% de sua energia elétrica sendo proveniente de fontes renováveis. A China é a maior produtora e consumidora de energia solar. Ela é responsável por consumir mais de 50% da produção de placas solares do mundo e busca atingir uma capacidade instalada (energia a base de células fotovoltaicas) de 400GW até o ano de 2030, colocando o país no caminho para obtenção da independência energética. Em 2019, foi criada a primeira usina solar no Brasil, com uma potência instalada de 1,3GW (1).

Além disso, no Brasil, também é crescente o volume de investimentos no ramo da energia solar. Em junho de 2021, foram anunciados investimentos privados que, somados, geram um total de 4,17 bilhões de reais no estado da Paraíba para a construção de uma fábrica de módulos fotovoltaicos e um complexo solar com capacidade de 1,6GW de capacidade instalada (2).

Em 2019, o mercado de energia solar no Brasil cresceu mais de 212%, alcançando a marca de 2,4 GW instalados. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL),

foram instalados mais de 110 mil sistemas fotovoltaicos de mini e microgeração em empresas, residências, comércios, propriedades rurais, etc., correspondendo a R$ 4,8 bilhões e mais de 15 mil profissionais trabalhando nesta área. Em outubro de 2020, o Brasil atingiu 7 GW de potência instalada de energia solar, sendo que mais de 4 GW, que são correspondentes à uma porcentagem de 99,9% de toda micro e minigeração, estão distribuídas em residências, comércios, indústrias e propriedades rurais. Com relação a geração centralizada (na qual poucas unidades geradoras produzem eletricidade para muitos diferentes beneficiários), o Brasil obteve 2,955 GW gerados pela energia solar, que corresponde a 1,6% de toda a matriz energética brasileira (3).

Portanto, a energia solar está ocupando cada vez mais espaço na matriz energética dos países e os investimentos são cada vez maiores em energias renováveis, o que torna o tema desse projeto de pesquisa relevante e atual, o que pode, de alguma forma, contribuir com o desenvolvimento de estruturas básicas inovadoras para a fabricação de células solares que apresentam um melhor desempenho elétrico em relação às células solares convencionais, como a proposta por esse projeto de pesquisa.

1.2. TRABALHOS RELACIONADOS

Dentro do meio acadêmico, os autores Elisa Antolín, *et al*. publicaram uma pesquisa sobre a extração de corrente elétrica em células solares multifuncionais, estudando o conceito de célula solar a base de Transistor Bipolar de Heterojunção (*Hetero-Junction Bipolar Transistor Solar Cell*, HBTSC), que se trata de uma estrutura multiterminal simples, compacta e econômica. Essa célula pode fornecer um maior rendimento anual de energia elétrica e ainda é mais versátil para a combinação de materiais semicondutores do que a tecnologia de multijunção conectada em série, que atualmente é utilizada. O modelo é composto de três camadas principais, sendo elas o emissor, a base e o coletor, respectivamente. Nesse estudo foi utilizado um modelo de difusão-deriva para analisar os aspectos importantes no projeto de uma estrutura HBTSC. Como conclusão, foi identificado que a injeção de portadores do emissor para o coletor degrada a tensão de circuito aberto da sub-célula superior, mas esse risco pode ser eliminado otimizando o projeto da estrutura da base (4).

Outro estudo que relata utilização de novas tecnologias para a formação de uma célula solar mais eficiente é o dos autores Antonio Martí *et al.* Eles propõem a utilização de materiais de perovskita, que possuem baixo custo e excelentes propriedades optoeletrônicas

para desenvolvimento de células solares. Essa pesquisa propôs o desenvolvimento de uma célula solar de silício-perovskita baseada na arquitetura do transistor bipolar de heterojunção de três terminais. Para avaliar o potencial dessa estrutura, foi utilizado o modelo clássico de Hovel estendido a partir do qual obtiveram eficiências de até 28,6% para células sem revestimento antirreflexo (5).

A próxima pesquisa relacionada é dos autores Q.R. Lai *et al*., que demonstrou um novo conceito para um dispositivo fotovoltaico, utilizando-se de um Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (MOSFET) com estrutura de silício e um eletrodo de porta transparente (Índium Tin Oxide, ITO). Essa estrutura conta ainda com uma célula solar com polarização auxiliar e apresentou um aumento de 12,93% na fotocorrente do dispositivo (6).

Os autores Mahmudur Siddiqui *et al*, realizaram uma pesquisa propondo uma nova estrutura Metal-Óxido-Semicondutor (*Metal-Oxide-Semiconductor*, MOS) de porta dupla que usa silício intrínseco como material ativo para aplicação em células fotovoltaicas. Esse dispositivo apresenta como grande vantagem a baixa recombinação de portadores de carga gerados opticamente, devido à natureza intrínseca da região ativa, permitindo que os portadores de carga transitem em alta velocidade sobre o efeito do campo elétrico externo. Verificou-se que o dispositivo proposto apresentou maior eficiência e maior tensão de circuito aberto em comparação aqueles observados nas células solares de junção p-n típicas (7).

1.3. MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS

Diversos são os esforços para a melhoria do desempenho elétrico das células solares tais como o uso de novas estruturas base para a geração de energia solar como mostrado no artigo publicado por Antonio Martí *et al.* (6).

Essa referência estudou novos tipos de materiais para geração de uma célula solar mais eficiente (5), inovadores estilos de leiaute, como os vistos em (6), que propôs a utilização de uma estrutura MOSFET com polarização auxiliar e um material de porta não convencional para conseguir um melhor desempenho na fotocorrente (4) da célula solar. O mesmo concluiu que uma otimização no projeto do terminal de base de uma estrutura HBTSC é capaz de reduzir a degradação da tensão de circuito aberto e, como consequência, gerar uma maior eficiência energética em relação à tecnologia de multijunção (7). Também propôs uma nova estrutura MOSFET com porta dupla e a utilização de silício intrínseco na

sua região ativa para reduzir a recombinação de portadores. Esse novo leiaute gerou uma maior eficiência e maior tensão de circuito aberto em relação às estruturas p-n convencionais (4;5;6;7).

Com base nos esforços científicos realizados até agora em busca de melhorar o desempenho elétrico das células solares através de novos materiais, novos leiautes (4;5;6;7) e também pelo aumento na demanda de geração de energia renovável, principalmente o da energia solar (1;3), esse projeto de pesquisa tem por objetivo o estudo de células solares implementadas com Transistor de Efeito de Campo Metal-Oxido-Semicondutor (*Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*, MOSFET) por meio de simulações numéricas tridimensionais, que se mostram muito atuais e importantes tanto para o meio acadêmico quanto para o mercado de energia renovável.

Portanto, o principal objetivo desse projeto de pesquisa é fazer um estudo comparativo, por meio de meio de simulações numéricas tridimensionais, entre o MOSFET, canal N, do tipo depleção implementado com geometria de porta convencional (retangular) e não convencional, mais especificamente o do tipo *Fish* (geometria de porta visualmente semelhante ao símbolo matemático que representa o sinal de maior que, “>”), para serem utilizados como células básicas para implementação de células solares. (6;8;9).

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Este capítulo é responsável por apresentar os conceitos básicos necessários para o entendimento e desenvolvimento deste projeto de pesquisa. Será apresentada toda a definição de um material semicondutor, propriedades do silício dopado, fenômenos decorrentes da junção entre um silício do tipo P com um do tipo N, funcionamento de uma célula solar convencional (geometria de porta retangular) e sua caracterização elétrica, funcionamento de MOSFETs, canal N, dos tipos enriquecimento e depleção com geometrias de porta retangular convencional e não convencional do tipo *Fish* e MOSFETs operando como elementos básicos para implementação de células fotovoltaicas.

2.1. MATERIAL SEMICONDUTOR

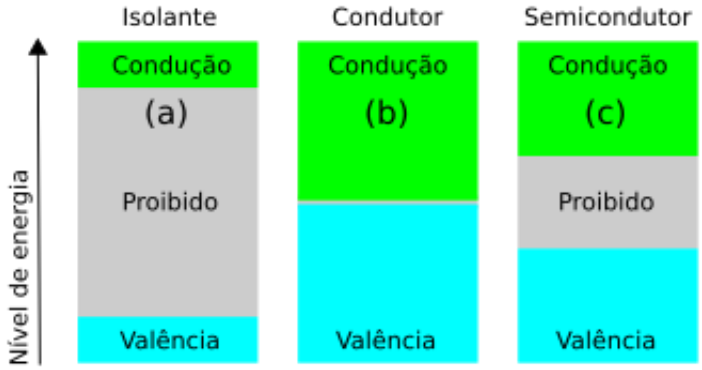
São aqueles que se situam entre os materiais condutores e os isolantes. Os materiais condutores são conhecidos por serem capazes de manter um fluxo elétrico contínuo quando aplicado uma diferença de potencial em seus terminais, além de apresentarem uma alta condutividade. Como exemplo, podemos citar os metais como ferro, alumínio, cobre, etc. Na outra extremidade, tem-se os materiais isolantes, que possuem uma baixa condutividade e necessitam de diferenças de potenciais muito elevadas para manterem um baixo fluxo de corrente elétrica entre seus terminais, como exemplo o vidro e a borracha (10).

Os materiais semicondutores como o Silício (Si) e o Germânio (Ge) em seu formato puro possuem uma condutividade média. Porém, é possível alterar suas características elétricas através de um processo chamado de dopagem. Eles são materiais facilmente encontrados na natureza e possuem sua estrutura atômica periódica, também conhecida como estrutura cristalina. As estruturas cristalinas são interessantes por manterem uma estrutura de mínima energia e eletricamente neutra, no caso dos dois materiais citados. Ambos possuem 4 elétrons em sua camada de valência (camada mais distante do núcleo do átomo) que se ligam de forma covalente ao átomo vizinho, formando a rede cristalina. Esses elétrons, por se encontrarem mais distantes do núcleo, necessitam de uma menor energia absorvida para se desprenderem da estrutura e se tornarem “elétrons livres”, que são os responsáveis pela condução elétrica em um material. A energia absorvida para rompimento das ligações pode ser advinda da incidência de energia luminosa ou energia térmica do

meio. Em temperatura ambiente, o silício puro possui em torno de $1{,}5\ x\ 10^{10}$ elétrons livres por centímetro cúbico (10).

Para melhor entendimento sobre a diferença entre os tipos de materiais, a Figura 1 ilustra a energia necessária para deslocar um elétron da camada de valência de uma estrutura para a camada de condução, na qual a faixa chamada de banda proibida é, por definição, uma banda de energia em que não há presença de elétrons. Através dessa figura, observa-se que, em um material isolante, é necessário a absorção de muita energia para que um elétron se desloque da banda de valência para a banda de condução. Para os materiais semicondutores essa energia necessária é um pouco menor, enquanto que para os materiais condutores, as bandas de condução e valência se sobrepõem às vezes, ou seja, um elétron consegue transitar entre as duas bandas sem a necessidade de absorver uma quantidade considerável de energia (10).

Figura 1: Bandas de energia; do Material Isolante (a); do Material Condutor (b); do Material Semicondutor (c).



Fonte: Autor adaptado de (10).

2.2. SILÍCIO EXTRÍNSECO

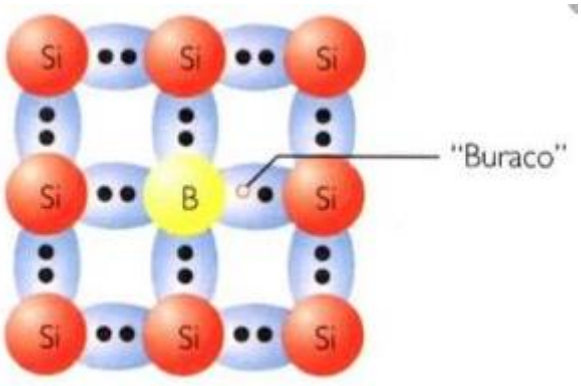
Como mostrado na seção acima, o silício (Si) puro (intrínseco) possui características de um material semicondutor com uma baixa condutividade e disponibilidade de elétrons livres por volume de silício em temperatura ambiente. Desta forma, aproveitando a capacidade desse tipo de material de mudar radicalmente suas propriedades de condução elétrica em decorrência da implantação de impurezas em sua estrutura cristalina, temos a técnica de

dopagem do silício, no qual obtemos o silício extrínseco que, dependendo da natureza do elemento dopante (átomos trivalentes ou pentavalentes), pode-se tornar do tipo P (dopado com átomos trivalentes) ou do tipo N (dopado com átomos pentavalentes) (10).

2.2.1. Silício do tipo P

O Silício do tipo P é formado quando a impureza (material dopante) implantada na sua estrutura cristalina tem como característica a presença de 3 elétrons em sua camada de valência, ou seja, um elétron a menos do que o Silício apresenta em sua camada de valência. Esse tipo de dopante é chamado de aceitador de elétron. Quando um átomo aceitador substitui um átomo de silício na estrutura cristalina é criado uma lacuna ou buraco (ausência de elétron), que é um tipo de portador de carga. Essa lacuna irá se deslocar entre os átomos da rede cristalina e dar origem a uma corrente elétrica no material semicondutor. Para dopagem de um silício do tipo P, o mais comum é a utilização de átomos de Boro (B) que é trivalente. A Figura 2 mostra a estrutura cristalina de um silício do tipo P com dopagem de Boro (10).

Figura 2: Estrutura cristalina de um Silício do tipo P dopado com átomos de Boro.



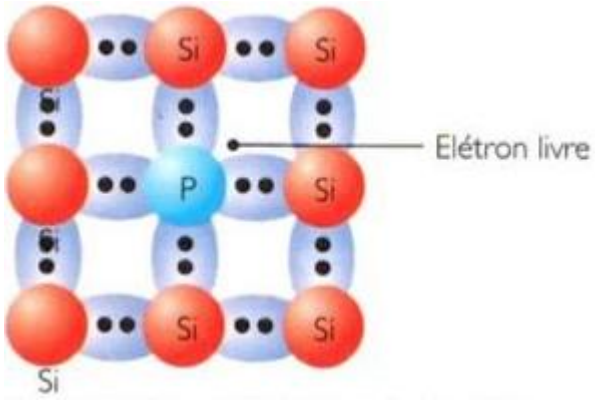
Fonte: Autor adaptado de (10).

Na Figura 2, Si representa um átomo de Silício, B representa um átomo de Boro, os círculos pretos representam os elétrons e o círculo branco representa a lacuna (buraco).

2.2.2. Silício do tipo N

O Silício do tipo N é formado quando a impureza implantada na sua estrutura cristalina tem como característica a presença de 5 elétrons em sua camada de valência, ou seja, um elétron a mais do que o Silício apresenta em sua camada de valência. Esse átomo dopante é chamado de doador de elétron. Quando um átomo doador substitui um átomo de silício na estrutura cristalina é criado um elétron livre, que é um tipo de portador de carga. Esse elétron irá se deslocar entre os átomos da rede cristalina e dar origem a uma corrente elétrica no material semicondutor. Para dopagem de um silício do tipo N, o mais comum é a utilização de átomos de fósforo (P), que são pentavalentes. A Figura 3 mostra a estrutura cristalina de um Silício do tipo N com dopagem de Fósforo (10).

Figura 3: Estrutura Cristalina de um Silício do tipo N dopado com átomos de Fósforo.



Fonte: Autor adaptado de (10).

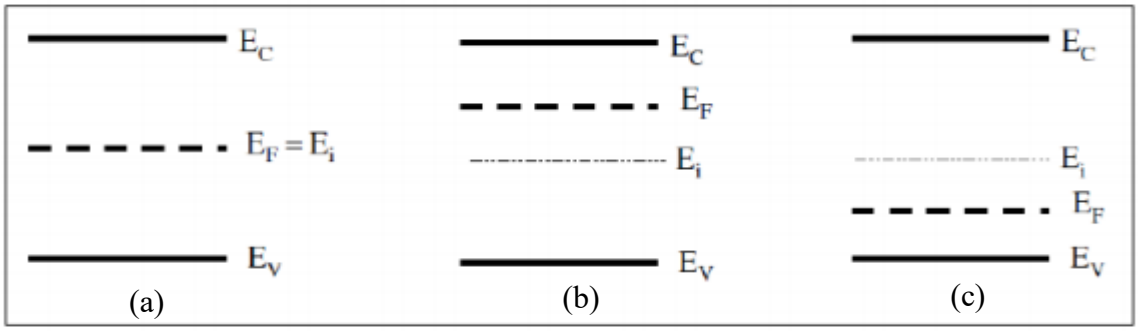
Na Figura 3, P representa o átomo de Fósforo.

2.2.3. Nível de Fermi e Diagrama de Bandas de Energia

O potencial de Fermi-Dirac ($\emptyset_F$) é apresentado como uma forma de se estimar a ocupação dos estados energéticos de um semicondutor e sua distribuição de portadores livres. Além de ser base para o cálculo do potencial elétrico de um dispositivo, o nível de Fermi pode ser interpretado como a probabilidade de haver 50% dos portadores de carga acima deste nível energético e 50% dos portadores abaixo desse nível energético (11).

O diagrama de bandas de energia é responsável por ilustrar a energia de valência (E_V), que se trata do último nível energético ocupado por elétrons, em que os elétrons não possuem energia suficiente para de desprender do núcleo e se tornar portadores livres, e a energia de condução (E_C), que é o nível de energia necessário para que o portador de carga se torne livre e comece a se mover através da estrutura cristalina. Entre esses dois níveis de energia, há a existência da banda proibida, que não há presença de elétrons. A diferença entre o nível de energia de valência e o nível de energia de condução é chamado de energia da banda proibida (*Gap* em inglês, E_G), que é exatamente a energia que um elétron precisa absorver para se tornar um elétron livre, quando o mesmo se move para a banda de condução. A Figura 4 mostra o diagrama de bandas de energia com nível de Fermi (E_F), para o silício intrínseco para o silício do tipo P e para o silício do tipo N, no qual E_i é o nível de Fermi para o silício intrínseco (11).

Figura 4: Diagrama de bandas de energia com Nível de Fermi para o silício intrínseco (a); silício do tipo N (b); silício do tipo P (c).



Fonte: Autor adaptado de (11).

Ao analisar a Figura 4, nota-se que, para o silício intrínseco, o nível de Fermi se encontra exatamente na metade da banda proibida, enquanto que para um silício do tipo N, o nível de Fermi se encontra mais próximo ao nível de condução. Esse efeito se dá pelo tipo de impureza

presente da rede cristalina, que são doadores de elétrons. Portanto, a probabilidade de encontrar um elétron na camada de condução é maior do que na camada de valência e, para o silício tipo P é exatamente o contrário, pois como a impureza é uma aceitadora de elétrons, os portadores livres são lacunas e a probabilidade e encontrar um elétron é maior no nível de valência do que no nível de condução. (11)

É possível calcular o potencial de Fermi, que mostra a diferença de energia entre o nível intrínseco e o nível de Fermi através da Equação [1] para um silício extrínseco de natureza aceitadora. Para o cálculo do potencial de Fermi em um silício extrínseco de natureza doadora, é necessário alterar o parâmetro N_A (concentração de impureza aceitadora por unidade de volume) por N_D (concentração de impureza doadora por unidade de volume):

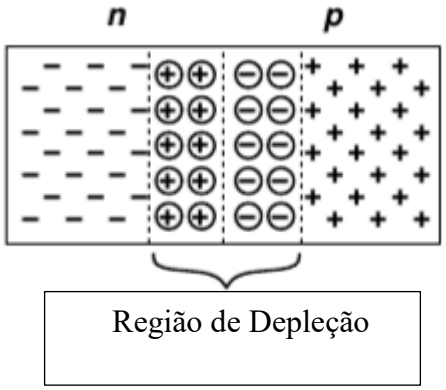
$$\emptyset_{Fp} = \frac{k*T}{q} * \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad [1]$$

Em que, k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura, q é a carga do elétron, n_i é a concentração intrínseca de portadores e $\emptyset_{Fp}$ é o potencial de Fermi do silício do tipo P.

2.3. JUNÇÃO PN

Como mostrado anteriormente, o silício pode ser dopado com impurezas de naturezas distintas, a fim de aumentar sua condutividade elétrica. Ao juntarmos um silício do tipo P com um silício do tipo N, é obtida uma junção PN, também conhecida como diodo. Os elétrons em excesso do silício do tipo N passam, por meio de difusão, para o silício do tipo P, causando um processo de recombinação com os átomos de Boro e a formação de íons negativos nessa região, enquanto que os átomos pentavalentes da região do tipo N próximos a junção, que perderam seus elétrons tornam-se íons positivos. Essa região formada por átomos ionizados é caracterizada pela ausência de portadores livres e é chamada de região de depleção (12). A Figura 5 ilustra uma junção PN com sua respectiva região de depleção.

Figura 5: Junção PN com a região de depleção formada na interface dos materiais.



Fonte: Autor adaptado de (12).

A partir da equação de Poisson mostrada pela Equação [2], pode-se realizar o cálculo da largura da região de depleção (d) de um diodo formado por uma de junção PN (13).

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_R \varepsilon_0 (V_{Bi} - V_D)}{q}} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) [2]$$

Onde ε_R é a permissividade relativa do material, , ε_0 é a permissividade elétrica do vácuo, V_{Bi} é o potencial de contato da junção PN, V_D é a tensão elétrica aplicada aos terminais da junção, q é a carga do elétron, N_A é a concentração de dopantes aceitadores, N_D é a concentração de dopantes doadores (13).

Como visto, a largura da região de depleção depende da tensão de contato V_{Bi}, que se trata da tensão de equilíbrio, também conhecida como barreira de potencial, necessária para que um elétron seja capaz de penetrar na região de depleção e atravessá-la sem que seja repelido pelo campo elétrico interno gerado pelos átomos ionizados da região de depleção. Essa tensão de contato depende apenas da concentração de dopantes e da temperatura (T) em que o dispositivo está operando. A Equação [3] define como pode ser obtido V_{Bi} (13).

$$V_{Bi} = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) [3]$$

A partir da equação de Poisson, é possível calcular as extensões da região de depleção tanto do lado do silício do tipo N (x_n) como a do lado do tipo P (x_p). Equações [4] e [5] (13)

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_R V_{Bi}}{q}\left(\frac{N_D}{N_A(N_A + N_D}\right)} \text{ [4]}$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_R V_{Bi}}{q}\left(\frac{N_A}{N_D(N_A + N_D}\right)} \text{ [5]}$$

Analisando as equações [4] e [5], concluímos que a região de depleção se estende mais para a região menos dopada, ou seja, a extensão da região de depleção é inversamente proporcional à concentração de dopantes (13).

Toda análise é válida para uma junção PN, que não é influenciada por uma fonte de tensão externa, ou seja, o diodo sem polarização. Quando uma fonte de tensão externa é conectada ao diodo, de modo que o terminal positivo da fonte de tensão esteja eletricamente conectado ao material do tipo P e o terminal negativo da fonte de tensão esteja conectado ao material do tipo N, dizemos que a junção PN está diretamente polarizada e, caso o valor dessa fonte de tensão supere a barreira de potencial da junção PN, ocorrerá um fluxo de corrente elétrica considerável no diodo. Caso o diodo seja reversamente polarizado, a junção PN pode ser considerada como uma chave aberta e sua região de depleção é aumentada em relação à junção PN sem polarização (14).

As junções PN podem ser utilizadas para diversos fins, como nas células solares, Diodos emissores de luz (*Light Emitting Diode*, LED), em retificadores de onda senoidal, em reguladores de tensão, operando como varactores etc. (14). Observando-se uma junção PN operando como elemento básico de uma célula solar, o seu funcionamento se dá a partir da incidência de fótons advindos de fontes luminosas (atividade solar, lâmpadas, etc.), que fornecem energia para que os elétrons presentes na região de depleção rompam suas ligações covalentes e se tornem elétrons livres (8).

Os elétrons livres são incorporados à corrente elétrica do diodo pela ação de um campo elétrico, permitindo que esse dispositivo atue como um gerador de energia. Quanto maior a região de depleção, maior é a chance de um fóton quebrar uma ligação covalente e gerar portadores livres, ou seja, uma maior região de depleção gera uma maior corrente elétrica gerada pela incidência de fótons. Desta forma, as junções PN, para atuar como uma célula solar

são polarizadas reversamente devido ao aumento de sua região de depleção. Lembrando que regiões de depleção longas demais também permitem a recombinação de portadores gerados, reduzindo a corrente elétrica (8).

2.4. EFEITO FOTOELÉTRICO

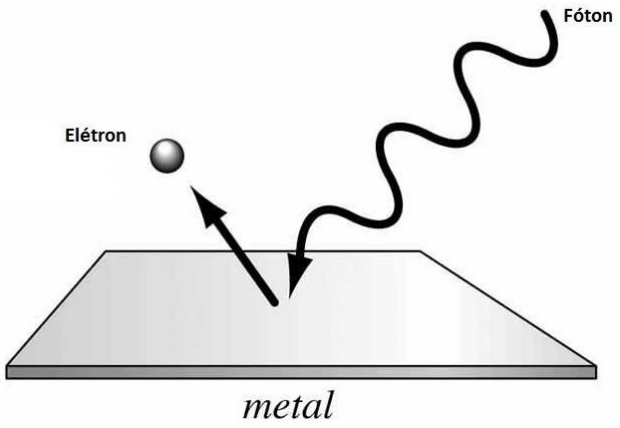
Para melhor entendimento do funcionamento de uma célula solar, é importante primeiro conhecer o efeito fotoelétrico, que é o responsável pela geração de portadores de carga livres na região de depleção devido à incidência de ondas eletromagnéticas, no caso, a radiação solar (15).

O efeito fotoelétrico é baseado na emissão de pacotes de energia (fótons) através de radiações eletromagnéticas. A energia de um fóton pode ser calculada segundo a Equação [6], na qual E é a energia do fóton, h é a constante de Plank e f é a frequência do fóton (15).

$$E = h * f \text{ [6]}$$

Esse efeito ocorre geralmente em superfícies metálicas expostas às radiações eletromagnéticas (atividade solar). Quando essas radiações, que contém a presença de fótons, atinge as placas metálicas, os fótons podem transferir sua energia para os elétrons, que se desprendem da banda de valência e se tornam portadores de carga livre na banda de condução. Para que os elétrons se tornem livres, é necessário que o fóton responsável por transferir essa energia para que os elétrons contenham um nível energético maior do que a função trabalho (Φ) do material, no caso a do silício (Φ_{Si}), e a energia necessária para fazer isso é de 1,1 eV. Caso a energia do fóton incidente exceda a função trabalho do material, os elétrons se desprendem com uma energia cinética (E_C), que é calculada como a diferença entre a energia do fóton (E) e a função trabalho do material (Φ_{Si}) (15). A Figura 6 ilustra um exemplo genérico do efeito fotoelétrico em uma placa de metal.

Figura 6: Efeito fotoelétrico em uma placa de metal exposta as radiações eletromagnéticas.



