

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SOROCABA

FÁBIO ALEX DA SILVA

**ESTUDO DE DIODOS PIN MULTICAMADAS ATUANDO COMO CÉLULA  
FOTOVOLTAICA**

SOROCABA/SP  
JULHO/2020

FÁBIO ALEX DA SILVA

**ESTUDO DE DIODOS PIN MULTICAMADAS ATUANDO COMO CÉLULA  
FOTOVOLTAICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Campus de Sorocaba, como exigência para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos

Orientadora: Maria Glória Caño de Andrade

SOROCABA/SP  
JULHO/2020

S586e

Silva, Fábio Alex da

Estudo de diodos PIN multicamadas atuando como célula fotovoltaica / Fábio Alex da Silva. -- Sorocaba, 2020  
123 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba  
Orientadora: Maria Glória Caño de Andrade

1. Células solares. 2. Microeletrônica. 3. Dispositivos optoeletrônicos. 4. Tecnologia de silício sobre isolante. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **Estudo de Diodos PIN Multicamadas Atuando como Célula Fotovoltaica**

**AUTOR: FÁBIO ALEX DA SILVA**

**ORIENTADORA: MARIA GLÓRIA CAÑO DE ANDRADE**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Sistemas Eletrônicos pela Comissão Examinadora:

Profª. Drª. MARIA GLÓRIA CAÑO DE ANDRADE

Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba

Professor Doutor RODRIGO TREVISOLI DORIA  
Engenharia Elétrica / Centro Universitário FEI

Prof. Dr. PAULO JOSÉ AMARAL SERNI

Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba

Sorocaba, 22 de maio de 2020

*Dedico aos amores de minha vida, minha  
amada filha Mirela e minha amada esposa  
Hilda que sempre me incentivaram  
a nunca desistir dos meus sonhos.  
Aos meus amados pais Arlindo e Maria que  
sempre me deram muito apoio para a  
realização de mais uma importante vitória  
em minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Professora Dra. Maria Glória Cano de Andrade, pela orientação, motivação e apoio no desenvolvimento desta dissertação. Agradeço a ela também, a oportunidade que ela me deu ao abrir as portas para mais um sonho em minha vida, demonstrando o quanto um professor (um Anjo) pode fazer a diferença na vida de uma pessoa.

Agradeço também o Professor Dr. Rodrigo Trevisoli Doria, que muito contribuiu na elaboração desta pesquisa, com sugestões, correções e principalmente com orientações, as quais permitiram o crescimento na qualidade desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

Aos meus amigos do grupo de pesquisa da UNESP - Jeverson Cardozo da Silva, Luís Felipe de Oliveira Bergamim e Carlos Roberto Nogueira - que me incentivaram e ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também ao Fernando Oliveira de Souza da Silva, pela ajuda no entendimento sobre o assunto abordado e no desenvolvimento deste trabalho.

E a todos aqueles que de forma direta ou indireta ajudaram de alguma forma na realização deste trabalho

## RESUMO

Este trabalho é baseado no estudo do comportamento de um diodo PIN de multicamadas utilizado como célula solar. Esse estudo é desenvolvido por meio de simulações em ambiente virtual, validada a partir de dados experimentais, e tem como foco principal o comportamento da geração de corrente pelo dispositivo, tanto na interação entre o dispositivo e uma determinada faixa do espectro luminoso, como na influência que as alterações nas dimensões dessa célula solar podem trazer na tensão gerada.

O diodo PIN proposto encontra-se em uma lâmina SOI (Silicon On Insulator) com uma potencial aplicação destinada para a alimentação de circuitos que necessitam de ultrabaixa potência (ULP – Ultra Low Power), tais como sensores de campo para monitoramento e circuitos subcutâneos para monitoramento médico.

É construído por uma camada dupla com diferentes semicondutores (silício e germânio) e, através de alterações em sua estrutura (mudança dos materiais e das dimensões), será verificado o comportamento dos principais parâmetros de uma célula solar, tais como fator de forma (FF), corrente fotogerada, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, tensão e corrente de trabalho e potência gerada pelo dispositivo.

Adicionalmente, é também analisado o comportamento de penetração e absorção do espectro luminoso na célula solar e a existência de alterações nos parâmetros medidos quando há alteração na posição das camadas de semicondutores, com a finalidade de demonstrar que o incremento de uma camada de germânio pode trazer ao dispositivo inteiramente de silício.