Fonte: Autor adaptado de (15).

2.5. ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR E POTÊNCIA LUMINOSA

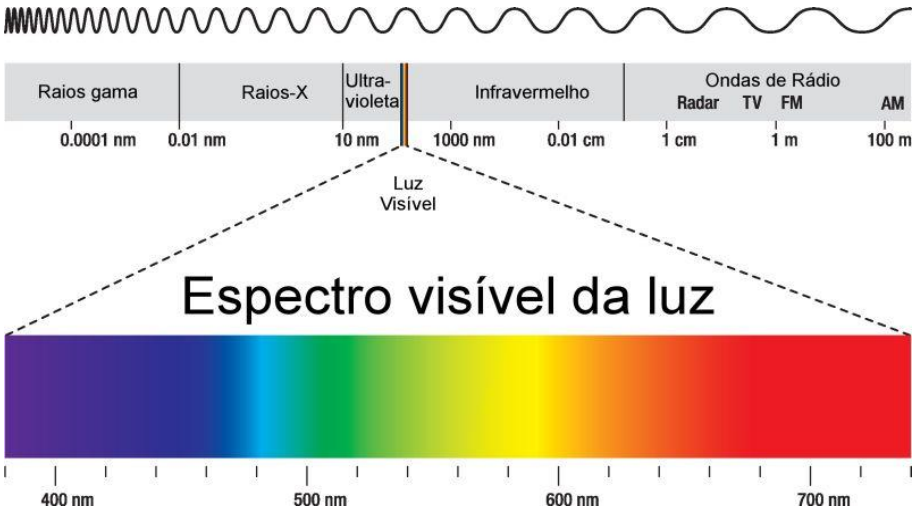
Para um melhor entendimento da geração de energia elétrica por uma célula solar, é importante entender sobre a fonte de energia que gera as radiações eletromagnéticas, nesse caso, a radiação solar e seu espectro visível.

A Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (*National Aeronautics and Space Administration*, NASA) caracterizou o espectro de luz solar incidente sobre a atmosfera do planeta Terra, como o espectro terrestre e sua denominação é AM0. Porém, para alcançar a superfície terrestre, esse espectro sofre perdas devido às suas reflexões causadas pelas nuvens e gases atmosféricos. Dessa forma, foi definido o espectro de luz solar incidente sobre a atmosfera da Terra como AM1.5G (Espectro Global), que é o espectro de luz solar que incide sobre a superfície terrestre ou de um dispositivo à céu aberto, como as placas solares. No caso desse espectro, é considerada uma densidade de potência de 1000W/m², que corresponde à máxima potência do AM1.5G que consegue incidir em uma célula solar (16).

Para células fotovoltaicas com concentradores de luz, que conseguem absorver apenas a incidência direta de energia, é utilizado o espectro AM1.5D (Espectro Direto), que possui potência de 775W/m², sendo que potências superiores a esta são dispersadas pela difusão, fenômeno esse que tem ocorrência quando o espectro se choca com certas partículas dentro da atmosfera e se difunde em várias direções. Uma parte é difundida pelo ar, principalmente a luz

azul, uma boa parte pelas nuvens, névoa seca, que difunde principalmente a vermelha e a luz amarela que é difundida por partículas de poeira (16). A Figura 7 Ilustra o espectro solar completo.

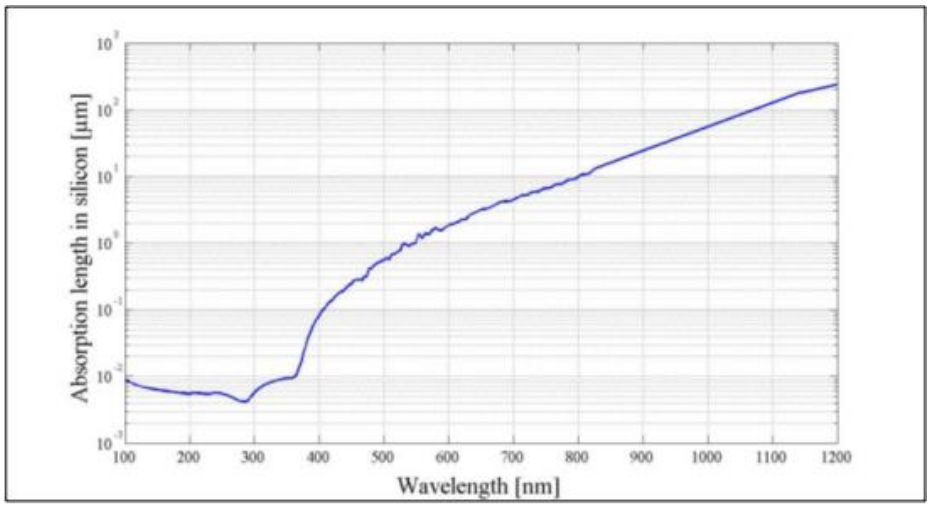
Figura 7: Espectro solar completo.



Fonte: Autor adaptado de (16).

Outro ponto importante do espectro solar é a relação entre o comprimento de onda dos fótons incidentes e a espessura de silício necessária para absorver totalmente a energia compreendida em um fóton. A Figura 8 ilustra a curva da espessura de silício necessária para absorção completa da energia de um fóton (*absorption length in silicon*) em função do comprimento de onda do fóton (*wavelength*) (17).

Figura 8: Curva da espessura de silício necessária para absorção completa da energia de um fóton em função de seu comprimento de onda.



Fonte: Autor adaptado de (18).

Analisando a Figura 8, observa-se que para comprimentos de onda menores que 400 nm, uma camada de silício de 10 nm é suficiente para absorção de toda energia incidente de um fóton, porém, após esse intervalo, há uma relação logarítmica de crescimento da espessura de silício necessária conforme o comprimento de onda incidente é aumentado. Caso a espessura do silício seja menor do que a necessária para absorção completa da energia do fóton, há perda na capacidade de absorção e apenas parte dos fótons é absorvido pelo material (17).

2.6.PROPRIEDADES ÓPTICAS DOS SEMICONDUTORES

Como essa pesquisa tem por objetivo o estudo da geração de energia elétrica através da radiação solar e a absorção da energia dos fótons, é de interesse conhecer um pouco sobre o coeficiente de transmissão (T'), que está relacionado com a quantidade de fótons que penetra o material e o coeficiente de reflexão (R), aquele que está relacionado a quantidade de fótons que são refletidos pelo material. A partir da incidência usual de raios solares, esses coeficientes podem ser calculados por meio das Equações [7] e [8] (19):

$$T' = \frac{(1 - \mathrm{R}^2)\exp\left(-4\pi \mathrm{x}\,\lambda\right)}{1 - \mathrm{R}^2 \exp\left(-\frac{8\pi}{\mathrm{x}}\lambda\right)} \quad [7]$$

$$R = \frac{(1 - \tilde{n})^2 + \mathrm{k}'^2}{(1 + \tilde{n})^2 + \mathrm{k}'^2} \quad [8]$$

Onde λ é o comprimento de onda, ñ é o índice de refração da luz no material, k' é a constante de absorção e x é a espessura do semicondutor. É possível ainda realizar o cálculo do coeficiente de absorção de luz por unidade de área (α) através da Equação [9] (19):

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad [9]$$

Combinando as equações [7], [8] e [9], através da obtenção dos dados de transmissão e reflexão em função do comprimento de onda da luz solar incidente, é possível obter os parâmetros ñ e k. Esses parâmetros podem ser relacionados ao momento em que ocorre a transição entre as bandas de energia de valência e condução do material semicondutor (19).

2.6.1. Eficiência Quântica

A eficiência quântica se trata da propriedade de ganho de fóton-corrente, ou seja, uma maior incidência de fótons absorvidos pelo material gera uma maior corrente elétrica em dispositivos que sofrem a influência do efeito fotoelétrico. O primeiro parâmetro a ser analisado é a eficiência quântica total (EQ_T), que é a razão entre a corrente de anodo gerada por fótons (I_{FG}) e a corrente máxima que poderia ter sido gerado se todos os fótons incidentes fossem convertidos em portadores de carga livres (I_{FGMAX}) . A Equação [10] define o valor de EQ_T (20).

$$EQ_T = \frac{I_{FG}}{I_{FGMAX}} \quad [10]$$

A partir da eficiência quântica total, é definida a densidade de portadores de carga utilizados em um fluxo de corrente elétrica gerado pela absorção de cada fóton no dispositivo. Assim, é gerado um campo elétrico dentro do semicondutor, que dá origem à corrente elétrica foto-geradora (I_P), que pode ser representada pela Equação [11] (18):

$$I_P = \mathrm{q}\left(\eta\frac{\mathrm{Popt}}{hv}\right)\left(\frac{\mu\,.\,\tau\,.\,\xi}{\mathrm{L}}\right)[11]$$

Onde η é a eficiência, Popt é a potência luminosa incidente, hv é a energia do fóton, μ é a mobilidade dos portadores de carga do semicondutor, τ é o tempo de vida médio dos portadores de carga, ξ é a intensidade do campo elétrico, e L é o comprimento total do material (18). Com a obtenção da corrente elétrica foto-geradora, é possível calcular o ganho por meio da Equação [12], na qual I_{Ph} é a corrente elétrica primária gerada (corrente elétrica total gerada no dispositivo) (18).

$$Ganho = \frac{I_P}{I_{Ph}} = \frac{\mu\,.\,\tau\,.\,\xi}{L} = \frac{\tau}{tr}\ [12]$$

O ganho descrito pela Equação [12] é exclusivo dos dispositivos que são construídos com semicondutores. Com a análise das expressões descritas acima, pode-se concluir que a eficiência quântica é equivalente ao número de pares elétron-lacuna que surgem com a incidência de um fóton, e sua principal característica é o surgimento da corrente elétrica foto-gerada devido à absorção de potência óptica para um determinado comprimento de onda (18).

Aplicando o conceito de eficiência quântica às células solares, caso a incidência de um fóton gerasse um par elétron-lacuna, esse dispositivo teria uma eficiência quântica de 100%. Porém, na prática, os semicondutores possuem uma área fotossensível, na qual a própria superfície é responsável por refletir parte dos raios incidentes. Além disso, existem os efeitos de transmissão e reflexão natural das propriedades ópticas dos semicondutores e esses efeitos interferem na relação entre a potência total incidente e a potência absorvida, fazendo com que as células solares não atinjam a eficiência quântica ideal. Uma forma de minimizar o efeito da região fotossensível é a aplicação de coberturas antirreflexo (21).

2.7.CÉLULAS SOLARES CONVENCIONAIS

As células solares são dispositivos com a finalidade de transformar energia luminosa em corrente elétrica através do efeito fotovoltaico. Segundo os conceitos vistos anteriormente, o efeito fotovoltaico ocorre quando há incidência de fótons no dispositivo, que fornece a energia absorvida a sua rede cristalina, rompendo ligações covalentes, gerando pares elétron-lacuna e, consequentemente uma corrente elétrica no dispositivo (21;22).

A seguir serão mostradas as células solares mais utilizadas comercialmente, suas vantagens e desvantagens, a região de operação de uma célula solar como geradora de energia e a parametrização da eficiência de uma célula solar segundo suas figuras de mérito, como rendimento e fator de forma.

2.7.1. Principais células solares comercializadas, suas vantagens e desvantagens

Atualmente, as células solares fabricadas a partir de silício policristalino dominam o mercado com uma representatividade de 95% e têm seu rendimento médio entre 13% e 17%. Com dispositivos melhorados, pode atingir 20% na conversão de energia luminosa em elétrica. Como uma das desvantagens, essa célula solar não apresenta um bom rendimento, mas se trata de uma tecnologia amplamente utilizada e conhecida pelas indústrias eletrônicas e seu custo de fabricação é baixo, dependendo apenas da espessura da camada de silício que formará a base da estrutura, ou seja, o custo de produção é influenciado pela espessura da célula solar. Com o avanço da tecnologia de fabricação, pode-se verificar células solares cada vez com menores espessuras e, portanto, com um menor custo (23;24;27).

Outra célula encontrada é a composta por um módulo monocristalino, que é formada a partir de cortes de uma lâmina de silício proveniente de um cristal com formação uniforme e única. Essas células são mais caras pelo fato de exigirem um processo de fabricação rigoroso, porém apresentam um maior rendimento na conversão de energia, que gira em torno de 15 a 20% (24).

Há também o módulo multicristalino, que é obtido a partir de uma lâmina de silício multicristalina com diferentes orientações. Por exigir um processo menos rigoroso, é o tipo financeiramente mais acessível, porém apresentam uma menor eficiência na conversão de energia luminosa em elétrica, chegando no máximo, a um rendimento entre 15% e 18% (24).

Os módulos de película fina são aqueles nos quais são depositadas camadas extremamente finas de materiais fotossensíveis sobre bases de baixo custo como vidro, por exemplo. Possui custo de fabricação menor do que as tecnologias vistas anteriormente e é muito utilizado por permitir a combinação de silício amorfo e microcristalino, apresentando bons resultados (17). O silício amorfo, que foi o primeiro material utilizado em células de película fina tem sua maior vantagem no baixo custo, possibilidade de fabricação em série e pode ser inserida em qualquer substrato de metal condutor ou vidro. Porém apresenta um baixo rendimento, que varia entre 5% e 8% (24).

Por fim, as células solares produzidas a partir de Arseneto de Gálio (GaAs), que se trata de uma das tecnologias mais eficientes da atualidade, conseguindo atingir um rendimento de até

28%, porém apresenta um custo de fabricação muito alto e se tornam economicamente inviáveis para o mercado. Essa tecnologia é utilizada, atualmente, em painéis solares instalados em satélites artificiais, pois esse semicondutor apresenta uma estrutura cristalina muito parecida com a do silício e apresenta ótimo desempenho operando em baixas temperaturas e vantagens para as aplicações espaciais (17;24).

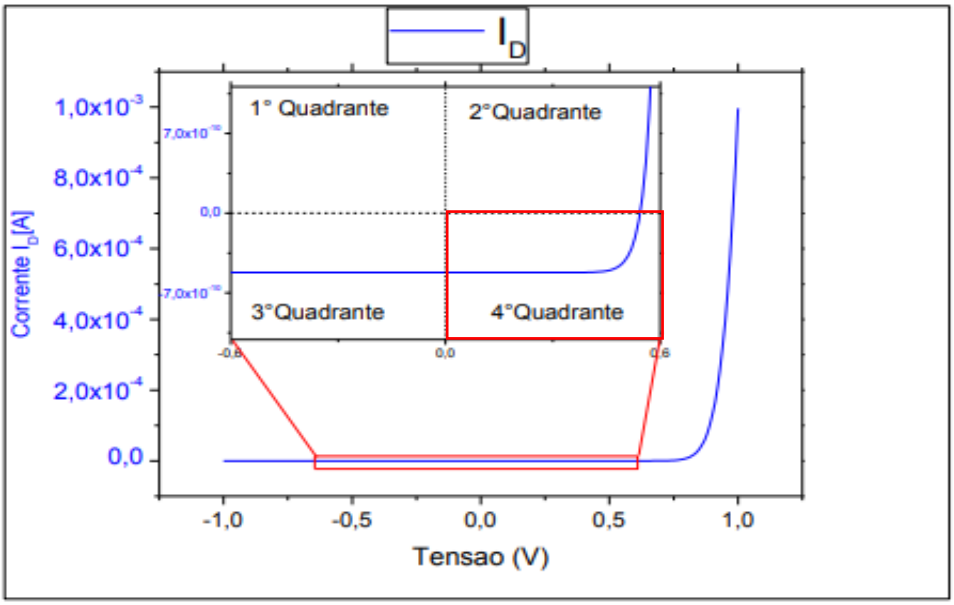
Após conhecer algumas tecnologias para fabricação de células solares, é importante, entender melhor sobre a região de operação de uma célula solar baseada na curva característica de uma junção PN, para que ela atue como uma célula geradora de energia elétrica.

2.7.2. Região de operação de células solares atuando como geradoras de energia

As células solares convencionais são formadas por junções PN. Portanto, sua curva característica que leva em conta a corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada nos seus terminais é igual a curva do diodo, na qual é observada uma corrente elétrica praticamente nula para tensões abaixo de V_{Bi} e um aumento exponencial da corrente elétrica para tensões maiores que o potencial de contato.

Porém, para que a célula solar opere como uma fornecedora de energia elétrica, a potência elétrica gerada por ela (produto entre a tensão elétrica e a corrente elétrica) deve ser negativa, caso contrário o dispositivo estará atuando como um absorvedor de energia elétrica. A Figura 9 ilustra a curva característica de corrente elétrica gerada por um diodo (I_D) em função da tensão aplicada entre o anodo e o catodo, com um gráfico ampliado no intervalo de tensão entre -0,6V e +0,6V, considerando-se que ela está sob efeito das radiações de energia luminosa (25).

Figura 9: Curva característica de corrente elétrica gerada por um diodo (I_D) em função da tensão aplicada entre o seu anodo e o seu catodo (de -0,6V e +0,6V) com o dispositivo submetido às radiações de energia luminosa.



Fonte: Autor adaptado de (25).

A partir do gráfico apresentado na Figura 9, é possível observar que, para a célula solar atuar como uma geradora de energia, ela deve operar no 4º quadrante, em que há uma corrente elétrica negativa em função da energia absorvida dos fótons incidentes e uma polarização com tensão positiva, ou seja, o produto entre corrente elétrica e tensão elétrica resulta em uma potência negativa. Portanto, as células estudadas devem ser polarizadas com tensões positivas e abaixo da tensão V_{Bi} para que atuem como fornecedoras de energia elétrica (25).

2.7.3. Rendimento

O rendimento de uma célula solar (η), também conhecido como eficiência de operação, pode ser determinado pela razão da máxima potência elétrica obtida na saída do circuito (P_{MAX}) pela potência fornecida pela radiação solar (P_{IN}), considerando o valor de 1000W/m², conforme afirmado pela NASA, levando-se em conta a potência incidente na superfície terrestre. A expressão do rendimento (η) em uma célula solar é dada pela Equação [13] (20).

$$\eta = \frac{P_{MAX}\ (W)}{P_{in} = Área\ (\mathrm{m^2})\ x\ 1000\ \mathrm{W/m^2}}\ \mathrm{x100\%}\ [13]$$

Onde P_{MAX} é a potência máxima obtida na saída do circuito da célula solar quando ela opera como gerador de energia e, P_{in} é a potência incidente proveniente da radiação solar, que é calculada pelo produto entre a área de superfície do dispositivo e a potência incidente por unidade de área, que é definida pela NASA. Os principais fatores que interferem no rendimento de uma célula solar são as perdas causadas pela resistência interna, as perdas por recombinação dos pares elétron-lacuna, eficiência termodinâmica e perdas por reflexão da radiação luminosa (20).

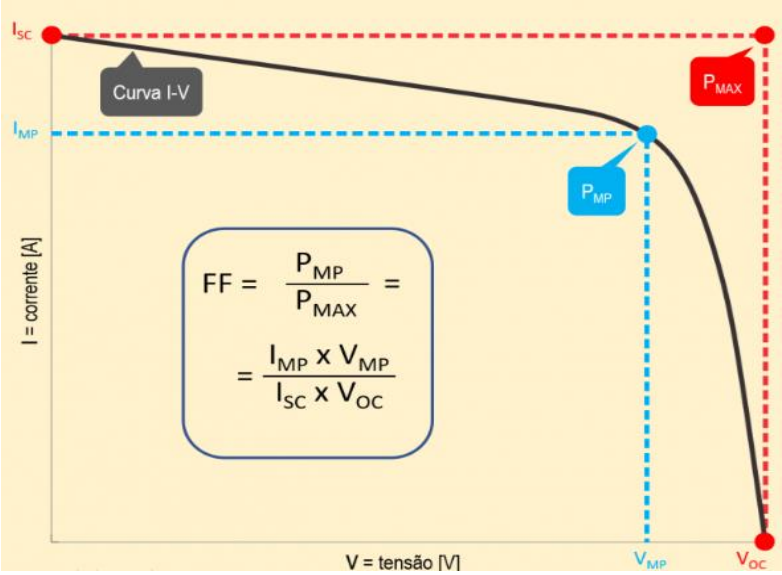
2.7.4. Fator de Forma

Outro parâmetro importante para a caracterização de uma célula solar é o fator de forma. Para melhor compreensão, primeiro será apresentado o conceito sobre a tensão de circuito aberto (V_{OC}) e posteriormente o da corrente de curto circuito (I_{SC}). A tensão de circuito aberto de uma célula solar é obtida quando seus terminais são deixados em aberto e o dispositivo é exposto às radiações luminosas. A corrente elétrica de curto-circuito é obtida quando os terminais da junção PN são colocados em curto-circuito (maior corrente entre os terminais) e o dispositivo é exposto às radiações provenientes da energia luminosa (26).

Portanto, o Fator de Forma (FF) de uma célula solar pode ser definido como a razão entre a potência máxima ideal (P_{MAX}) e a potência elétrica dada pelo produto de V_{OC} pela I_{SC}. Essa razão resultará em um número entre 0 e 1, ou seja, quanto mais próximo de 1, significa que a célula solar está operando mais próximo de seu funcionamento ideal. A Equação [14] define o FF de uma célula solar. Além disso, a Figura 10 ilustra como devem ser obtidos os valores de V_{OC} e I_{SC} para o cálculo da P_{MAX} e da tensão elétrica gerada pela célula solar (V_{MP}) e da corrente elétrica gerada pela célula solar (I_{MP}) para o cálculo da potência elétrica real (P_{MP}), para que seja possível, posteriormente, o cálculo do fator de forma da célula solar (20).

$$FF = \frac{P_{MAX}}{V_{OC}\ x\ I_{SC}}\ [14]$$

Figura 10*:* Curva característica típica de uma célula solar (do módulo da corrente (I) em função da tensão aplicada em seus terminais (V)) e identificação dos valores de tensão e corrente elétricas para o cálculo do fator de forma de uma célula solar.

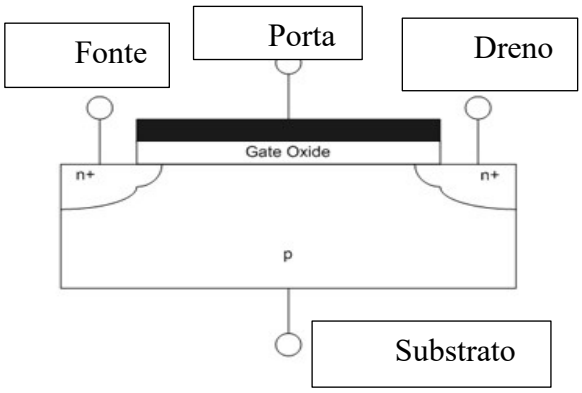


Fonte: Autor adaptado de (20)

2.8. MOSFET, canal N, do tipo Enriquecimento

O Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (*Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*, MOSFET) convencional possui geralmente uma geometria de porta retangular e é composto por quatro terminais, que são a porta (*gate*), o dreno (*drain*), a fonte (*source*) e o substrato (*body*). Esse dispositivo pode ser do tipo N (nMOSFET, que apresenta o seu canal do tipo N), quando suas regiões de dreno e fonte são dopadas com silício do tipo N e o substrato é um silício tipo P. Já o MOSFET do tipo P (pMOSFET, que apresenta o seu canal do tipo p) é construído com regiões de dreno e fonte do tipo P e o substrato é formado por um silício do tipo N. A Figura 11 ilustra a seção transversal de um MOSFET, canal N (14).

Figura 11: Seção transversal de um MOSFET do tipo N, no qual n+ se trata de uma região de silício do tipo N fortemente dopada.



Fonte: Autor adaptado de (14).

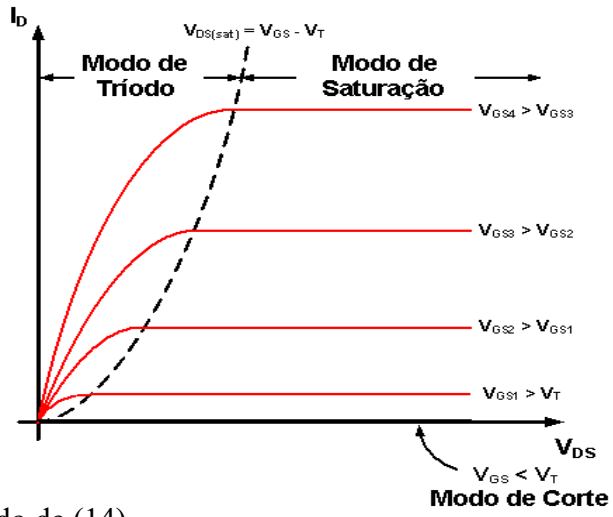
O processo de fabricação de um nMOSFET, como aquele ilustrado na Figura 11, consiste na utilização de uma lâmina de silício do tipo P, que formará o substrato do dispositivo. Sobre essa lâmina, é realizado o processo de dopagem do tipo N para as regiões que se tornarão os terminais de dreno e fonte do transistor. Entre essas regiões é depositado uma camada muito fina de dióxido de silício (SiO_2), que é um ótimo isolante. O contato de porta pode ser formado por um metal ou por um silício policristalino depositado em cima desse óxido fino. Em cima da fonte, do dreno e do substrato também é depositado um metal que forma uma área de contado em cada um deles (14).

Quando é aplicado uma diferença de potencial entre o terminal da porta e o terminal da fonte (V_{GS}), que seja maior que a tensão de limiar (V_T), é criada uma região de canal entre a fonte e o dreno. Nesse canal, de comprimento L e largura W, passará um fluxo de corrente elétrica no sentido longitudinal entre o dreno e a fonte, caso seja aplicada uma diferença de potencial entre o dreno e a fonte (V_{DS}). É possível controlar esse fluxo de corrente elétrica através da diferença de potencial que é aplicada entre o terminal de porta e o terminal da fonte do MOSFET. Com essas duas condições de polarização, é possível observar uma corrente elétrica que flui do dreno para a fonte, através do canal induzido nesse dispositivo (14).

Existem três regiões de operação em que esse dispositivo funciona, a região de corte, na qual não há circulação de corrente elétrica entre fonte e dreno ($V_{GS} < V_T$), a região de tríodo, em que ele tem um funcionamento parecido com de um resistor ($V_{GS} > V_T \; e \; V_{DS} < V_{GS} - V_T$) e a região de saturação, na qual ele se comporta como uma fonte de corrente ($V_{GS} > V_T \; e \; V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$). A Figura 12 ilustra a curva característica da corrente no dreno (I_D) em função de V_{DS},para diferentes valores de V_{GS} , para mostrar as três regiões de operação e a característica

de quanto maior for a diferença de potencial entre a porta e a fonte, maior é a corrente elétrica que surgirá no dispositivo (14).

Figura 12: Curva característica de corrente elétrica entre dreno e fonte em função da tensão entre dreno e fonte de um MOSFET do tipo N.

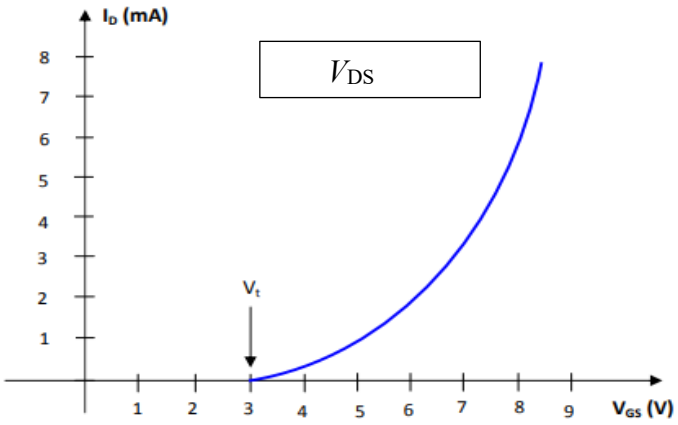


Fonte: Autor adaptado de (14).

Onde, $V_{DS(sat)}$, é a diferença de potencial entre terminais de dreno e fonte necessária para o MOSFET entrar na região de saturação, V_{GS1} à V_{GS4} são diferenças de potencial entre os terminais de porta e fonte, sendo que $V_{GS1} < V_{GS2} < V_{GS3} < V_{GS4}$.

Na região de saturação, a corrente elétrica de dreno tende a ser independente da tensão entre dreno e fonte (V_{DS}) e é determinada pela diferença de potencial aplicada entre a porta e a fonte (V_{GS}) do transistor, possuindo uma relação quadrática com V_{GS}. A Figura 13 mostra a curva característica de corrente de dreno (I_D) em função da diferença de potencial entre a porta e a fonte (V_{GS}) de um MOSFET, para um determinado valor de V_{DS}. Na Figura 13 podemos notar que a corrente de dreno só começa a fluir para tensões V_{GS} maiores do que a tensão de limiar (V_t) do dispositivo (14).

Figura 13: Curva característica de I_D em função de V_{GS} de um MOSFET, canal N, para um determinado valor de V_{DS}.



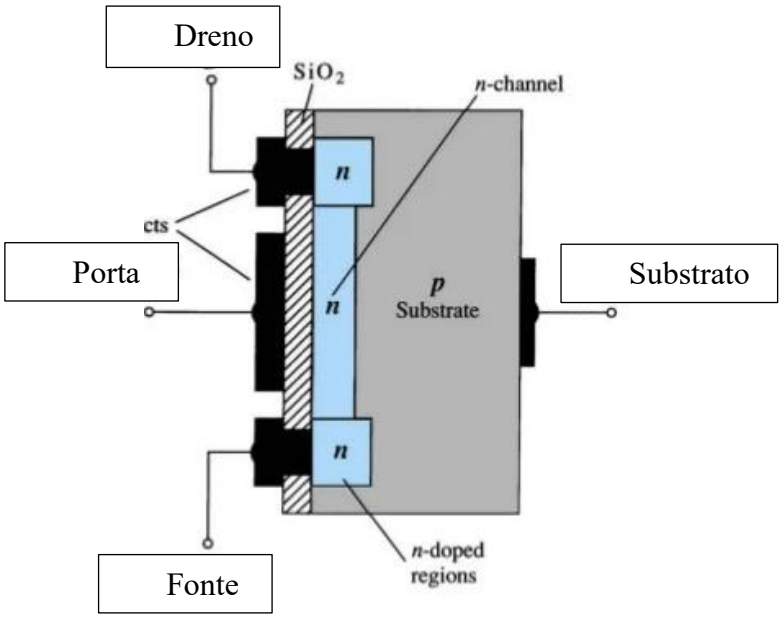
Fonte: Autor adaptado de (14).

2.8.1. MOSFET, Canal N, do Tipo Depleção

O MOSFET do tipo depleção é uma variação do MOSFET do tipo enriquecimento e possui suas curvas características similares, como visto na Seção 2.8. Sua principal diferença é a existência de um canal já formado entre dreno e fonte, mesmo antes da polarização do dispositivo. A aplicação de uma diferença de potencial elétrico negativo entre os terminais de porta e fonte afasta os elétrons do canal, fazendo com que este fique com uma concentração baixa de elétrons na região de canal (14).

O canal, então, deixa de existir pelo processo de recombinação dos elétrons do canal com as lacunas do substrato, que gera uma redução da corrente elétrica que flui entre os terminais de dreno e fonte. A Figura 14 ilustra um MOSFET, canal N, do tipo depleção (14).

Figura 14: Seção transversal de um MOSFET, canal N, do tipo depleção.



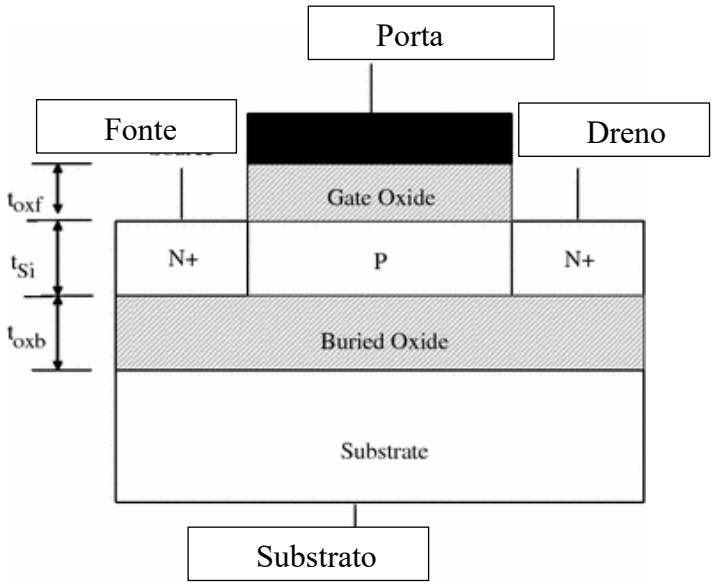
Fonte: Autor adaptado de (14).

Na Figura 14, “cts” significa os contatos das regiões de dreno, porta, fonte e substrato.

2.8.2. Transistor SOI MOSFET

A tecnologia de lâminas de silício do tipo Silício-Sobre-Isolante (*Silicon-On-Insulator*, SOI) apresenta em sua estrutura interna uma camada isolante de óxido de silício entre a região do filme de silício onde se dá a região de canal do dispositivo e o substrato do MOSFET. Esse isolante é chamado de óxido enterrado (*buried oxide*) e esse tipo de dispositivo traz grandes vantagens em relação ao MOSFET construído com lâmina de silício convencional (*Bulk*), pois possui uma melhor isolação elétrica, um melhor controle eletrostático da porta, um chaveamento mais rápido, etc. A Figura 15 ilustra a seção transversal de um SOI MOSFET, canal N, do tipo enriquecimento (28).

Figura 15: Seção transversal de um SOI nMOSFET, canal N, do tipo enriquecimento.



Fonte: Autor adaptado de (29).

Onde, t_{oxb} é a espessura do óxido enterrado, t_{Si} é a espessura do filme de silício que define a região de canal e t_{oxf} é a espessura do óxido de porta. Nessa tecnologia, foram denominadas 3 interfaces, a primeira entre o óxido de porta e a região do canal, a segunda entre a região do canal e o óxido enterrado e a terceira entre o óxido enterrado e o substrato (28;29).

2.8.3. FISH SOI MOSFET

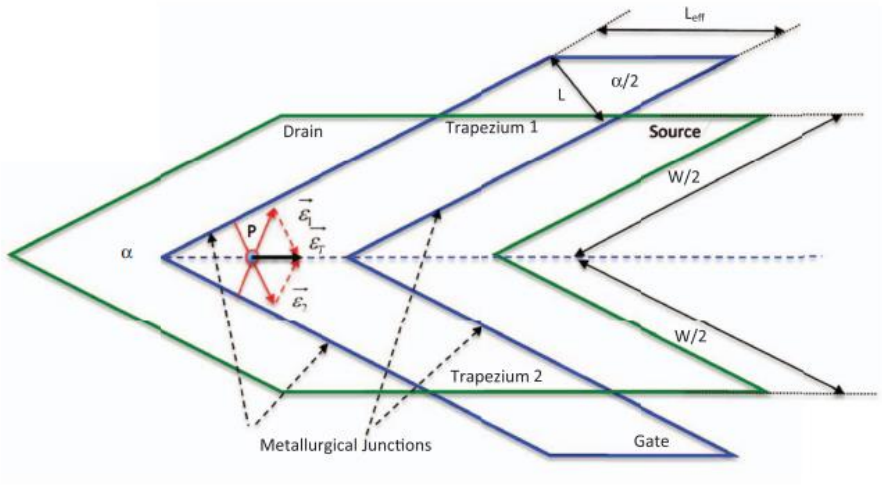
O FISH SOI MOSFET é um transistor de efeito de campo com a geometria de porta não convencional, ou seja, sua geometria de porta não é retangular. Neste dispositivo ela é formada pela junção de duas regiões trapezoidais. Por conta de sua diferenciada geometria da região de porta, esse dispositivo utiliza o Efeito de Canto Longitudinal (*Longitudinal Corner Effect*, LCE) para aumentar o campo elétrico longitudinal ao longo do seu canal em comparação àquele observado em um MOSFET convencional (geometria de porta retangular), considerando-se que eles possuem as mesmas áreas de porta (A_G), larguras de canal (W) e condições de polarização (9).

Essa mudança feita no dispositivo melhora seu desempenho elétrico, aumenta sua corrente de dreno (I_D) e a transcondutância (g_m) em comparação aqueles valores encontrados nos MOSFETs com geometria de porta convencional. Isso ocorre devido ao seu campo elétrico

longitudinal resultante ser dado pela soma vetorial de duas componentes de campo elétrico longitudinais que são geradas pelas arestas da sua geometria de porta (9).

Desta forma, os portadores de carga móveis no canal do MOSFET do tipo *Fish* são puxados da fonte para o dreno na direção contrária do campo elétrico longitudinal resultante. Ou seja, para um mesmo comprimento de canal, o MOSFET do tipo *Fish* consegue produzir uma maior corrente elétrica no dreno do que o MOSFET com geometria de porta convencional retangular. A Figura 16 ilustra o leiaute de um FISH SOI MOSFET (9).

Figura 16: Vista de cima de um FISH SOI MOSFET.



Fonte: Autor adaptado de (9).

Na Figura 16, W e L são a largura e o comprimento do canal, respectivamente, L_{eff}, α são o comprimento de canal efetivo e o ângulo definido pelas junções metalúrgicas da regiões de dreno/fonte e canal, respectivamente, $\vec{\varepsilon}_1$e $\vec{\varepsilon}_2$ são as componentes vetoriais do campo elétrico longitudinal na região de canal, $\vec{\varepsilon}_T$ é o campo elétrico longitudinal resultante na região de canal (9).

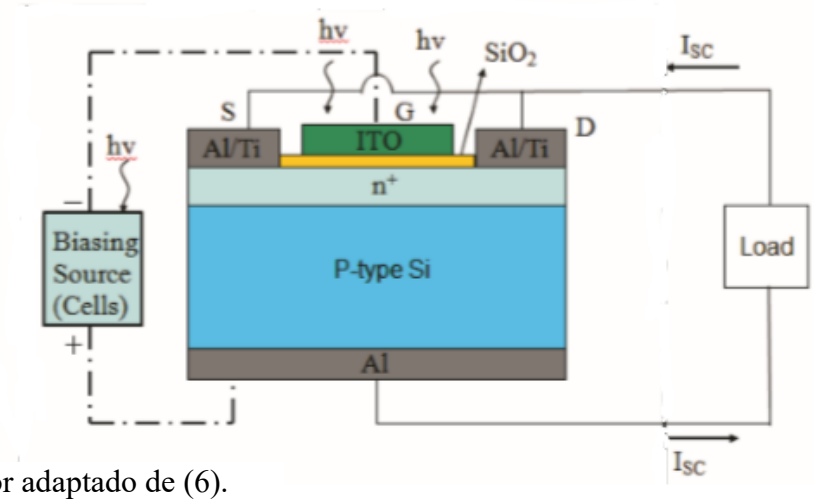
Por conta da nova geometria de porta do MOSFET do tipo *Fish* e do efeito longitudinal de canto, são criados duas componentes de campo elétrico longitudinal (paralelo) $\vec{\varepsilon}_1$ e $\vec{\varepsilon}_2$, em que a soma vetorial dessas duas componentes resulta no campo elétrico longitudinal resultante $\vec{\varepsilon}_T$, que é maior do que o campo elétrico longitudinal resultante gerado em um SOI MOSFET com

geometria de porta convencional, considerando que eles apresentem as mesmas áreas de porta e condições de polarização (9).

2.9. CÉLULA SOLAR BASEADA EM UM MOSFET, CANAL N, DO TIPO DEPLEÇÃO

Uma célula solar formada pela estrutura de um MOSFET pode ser fabricada a partir de uma camada de silício do tipo n+ sobreposta em um substrato de silício do tipo P, uma camada de dióxido de silício (SiO_2), um eletrodo de porta transparente (*Índium Tin Oxide*, ITO), dois contatos ôhmicos frontais, que definem os terminais de dreno e fonte e um eletrodo na parte do substrato do dispositivo (Figura 17), na qual hv é a energia dos fótons presentes nas ondas eletromagnéticas provenientes do sol, I_{SC} é a corrente de curto circuito, Load é uma carga conectada ao circuito que será alimentado por essa célula solar (6).

Figura 17: Célula solar formada por um MOSFET, com os contatos de dreno e fonte curto circuitados e uma fonte de alimentação auxiliar externa (*Biasing Source*).



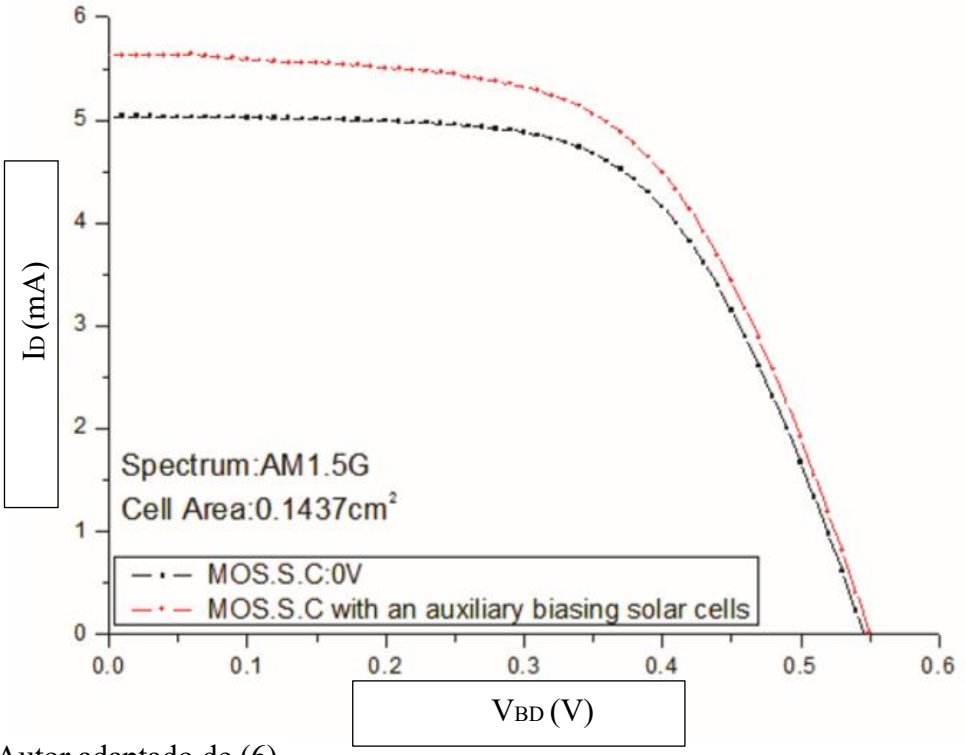
Fonte: Autor adaptado de (6).

Na Figura 17, o dreno e a fonte estão em curto-circuito e são ligados a uma carga, que se conecta com o eletrodo do substrato, fechando o circuito da carga. Na porta da estrutura MOSFET, canal N, do tipo depleção há uma fonte auxiliar externa, que pode ser uma outra célula solar convencional ou não, cujo terminal negativo está ligado à porta e o seu terminal positivo está ligado ao contato do substrato. A fonte auxiliar induz cargas negativas na porta e cargas positivas no substrato, que resulta no aumento da região de depleção existente entre o semicondutor do tipo N+ e o silício do tipo P, logo abaixo do SiO_2. Esse aumento da região de

depleção é capaz de promover também um aumento da formação de pares elétrons-lacunas, resultando em um aumento na corrente de curto-circuito (I_{SC}), quando esse dispositivo é submetido às radiações de energia luminosa. A incidência dessa radiação de energia luminosa passa pela porta da célula, atingindo o silício do tipo N+ e em alguns casos atinge o material do tipo P. Quando os fótons atingem os elétrons que estão na camada de valência dos materiais, caso eles tenham energia suficiente, os elétrons saltam da banda de valência para a banda de condução e serão coletados pelo dreno e/ou pela fonte na forma de corrente elétrica (Isc) (6).

A Figura 18 ilustra um exemplo de uma curva característica da corrente fotoelétrica gerada pela região de depleção entre as regiões n+ e P em função da tensão gerada entre os terminais de fonte e dreno e o substrato da sua estrutura, sendo que a curva em vermelho utiliza uma fonte de polarização auxiliar externa diferente de zero e a curva em preto é sem polarização externa e ambas foram submetidas ao espectro AM1.5G (6).

Figura 18: Curva característica de corrente elétrica gerada (ID) pela região de depleção formada pelas regiões n+ e P em função da tensão sobre a carga "Load" (VBD) em células solares baseadas em dispositivos MOSFETs, canal N, do tipo depleção que foi submetia ao espectro AM1.5G.



Fonte: Autor adaptado de (6).

Através da análise do gráfico da Figura 18, verifica-se que quando há a presença de uma fonte auxiliar de polarização, a célula solar baseada em um MOSFET, canal N, do tipo depleção

apresenta um aumento de 12,93% em sua corrente de curto-circuito (I_{SC}), considerando-se uma fonte de tensão de corrente contínua (*Direct Current*, DC) externa de 5V (24).

2.10. SIMULADOR *SYNOPSYS SENTAURUS*

Com o simulador Synopsys Sentaurus (30) é possível simular dispositivos eletrônicos através do sistema operacional Linux. Esse simulador está disponível nos laboratórios de nanoeletrônica do Centro Universitário da FEI. A execução desse *software* se dá a partir do *Sentaurus Workbench* (SWB), que é a ferramenta responsável por armazenar e gerenciar todas as informações do dispositivo eletrônico a ser simulado, a estrutura do dispositivo gerada através do *Sentaurus Structure Editor* (SDE) e também controlar as simulações do dispositivo. A interface SWB conta também com exemplos de diferentes dispositivos para simulação, biblioteca integrada com diversas informações, inclusive informações das propriedades de cada elemento químico e dados sobre espectros solares (30).

Esse simulador conta também com o *Sentaurus Device* (SDEVICE), que é o responsável pela simulação das características elétricas do dispositivo simulado e utiliza como arquivo de entrada o SDE contendo a estrutura do dispositivo e sua grade (30). O arquivo de simulação da estrutura do MOSFET com geometria de porta convencional utilizado nessa pesquisa se encontra no Apêndice A dessa dissertação.

O funcionamento do SDEVICE é baseado em modelos físicos e equações (Poisson e continuidade) que são capazes de prever as características elétricas de dispositivos como, por exemplo, campo elétrico, quantidade de portadores de carga, potencial elétrico, corrente elétrica, etc. Todos os parâmetros são dependentes das condições de polarização do dispositivo e do ambiente em que está inserido. Para essa pesquisa, as condições ambientes que impactam no funcionamento do dispositivo são a temperatura e o espectro de luz que incide na superfície do transistor (30).

Os arquivos de simulação da estrutura e de suas características elétricas possuem uma linguagem própria e, por isso, têm extensão diferente para reconhecimento no simulador. Por serem alocados na mesma pasta, eles devem ser editados pela própria interface do Sentaurus ou por um editor de texto do próprio Linux. Os comandos não precisam seguir uma sequência lógica de execução, tanto para a estrutura do dispositivo quanto para o circuito a ser estudado. Uma vez tendo as sentenças, os comandos, as rotinas e as sub-rotinas bem definidas e separadas, é possível efetuar a simulação desejada (30).

No Apêndice B está disponível o arquivo SDEVICE utilizado para simulação do MOSFET, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta convencional funcionando como uma célula solar. Sua polarização é realizada com uma fonte de tensão externa, que varia de 0 a 1V com passo de 10mV e com a incidência do espectro solar AM1.5G. A curva característica que esse arquivo gera pode ser visualizada através da ferramenta *Sentaurus Visual* (SVISUAL), que pode ser acessada tanto pelo SWB, como pelo terminal do Linux (30).

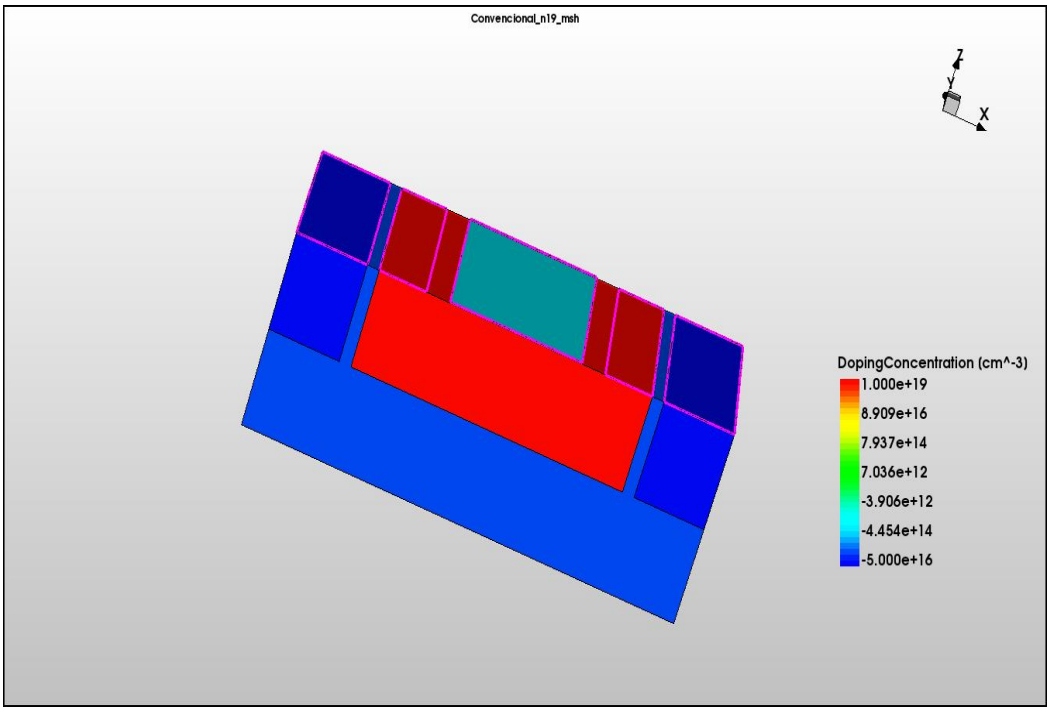
3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, são mostradas as características estruturais e dimensionais desse tipo de célula solar implementada com MOSFETs, canal N, do tipo depleção, de geometrias de porta convencional e não convencional do tipo *Fish*, com auxílio do simulador *Synopsys Sentaurus* (30), que está disponível nos laboratórios de nanoeletrônica do Centro Universitário da FEI.

3.1. ESTRUTURA DO MOSFET, CANAL N, DO TIPO DEPLEÇÃO COM GEOMETRIA DE PORTA CONVENCIONAL

O arquivo SDE, apresentado no Apêndice A, é responsável por gerar a estrutura de um MOSFET, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta retangular convencional para ser simulado no simulador Sentaurus (Figura 19), que será utilizado como célula básica para implementar uma célula solar, com suas respectivas dimensões e concentrações de dopantes por unidade de volume (escala de cores).

Figura 19: Estrutura tridimensional de um MOSFET, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta retangular, que foi gerada através do arquivo SDE descrito no Apêndice A que será utilizado como célula básica de uma célula solar.



Fonte: Autor

Na Figura 19, tem-se, da direita para esquerda, o contato de alumínio do substrato (silício do tipo P dopado com uma concentração igual a $5x10^{16}\ cm^{-3}$), a região de dreno (silício do tipo N+ dopado com uma concentração igual a $1x10^{19}\ cm^{-3}$), a região de porta (silício policristalino), região de fonte (silício do tipo N+ dopado com uma concentração igual a $1x10^{19}\ cm^{-3}$) e um segundo contato de alumínio no substrato (silício do tipo P dopado com uma concentração igual a $5x10^{16}\ cm^{-3}$). Abaixo tem-se a região azul mais clara que corresponde ao silício do tipo P com uma baixa dopagem ($1x10^{16}\ cm^{-3}$). A estrutura contém um comprimento de canal (L) igual a 0,56µm, uma largura de canal igual a 0,81µm e uma espessura do silício de substrato igual a 1µm.

3.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA TRIDIMENCIONAL

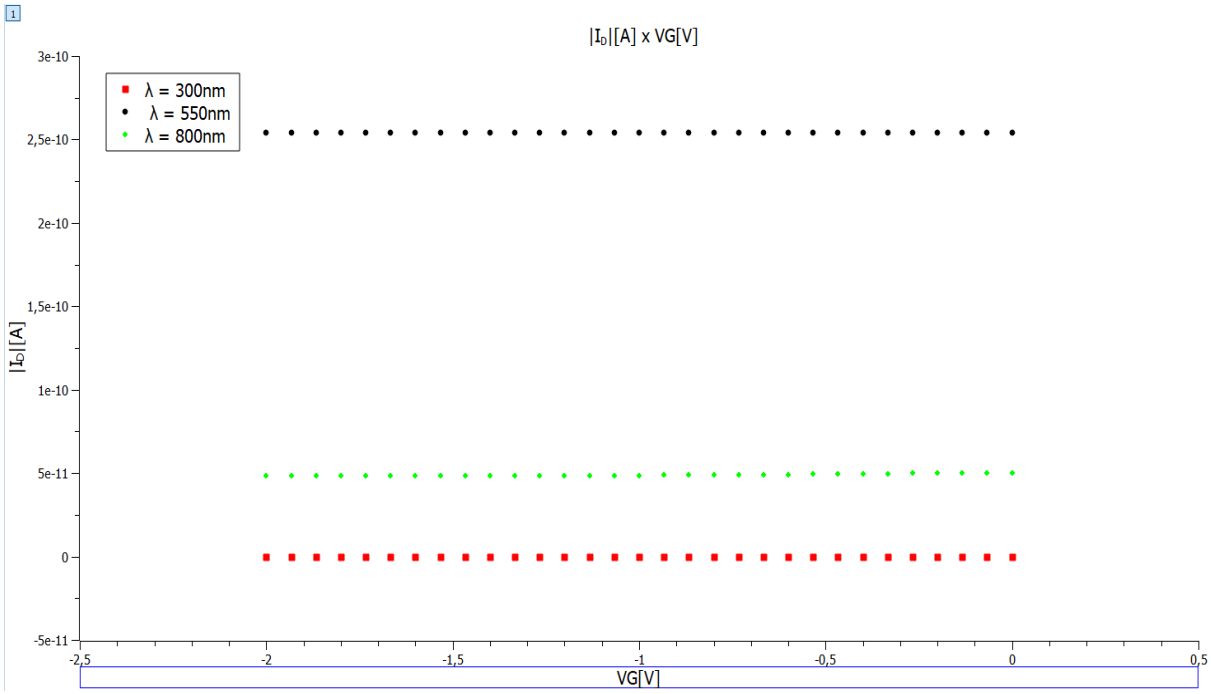
Foram realizadas simulações do MOSFET, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta convencional (retangular) e do MOSFET do tipo *Fish*, sob o efeito da incidência de fótons, a fim de observar o fluxo de corrente elétrica que ocorre nas regiões do dreno do substrato (silício do tipo P), respectivamente.