Os resultados obtidos indicam que houve um aumento na geração fotovoltaica, quando a camada de germânio se encontra posicionada acima da camada de silício. Sendo assim, este trabalho demonstra que pequenas alterações na forma de construção e nas espessuras do diodo PIN lateral usado como célula solar proporcionaram um aumento no rendimento de mais de 136% quando comparamos os dispositivos híbridos ao dispositivo inteiramente de silício.

Palavras-chave: Célula solar, diodo PIN, SOI, multicamadas, germânio, espectro luminoso.

## ABSTRACT

This work is based on the study of multilayer PIN diode used as a solar cell. This study was developed through simulations in a virtual environment with the main focus of the generation current by the device so much in the interaction between the device and a range of the light spectrum as well as in the influence the changes in the dimensions of the solar cell may bring in the voltage generated.

It is composed of a double layer with different semiconductors (silicon and germanium), and though changes in its structure (materials and dimensions change), it will be verified the behavior of main parameters of a solar cell, such as Fill Factor (FF), photogenerated current, open-circuit voltage, short circuit current, work voltage and work current and the generated power will by the device.

Additionally, it was also verified the behavior of the penetration and absorption of the light spectrum in the solar cell, and the existence of changes in the measured parameters when there is a change of position in the semiconductor layers, to demonstrate that the increase of a germanium layer may bring to the device concerning entirely silicon device.

The results obtained indicate that there was an increase in the photogeneration when the germanium layer is positioned above the silicon layer. This way, this work demonstrates that small changes in the construction and the thickness of the lateral PIN diode used as a solar cell provide an increase in efficiency of more than 136% when comparing hybrid device to the entire silicon device.

Keywords: Solar cell, PIN diode, SOI, multilayers, germanium, light spectrum.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura básica do dispositivo desenvolvido em uma lâmina SOI e utilizado como célula fotovoltaica. ....	18
Figura 2 – Faixa espectral completa. ....	23
Figura 3 - Densidade de potência espectral da radiação solar.....	24
Figura 4 - Componentes da radiação solar no planeta Terra. ....	25
Figura 5 – Comparação dos potenciais máximos das fontes energéticas do planeta Terra.....	26
Figura 6 - Geração de energia mundial.....	26
Figura 7 - Produção Mundial de Eletricidade PV (2005 - 2017). ....	27
Figura 8 - Mapa da irradiância no planeta Terra. ....	28
Figura 9 - Mapa da irradiância no Brasil.....	28
Figura 10 - Geração instalada no Brasil dividida por matriz energética. ....	29
Figura 11 - Coeficiente de absorção e comprimento de penetração em função de $\lambda$ e energia para diferentes materiais. ....	31
Figura 12 - Dispositivo de monitoramento florestal no qual a célula fotovoltaica simulada poderia ser acoplada.....	33
Figura 13 - Estrutura eletrônica de bandas a 0K.....	35
Figura 14 - Interação das ondas eletromagnéticas com o material semiconductor, a partir do conceito de diagramas de bandas de energia do semiconductor. ....	36
Figura 15 – Novo estado energético de um material semiconductor dopado com Boro (estado aceitador em um semiconductor tipo p). ....	38
Figura 16 - Novo estado energético de um material semiconductor dopado com Fósforo (estado doador em um semiconductor tipo n).....	39
Figura 17 - Junção pn. ....	40
Figura 18 - Formação da carga espacial na junção pn. ....	40
Figura 19 - Polarização direta e reversa da junção pn em um diodo. ....	41
Figura 20 - Célula solar típica de silício.....	42
Figura 21 - Célula solar feita de silício monocristalino. ....	43
Figura 22 - Célula tandem com diversas junções PN.....	46
Figura 23 - Diodo p-i-n usado como foto-sensor. ....	48
Figura 24 - Estrutura de uma lâmina SOI.....	49