3.3.RESULTADOS OBTIDOS

Em um primeiro momento, foi simulado o MOSFET, canal N, do tipo depleção com a incidência de um espectro de luz monocromático, ou seja, com comprimento de onda fixo e variando esse comprimento de onda para observar o efeito da energia luminosa sobre a curva característica da corrente elétrica do dreno (I_D) em função da diferença de potencial entre a porta e a fonte (V_G) do dispositivo, considerando uma diferença de potencial entre dreno e fonte (V_{DS}) igual a 1V. Os valores dos comprimentos de onda utilizados foram de 300, 550 e 800nm, respectivamente. A Figura 20 mostra a curva característica da I_D em função da V_G através da simulação numérica tridimensional realizada do dispositivo levando-se em conta diferentes comprimentos de onda, ressaltando que essa curva foi obtida apenas para a região em que o dispositivo está atuando como um gerador de energia, ou seja, aquela região que possui uma

potência negativa (tensão de porta positiva e corrente de dreno negativa). Como visto anteriormente, isso ocorre com tensões de porta entre -0,6V e 0,6V.

Figura 20: Curva característica da I_D em função da V_G, para V_{DS} igual a 1V para diferentes comprimentos de onda de luz monocromática de um MOSFET, canal N, do tipo depleção funcionando como um elemento básico de uma célula solar.



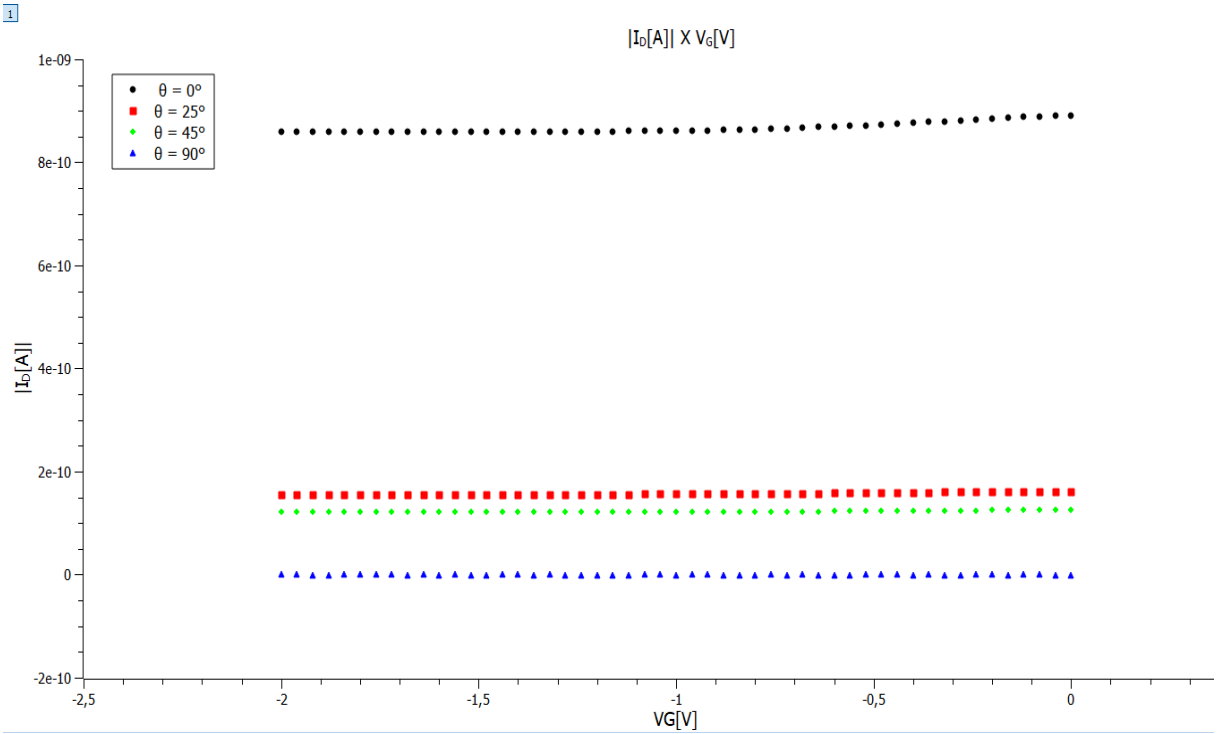
Fonte: Autor

Analisando a Figura 20, podemos concluir que o comprimento de onda interfere na corrente elétrica de dreno gerada e, consequentemente, na potência gerada pelo dispositivo. Nesse caso, observamos que devido a espessura da camada de Silício ser de 1µm, o comprimento de onda ideal é de 550 nm, ou seja, toda energia de um fóton com esse comprimento de luz é absorvida dentro da espessura considerada desse MOSFET. Com isso é possível maximizar a potência gerada dessa célula solar, utilizando-se de um comprimento de onda da fonte luminosa igual a 550 nm.

Posteriormente, foi verificado o impacto do ângulo de incidência da radiação solar na geração de potência elétrica. Para tanto foi simulado a curva característica da I_D em função de da V_G do dispositivo, variando-se o ângulo de incidência do plano de irradiação luminosa. O resultado pode ser visto na Figura 21. Para essa curva, foram feitas simulações numéricas tridimensionais focando apenas na região em que o dispositivo atua como gerador de energia

elétrica, como feito anteriormente, mantendo-se uma tensão entre dreno e fonte de 1V e utilizando-se um comprimento de onda da fonte luminosa igual a 550 nm.

Figura 21: Curva característica da I_D em função da V_G, para V_{DS} igual a 1V para diferentes ângulos de incidências das irradiações no MOSFET, canal N, do tipo depleção, funcionando como elemento básico de célula solar.



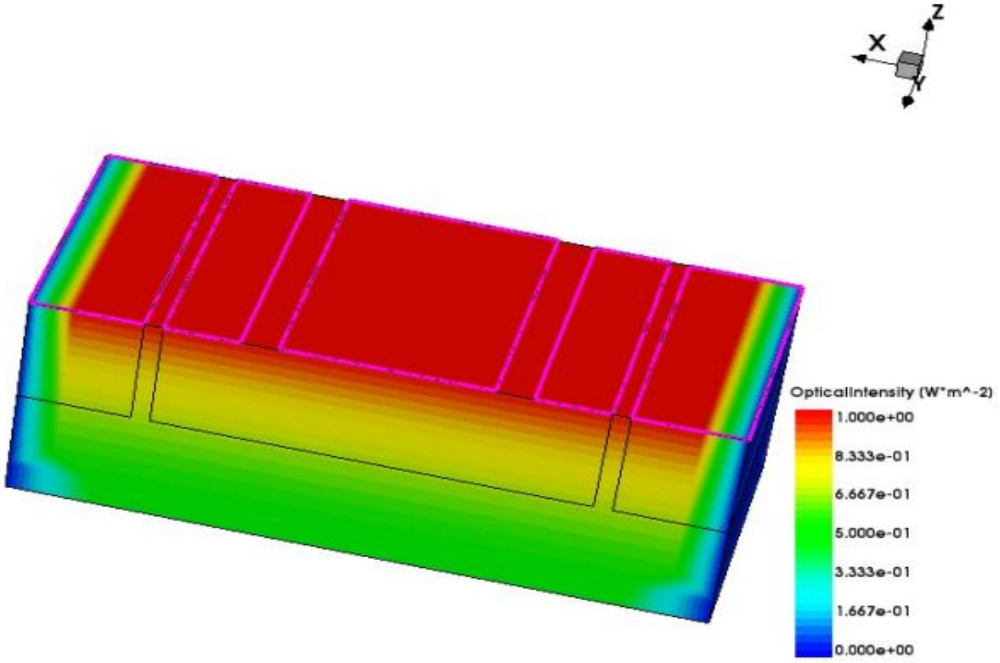
Fonte: Autor

Analisando o gráfico ilustrado na Figura 21, é possível verificar o impacto da variação do ângulo de incidência da radiação da energia luminosa na corrente elétrica de dreno gerada desse dispositivo. Para a orientação da estrutura do MOSFET desenvolvida, o ângulo de 0º, que corresponde a uma incidência perpendicular das ondas eletromagnéticas no dispositivo é aquele que é capaz de maximizar a corrente elétrica de dreno gerada e, consequentemente, gerar uma maior potência elétrica.

Após verificar a influência do ângulo da radiação que incide no dispositivo, foram realizadas simulações numéricas tridimensionais acrescentando uma fonte de polarização externa na porta do dispositivo (V_G) para verificar sua influência no funcionamento da curva característica do MOSFET. Para tanto, foram simuladas as curvas da corrente no dreno (I_D) em função da diferença de potencial entre o substrato e o dreno (V_{BD}), variando-se a tensão aplicada na porta do dispositivo, com o dispositivo sendo irradiado pelo espectro AM 1.5G. A Figura 22

ilustra o MOSFET, canal N, do tipo depleção sendo irradiado com energia luminosa (espectro AM1.5G).

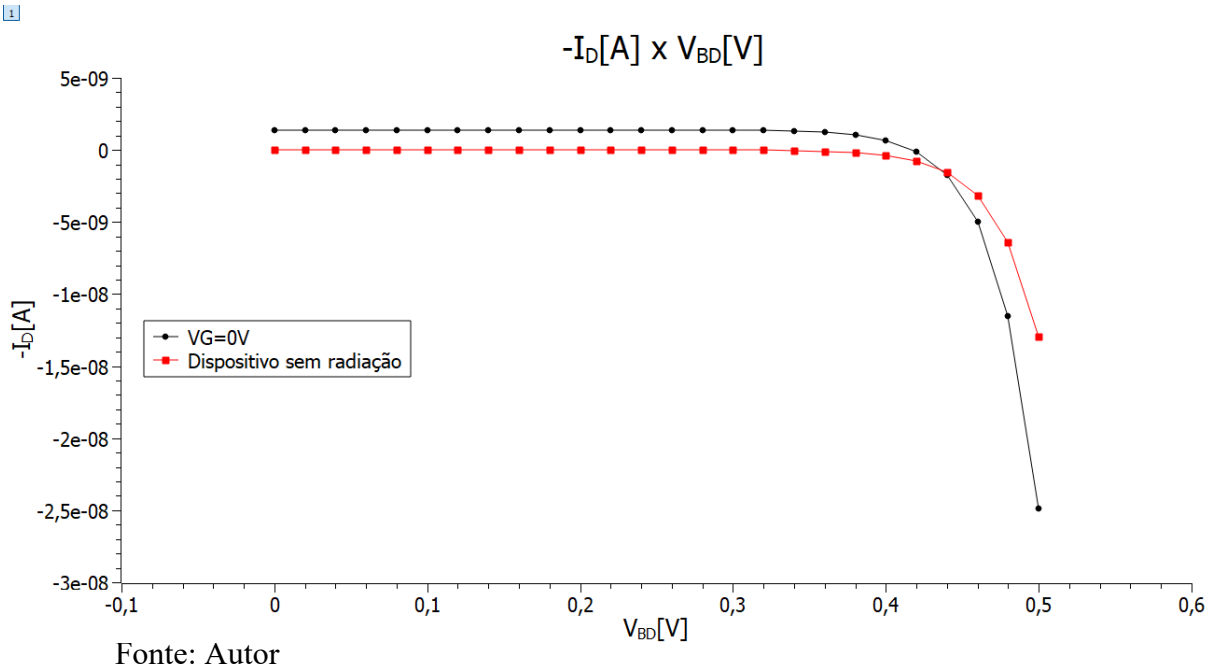
Figura 22: Estrutura tridimensional simulada de um MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta retangular durante o processo de irradiação de energia luminosa do espectro de luz AM 1.5G, indicando a incidência da energia luminosa no dispositivo em W/m^2.



Fonte: Autor

Analisando-se a Figura 22, é possível ver o decaimento da densidade de potência luminosa, dada em *W*/m², conforme aumenta a profundidade da estrutura cristalina do silício. A Figura 23 ilustra o gráfico da I_D em função da V_{BD} do MOSFET, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta convencional, operando como célula solar, ou seja, considerando-se uma carga ôhmica de 100 ohms entre os terminais de dreno e substrato, para uma tensão de porta igual a 0V, uma diferença de potencial entre dreno e substrato variando de 0 a 1V e com o dispositivo sendo irradiado pelo espectro AM 1.5G.

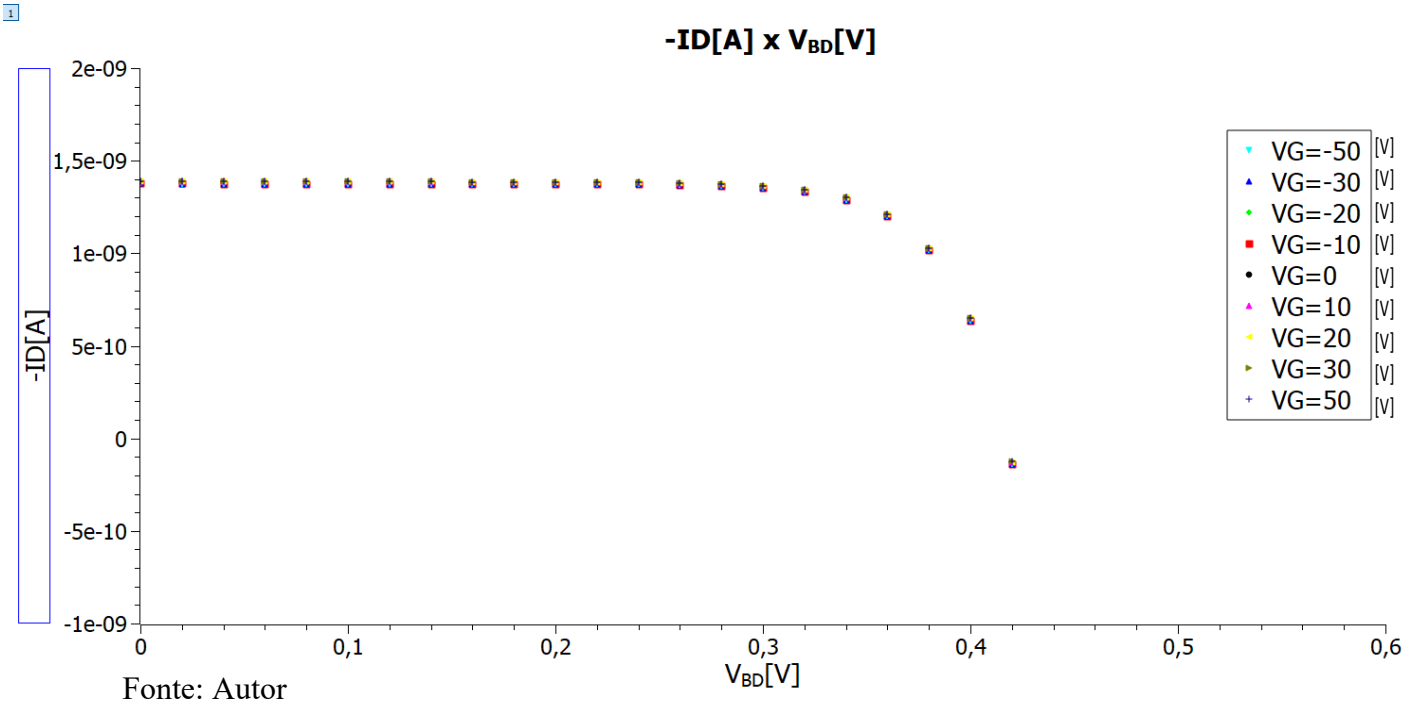
Figura 23: Curva característica da I_D em função da V_{BD}, para uma tensão de porta igual a 0V(preto) e dispositivo sem radiação (vermelho) do MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta retangular.



Fonte: Autor

Analisando-se a Figura 23, observa-se o comportamento do MOSFET, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta convencional retangular atuando como uma célula solar para uma tensão de porta igual a 0V. É possível observar também o seu funcionamento operando como um gerador de energia elétrica (potência negativa), região de interesse desse projeto de pesquisa. A Figura 24 ilustra o gráfico da I_D em função da V_{BD} para diferentes tensões aplicadas a porta e com o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional operando como célula solar (Figura 17), sendo irradiado pelo espectro AM 1.5G.

Figura 24: Gráfico de I_D em função de V_{BD} para diferentes valores de V_G do MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional, operando como célula solar, sendo irradiado pelo espectro AM 1.5G.



Fonte: Autor

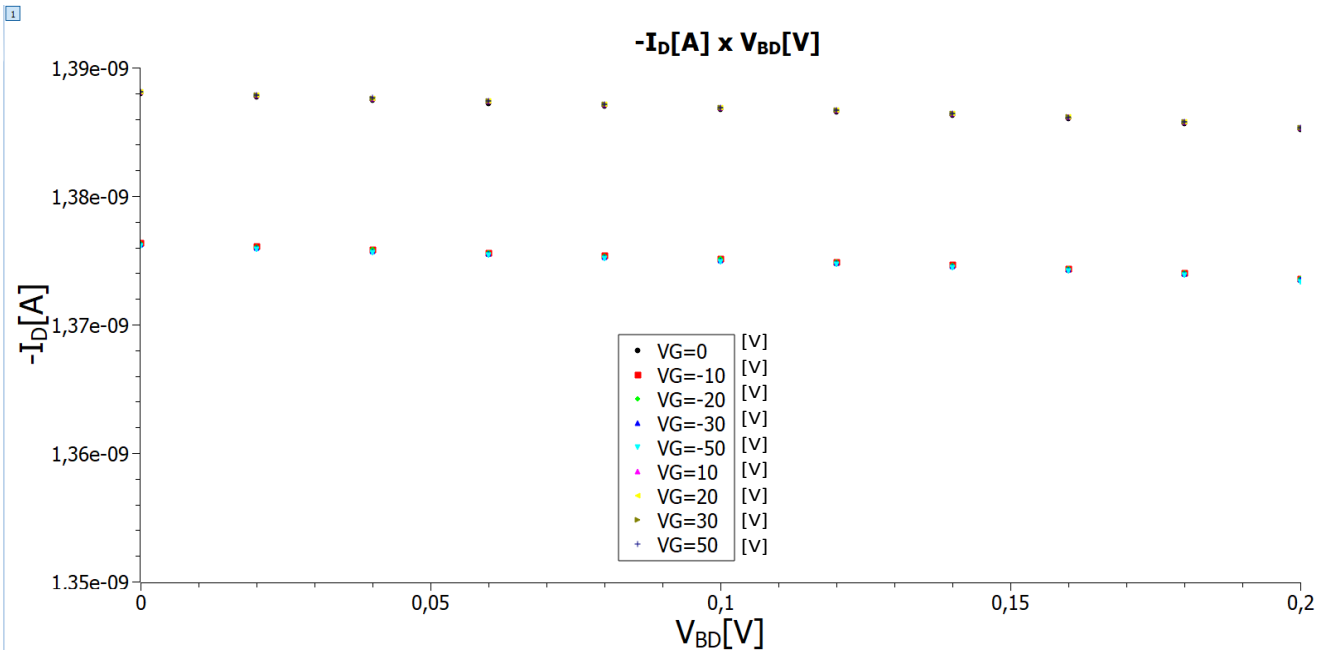
É possível observar que há uma variação, mesmo que muito pequena, em torno de $1x10^{-11}A$, nas curvas ilustradas pela Figura 24. A partir dessa informação, é possível obter as diferentes correntes elétricas de curto-circuito (I_{SC}), ou seja, o ponto do gráfico da Figura 24 em que a tensão entre o substrato e o dreno é igual a 0 V, e as diferentes tensões de circuito aberto (V_{OC}), ou seja, tensões entre o substrato e o dreno para uma corrente de dreno igual a 0 A. Esses valores são necessários para realizar a caracterização elétrica da célula básica MOSFET, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta convencional, que será usada para a implementação de células solares, através dos cálculos dos parâmetros definidos pelo Fator de Forma e pelo Rendimento. Além disso, é possível verificar o impacto da aplicação da fonte de tensão externa para polarizar a tensão de porta desse MOSFET.

Uma pequena variação foi observada na corrente gerada (I_D) por esse MOSFET, operando como célula solar, em decorrência da variação de V_G. Os valores de V_G foram variados de -50V a +50V. Cabe aqui ressaltar que esses valores de V_G, acima de 5V não podem ser aplicados experimentalmente devido à dimensão da espessura do óxido de porta usada nesse dispositivo e também pelo elevado consumo de potência e só foram usados para fins de estudos exploratórios. Essas variações encontradas foram muito pequenas, pois o dispositivo apresenta dimensões extremamente pequenas. Caso esse dispositivo fosse maior, ou houvesse uma

associação paralela de muitos desses dispositivos, essas variações de corrente elétrica seriam maiores.

Para melhor observar a variação da corrente de curto-circuito (I_{SC}) e da tensão de circuito aberto (V_{OC}), foram geradas duas outras figuras a partir da Figura 24. A Figura 25 foi implementada para ampliar a região em que a tensão V_{BD} é próxima a 0. A Figura 26 foi criada para ampliar a região em que a corrente elétrica no dreno (I_D) é próxima do seu valor nulo.

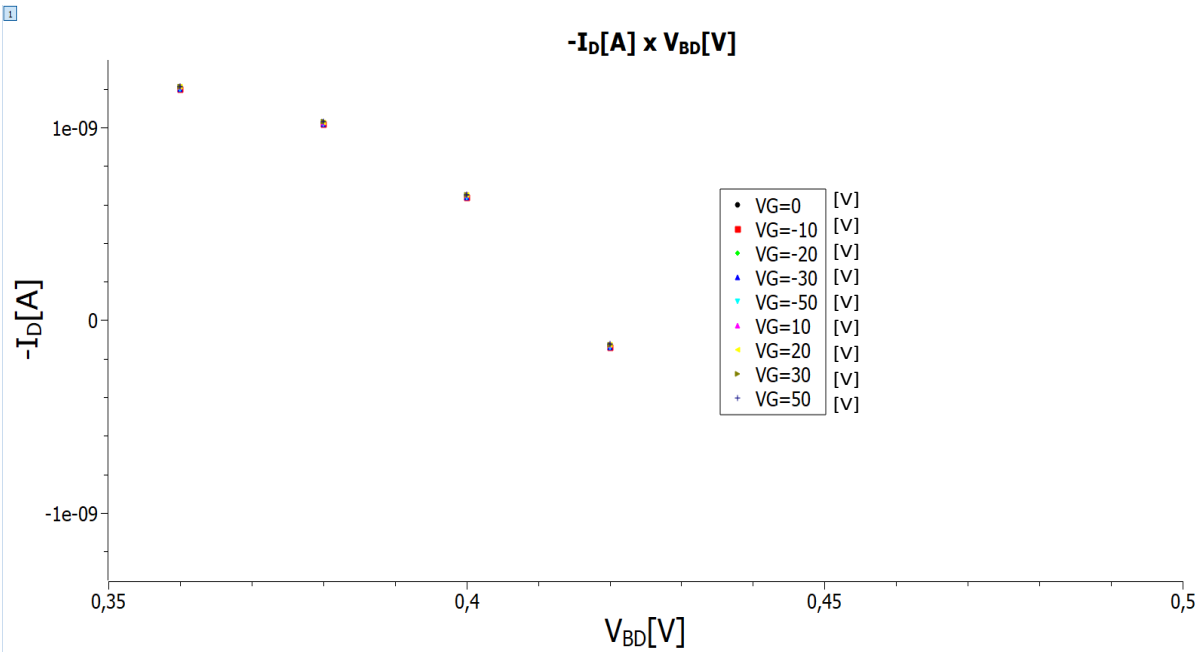
Figura 25: Gráfico da I_D em função da V_{BD} para obtenção das I_{SC}s do dispositivo.



Fonte: Autor

Analisando-se a Figura 25, observa-se que para valores de V_G nulo ou positivos as correntes elétricas no dreno (I_D) se mantêm em um patamar mais elevado, quando comparado com a corrente elétrica no dreno para tensões V_G negativas. Isso pode ser justificado pelo aumento da largura da região de depleção na junção n+ do canal e P do substrato, à medida que V_G aumenta de valor. Além disso, considerando-se as V_{GS}, sejam elas positivas ou negativas, os seus valores praticamente não mudam à medida que se varia V_G. Isso pode ser justificado pela variação muito pequena das regiões de depleção desse dispositivo em função da variação de V_G.

Figura 26: Gráfico da I_D em função da V_{BD} visando a obtenção das V_{OCs} do dispositivo.

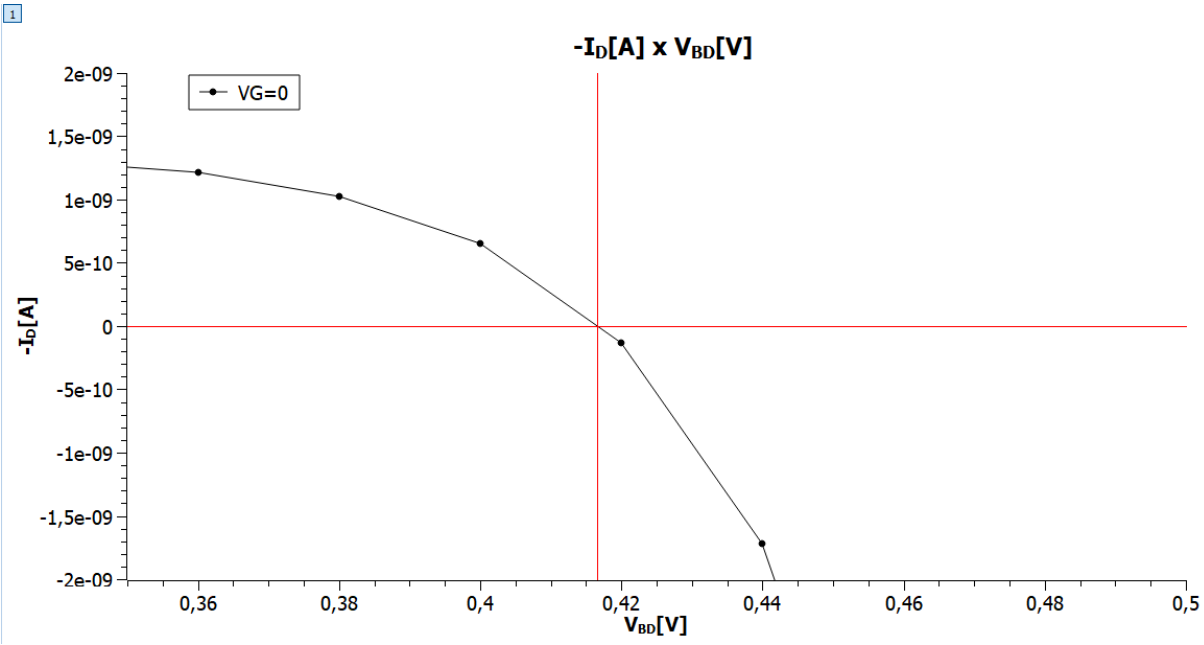


Fonte: Autor

Analisando-se a Figura 26, observa-se que a polarização externa aplicada ao terminal de porta (V_G) não gerou grande impacto nos valores de tensão de circuito aberto (V_{OC}) obtidos.

Com o intuito de obter a tensão de circuito aberto com maior precisão, foi ampliada a escala entre os valores em que a corrente no dreno passa de um valor positivo para um valor negativo, ou seja, o ponto em que a corrente I_D é igual a 0 A. Dessa forma, esse ponto do gráfico é obtido por meio do eixo da V_{BD}. A Figura 27 ilustra a forma como foi obtido o valor da tensão de circuito aberto para cada valor de V_G simulado, levando-se em conta o gráfico de I_D em função de V_{BD}.

Figura 27: Gráfico da I_D em função da V_{BD}, visando a obtenção da V_{OC} para uma V_G igual a 0 V.

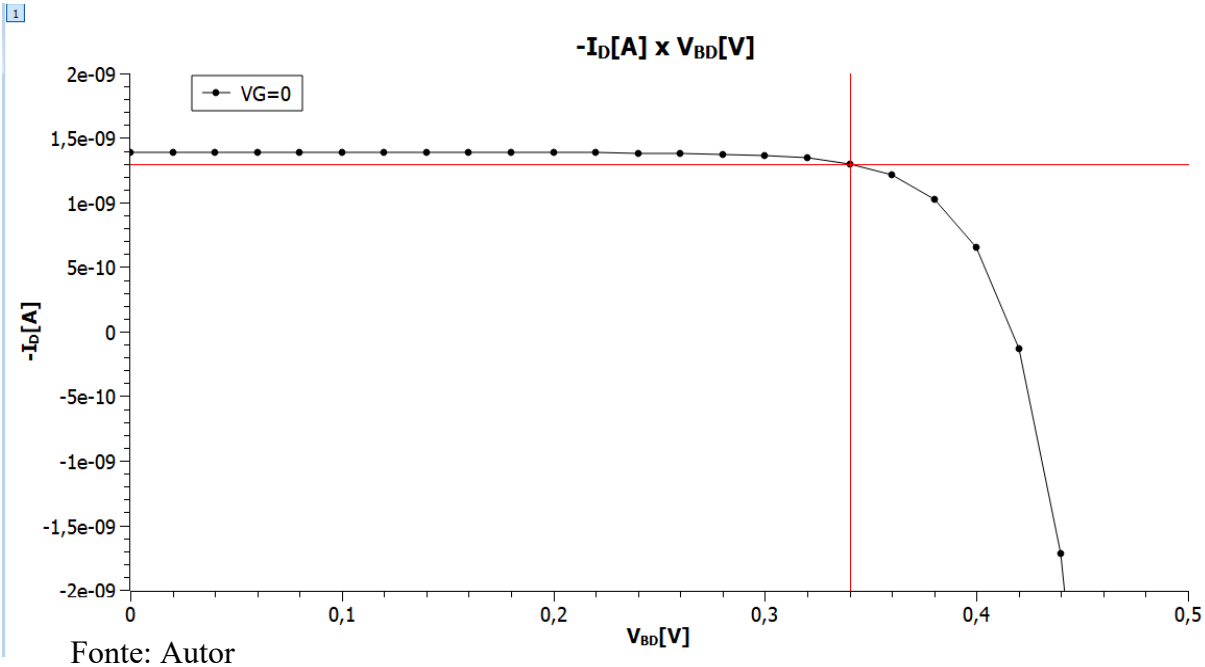


Fonte: Autor

Baseado na Figura 27, como exemplo, o valor da tensão de circuito aberto para V_G igual a 0 é de 0,4167 V.

As potências máximas dos MOSFETs, canal N, do tipo depleção, considerados nesse projeto de pesquisa, foram obtidas a partir das curvas características de I_D em função de V_{BD} simuladas. A Figura 28 exemplifica como foi obtido o valor da potência máxima para uma determinada tensão aplicada na porta do MOSFET, canal N, do tipo e depleção com geometria de porta convencional retangular. O critério realizado para as caracterizações elétricas das potências máximas dos MOSFET, canal N, do tipo depleção, e com diferentes formatos geométricos de porta foi o de considerar o ponto da curva em que o produto entre corrente elétrica I_D e a tensão entre substrato e dreno V_{BD} apresenta seu valor máximo.

Figura 28: Gráfico da I_D em função de V_{BD} visando a obtenção da Potência Máxima do MOSFET, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta convencional operando como célula solar, considerando-se uma tensão V_G igual a 0 V e sendo irradiado pelo espectro AM 1.5G.



Fonte: Autor

O mesmo método que foi utilizado para obter todos os valores das I_{SC}, das V_{OC} e das potências elétricas máximas, para todos os valores de V_G, foi também usado para o MOSFET, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta do tipo *Fish*.

Após obter todos os valores das corrente de curto-circuito (I_{SC}), das tensão de circuito aberto (V_{OC}) e das potências elétricas máximas, para cada valor de polarização da porta (V_G), foi gerada a Tabela 1, que será utilizada para calcular os parâmetros de caracterização elétrica da célula básica MOSFET, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta convencional, para ser utilizada em células solares em cada uma das condições simuladas (variando a polarização externa aplicada ao terminal de porta).

Tabela 1:Valores de V_{OC}, I_{SC} e Potência Máxima para diferentes valores de V_G aplicados no MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional.

V_G (V)	V_{OC} (V)	I_{SC} (nA)	P_{MAX} (nW)
-50	0,4179	1,376	0,4319
-30	0,4172	1,3762	0,43193
-20	0,4172	1,3763	0,43196
-10	0,418	1,3763	0,43204
0	0,4167	1,3879	0,43595
10	0,4164	1,3881	0,43627
20	0,4179	1,3881	0,43628
30	0,4168	1,3881	0,43635
50	0,4168	1,3881	0,43635

Fonte: Autor.

Com os valores da Tabela 1, são calculados os Rendimentos (η) através da equação [13] e os Fatores de Forma (FF) através da equação [14], para todos os valores de tensão aplicados na porta do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional. A Tabela 2 mostra os resultados obtidos dos rendimentos e dos fatores de forma para as diferentes condições de tensão V_G.

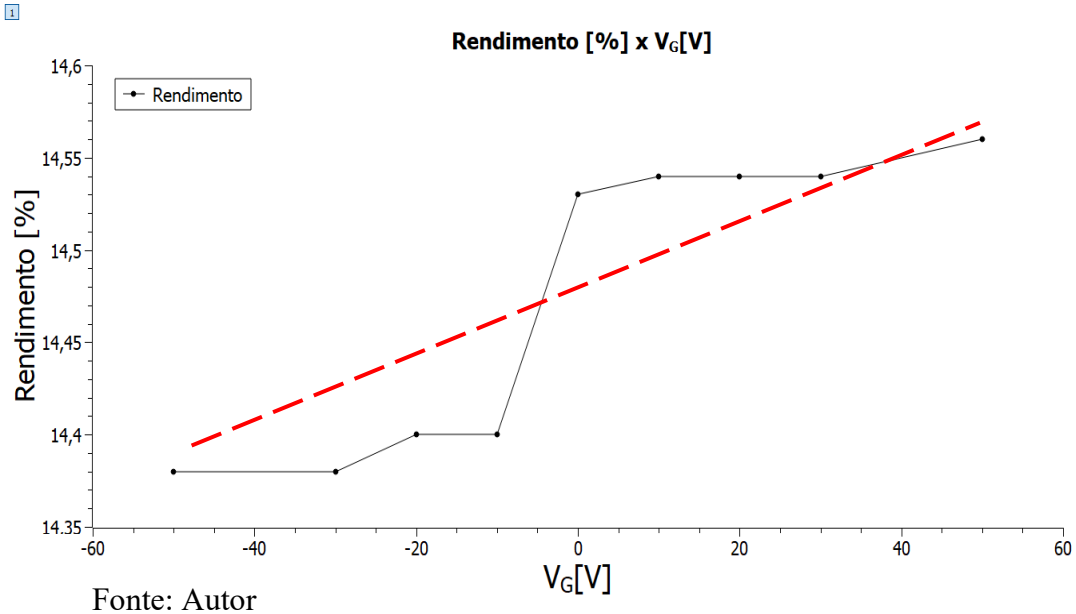
Tabela 2:Valores dos Rendimentos e dos Fatores de Forma obtidos para diferentes valores de tensão aplicadas na porta do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta retangular.

V_G [V]	η [%]	FF[%]
-50	14,38%	75,11%
-30	14,38%	75,23%
-20	14,40%	75,23%
-10	14,40%	75,10%
0	14,53%	75,38%
10	14,54%	75,48%
20	14,54%	75,21%
30	14,54%	75,42%
50	14,56%	75,42%

Fonte: Autor.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 2, ao aplicar uma tensão de polarização externa na porta da célula básica composta por um MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional, que pode ser usada para implementação de uma célula solar, é possível verificar que o seu Rendimento e o seu Fator de Forma tendem a serem maiores, em média, em relação aqueles observados quando aplicamos tensões positivas na porta. O gráfico da Figura 29 ilustra o comportamento do Rendimento do MOSFET, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta convencional retangular em função da tensão de polarização externa aplicada ao seu terminal de porta, no qual a linha vermelha tracejada ilustra a reta média do Rendimento obtido, considerando-se as seguintes condições: tensão V_{BD} variando de 0 a 1V e dispositivo sendo irradiado com o espectro AM 1.5G.

Figura 29: Gráfico do Rendimento do MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional retangular em função da tensão de polarização externa aplicada no seu terminal de porta.

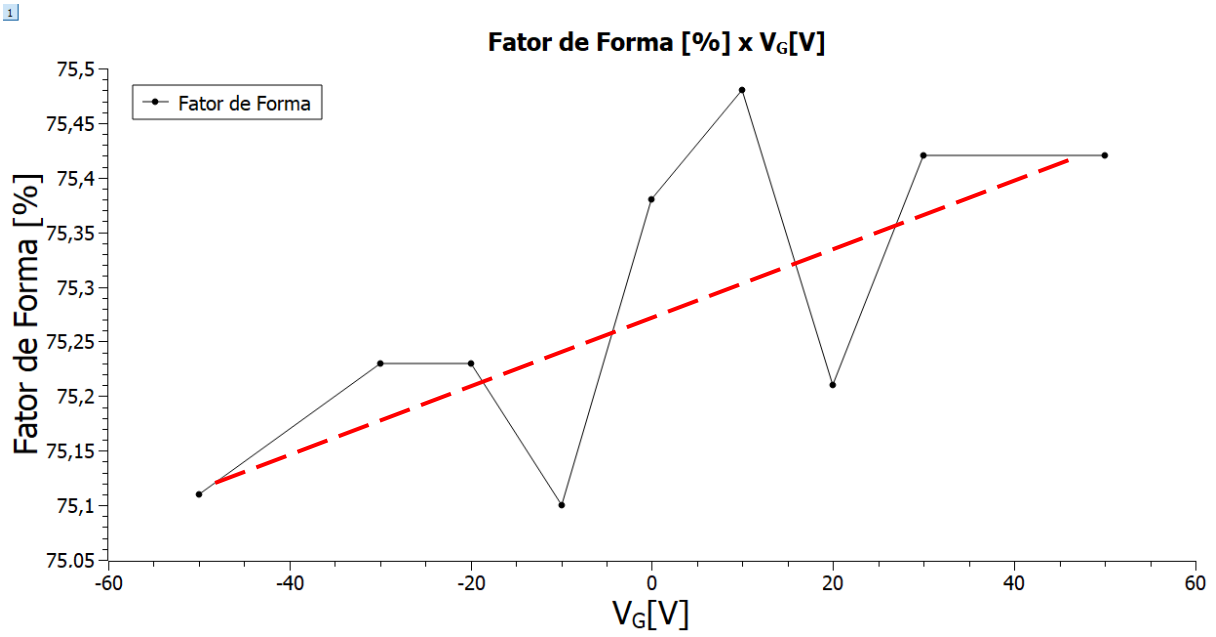


Fonte: Autor

Considerando-se o Fator de Forma da Tabela 2, é possível observar que seu valor varia de 75,11% a 75,42%, conforme a polarização externa na porta é aumentada de -50V para +50V. O parâmetro de fator de forma nos informa o quão próximo da operação ideal a célula solar está operando e, com os dados obtidos, vemos que, quanto maior a polarização externa de tensão de porta, mais o MOEFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional se aproxima, mesmo que minimamente, de sua condição ideal de operação. O gráfico da Figura

30 ilustra o Fator de Forma em função da polarização de tensão externa aplicada ao terminal de porta desse dispositivo.

Figura 30: Gráfico do Fator de Forma em função da polarização externa aplicada ao terminal de porta do MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional.



Fonte: Autor

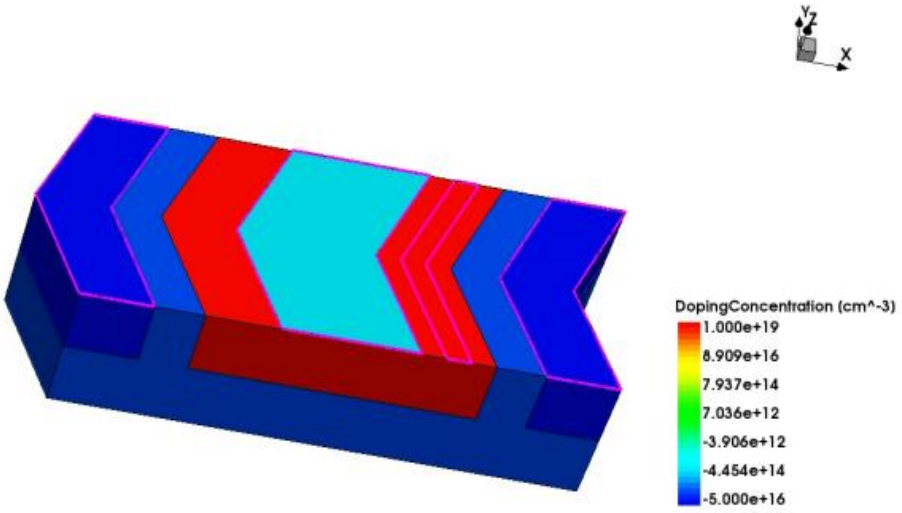
Analisando a Figura 30, observa-se a linha de tendência, que foi tracejada em vermelho, que indica uma tendência do aumento no Fator de Forma do MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional retangular conforme a polarização de tensão externa aplicada à porta aumenta. A variação do Fator de Forma observada é muito pequena. Isso pode ser justificado devido as dimensões desse dispositivo, operando como célula solar, serem extremamente pequenas. Trabalhos futuros terão como objetivo otimizar as dimensões e as concentrações de dopantes desse MOSFET, visando ao aumento no seu desempenho elétrico.

3.4. ESTRUTURA DO DISPOSITIVO COM GEOMETRIA DE PORTA NÃO CONVENCIONAL DO TIPO *FISH*

Após concluídas as simulações numéricas tridimensionais com a célula solar baseada em um MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria convencional, foi desenvolvida uma nova estrutura de célula solar utilizado como elemento construtivo o MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta do tipo *Fish*. O arquivo SDE para a geração dessa

estrutura se encontra no Apêndice C. A Figura 31 ilustra o modelo tridimensional da célula solar com geometria de porta não convencional mencionada. Para esse dispositivo foram mantidas as dimensões utilizadas anteriormente, ou seja, comprimento de canal (L) igual a 0,56µm, largura de canal (W) igual a 0,81µm e espessura do substrato igual a 1µm, assim como foram mantidas as concentrações de dopantes utilizadas no dispositivo convencional, que foram descritas na Seção 3.1.

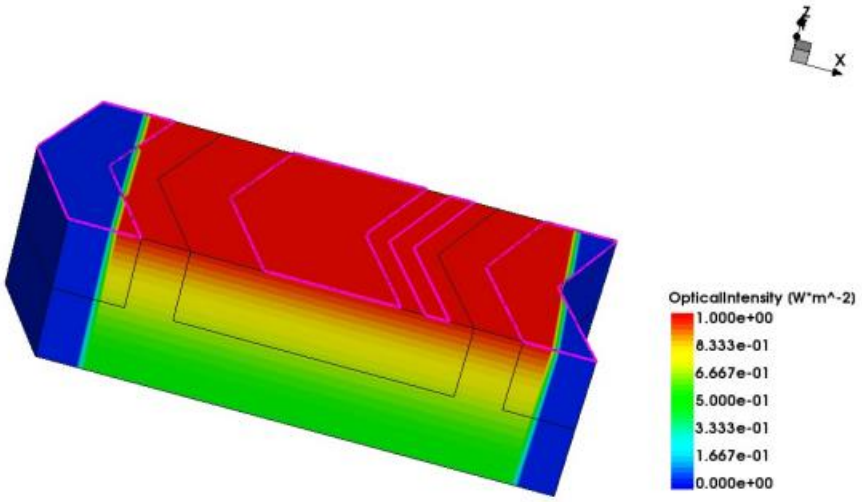
Figura 31: Estrutura tridimensional do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish* gerada através do arquivo SDE descrito no Apêndice C, que será utilizada como célula básica de uma célula solar.



Fonte: Autor

Para a estrutura ilustrada pela Figura 31 serão realizadas simulações numéricas tridimensionais com as mesmas condições de polarização utilizadas na estrutura convencional com o intuito de realizar uma análise comparativa entre ambas. Para tanto, foram simuladas as curvas da corrente elétrica no dreno (I_D) em função da diferença de potencial entre o substrato e o dreno (V_{BD}), variando a tensão elétrica aplicada no terminal de porta e com o dispositivo sendo irradiado pelo espectro AM 1.5G. A Figura 32 ilustra o MOSFET do tipo *Fish* sendo irradiado com energia luminosa (espectro AM 1.5G).

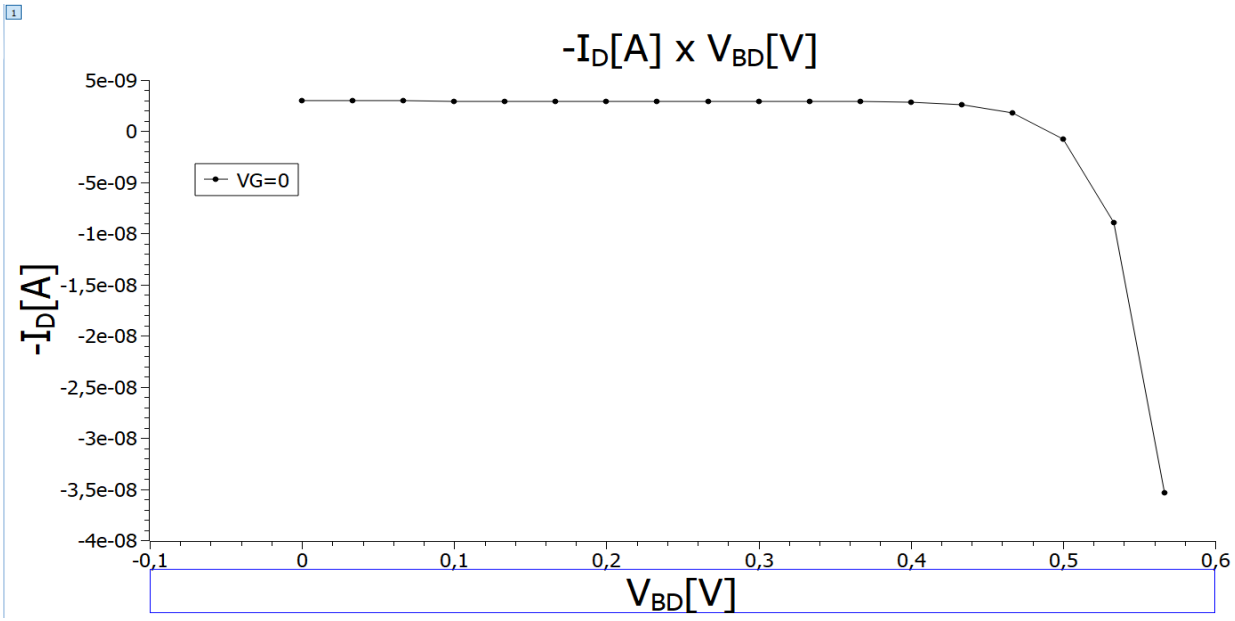
Figura 32: Estrutura tridimensional simulada do MOSFET do tipo *Fish* que foi irradiado pelo espectro de luz AM 1.5G, indicando a incidência de energia luminosa no dispositivo em W/m^2.



Fonte: Autor

Analisando-se a Figura 32, é possível ver o decaimento da densidade de potência luminosa, dada em W/m^2, conforme se aumenta a profundidade da estrutura cristalina do silício. A Figura 33 ilustra a curva característica de I_D em função de V_{BD}, para uma tensão de porta igual a 0V, uma diferença de potencial entre dreno e substrato (V_{BD}) variando de 0 a 0,6V e com o dispositivo irradiado pelo espectro AM1.5G.

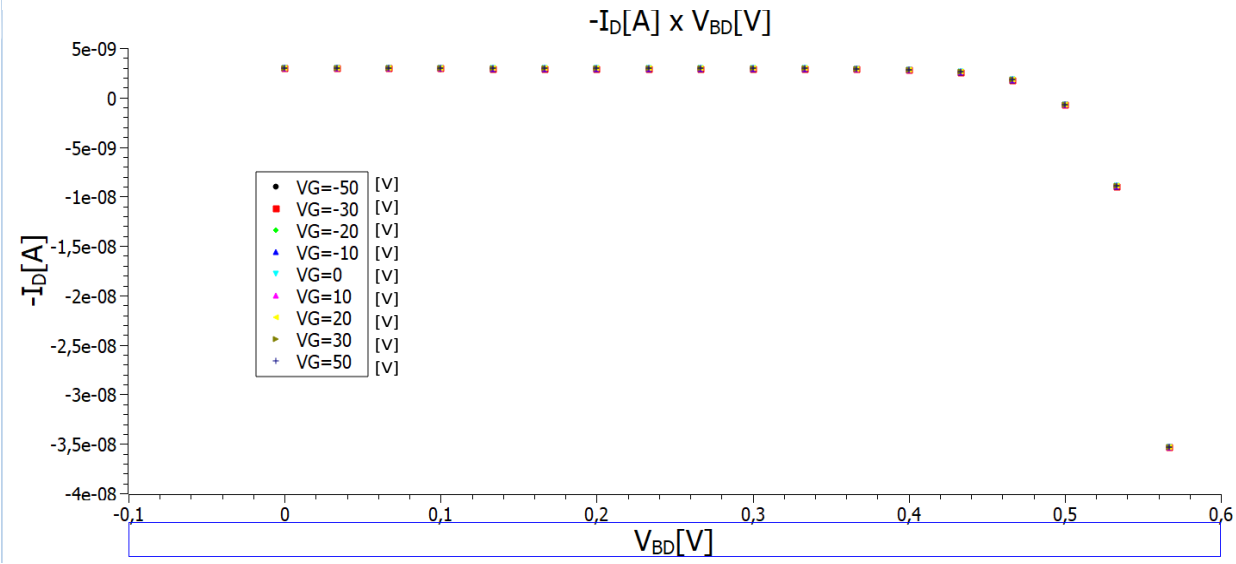
Figura 33: Gráfico da corrente no dreno em função da tensão entre substrato e dreno com a tensão de porta (V_G) igual a 0 V do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish*.



Fonte: Autor

Analisando-se a Figura 33, observa-se o comportamento do MOSFET do tipo *Fish* atuando como célula solar para uma tensão de porta igual a 0V. É possível observar a operação do dispositivo como gerador de energia elétrica (potência negativa) e também o momento em que o mesmo passa a atuar como um consumidor de energia elétrica (potência positiva). A Figura 34 ilustra a curva característica da I_D em função da V_{BD}, para diversos valores de polarização externa aplicados no terminal de porta e com o dispositivo irradiado pelo espectro AM 1.5G.

Figura 34: Gráfico da corrente no dreno em função da diferença de potencial entre substrato e dreno variando a tensão de porta V_G do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish*.



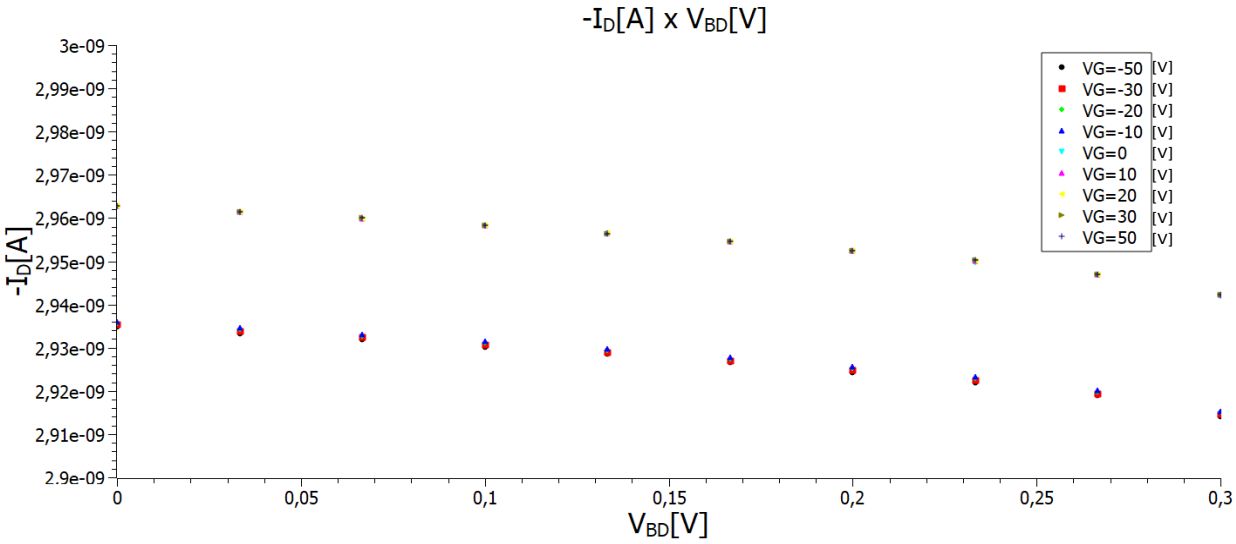
Fonte: Autor

Para as curvas traçadas ilustradas na Figura 34, foi possível observar uma variação de $3x10^{-11}A$ na corrente de dreno, considerando-se a variação de tensão aplicada na porta do dispositivo de -50V a +50V (valores não práticos e com objetivo exploratório). Como o MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria do tipo *Fish* possui as mesmas dimensões do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional, uma pequena variação é encontrada e se justifica da mesma maneira que foi feito para o dispositivo convencional (Seção 3.3).