Figura 25 - Curva característica corrente por tensão fotogerada – $I \times V$ .....	52
Figura 26 - Curva característica $I \times V$ para diferentes irradiações.....	53
Figura 27 - Circuito equivalente da célula solar.....	54
Figura 28 - Curva de corrente e potência em função da tensão para uma célula de 156 mm x 156 mm.....	55
Figura 29 - Malha criada para a validação do dispositivo simulado. ....	60
Figura 30 - Fluxograma de entradas e saídas do TCAD.....	61
Figura 31 - Dispositivo referência utilizado para validação da simulação. ....	64
Figura 32 – Estrutura do dispositivo referência simulado.....	65
Figura 33 - Curvas do dispositivo referência.....	65
Figura 34 - Curva de corrente x tensão para a calibração do dispositivo simulado...67	
Figura 35 – Esquema de uma célula solar com germânio por cima de uma camada de silício. ....	68
Figura 36 – Esquema de uma célula solar com germânio por baixo de uma camada de silício. ....	69
Figura 37 - Corrente fotogerada em função da tensão comparando diferentes dispositivos puros e híbridos (germânio por cima do silício) à 300 K.....	73
Figura 38 – Corrente do catodo em função do comprimento de onda para de células solares de silício e híbridas. ....	75
Figura 39 - Corrente do catodo em função do comprimento de onda para de células solares com espessura de 1 $\mu\text{m}$ de material semiconductor. ....	76
Figura 40 - Corrente do catodo em função do comprimento de onda para de células solares com espessura de 8,02 $\mu\text{m}$ de material semiconductor. ....	76
Figura 41 - Corrente do catodo em função do comprimento de onda para de células solares com espessura de 8,2 $\mu\text{m}$ de material semiconductor. ....	77
Figura 42 - Corrente do catodo em função do comprimento de onda para de células solares com espessura de 10 $\mu\text{m}$ de material semiconductor. ....	78
Figura 43 - Profundidade de penetração da luz em função do comprimento de onda para dispositivos de 1 $\mu\text{m}$ de espessura (escala linear).....	80
Figura 44 - Profundidade de penetração da luz em função do comprimento de onda para dispositivos de 1 $\mu\text{m}$ de espessura (escala logarítmica). ....	81
Figura 45 - Profundidade de penetração da luz em função do comprimento de onda para dispositivos de 10 $\mu\text{m}$ de espessura (escala linear).....	83

Figura 46 - Profundidade de penetração da luz em função do comprimento de onda para dispositivos de 10 $\mu\text{m}$ de espessura (escala logarítmica).	83
Figura 47 – Corte vertical do dispositivo híbrido de 10 $\mu\text{m}$ para visualização da fotogeração.	84
Figura 48 – Taxa de fotogeração em função da profundida do dispositivo híbrido em uma célula fotovoltaica de 10 $\mu\text{m}$ .	85
Figura 49 – Taxa de fotogeração em função da profundida do dispositivo híbrido em uma célula fotovoltaica de 10 $\mu\text{m}$ (visualização da profundidade entre a superfície até 2 $\mu\text{m}$ ).	85
Figura 50 - Taxa de fotogeração em função da profundida do dispositivo híbrido em uma célula fotovoltaica de 10 $\mu\text{m}$ (visualização da profundidade entre 2 $\mu\text{m}$ a 10 $\mu\text{m}$ ).	86
Figura 51 - Campo elétrico vertical na direção da espessura (a) híbrido (b) inteiramente de silício.	87
Figura 52 - Campo elétrico horizontal ao longo do dispositivo (a) híbrido (b) inteiramente de silício.	87
Figura 53 – Campo elétrico vertical em relação à profundidade do dispositivo (espessura) nos dispositivos híbrido e inteiramente de silício.	88
Figura 54 - Corte da figura 50 perpendicular ao eixo y (comprimento) nos dispositivos híbrido e inteiramente de silício.	89
Figura 55 – Corrente de anodo gerada em função da tensão de anodo com influência da recombinação superficial entre interfaces (célula de 0,1 $\mu\text{m}$ ).	91
Figura 56 – Corrente de anodo gerada em função da tensão de anodo com influência da recombinação superficial entre interfaces (célula de 1 $\mu\text{m}$ ).	91
Figura 57 – Corrente de anodo gerada em função da tensão de anodo com influência da recombinação superficial entre interfaces (célula de 10 $\mu\text{m}$ ).	92
Figura 58 - Curva I x V para dispositivos de 1 $\mu\text{m}$ .	94
Figura 59 - Curva I x V para dispositivos de 10 $\mu\text{m}$ .	94
Figura 60 - queda de Voc devido ao aumento da área da região de depleção.	96
Figura 61 - Variação de corrente e tensão com a variação da região intrínseca.	97
Figura 62 - Fator de forma da célula fotovoltaica em função do comprimento da região intrínseca para dispositivos de 10 $\mu\text{m}$ de espessura.	99
Figura 63 - Rendimento da célula fotovoltaica em função do comprimento da região intrínseca para dispositivos de 10 $\mu\text{m}$ de espessura.	99