A partir da curva característica de corrente elétrica no dreno (I_D) em função da tensão aplicada entre substrato e dreno (V_{BD}), são obtidos os valores das correntes elétricas de curto-circuito (I_{SC}) e tensões de circuito aberto (V_{OC}), assim como foi feito com o dispositivo anterior (Seção 3.3). Através desses valores, serão calculados os Rendimentos e os Fatores de Forma para as diferentes condições de polarização de porta e para posterior análise comparativa com o dispositivo convencional.

Para melhor observar a variação da corrente de curto-circuito (I_{SC}), foi gerada a Figura 35, que amplia a escala da corrente de dreno (I_D) na região em que a tensão V_{BD} é próxima a 0. A Figura 36 foi criada para ampliar a região em que a corrente elétrica no dreno (I_D) do dispositivo é próxima do seu valor nulo.

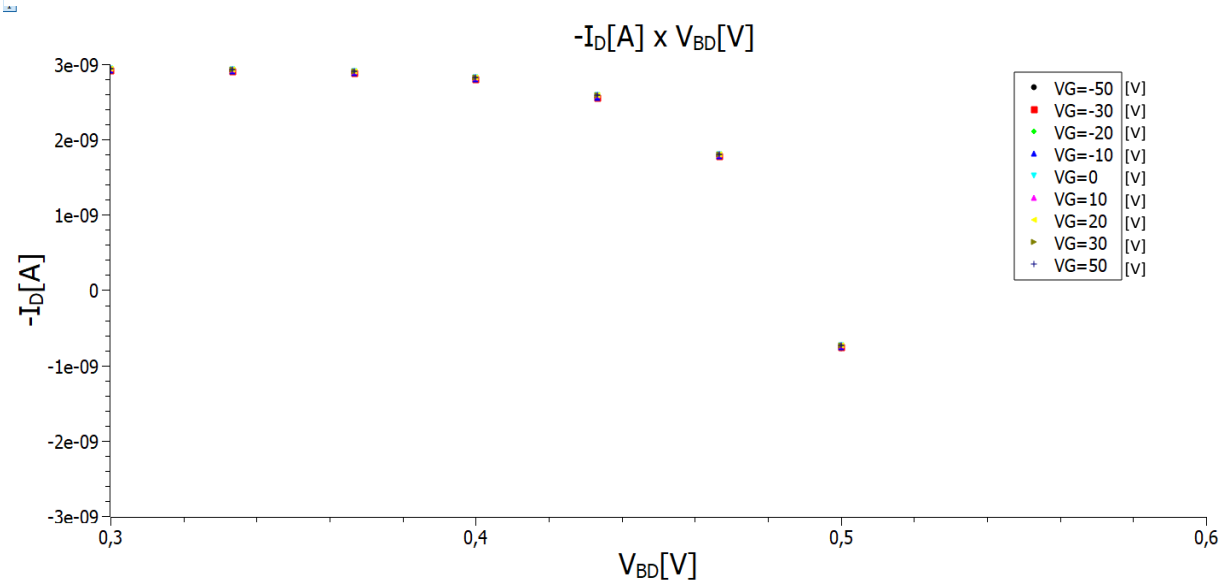
Figura 35: Gráfico da corrente no dreno em função da diferença de potencial entre substrato e dreno, visando a obtenção das correntes de curto-circuito, considerando-se os diferentes valores de V_G.



Fonte: Autor

Analisando-se a Figura 35, observa-se que, para valores de V_G nulo ou positivos, as correntes elétricas no dreno (I_D) são maiores que aquelas medidas quando são aplicadas V_G negativas. Além disso, analisando os valores de corrente elétrica no dreno, observa-se que, quando é aplicada uma polarização externa positiva, independentemente do seu valor, ou sem polarização externa no terminal de porta, tem-se maiores valores de corrente elétrica no dreno do que quando é aplicada uma polarização externa negativa, no terminal de porta do MOSFET do tipo *Fish*, independentemente também do seu valor. Isso se justifica da mesma forma que foi explicado para o caso do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional.

Figura 36: Gráfico da corrente no dreno em função da diferença de potencial entre susbtrato e dreno, visando a obtenção das tensões de circuito aberto, considerando-se os diferentes valores de V_G.

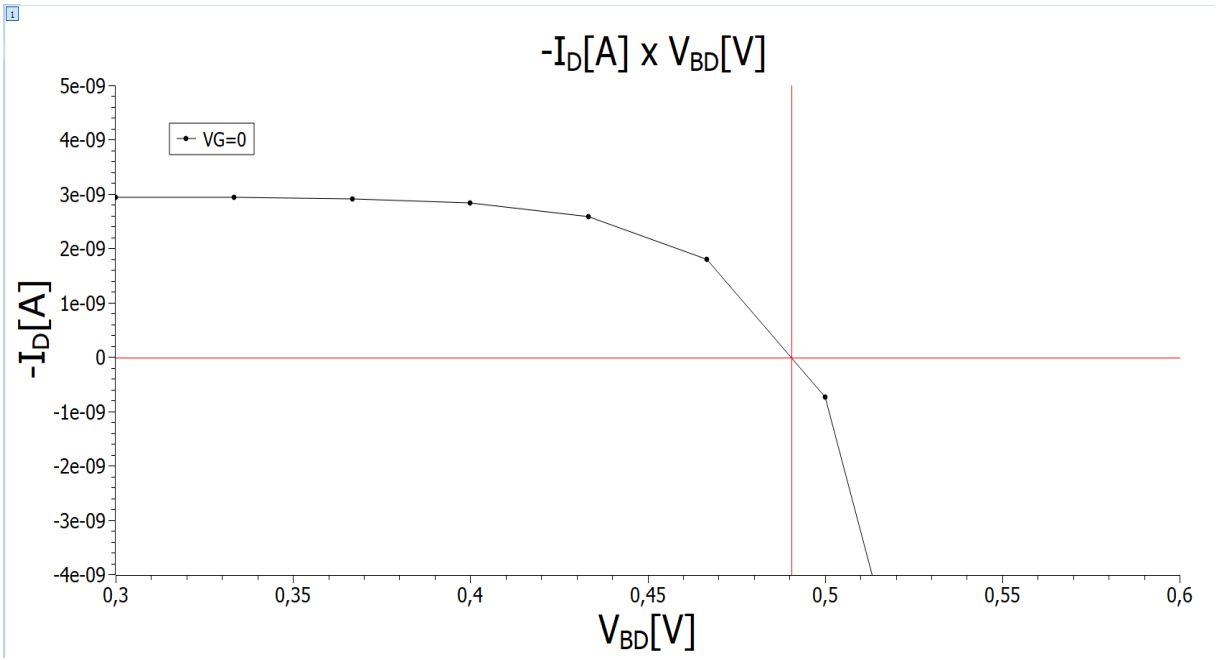


Fonte: Autor

Analisando-se a Figura 36, observa-se que as diferentes polarizações externas aplicadas ao terminal de porta (V_G) não geraram grande impacto nos valores das tensões de circuito aberto (V_{OC}) obtidos.

Com o intuito de obter as tensões de circuito aberto com maior precisão, foi ampliada a escala dos valores das V_{BDs} em que a corrente no dreno passa de um valor positivo para um valor negativo, ou seja, cruza o ponto em que a corrente I_D é igual a 0 A. Dessa forma, nesses pontos obtemos as tensões de circuito aberto no eixo das V_{BDs}. A Figura 37 ilustra a forma como foram obtidos os valores das tensões de circuito aberto para os diferentes valores de V_G simulados, levando-se em conta o gráfico de I_D em função de V_{BD}.

Figura 37: Gráfico da corrente no dreno em função da diferença de potencial entre substrato e dreno visando a obtenção da tensão de circuito aberto do dispositivo para V_G igual a 0 V.

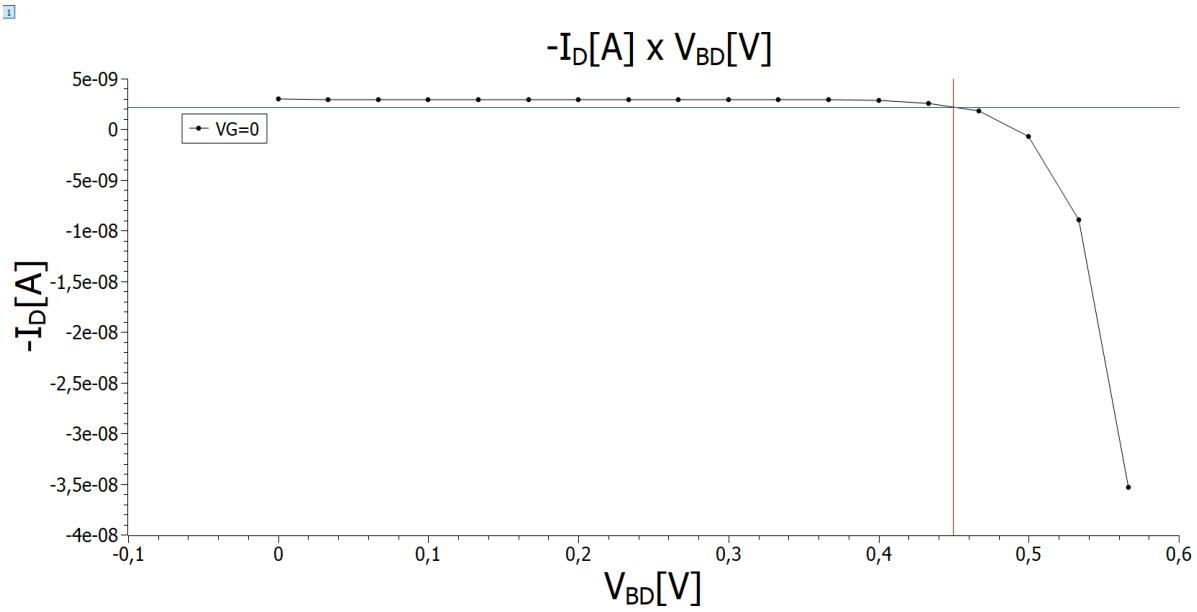


Fonte: Autor

Baseado na Figura 37, como exemplo, o valor da tensão de circuito aberto para V_G igual a 0V é de 0,4906V.

As potências máximas do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish* também foram obtidas das curvas características de I_D em função de V_{BD} simuladas desse dispositivo. A Figura 38 exemplifica como foi obtido os valores das potências elétricas máximas para uma determinada tensão aplicada na porta do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish*, utilizando-se o mesmo critério que foi empregado para o MOSFET convencional (Seção 3.3).

Figura 38: Gráfico da I_D em função da V_{BD} visando a obtenção da Potência Máxima do MOSFET do tipo *Fish* operando como célula solar, levando-se em conta uma V_G igual a 0V.



Fonte: Autor

Os métodos descritos acima foram utilizados para obter todos os valores de I_{SC}, de V_{OC} e das potências elétricas máxima desse dispositivo para todos os valores de V_G considerados.

Após obter todos os valores das correntes de curto-circuito (I_{SC}), das tensões de circuito aberto (V_{OC}) e das potências elétricas máximas, para cada valor de polarização da porta (V_G), foi gerada a Tabela 3, que é utilizada para calcular os parâmetros de caracterização elétrica da célula básica MOSFET do tipo *Fish* para ser utilizada em células solares em cada uma das condições de polarização simuladas.

Tabela 3: Valores das V_{OC}, das I_{SC} e das Potências Máximas para os diferentes valores de VG considerados para a polarização do MOSFET do tipo *Fish*.

V_G (V)	V_{OC} (V)	I_{SC} (nA)	P_{MAX} (nW)
-50	0,49	2,934	1,10757
-30	0,4903	2,935	1,10862
-20	0,49	2,935	1,10752
-10	0,4896	2,936	1,10799
0	0,4906	2,962	1,1198
10	0,4905	2,963	1,11966
20	0,4904	2,963	1,11958
30	0,4904	2,963	1,11958
50	0,4903	2,963	1,11964

Fonte: Autor.

Com os valores da Tabela 3, são calculados os Rendimentos (η), através da equação [13], e os Fatores de Forma (FF), por meio da equação [14], para todos os valores de tensão aplicados na porta do MOSFET do tipo *Fish*. A Tabela 4 mostra os resultados obtidos dos Rendimentos e dos Fatores de Forma para os diferentes valores de V_G.

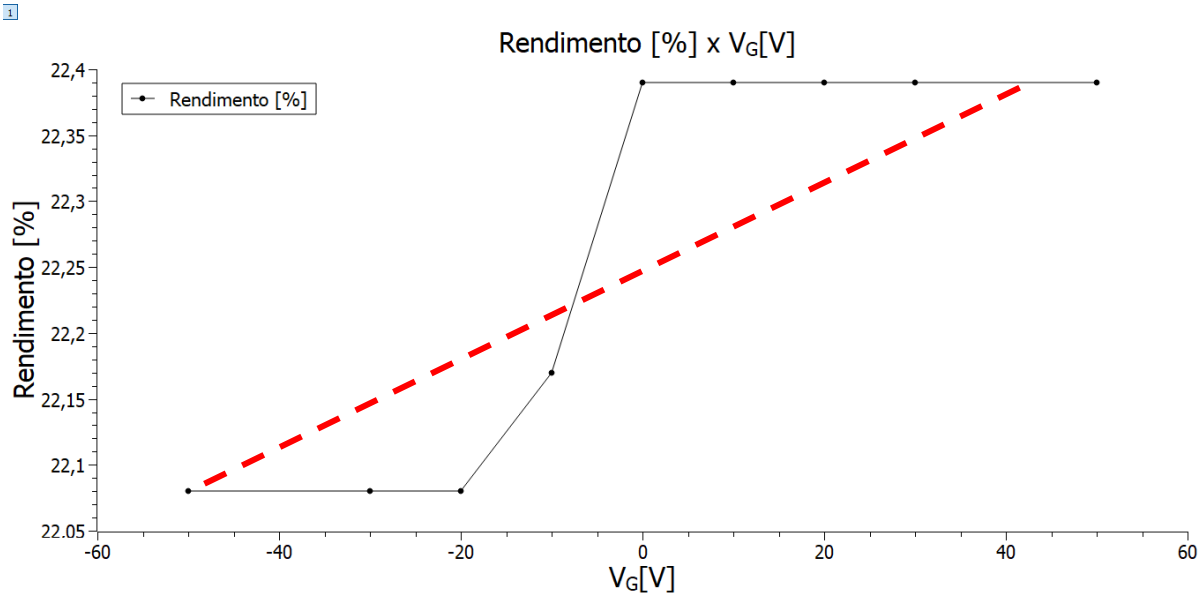
Tabela 4: Valores dos Rendimentos e dos Fatores de Forma para os diferentes valores das tensões aplicadas na porta do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish*.

V_G [V]	η [%]	FF[%]
-50	22,08%	77,04%
-30	22,08%	77,04%
-20	22,08%	77.01%
-10	22,17%	77,08%
0	22,39%	77,06%
10	22,39%	77,04%
20	22,39%	77,05%
30	22,39%	77,05%
50	22,39%	77,07%

Fonte: Autor.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 4, ao aplicar uma tensão de polarização externa na porta da célula básica MOSFET do tipo *Fish*, que pode ser utilizada para a implementação de uma célula solar, vemos que, o seu Rendimento variou cerca de 0,31% (de 22,08% a 22,39%) entre -50V e +50V e tende a ser maior em relação às tensões positivas aplicadas na porta. Além disso, o seu Fator de Forma permaneceu praticamente constante independentemente da polarização externa aplicada ao terminal de porta do MOSFET do tipo *Fish*. O gráfico ilustrado na Figura 39 mostra o comportamento do Rendimento do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish* em função da tensão de polarização externa aplicada ao seu terminal de porta, no qual a linha vermelha tracejada ilustra a reta média do Rendimento obtido, considerando-se as seguintes condições: tensão V_{BD} variando de 0 a 1V e dispositivo sendo irradiado com o espectro AM 1.5G.

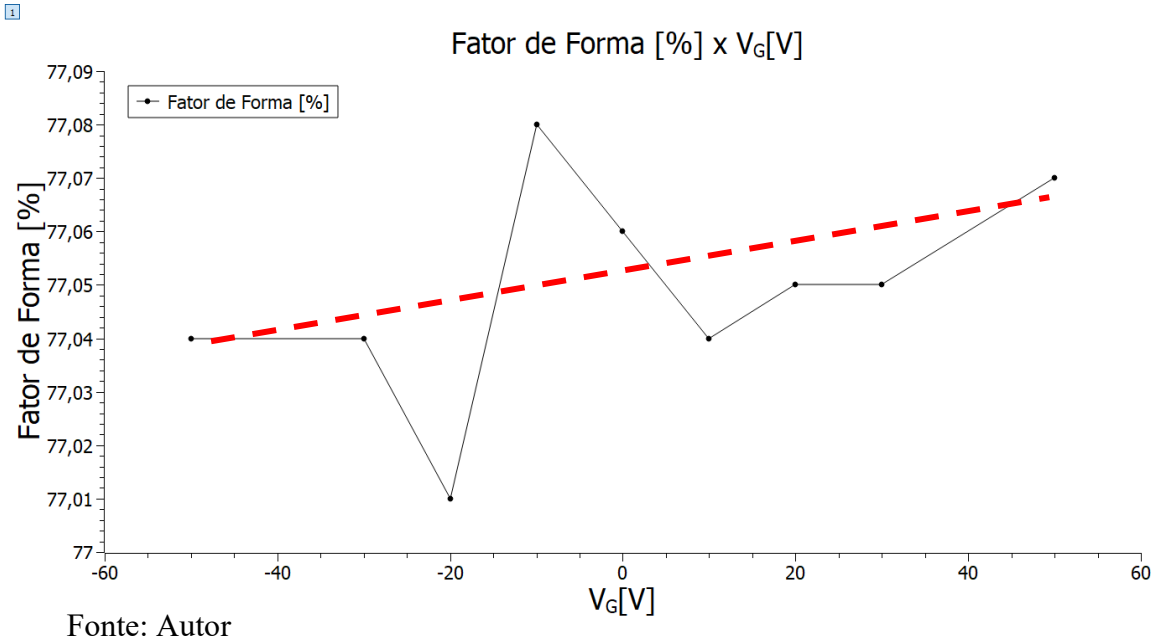
Figura 39: Gráfico do Rendimento do MOSFET do tipo *Fish* em função da tensão de polarização externa aplicada no seu terminal de porta.



Fonte: Autor

Considerando-se os Fatores de Forma mostrados na Tabela 4, é possível observar que seu valor se manteve praticamente constante independentemente da tensão de porta aplicada (variação de 77,04% a 77,07% considerando uma variação de V_G de -50V a +50V). O parâmetro de fator de forma nos informa o quão próximo da operação ideal a célula solar está operando e, com os dados obtidos, vemos que, a polarização externa não influencia na operação do MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta do tipo *Fish* em relação à sua operação ideal. O gráfico da Figura 40 ilustra o Fator de Forma em função da polarização externa aplicada ao terminal de porta desse dispositivo.

Figura 40: Gráfico do Fator de Forma em função da polarização externa aplicada a porta do MOSFET do tipo *Fish*.



Fonte: Autor

3.5. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CÉLULAS SOLARES BASEADAS EM MOSFETs, CANAL N, DO TIPO DEPLEÇÃO E COM GEOMETRIAS DE PORTA CONVENCIONAL E NÃO CONVENCIONAL (*FISH*)

Após simular as duas células solares com dimensões similares, ou seja, com as mesmas dimensões de comprimentos e larguras de canal e, sob as mesmas condições de polarização, podemos comparar os seus desempenhos elétricos na conversão de energia luminosa em energia elétrica através de seus respectivos valores de Rendimentos e Fatores de Forma. No caso da célula solar baseada em um MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional (retangular), levando-se em conta uma carga ôhmica de 100 ohms, foi obtido um Rendimento de aproximadamente 14,5% com uma corrente no dreno máxima de aproximadamente 1,38nA e a célula solar baseada em um MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta não convencional do tipo *Fish* alcançou um Rendimento de aproximadamente 22,3%, com uma corrente no dreno máxima de aproximadamente 2,96nA.

Dessa forma, podemos verificar o impacto da mudança de geometria de porta do MOSFET, canal N, do tipo depleção gerou no seu Rendimento, ou seja, uma célula solar utilizando como célula básica um MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta não

convencional do tipo *Fish* consegue ter um melhor rendimento energético (eficiência energética) quando se trata da conversão de energia luminosa em energia elétrica quando comparada com o Rendimento de uma célula solar implementada com MOSFETs, canal N, do tipo convencional e com geometria de porta retangular. Para esse projeto de pesquisa, o Rendimento do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish (*MOSFET do tipo *Fish*) é 54% (em porcentagem) maior do que o Rendimento do MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional retangular (MOSFET do tipo convencional).

Em relação às polarizações externas aplicadas aos terminais de porta dos MOSFETs, canal N, dos tipos depleção e com geometrias de porta dos tipos convencional retangular e *Fish*, verificamos que, para ambos os caso, há variações muito pequenas nos Rendimentos dos MOSFETs (variação máxima de 0,31% para o MOSFET do tipo *Fish* e 0,18% para o MOSFET, convencional), porém tendem a serem maiores quando são aplicadas tensões positivas ao terminal de porta dos dispositivos. Portanto, há necessidade de dar continuidade a este trabalho de pesquisa para otimizar o dimensionamento e as concentrações de dopantes das diferentes regiões que integram os MOSFETs, canal N, do tipo depleção a fim de aumentar o seu desempenho elétrico em relação à tensão externa aplicada à porta do MOSFET, canal N, do tipo depleção.

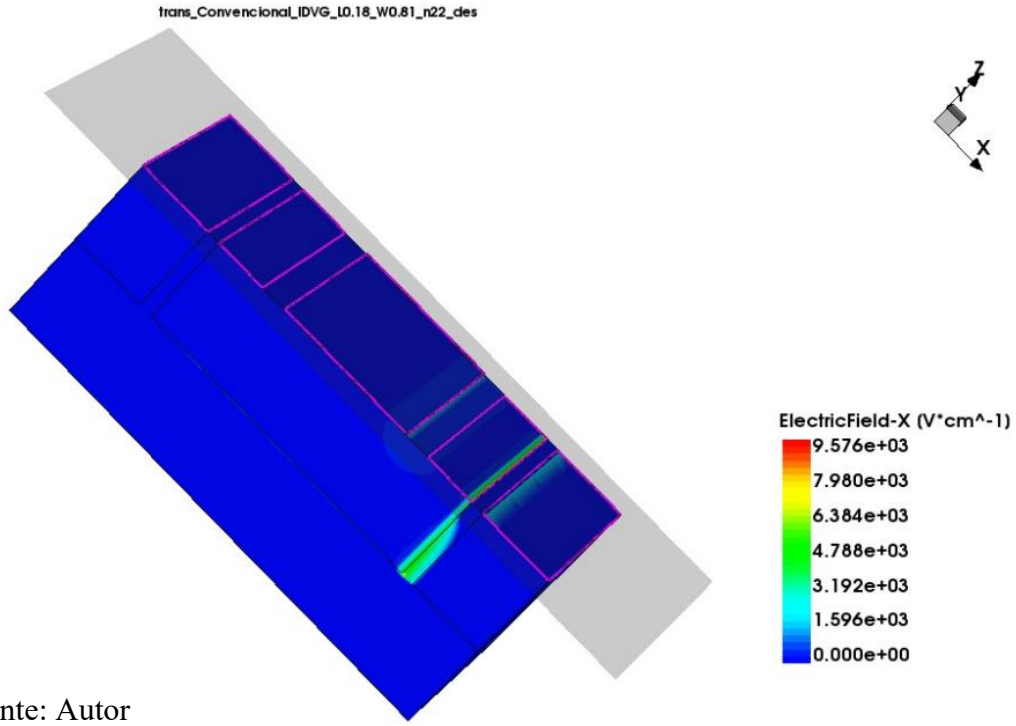
Com relação ao Fator de Forma das células solares, verificamos que a célula solar implantada com MOSFETs, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional atingiu valores em torno de 75,3%, com uma pequena variação (variação máxima de 0,31% para uma variação de tensão na porta de -50V para 50V), enquanto que a célula solar implantada com MOSFETs, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta não convencional (do tipo *Fish*) apresentou um Fator de Forma de aproximadamente 77% e se manteve praticamente constante para todos os valores de tensão aplicados no terminal de porta. Com esses resultados, podemos verificar que ambas as células solares implementadas com esses diferentes MOSFETs apresentam Fatores de Forma praticamente idênticos (variação de 0,03%).

Em relação ao impacto da polarização externa aplicada na porta do dispositivo e do Fator de Forma das células, podemos dizer que, para a que foi implementada com o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional, houve uma variação muito pequena (variação de 0,31%) e, quanto mais negativa a tensão externa na porta, mais o dispositivo se afastava de sua operação ideal. No caso da célula solar implementada com o MOSFET do tipo *Fish*, a aplicação de polarização externa praticamente não alterou sua operação.

Analisando as figuras de mérito de Rendimento e Fator de Forma discutidas acima, é possível concluir que a utilização do MOSFET do tipo *Fish* como elemento básico de uma célula solar na configuração utilizada por este projeto de pesquisa tende a trazer um melhor desempenho elétrico do que aqueles observados com aquela célula solar implementada com o MOSFET do tipo convencional e que a aplicação de uma polarização em tensão externa no terminal de porta tende a melhorar o desempenho elétrico das células solares, quando esses valores aumentam de valores negativos para valores positivos. Lembrando que para validação dessas conclusões serão necessários maiores estudos.