Figura 64 - Corrente de trabalho da célula fotovoltaica em função do comprimento da região intrínseca para dispositivos de 10 $\mu\text{m}$ de espessura.....	100
Figura 65 - Tensão de trabalho da célula fotovoltaica em função do comprimento da região intrínseca para dispositivos de 10 $\mu\text{m}$ de espessura.....	101
Figura 66 - Potência de trabalho da célula fotovoltaica em função do comprimento da região intrínseca para dispositivos de 10 $\mu\text{m}$ de espessura.....	101
Figura 67 – Corrente de anodo em função da tensão de anodo considerando um dispositivo 3D com Li de 24 $\mu\text{m}$ . .....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos materiais mais usados em células solares.....	32
Tabela 2 - Eficiência de algumas células solares.....	47
Tabela 3 - Parâmetros iniciais para validação da simulação do dispositivo de referência.....	58
Tabela 4 - Medidas e características do dispositivo de referência utilizado na validação.....	59
Tabela 5 - Características do dispositivo referência.....	66
Tabela 6 – Dimensões de uma célula solar híbrida com 0,1 $\mu\text{m}$ de espessura de material semicondutor.....	69
Tabela 7 - Dimensões de uma célula solar híbrida com 1 $\mu\text{m}$ de espessura de material semicondutor.....	70
Tabela 8 - Dimensões de uma célula solar híbrida com 8,02 $\mu\text{m}$ de espessura de material semicondutor.....	70
Tabela 9 - Dimensões de uma célula solar híbrida com 8,2 $\mu\text{m}$ de espessura de material semicondutor.....	71
Tabela 10 - Dimensões de uma célula solar híbrida com 10 $\mu\text{m}$ de espessura de material semicondutor.....	71
Tabela 11 - Valores para $I_s$ do dispositivo de 10 $\mu\text{m}$ .....	95
Tabela 12 - Variação do $\eta$ e do FF devido à variação da região intrínseca.....	98
Tabela 13 - Variação de $P_m$ devido ao aumento da região intrínseca.....	100
Tabela 14 - Principais parâmetros de uma célula solar com 10 $\mu\text{m}$ de espessura.....	103

## LISTA DE SIGLAS E DEFINIÇÕES

2D	Duas dimensões (eixo 'x' e eixo 'y')
3D	Três dimensões (eixo 'x', eixo 'y' e eixo 'z')
Al	Elemento químico Alumínio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Composto químico Óxido de Alumínio
AM	Massa de Ar; <i>Air Mass</i>
As	Elemento químico Arsênio
a-Si	Silício amorfo
B	Elemento químico Boro
Cd	Elemento químico Cádmio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono, ou gás Carbônico
CA	Corrente Alternada; <i>Alternating Current</i>
CC	Corrente Contínua; <i>Direct Current</i>
CdTe	Célula solar composta por Telureto de Cádmio
CIGS	Célula solar composta por Cobre, Índio, Gálio e Selênio
CZ	Processo de purificação do silício Czochralski
CZTS	Célula solar composta por Sulfeto de Cobre, Zinco e Estanho
DPC	Dispositivo Padrão de Controle
DR	Dispositivo referência
Ga	Elemento químico Gálio
Ge	Elemento químico Germânio

Ge/Si	Germânio sobre Silício
H <sub>2</sub>	Hidrogênio molecular
H <sub>2</sub> O	Composição química da água
He	Elemento químico Hélio
In	Elemento químico Índio
kWh/m <sup>2</sup> /ano	Kilowatt-hora por metro quadrado por ano
LID	Degradação Induzida pela Luz; <i>Light-Induced Degradation</i>
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo de Óxido de Metal Semicondutor; <i>Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MPP	Ponto de Máxima Potência; <i>Maximum Power Point</i>
N	Elemento químico Nitrogênio
P	Elemento químico Fósforo
PIN	Junção entre a região de anodo (p), intrínseca (i) e catodo (n)
p-Si	Silício policristalino
PV	Fotovoltaico; <i>Photovoltaic</i>
Sb	Elemento químico Antimônio
Si	Elemento químico Silício
SiO <sub>2</sub>	Óxido de Silício
Si/Ge	Silício sobre Germânio
SiGE	Silício Grau Eletrônico