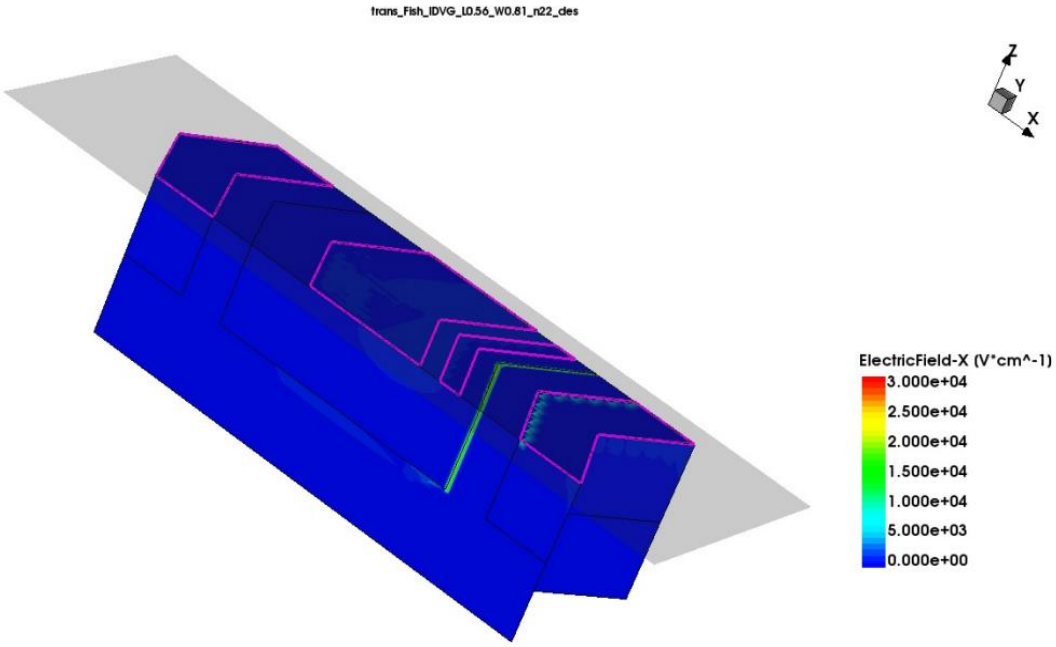
A melhoria do Rendimento encontrada no MOSFET, canal N, do tipo depleção e com a geometria de porta do tipo *Fish* em relação ao MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional pode ser explicada pelo maior campo elétrico longitudinal gerado pela geometria de porta do tipo *Fish,* devido ao Efeito de Canto Longitudinal (LCE) presente em sua estrutura, conforme explicado na Seção 2.8.3. Para comprovar esses resultados, foram gerados cortes nas estruturas das células solares justamente para verificar os campos elétricos longitudinais presentes em ambas as estruturas na região entre dreno e substrato. As Figuras 41 e 42 ilustram os planos de corte realizados nos MOSFETs, canal N, do tipo depleção com geometrias de porta dos tipos convencional e *Fish*, respectivamente, para investigar os campos elétricos longitudinais (ao longo do comprimento de canal da estrutura MOSFET) imediatamente abaixo dos contatos de dreno e substrato dos dispositivos.

Figura 41: Plano de corte realizado na estrutura 3D do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional retangular com a indicação do campo elétrico longitudinal resultante.



Fonte: Autor

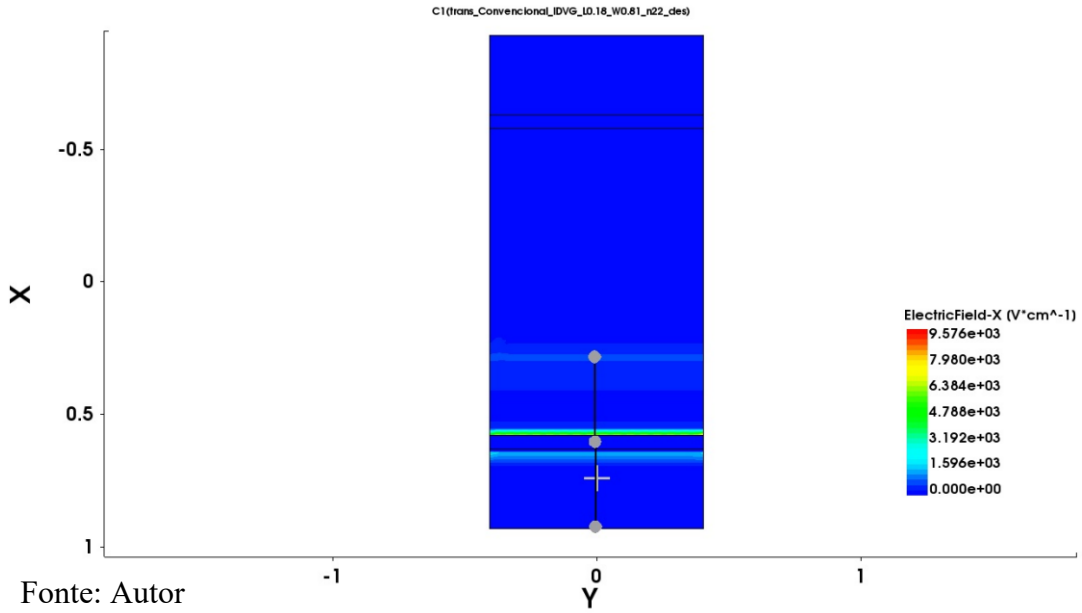
Figura 42: Plano de corte realizado na estrutura 3D do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish* com a indicação do campo elétrico longitudinal resultante.



Fonte: Autor

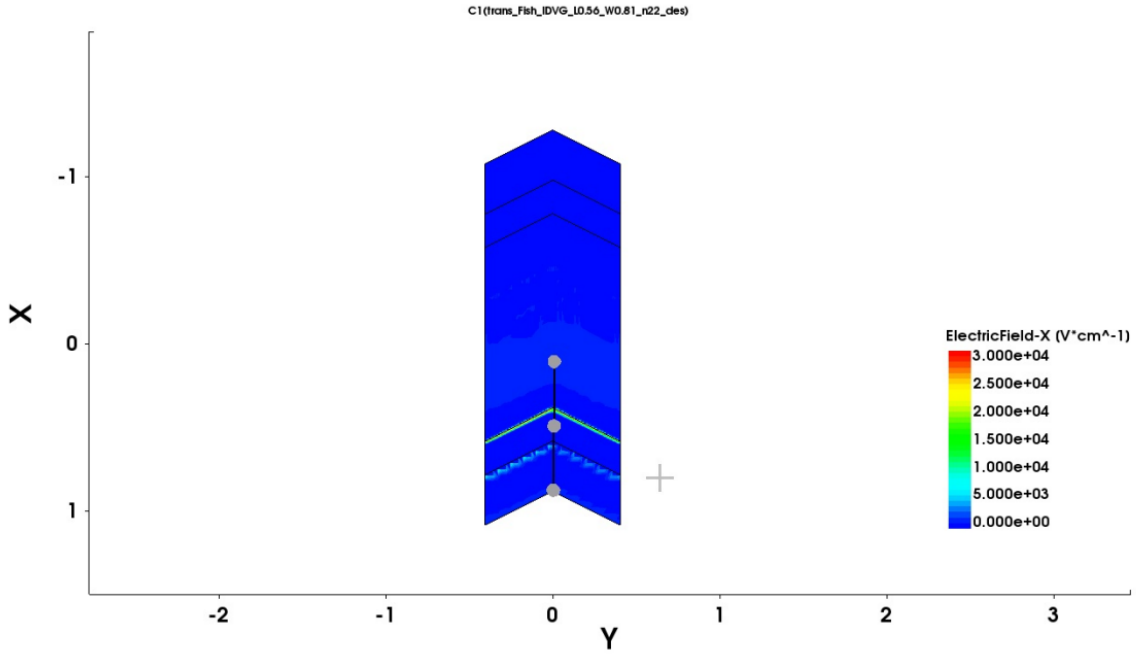
Os planos de corte das Figuras 41 e 42 (cortes na estrutura 3D imediatamente abaixo dos contatos de dreno e substrato) geraram estruturas 2D dos MOSFETs, canal N, do tipo depleção com geometrias de porta dos tipos retangular convencional e *Fish*, que podem ser vistas nas Figuras 43 e 44 (corte em linha gerados do contato de dreno até o contato de substrato para ambos os dispositivos), respectivamente. A partir das Figuras 43 e 44 foram gerados novos cortes, em linha, para analisarmos perfis dos campos elétricos longitudinais resultantes nas superfícies de ambos os dispositivos. Para todos os cortes descritos, foi considerada uma tensão de polarização externa aplicada ao terminal de porta dos MOSFETs, canal N, do tipo depleção com geometrias de porta convencional retangular e do tipo *Fish* igual a 0V. Os dispositivos estão sobre efeito da irradiação do espectro AM 1.5G e tensão V_{BD} 1V. A Figura 45 ilustra os perfis dos campos elétricos longitudinais resultantes nesses dispositivos em virtude das condições de polarização consideradas.

Figura 43: Linha de corte na estrutura 2D do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional retangular, com indicação do campo elétrico longitudinal resultante.



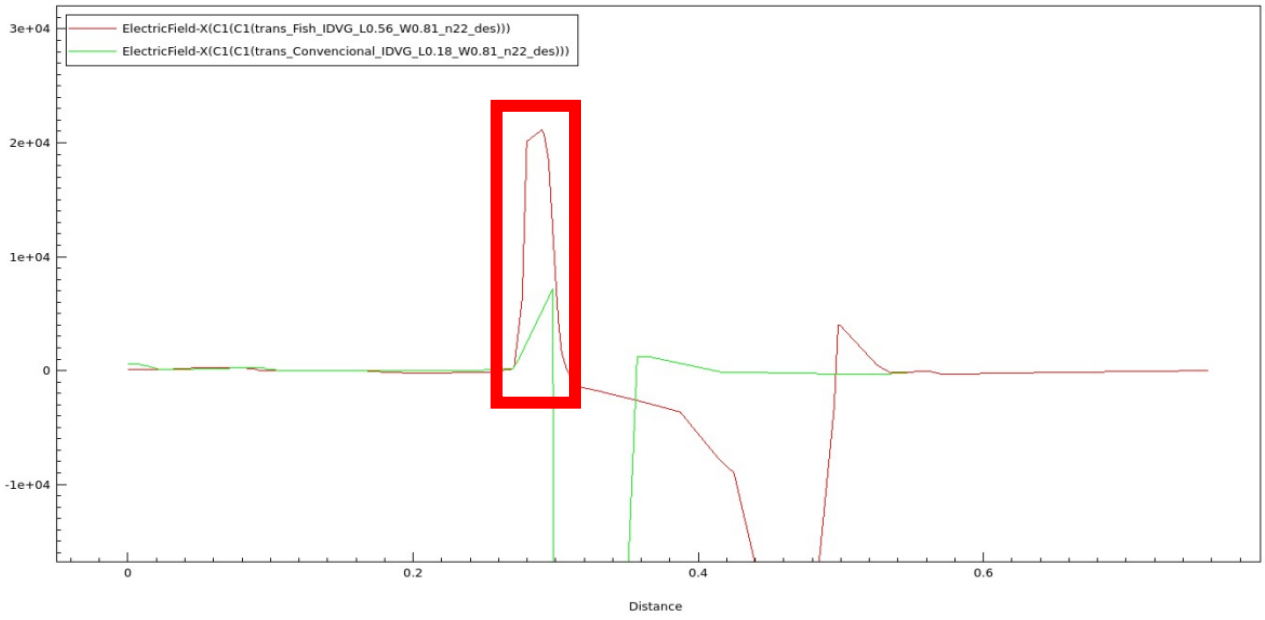
Fonte: Autor

Figura 44: Linha de corte na estrutura 2D do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish*, com indicação do campo elétrico longitudinal resultante.



Fonte: Autor

Figura 45: Perfis dos campos elétricos longitudinais resultantes de ambos dispositivos (linha vermelha representando o MOSFET, canal N, do tipo depleção do tipo *Fish* e linha verde representando o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional).

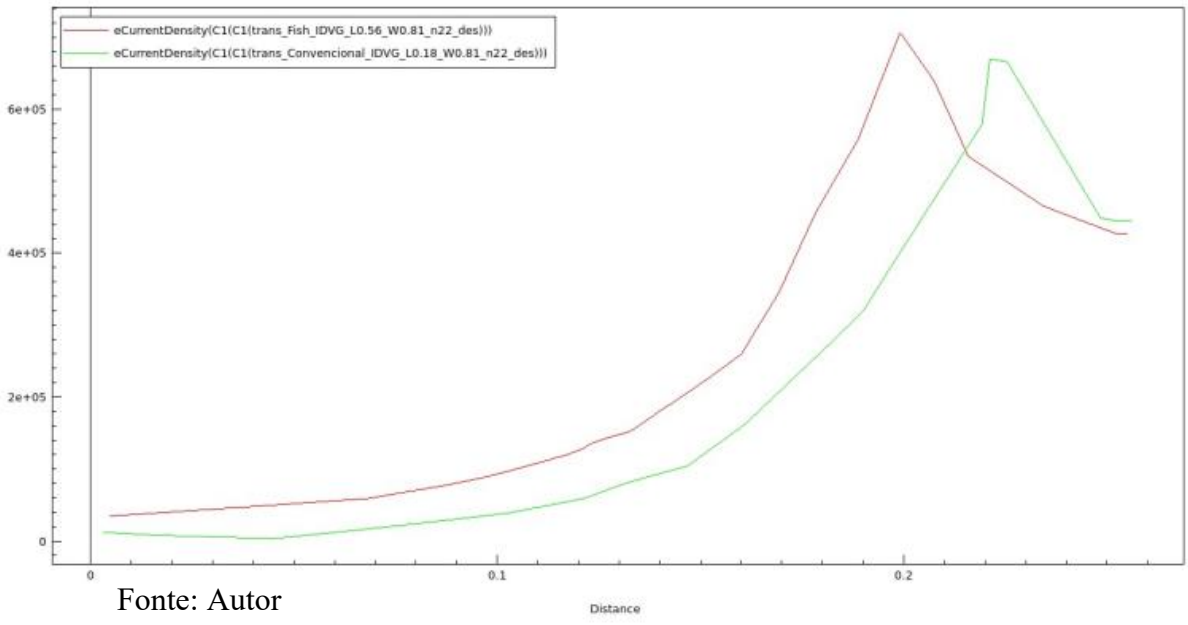


Fonte: Autor

Analisando-se o gráfico ilustrado na Figura 45, foi destacada a região do gráfico onde estão localizados os campos elétricos longitudinais resultantes, que ocorrem entre as regiões do dreno e do substrato, por meio de um retângulo em vermelho (traço grosso). Nessa região, podemos observar que o MOSFET, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta do tipo *Fish* possui um campo elétrico longitudinal resultante máximo 3,05 vezes maior ($2{,}2x10^{4}\ V * cm^{-1}$) que aquele encontrado no MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta retangular convencional ($7{,}2x10^{3}\ V * cm^{-1}$), graças à presença do efeito LCE na estrutura da célula solar, mais especificamente na região entre os contatos do dreno e do substrato, implementada com o MOSFET do tipo *Fish*.

Analisando-se as densidades de corrente elétrica geradas entre as regiões de dreno e substrato de ambos os dispositivos, foi gerado o gráfico da Figura 46, no qual são ilustradas as curvas em vermelho e verde mostrando os perfis das densidades de corrente elétrica (eixo Y do gráfico) em função da distância do corte (eixo X do gráfico) desses MOSFETs, canal N, do tipo depleção com geometrias de porta dos tipos *Fish* e convencional, respectivamente.

Figura 46: Perfis de densidade de corrente elétrica de ambos dispositivos (linha vermelha representando o MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta do tipo *Fish* e linha verde representando o MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional).



Fonte: Autor

Analisando-se os picos das densidades de corrente elétrica da Figura 46, o MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional gerou um resultado igual a $6{,}6\ A *$

cm^{-2} enquanto que o MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta não convencional do tipo *Fish* apresentou um pico de densidade de corrente elétrica igual a $7{,}1\ A * cm^{-2}$, ou seja, houve uma melhora de 7,57% na densidade de corrente elétrica do MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta do tipo *Fish* em relação ao MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta retangular convencional. Estes resultados que reforçam a necessidade de estudos adicionais de células solares baseadas em MOSFETs, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta não convencional do tipo *Fish* e outros formatos geométricos.

3.6. TRABALHOS FUTUROS

Esse projeto de pesquisa é precursor no que se refere a implementação de células solares baseadas em MOSFETs, canal N, do tipo depleção com geometria de porta não convencional do tipo *Fish*, explorando o efeito LCE para aumentar o campo elétrico longitudinal resultante na região entre o dreno e o substrato, com o contato de substrato realizado na superfície do dispositivo e em com conformidade com tecnologias de fabricação de circuitos integrados (CIs) Metal-Óxido-Semicondutor (MOS) Complementar (CMOS) planares. Porém, os resultados são ainda muito incipientes e promissores, o que nos leva a propor alguns trabalhos futuros a este projeto de pesquisa, a fim de explorar mais ainda essa inovadora forma de utilização de MOSFETs com geometrias de porta não convencional, como célula básica para construção de células solares, são eles prioritariamente: I- Otimização das dimensões e das concentrações de dopantes dos MOSFETs, canal N, do tipo depleção, com geometria de porta do tipo *Fish* para aumentar o desempenho elétrico das células solares; II- Estudos de outras geometrias de porta não convencionais (além da geometria do tipo *Fish*), III- Fabricação de células solares com dimensões maiores para a verificação do seu desempenho elétrico; IV- Uso de novos materiais que podem ser utilizados para construção dos MOSFETs.

4. CONCLUSÕES

Esse projeto de pesquisa teve como principal objetivo fazer uma proposta de novas estruturas de células solares utilizando como elemento construtivo MOSFETs com geometria de porta não convencional, mais especificamente o do tipo *Fish*, a fim de buscar melhorias nas características elétricas de uma célula solar. Para tanto, foram realizadas simulações numéricas tridimensionais a fim de se obter as figuras de mérito de Rendimento e Fator de Forma para essas novas estruturas básicas de células solares.

Através dos estudos realizados, foi possível entender mais sobre a tecnologia das energias renováveis e porque elas estão sendo estratégicas para a grande parte dos países do globo terrestre, principalmente aquelas voltadas à energia solar.

Através das simulações numéricas tridimensionais realizadas, que utilizam MOSFETs, canal N, do tipo depleção e com geometrias de porta convencional retangular e do tipo *Fish*, foi possível verificar que o comprimento de onda incidente influencia diretamente no nível de corrente elétrica no dreno. Essa influência ocorre devido ao fato de que é necessária uma determinada espessura de silício para absorver completamente a energia dos fótons incidentes. Para as células estudadas, vimos que o comprimento de onda em que temos melhores níveis de corrente no dreno é o de 550 nm, pois é justamente o comprimento de onda em que a energia dos fótons incididos é absorvida totalmente dentro da espessura do silício dos dispositivos simulados.

Além disso, o ângulo de incidência da radiação solar também impacta no nível de corrente elétrica do dreno. Para esse caso, vimos que, quando a radiação incide de forma perpendicular ao dispositivo temos um maior nível de corrente elétrica de dreno obtida.

Outro assunto estudado foi a influência de uma polarização externa no terminal de porta na caracterização de uma célula solar, utilizando como parâmetros o Rendimento e o Fator de Forma. Para o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional, que apresenta dimensões extremamente pequenas, as variações obtidas também foram numericamente pequenas. Por exemplo, uma variação de -50V a +50V no terminal de porta gerou uma variação de $1x10^{-11}A$ na corrente elétrica do terminal de dreno, mas foi possível observar que, para polarizações externas com valores negativos, houve uma degradação, mesmo que pequena, no Rendimento e Fator de Forma do dispositivo, enquanto que para valores positivos de tensão aplicados no terminal de porta, houve uma melhora no Rendimento

da célula. Em relação ao Fator de Forma, foi observado um comportamento parecido, ou seja, uma tendência de melhorar seu desempenho de acordo com o aumento da polarização externa aplicada na porta do transistor.

Para o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish*, foi observado um comportamento parecido ao do MOSFET, canal N, do tipo depleção com geometria de porta convencional. O Rendimento foi degradado quando aplicada uma polarização externa negativa ao terminal de porta, mas se manteve constante para as tensões positivas e nula. Além disso, os Fatores de Forma se mostraram praticamente constantes, independentes dos valores da fonte de polarização externa que foi aplicada à porta. Levando-se em consideração a variação de corrente no dreno obtida para uma variação de -50V a +50V na polarização externa de tensão aplicada ao terminal de porta, foi obtida uma variação de $3x10^{-11}A$, ou seja, 3 vezes maior do que para a célula construída com um MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional.

Fazendo uma análise comparativa entre os dois dispositivos, o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish* (não convencional) apresentou um rendimento médio de 22,39%, enquanto que o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional (convencional) teve um rendimento médio de 14,53% (aumento de 54% em porcentagem), ou seja, o dispositivo não convencional é capaz de transformar energia luminosa em energia elétrica de maneira mais eficiente do que aquela alcançada pelo equivalente implementado com MOSFETs, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional. Quando comparado às células solares convencionais, que são construídas a base de diodos (Rendimento médio de 17%), o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish* apresentou um aumento no Rendimento médio igual a 31,7% (em porcentagem). Também foi possível observar que o modelo convencional apresentou um nível de corrente no dreno igual a 1,39nA, em média, enquanto que o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish* teve um nível de corrente elétrica no dreno, em média, de 2,96nA. Essa diferença na corrente elétrica se justifica pelo fato do campo elétrico longitudinal resultante do MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish* ser 3,05 vezes maior do que campo elétrico do modelo convencional, graças ao efeito LCE presente em sua estrutura.

Analisando-se agora o Fator de Forma obtido nos dois tipos de transistores, o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional (convencional) teve seu fator de forma em torno de 75,3% enquanto que o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com

geometria de porta do tipo *Fish* (não convencional) teve seu fator de forma em torno de 77,06%, que corresponde a um melhor funcionamento da célula solar.

Após os estudos iniciais realizados, é possível concluir que o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta do tipo *Fish* é mais promissor para utilização como elemento construtivo para uma célula solar do que o MOSFET, canal N, do tipo depleção e com geometria de porta convencional, levando em consideração o Rendimento, o Fator de Forma e o nível de corrente elétrica gerada no dreno. Outro ponto positivo para utilização dos MOSFETs como elemento construtivo de células solares, é o fato de poderem ser fabricados com a tecnologia de circuitos integrados (CIs) Metal-Óxido-Semicondutor (MOS) Complementar (*Complementary* MOS, CMOS) planar e facilmente integrados para realizarem a alimentação em tensão de Cis CMOS em uma mesma lâmina de silício (*chip*).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A Energia Solar no Mundo. Disponível em: https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-mundo, acesso em julho de 2021.

2. Paraíba vai ter fábrica de módulos e novo complex solar. Disponível em: https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-mundo, acesso em julho de 2021.

3. Dados do Mercado de Energia Solar do Brasil. Disponível em: https://www.portalsolar.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil.html, acesso em julho de 2021.

4. ANTOLÍN, Elisa et al. "Considerations for the Design of a Heterojunction Bipolar Transistor Solar Cell", IEEE J. Photovolt., vol 10, no. 1, pp. 2-7, Oct. 2019.

5. MARTÍ, Antonio et al. "Perovskite-Si solar cell: a three-terminal heterojunction bipolar transistor architecture", IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Aug.2020.

6. Q.R. Lai *, W.J. Ho*, J.J. Liu*, Y.Y. Lee*, C.C. Liao*, J.Y. Wu*, and Y.C. Chiu* "Photocurrent of MOS-Si Photovoltaic Device Enhanced by an Auxiliary Biasing Solar Cell"., IEEE, Aug. 2012.

7. SIDDIQUI, Mahmudur R et al, "A double gate MOS structure for solar photo-voltaic application", IEEE ICECE, Jan. 2011.

8. WÜRFEL, Peter. Physics of Solar Cells. New York, NY, USA: Wiley, 2009.

9. GIMENEZ, Salvador Pinillos. "FISH SOI MOSFET: Modeling, Characterization and Its Application to Improve the Performance of Analog ICs", ECS 158(12), 265(2011).

10. BOYLESTAD, R. L e NASHELSKY, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos, Prentice Hall, 10ª Ed., 2010.

11. BIASI, Ronaldo S. MELLO, Hilton A. Introdução a Física dos Semicondutores, EDGARD BLUCHER Ltda, 1ª Ed., 1975.

12. MALVINO, Albert P. Eletrônica, Makron Books, 4ª Ed., 2006.

13. MARTINO, J.A., PAVANELLO, M.A. e VERDONCK, P. Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS, Thomson, 1ª Ed., 2004.

14. SEDRA, A.S. e SMITH, K. C. Microeletrônica, Pearson Prentice Hall, São Paulo, 5ª Ed. 2007.

15. BERTOLDO, Leandro. Efeito Fotoelétrico, Publicado Independentemente, 1ª Ed., 2019.

16. Espectro AM1.5 Dataset Online: http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/, acesso feito em junho de 2021.

17. ALDABÓ, Ricardo. Energia solar para produção de eletricidade. São Paulo: Artliber Editora, 2012.

18. EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. Física Quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. Tradução de Paulo Costa Ribeiro, Ênio Costa da Silveira e Marta Feijó Barroso. Rio de Janeiro: Campus, 1979.

19. S.G.Streetman, S.Banerjee. Solid State Electronic Devices, 5ª ed.,2000.

20. SZE, S.M. Physics of semiconductor devices, John Wiley and Sons, New York, 1981.

21. LYRA, F. Energia solar: fundamentos e tecnologias de conversão heliotermoelétrica e fotovoltaica. Recife: UFPE.1995, 471p.

22. M. A. Green, Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications, Australia: University of New South Wales, 1982.

23. J. H. Lee et al, Solar Energy Mat. and Solar Cells, In Press, ScienceDirect, 1 May 2010.

24. VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações, São Paulo, Érica, 2012.

25. SILVA, Fernando O. S. Estudo de Diodos PIN Fabricados em Substratos SOI operando como Células Solares. Dissertação de Mestrado, FEI, 2018.

26. PRADO, Daniel Augusto. "Fabricação e caracterização de uma célula solar a partir do polímero poli (n-vinilcarbazol) PVK dopado com perclorato de lítio".

27. DA ROSA,Willian Guidolin. "Metodologia de projeto de um inversor ressonante auto-oscilante operando em alta frequência para aplicações a LED". Pag. 101.

28. AKEMI, Kátia Regina S. "Estudo de transistores SOI MOSFETs com camada de silício e óxido enterrado ultrafinos operando em modo de tensão limiar dinâmica". Pag.31.