SiGM	Silício Grau Metalúrgico
SiGS	Silício Grau Solar
SIMON	Separação por Implantação de Oxigênio e Nitrogênio; <i>Separation by Implanted Oxygen and Nitrogen</i>
SIMOX	Separação por Implantação de Oxigênio; <i>Separation by Implanted Oxygen</i>
SOI	Silício Sobre Isolante; <i>Silicon-On-Insulator</i>
SOS	Silício sobre Safira; <i>Silicon-On-Sapphire</i>
Tandem	Célula solar composta por múltiplas junções entre diferentes materiais
Te	Elemento químico Telúrio
TWh	Terawatt-hora
ULP	Ultrabaixa Energia; <i>Ultra Low Power</i>
USLI	Integração em Escala Ultra Grande; <i>Ultra Large Scale Integration</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
$\alpha$	Coefficiente de absorção ótico	cm <sup>-1</sup>
A	Área	cm <sup>2</sup>
$c$	Velocidade da luz no vácuo	m/s
D <sub>n</sub>	Coefficiente de difusão do elétron	cm <sup>2</sup> /s
D <sub>p</sub>	Coefficiente de difusão da lacuna	cm <sup>2</sup> /s
E <sub>G</sub>	Espessura da camada de germânio	μm
E <sub>g</sub>	Banda proibida do material semiconductor	eV
E <sub>Ox</sub>	Espessura da região do óxido de porta	μm
E <sub>OxE</sub>	Espessura da região do óxido enterrado	μm
E <sub>s</sub>	Espessura da camada de silício	μm
FF	Fator de forma da célula solar	---
I <sub>D</sub>	Corrente através das junções metalúrgicas do diodo	A
I <sub>m</sub>	Corrente de trabalho da célula solar	A
I <sub>p</sub>	Corrente de fuga do diodo	A
I <sub>ph</sub>	Corrente gerada pela célula solar	A
I <sub>s</sub>	Corrente de saturação do diodo	A
I <sub>sc</sub>	Corrente de curto-circuito	A
$k$	Constante de Boltzmann	J/K

$k_e$	Coeficiente de extinção	---
$L_i$	Comprimento da região intrínseca do diodo PIN	$\mu\text{m}$
$L_n$	Comprimento da região de catodo do diodo PIN	$\mu\text{m}$
$L_p$	Comprimento da região de anodo do diodo PIN	$\mu\text{m}$
$N_A$	Concentração de impurezas aceitadoras	$\text{cm}^{-3}$
$N_c$	Densidade de estado efetiva da banda de condução	$\text{cm}^{-3}$
$N_D$	Concentração de impurezas doadoras	$\text{cm}^{-3}$
$N_v$	Densidade de estado efetiva da banda de valência	$\text{cm}^{-3}$
$P_{in}$	Irradiância incidente na célula solar	$\text{W/m}^2$
$q$	Carga elementar do elétron	C
$R_p$	Resistência paralela do circuito elétrico equivalente	$\Omega$
$R_s$	Resistência série do circuito elétrico equivalente	$\Omega$
$T$	Temperatura absoluta	K
$V_m$	Tensão de trabalho da célula solar	V
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto	V
$\eta$	Rendimento da célula solar	%
$\tau_n$	Tempo de vida útil do elétron	s
$\tau_p$	Tempo de vida útil da lacuna	s
$E$	Energia da onda eletromagnética	eV
$h$	Constante de Planck	J.s

$f$	Frequência da onda eletromagnética	Hz
$\lambda$	Comprimento de onda	m
$\bar{n}$	Índice de refração complexo	---
$n_r$	Parte real do índice de refração complexo	---
$jk_e$	Parte imaginária do índice de refração complexo	---
$v$	Velocidade da luz no meio ambiente	m/s
$\lambda_0$	Comprimento de onda da luz no vácuo	$\mu\text{m}$