29. COLINGE, Jean Pierre. "Semiconductor-On-Insulator Materials for Nanoelectronics Applications".

30. Synopsys, Sentaurus User Guide, Mountain View, 2015.

APÊNDICE A – ARQUIVO SDE DO MOSFET COM GEOMETRIA DE PORTA CONVENCIONAL

```
################################
#   CONVENCIONAL - TSMC2018   #
################################


(sde:clear); Reinicializacao do Sentaurus Structure Editor
(sdegeo:set-default-boolean "ABA"); Regiões recentemente adicionadas substituem as antigas no qual se sobrepõem
#########################################################################################################
; Definindo os parametros

(define L          @L@); comprimento de canal
(define W          @W@); largura de canal
(define tox        0.0042); espessura do oxido
(define DL         0.3); largura de regiao de dreno
(define SL         0.3); largura da regiao de fonte
(define NA         1e16); dopagem da regiao de substrato
(define NA_2       5e16); dopagem das regioes p+
(define ND         1e19); dopagem das regioes de dreno e fonte
(define tSi        0.70); espsssura da lamina de Si
(define NDdepth    0.35); profundidade da regiao n
(define RBR        0.02); ajuste do refino entre as interfaces do canal e as regioes p+
(define x1     0.05); distancia entre as regioes de dreno/fonte e as regioes de p+
(define x2     0.3); largura da regioes p+

#########################################################################################################
; Criando as regioes do dispositivo
(sdegeo:create-cuboid (position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1 x2) (/ (- 0 W) 2) 0) (position (+ (/ L 2) DL x1 x2) (/ W 2) tSi)
 "Silicon" "Substrato"); Criacao do substrato de Si
```

```
(sdegeo:create-cuboid (position (/ (- 0 L) 2) (/ (- 0 W) 2) tSi) (position (/ L 2) (/ W 2) (+ tox
tSi))
 "Oxide" "OxidoPorta"); Criacao do óxido de Porta

(sdegeo:create-cuboid (position (- (/ (- 0 L) 2) SL) (/ (- 0 W) 2) tSi) (position (+ (/ L 2) DL)
(/ W 2) (- tSi NDdepth))
 "Silicon" "Canal"); Criacao da regiao do canal

(sdegeo:create-cuboid (position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1) (/ (- 0 W) 2) tSi) (position (- (/ (- 0 L)
2) SL x1 x2) (/ W 2) (- tSi NDdepth))
"Silicon" "Substrato_S"); Regiao p+ proximo a fonte

(sdegeo:create-cuboid (position (+ (/ L 2) DL x1) (/ (- 0 W) 2) tSi) (position (+ (/ L 2) DL
x1 x2) (/ W 2) (- tSi NDdepth))
"Silicon" "Substrato_D"); Regiao p+ proximo ao dreno

##########################################################################
##########################################################
; Criaçao da grade
; Grade Global
(sdedr:define-refinement-window "RefWin.Global" "Cuboid"
  (position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1 x2) (/ (- 0 W) 2) tSi) (position (+ (/ L 2) DL x1 x2) (/ W 2)
(- tSi (* NDdepth 2))))

(sdedr:define-refinement-size "RefDef.Global"
  1.0 0.1  0.1
  0.1 0.1 0.1 )

(sdedr:define-refinement-placement "Place.Global"
 "RefDef.Global" "RefWin.Global" )

; Janela de refino na regiao n
```

```
(sdedr:define-refinement-window "InterfaceSiSi02" "Cuboid"
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL) (/ (- 0 W) 2) (- tSi NDdepth)) (position (+ (/ L 2) DL) (/ W 2) (+ tox tSi)))

(sdedr:define-refinement-size "Interface_2"
 0.1 0.1 0.02
 0.1 0.1 0.1 )

(sdedr:define-refinement-placement "Place.InterfaceSiSi02"
 "Interface_2" "InterfaceSiSi02" )


(sdedr:define-refinement-size "Interface"
  0.05 0.05 0.05
  0.05 0.05 0.05 )

(sdedr:define-refinement-function  "Interface" "MaxLenInt" "Silicon" "Oxide" 0.001 2 "DoubleSide")

(sdedr:define-refinement-placement "IntSiO2" "Interface" "InterfaceSiSi02" )

; Janela de refino na regiao entre Dreno e canal

(sdedr:define-refinement-size "RefDef.DrenoFonte"
   0.06 0.06  0.02
   0.06 0.06  0.02)

(sdedr:define-refinement-window "RefWin.Dreno" "Cuboid"
  (position (- (+ (/ L 2) DL) RBR) (/ (- 0 W) 2) tSi) (position (+ (/ L 2) RBR DL x1) (/ W 2) (- tSi NDdepth)))

(sdedr:define-refinement-placement "Place.Dreno"
 "RefDef.DrenoFonte" "RefWin.Dreno" )
```

```
    ; Janela de refino na regiao entre Fonte e canal
    (sdedr:define-refinement-window "RefWin.Fonte" "Cuboid"
     (position (+ (- (/ (- 0 L) 2) SL) RBR) (/ (- 0 W) 2) tSi) (position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1 RBR)
(/ W 2) (- tSi NDdepth)))

    (sdedr:define-refinement-placement "Place.Fonte"
     "RefDef.DrenoFonte" "RefWin.Fonte" )

    ##########################################################################
##############################################################
    ; Dopagem
    ; Substrato
    (sdedr:define-constant-profile "Const.Bulk" "BoronActiveConcentration" NA)
    (sdedr:define-constant-profile-region "PlaceCD.Bulk"
     "Const.Bulk" "Substrato")

    ; Regioes p+
    (sdedr:define-constant-profile "Const.Bulk_2" "BoronActiveConcentration" NA_2)
    (sdedr:define-constant-profile-region "PlaceCD.Bulk_D"
     "Const.Bulk_2" "Substrato_D")
    (sdedr:define-constant-profile-region "PlaceCD.Bulk_S"
     "Const.Bulk_2" "Substrato_S")


    ; Regioes de dreno e Fonte
    (sdedr:define-constant-profile "Const.SD" "ArsenicActiveConcentration" ND)
    (sdedr:define-constant-profile-region "PlaceCD.Dreno"
     "Const.SD" "Canal")
    (sdedr:define-constant-profile-region "PlaceCD.Fonte"
     "Const.SD" "Fonte")

    ##########################################################################
##############################################################
    ; Defininindo os contatos
```

```
; Definição dos contatos com espessura de borda de 0.4 um
(sdegeo:define-contact-set "gate"      4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:define-contact-set "drain"     4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "||" )
(sdegeo:define-contact-set "source"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "==" )
(sdegeo:define-contact-set "substrate_D" 4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "<><>" )
(sdegeo:define-contact-set "substrate_S" 4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "<><>" )
#(sdegeo:define-contact-set "substrate" 4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "<><>" )


; Contatos da regiao p+ proximo a fonte
(sdegeo:set-current-contact-set "substrate_S")
(sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1 (/ x2 2)) 0 tSi) )
"substrate_S")

; Contatos da regiao p+ proximo ao dreno
(sdegeo:set-current-contact-set "substrate_D")
(sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position (+ (/ L 2) DL x1 (/ x2 2)) 0 tSi) )
"substrate_D")

; Contato de substrato
#(sdegeo:set-current-contact-set "substrate")
#(sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position 0 0 0) ) "substrate")

; Contato de porta
(sdegeo:set-current-contact-set "gate")
(sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position 0 0 (+ tSi tox)) ) "gate")

; Contato de fonte
(sdegeo:create-cuboid (position (- (/ (- 0 L) 2) SL) (/ (- 0 W) 2) tSi) (position (- (/ (- 0 L) 2)
(/ SL 3)) (/ W 2) (+ tox tSi))
 "Oxide" "ContatoFonte")
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position (- (/ (- 0 L) 2) (/ SL 2)) (/ (- 0 W) 2) (+ tox
tSi))))
```

```
    (sdegeo:set-current-contact-set "source")
    (sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position (+ (- (/ (- 0 L) 2) SL) 0.001) 0 tSi) )
"source")

    ; Contato de dreno
    (sdegeo:create-cuboid (position (+ (/ L 2) DL) (/ (- 0 W) 2) tSi) (position (+ (/ L 2) (/ DL
3)) (/ W 2) (+ tox tSi))
     "Oxide" "ContatoDreno")
    (sdegeo:delete-region (find-body-id (position (+ (/ L 2) (/ DL 2)) (/ (- 0 W) 2) (+ tox tSi))))

    (sdegeo:set-current-contact-set "drain")
    (sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position (- (+ (/ L 2) DL) 0.001) 0 tSi) ) "drain")

    ##########################################################################
##############################################################
    ;Salvando

    ; Saving structure
    (sde:save-model "Convencional_n@node@")

    ; Meshing structure
    (sde:build-mesh "snmesh" "" "Convencional_n@node@")
```

APÊNDICE B - ARQUIVO SDEVICE DE UM MOSFET COM GEOMETRIA DE PORTA CONVENCIONAL

```
Math {
Extrapolate
ExitOnFailure
NumberOfThreads=8
Iterations=15
method=ILS
CoordinateSystem {AsIs}
Wallclock
Avalderivatives
DirectCurrent
}

#Modelos fisicos usados na simulacao
Physics {
Temperature=300
Mobility(ConstantMobility)
Recombination(SRH(DopingDependence))
EffectiveIntrinsicDensity(BandGapNarrowing (OldSlotboom))
}

Physics {

Optics (
    OpticalGeneration(
                QuantumYield(
                        StepFunction(EffectiveBandgap)
                          )
                ComputeFromMonochromaticSource()
    )

Excitation (#Wavelength=0.31
```

```
        Intensity=1
        Theta=0
              Window ("J1") (
                    Origin= (0, 0, 0.75)
                    #OriginAnchor = Center # Default
                    Rectangle(dx=1.8 dy=0.81)
                         )
        )
OpticalSolver (
    OptBeam(
              LayerStackExtraction(
              WindowName="J1"
              WindowPosition=(0,0)
              Mode=RegionWise
              )
          )
)

ComplexRefractiveIndex(WavelengthDep (imag real))
)
}

Plot {
eCurrent          hCurrent
eCurrent/Vector   hCurrent/Vector
eDensity     hDensity
eMobility    hMobility
eVelocity    hVelocity
eEparallel   hEparallel
eENormal     hENormal
eTemperature hTemperature
Temperature TotalHeat eJouleHeat hJouleHeat
TotalCurrent/Vector
TotalCurrent
```

```
ElectricField/Vector
ElectricField
Potential/Vector
Potential
SpaceCharge
Temperature
Doping DonorConcentration AcceptorConcentration
SRHRecombination Auger Band2Band
BandGap BandGapNarrowing ConductionBand ValenceBand Affinity
NearestInterfaceOrientation
InterfaceOrientation
OpticalIntensity
OpticalGeneration
ComplexRefractiveIndex
}

Device SC {

File {
OpticalGenerationInput= "Convencional_@tdr@"
Grid      = "Convencional_@tdr@"
Parameter = "sdevice.par"
Current   = "Convencional_IDVG_L@L@_W@W@_n@node@_des.plt"
Plot      = "Convencional_IDVG_L@L@_W@W@_n@node@_des.tdr"
#PMIPath = "."
IlluminationSpectrum = "am15g_1.2um_equi-10nm.txt"
}

Electrode {
{Name="gate"              Voltage=0 workfunction=4.1}
{Name="source"            Voltage=0 workfunction=4.15}
{Name="drain"             Voltage=0 workfunction=4.15}
#{Name="substrate"        Voltage=0}
{Name="substrate_S"     Voltage=0 workfunction=4.15}
```

```
{Name="substrate_D"      Voltage=0 workfunction=4.15}
}

}

#_____
_____

System {
SC trans (gate=g  drain=d source=s substrate_S=x substrate_D=y)
Vsource_pset vg (g 0) {dc=0}
Vsource_pset vd (d 0) {dc=0}
Vsource_pset vy (y 0) {dc=0}
Vsource_pset vx (x 0) {dc=0}
Vsource_pset vs (s d) {dc=0}
Resistor_pset r (y d) {resistance=10}

plot "Convencional_IDVG_L@L@_W@W@_n@node@.txt" (v(y 0) v(g 0) v(y d) i(trans
d) i(trans y))
}


Solve {
Poisson
Coupled {Poisson Electron Hole} CurrentPlot(time=(-1))

Quasistationary
(MinStep=1e-3
Goal{Parameter=vg.dc Value=@<VG>@})
{Coupled{Poisson Electron Hole}
CurrentPlot(time=(-1))}

Quasistationary
```

```
(MinStep=1e-3
Goal{Parameter=vy.dc Value=1})
{Coupled{Poisson Electron Hole}
CurrentPlot(time=(range=(0 1) intervals=50))}
}
```

APÊNDICE C - ARQUIVO SDE DO MOSFET COM GEOMETRIA DE PORTA NÃO CONVENCIONAL

```
#####################################
#   FISH - alpha 90 - TSMC2018   #
#####################################

(sde:clear); Reinicializacao do Sentaurus Structure Editor
(sdegeo:set-default-boolean "ABA"); Regiões recentemente adicionadas substituem as antigas no qual se sobrepõem
#########################################################################################################
; Definindo os parametros

(define L          @L@); comprimento de canal
(define W          @W@); largura de canal
(define tox        0.0042); espessura do oxido
(define DL         0.3); largura de regiao de dreno
(define SL         0.3); largura da regiao de fonte
(define NA         1e16); dopagem da regiao de substrato
(define NA_2       5e16); dopagem das regioes p+
(define ND         1e19); dopagem das regioes de dreno e fonte
(define tSi        0.70); espsssura da lamina de Si
(define NDdepth    0.35); profundidade da regiao n
(define RBR        0.02); ajuste do refino entre as interfaces do canal e as regioes p+
(define x1     0.2); distancia entre as regioes de dreno/fonte e as regioes de p+
(define x2     0.3); largura da regioes p+

#########################################################################################################
; Criando as regioes do dispositivo

#1-Substrato
(sdegeo:create-polygon (list
```

```
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1 x2) (/ (- 0 W) 2) 0)
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1 x2 (/ W 4)) 0 0)
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1 x2) (/ W 2) 0)
(position (+ (/ L 2) DL x1 x2) (/ W 2) 0)
(position (- (+ (/ L 2) DL x1 x2) (/ W 4)) 0 0)
(position (+ (/ L 2) DL x1 x2) (/ (- 0 W) 2) 0)
)
"Silicon" "Substrato")
(sdegeo:extrude (list (car (find-face-id (position 0 0 0)))) tSi)

#2-Regiao do canal
(sdegeo:create-polygon (list
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL) (/ (- 0 W) 2) tSi)
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL (/ W 4)) 0 tSi)
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL) (/ W 2) tSi)
(position (+ (/ L 2) DL) (/ W 2) tSi)
(position (- (+ (/ L 2) DL) (/ W 4)) 0 tSi)
(position (+ (/ L 2) DL) (/ (- 0 W) 2) tSi)
)
"Silicon" "Canal")
(sdegeo:extrude (list (car (find-face-id (position 0 0 tSi)))) (- 0 (- tSi NDdepth)))

#3-Oxido de porta
(sdegeo:create-polygon (list
(position (/ (- 0 L) 2) (/ (- 0 W) 2) tSi)
(position (- (/ (- 0 L) 2) (/ W 4)) 0 tSi)
(position (/ (- 0 L) 2) (/ W 2) tSi)
(position (/ L 2) (/ W 2) tSi)
(position (- (/ L 2) (/ W 4)) 0 tSi)
(position (/ L 2) (/ (- 0 W) 2) tSi)
)
"Oxide" "OxidoPorta")
(sdegeo:extrude (list (car (find-face-id (position 0 0 tSi)))) tox)
```

```
    #4-Regiao p+_1
    (sdegeo:create-polygon (list
    (position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1 x2) (/ (- 0 W) 2) tSi)
    (position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1 x2 (/ W 4)) 0 tSi)
    (position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1 x2) (/ W 2) tSi)
    (position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1) (/ W 2) tSi)
    (position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1 (/ W 4)) 0 tSi)
    (position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1) (/ (- 0 W) 2) tSi)
    )
    "Silicon" "Substrato_S")
    (sdegeo:extrude (list (car (find-face-id (position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1 x2) 0 tSi)))) (- 0 (- tSi
NDdepth)))

    #5-Regiao p+_2
    (sdegeo:create-polygon (list
    (position (+ (/ L 2) DL x1 x2) (/ (- 0 W) 2) tSi)
    (position (- (+ (/ L 2) DL x1 x2) (/ W 4)) 0 tSi)
    (position (+ (/ L 2) DL x1 x2) (/ W 2) tSi)
    (position (+ (/ L 2) DL x1) (/ W 2) tSi)
    (position (- (+ (/ L 2) DL x1) (/ W 4)) 0 tSi)
    (position (+ (/ L 2) DL x1) (/ (- 0 W) 2) tSi)
    )
    "Silicon" "Substrato_D")
    (sdegeo:extrude (list (car (find-face-id (position (+ (/ L 2) DL x1) 0 tSi)))) (- 0 (- tSi
NDdepth)))

    ##########################################################################
##########################################################
    #Criaçao da grade
    #Grade Global
    (sdedr:define-refinement-window "RefWin.Global" "Cuboid"
     (position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1 x2) (/ (- 0 W) 2) tSi) (position (+ (/ L 2) DL x1 x2) (/ W 2)
(- tSi (* NDdepth 2))))
```

```
(sdedr:define-refinement-size "RefDef.Global"
  0.05 0.05 0.05
  0.05 0.05 0.05 )

(sdedr:define-refinement-placement "Place.Global"
 "RefDef.Global" "RefWin.Global" )

#Janela de refino na interface entre canal e oxido
(sdedr:define-refinement-window "InterfaceSi02" "Polygon" (list
(position (/ L 2) (/ (- 0 W) 2) (- tSi (* NDdepth 0.2)))
(position (/ (- 0 L) 2) (/ (- 0 W) 2) (- tSi (* NDdepth 0.2)))
(position (- (/ (- 0 L) 2) (/ W 4)) 0 (- tSi (* NDdepth 0.2)))
(position (- (/ L 2) (/ W 4)) 0 (- tSi (* NDdepth 0.2)))
(position (- (/ L 2) (/ W 4)) 0 (+ tSi 0.002))
(position (/ L 2) (/ (- 0 W) 2) (+ tSi 0.002))
(position (/ (- 0 L) 2) (/ (- 0 W) 2) (+ tSi 0.002))
(position (- (/ (- 0 L) 2) (/ W 4)) 0 (+ tSi 0.002))))

(sdedr:define-refinement-window "InterfaceSi02_2" "Polygon" (list
(position (/ (- 0 L) 2) (/ W 2) (- tSi (* NDdepth 0.2)))
(position (/ L 2) (/ W 2) (- tSi (* NDdepth 0.2)))
(position (- (/ L 2) (/ W 4)) 0 (- tSi (* NDdepth 0.2)))
(position (- (/ (- 0 L) 2) (/ W 4)) 0 (- tSi (* NDdepth 0.2)))
(position (/ (- 0 L) 2) (/ W 2) (+ tSi 0.002))
(position (/ L 2) (/ W 2) (+ tSi 0.002))
(position (- (/ L 2) (/ W 4)) 0 (+ tSi 0.002))
(position (- (/ (- 0 L) 2) (/ W 4)) 0 (+ tSi 0.002))))

(sdedr:define-refinement-size "Interface"
  0.05 0.05 0.05
  0.05 0.05 0.05 )

(sdedr:define-refinement-function "Interface" "MaxLenInt" "Silicon" "Oxide" 0.001 2
"DoubleSide")
```

```
(sdedr:define-refinement-placement "IntSiO2" "Interface" "InterfaceSi02" )
(sdedr:define-refinement-placement "IntSiO2_2" "Interface" "InterfaceSi02_2" )


#Janela de refino na regiao do canal proximo ao dreno
(sdedr:define-refinement-window "RefWin.Dreno" "Polygon" (list
(position (+ (/ L 2) DL RBR) (/ (- 0 W) 2) (- tSi NDdepth))
(position (- (+ (/ L 2) DL) RBR) (/ (- 0 W) 2) (- tSi NDdepth))
(position (- (+ (/ L 2) DL) RBR (/ W 4)) 0 (- tSi NDdepth))
(position (- (+ (/ L 2) DL RBR) (/ W 4)) 0 (- tSi NDdepth))
(position (- (+ (/ L 2) DL RBR) (/ W 4)) 0 tSi)
(position (+ (/ L 2) DL RBR) (/ (- 0 W) 2) tSi)
(position (- (+ (/ L 2) DL) RBR) (/ (- 0 W) 2) tSi)
(position (- (+ (/ L 2) DL) RBR (/ W 4)) 0 tSi)))

(sdedr:define-refinement-window "RefWin.Dreno_2" "Polygon" (list
(position (+ (/ L 2) DL RBR) (/ W 2) (- tSi NDdepth))
(position (- (+ (/ L 2) DL) RBR) (/ W 2) (- tSi NDdepth))
(position (- (+ (/ L 2) DL) RBR (/ W 4))  0 (- tSi NDdepth))
(position (- (+ (/ L 2) DL RBR) (/ W 4)) 0 (- tSi NDdepth))
(position (- (+ (/ L 2) DL RBR) (/ W 4)) 0 tSi)
(position (+ (/ L 2) DL RBR) (/ W 2) tSi)
(position (- (+ (/ L 2) DL) RBR) (/ W 2) tSi)
(position (- (+ (/ L 2) DL) RBR (/ W 4)) 0 tSi)))


#Janela de refino na regiao do canal proximo a fonte
(sdedr:define-refinement-window "RefWin.Fonte" "Polygon" (list
(position (+ (- (/ (- 0 L) 2) SL) RBR) (/ (- 0 W) 2) (- tSi NDdepth))
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL RBR) (/ (- 0 W) 2) (- tSi NDdepth))
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL RBR (/ W 4)) 0 (- tSi NDdepth))
(position (+ (- (/ (- 0 L) 2) SL (/ W 4)) RBR) 0 (- tSi NDdepth))
(position (+ (- (/ (- 0 L) 2) SL (/ W 4)) RBR) 0 tSi)
(position (+ (- (/ (- 0 L) 2) SL) RBR) (/ (- 0 W) 2) tSi)
```

```
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL RBR) (/ (- 0 W) 2) tSi)
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL RBR (/ W 4)) 0 tSi)))

(sedr:define-refinement-window "RefWin.Fonte_2" "Polygon" (list
(position (+ (- (/ (- 0 L) 2) SL) RBR) (/ W 2) (- tSi NDdepth))
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL RBR) (/ W 2) (- tSi NDdepth))
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL RBR (/ W 4))  0 (- tSi NDdepth))
(position (+ (- (/ (- 0 L) 2) SL (/ W 4)) RBR) 0 (- tSi NDdepth))
(position (+ (- (/ (- 0 L) 2) SL (/ W 4)) RBR) 0 tSi)
(position (+ (- (/ (- 0 L) 2) SL) RBR) (/ W 2) tSi)
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL RBR) (/ W 2) tSi)
(position (- (/ (- 0 L) 2) SL RBR (/ W 4)) 0 tSi)))

(sedr:define-refinement-size "RefDef.DrenoFonte"
  0.01 0.01  0.01
  0.01 0.01  0.01)

(sedr:define-refinement-placement "Place.Dreno"
 "RefDef.DrenoFonte" "RefWin.Dreno" )

(sedr:define-refinement-placement "Place.Dreno_2"
 "RefDef.DrenoFonte" "RefWin.Dreno_2" )

(sedr:define-refinement-placement "Place.Fonte"
 "RefDef.DrenoFonte" "RefWin.Fonte" )

(sedr:define-refinement-placement "Place.Fonte_2"
 "RefDef.DrenoFonte" "RefWin.Fonte_2" )

#################################################################################
#############################################################
; Dopagem
; Substrato
(sedr:define-constant-profile "Const.Bulk" "BoronActiveConcentration" NA)
```

```
(sdedr:define-constant-profile-region "PlaceCD.Bulk"
  "Const.Bulk" "Substrato")

; Regioes p+
(sdedr:define-constant-profile "Const.Bulk_2" "BoronActiveConcentration" NA_2)
(sdedr:define-constant-profile-region "PlaceCD.Bulk_D"
  "Const.Bulk_2" "Substrato_D")
(sdedr:define-constant-profile-region "PlaceCD.Bulk_S"
  "Const.Bulk_2" "Substrato_S")


; Regiao n
(sdedr:define-constant-profile "Const.SD" "ArsenicActiveConcentration" ND)
(sdedr:define-constant-profile-region "PlaceCD.Dreno"
  "Const.SD" "Canal")

##########################################################################
##########################################################
; Defininindo os contatos

; Definição dos contatos com espessura de borda de 0.4 um
(sdegeo:define-contact-set "gate"      4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:define-contact-set "drain"     4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "||" )
(sdegeo:define-contact-set "substrate_D" 4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "==" )
(sdegeo:define-contact-set "substrate_S" 4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "<><>" )

; Contato de porta
(sdegeo:set-current-contact-set "gate")
(sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position 0 0 (+ tSi tox)) ) "gate")

; Contatos da regiao p+ proximo ao dreno
(sdegeo:set-current-contact-set "substrate_D")
(sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position (+ (/ L 2) DL x1) 0 tSi) ) "substrate_D")
```

```
    ; Contatos da regiao p+ proximo a fonte
    (sdegeo:set-current-contact-set "substrate_S")
    (sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position (- (/ (- 0 L) 2) SL x1 x2) 0 tSi) )
"substrate_S")

    ; Contato de dreno
    (sdegeo:create-polygon (list
    (position (+ (/ L 2) (/ DL 3)) (/ (- 0 W) 2) tSi)
    (position (- (+ (/ L 2) (/ DL 3)) (/ W 4)) 0 tSi)
    (position (+ (/ L 2) (/ DL 3)) (/ W 2) tSi)
    (position (+ (/ L 2) (* (/ DL 3) 2)) (/ W 2) tSi)
    (position (- (+ (/ L 2) (* (/ DL 3) 2)) (/ W 4)) 0 tSi)
    (position (+ (/ L 2) (* (/ DL 3) 2)) (/ (- 0 W) 2) tSi)
    )
    "Oxide" "ContatoDreno")
    (sdegeo:extrude (list (car (find-face-id (position (+ (/ L 2) (/ DL 3) 0.0000001) (/ (- 0 W) 2)
tSi)))) tSi)
    (sdegeo:delete-region (find-body-id (position (+ (/ L 2) (/ DL 3) 0.0000001) (/ (- 0 W) 2) (+
(/ tSi 2) tSi))))

    (sdegeo:set-current-contact-set "drain")
    (sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position (+ (- (+ (/ L 2) (/ DL 3)) (/ W 4)) 0.0001)
0 tSi) ) "drain")

    ##########################################################################
##########################################################
    ;Salvando

    ; Saving structure
    (sde:save-model "Fish_n@node@")

    ; Meshing structure
```