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1. Objetivo.....	19
1.2. Estrutura do trabalho .....	20
<b>2. ENERGIA E GERAÇÃO SOLAR</b> .....	<b>21</b>
2.1. A energia solar.....	21
2.2. Espectro de energia solar e massa de ar .....	22
2.3. Dados de geração solar no Mundo .....	25
2.4. Dados da geração solar no Brasil.....	28
2.5. O efeito fotovoltaico .....	30
2.6. Coeficiente de absorção .....	30
2.7. Aplicabilidade do dispositivo simulado.....	33
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>34</b>
3.1. Semicondutores .....	34
3.2. Junção PN .....	39
3.3. Principais tipos de células solares comerciais .....	41
3.3.1. <i>Silício monocristalino</i> .....	43
3.3.2. <i>Filmes finos</i> .....	44
3.4. Diodo PIN .....	48
3.5. A tecnologia SOI .....	49
<b>4. PARÂMETROS IMPORTANTES PARA A CÉLULA SOLAR</b> .....	<b>51</b>
4.1. Eficiência quântica e rendimento .....	51
4.2. Curva característica I x V de uma célula solar .....	52
4.3. Circuito equivalente .....	53
4.4. Corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto.....	54
4.5. Ponto de máxima potência .....	55
4.6. Fator de forma .....	56
<b>5. MODELAGEM EM AMBIENTE VIRTUAL</b> .....	<b>58</b>
5.1. Software utilizado.....	59
5.2. Modelos físicos utilizados .....	62
5.3. Validação .....	63

<b>6. RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	<b>68</b>
6.1. Resposta ao espectro solar .....	74
6.2. Profundidade de penetração luminosa .....	79
6.3. Campos elétricos Horizontal e Vertical .....	87
6.4. Recombinações superficiais .....	90
6.5. Relação corrente X tensão .....	93
<b>7. CONCLUSÃO</b> .....	<b>104</b>
<b>8. PUBLICAÇÕES GERADAS DURANTE O TRABALHO</b> .....	<b>106</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>107</b>
<b>APÊNDICE</b> .....	<b>116</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, há um grande interesse em pesquisas para fontes renováveis de energia, na medida em que dispositivos e máquinas autossuficientes aparecem, dispositivos que auxiliam o cotidiano das pessoas, realizando trabalhos repetitivos e prejudiciais à saúde do ser humano.

Essas máquinas não podem depender de ligação constante através de fios, e, apesar de grandes avanços na tecnologia de baterias, também não podem depender exclusivamente delas.

Sendo assim, a sinergia entre baterias e dispositivos geradores traria um imenso salto na tecnologia de máquinas autônomas, tornando essas máquinas independentes de alimentação externa, acoplando a elas células solares para a geração de sua própria energia, permitindo, dessa maneira, que a rede de distribuição não seja tão sobrecarregada.

A demanda mundial de energia cresce rapidamente a cada ano. Entretanto, os meios convencionais de obtenção de energia (os combustíveis fósseis) serão esgotados dentro do próximo século (SZE e NG, 2007). Esse fato demonstra a importância do desenvolvimento de tecnologias que utilizem fontes renováveis de energia, tais como o vento, as marés e, principalmente, o Sol.

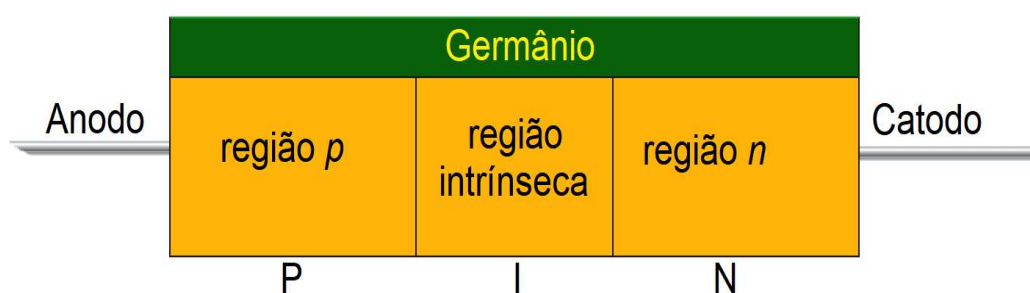
Pode-se dizer que a origem da energia nos combustíveis fósseis é o Sol, uma vez que a fotossíntese precisa da luz solar para ocorrer. Dessa forma, é possível dizer que, com exceção de energia proveniente de reações nucleares em átomos de certos elementos químicos, toda a energia contida nos combustíveis fósseis é proveniente da estrela mais próxima do planeta Terra (CHEN, 2011).

Outras fontes de energia como, por exemplo, a fonte hídrica (Hidroelétricas) e do vento (Eólica), na medida em que essa depende de alterações de pressão na atmosfera terrestre para criar os ventos, e aquela depende do ciclo das águas, inicialmente com a evaporação e depois com a precipitação, dependem do Sol (LOPEZ, 2012).

Por essa ótica, essa pesquisa vem contribuir para o aprimoramento de um dispositivo semicondutor utilizado como uma célula solar, através da verificação de diversas configurações e da interação entre diferentes tipos de semicondutores.

Trata-se de um diodo PIN (diodo formado por duas junções, a primeira entre a região de anodo (p) e a região intrínseca (i), e a segunda formada entre a região intrínseca (i) e a região de catodo (n), formado assim um diodo com três regiões, P-I-N), o qual é confeccionado de maneira a formar uma heterojunção entre uma camada de Silício e uma outra de Germânio, como pode ser visto na figura 1.

Figura 1 – Estrutura básica do dispositivo desenvolvido em uma lâmina SOI e utilizado como célula fotovoltaica.



Fonte: Autor

A verificação do comportamento, sob a luz solar, do dispositivo estudado, poderá mostrar que é possível a construção de uma célula solar com uma quantidade menor de material e com um rendimento muito satisfatório.

Isso poderá, em um futuro próximo, deixar células fotovoltaicas mais acessíveis à sociedade, e contribuir com uma melhora tecnológica na área de geração elétrica limpa e renovável, na medida em que o Sol é uma fonte de energia abundante e durará por muito tempo.

Assim, o desenvolvimento de novas tecnologias, como células solares com dimensões diminutas para aplicações na geração de energia (*Energy Harvesting*), utilizados para a alimentação de circuitos de ultrabaixa potência (ULP – *Ultra Low Power*) (BULTEEL, DELMARE e FLANDRE, 2009), alimentação de sensores utilizados externamente (como sensores de umidade, entre outros) (TUNES, 2018), e até mesmo em aplicações médicas, como sensores subcutâneos, sensores de glicemia, entre outros (JN, 2018), podem tornar viáveis a criação de sistemas autossuficientes para diversas aplicações.

Dessa maneira, o entendimento da interação entre células com dimensões muito pequenas e o espectro luminoso emitido pelo Sol, torna-se de extrema importância para o futuro da tecnologia autônoma, para o futuro do ser humano e para o futuro do meio ambiente no planeta Terra.

### **1.1. Objetivo**

O objetivo desta dissertação de mestrado é realizar um estudo sobre diodos PIN construídos em lâmina SOI (*Silicon On Insulator*) com uma potencial aplicação destinada para a alimentação de circuitos que necessitam de ultra-baixa potência (ULP – Ultra Low Power).

Na superfície superior de uma lâmina SOI existe uma região utilizada para a confecção de dispositivos. Abaixo dessa região existe uma fina camada de óxido de silício denominada de óxido enterrado, porque fica abaixo da região ativa, e logo abaixo desse óxido enterrado, há o restante do material semiconductor, do mesmo material da região ativa, com a finalidade de dar sustentação à lâmina. A presença de um substrato espesso é importante para evitar que a lâmina se trinque.

O diodo PIN é utilizado como célula solar, e algumas alterações estruturais são realizadas com a intenção de avaliar o aumento na geração fotovoltaica do dispositivo.

Inicialmente, foi realizada uma alteração no tipo de material semiconductor. Ou seja, houve adição de uma camada de germânio no dispositivo e, posteriormente, foi feita a alteração da posição da camada de germânio. Com isso, foi então verificado o comportamento óptico do dispositivo resultante em relação a uma determinada faixa do espectro solar.

Adicionalmente, foi realizada uma alteração do tamanho da região intrínseca do diodo PIN para a verificação da corrente e da tensão geradas pela célula solar.

O estudo é baseado em simulações em ambiente virtual realizadas no Atlas da Silvaco (SILVACO, INC., 2016), que é um simulador preditivo para dispositivos semicondutores. Esse *Software* é capaz de simular alterações físicas de geração e prever o comportamento de dispositivos reais.



## 1.2. Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em 7 capítulos, nos quais são apresentados alguns dos principais aspectos sobre células solares e sua interação com a energia proveniente do Sol.

O capítulo 2 apresenta aspectos gerais sobre a energia solar, tais como o espectro solar e a densidade de potência espectral da radiação solar. Também será apresentado um panorama da produção de energia fotovoltaica no mundo e no Brasil, assim como o princípio de funcionamento do efeito fotovoltaico.

No capítulo 3 são apresentados os tipos de semicondutores utilizados para a elaboração do diodo PIN simulado nesta pesquisa, também serão apresentados os principais tipos de células solares comerciais utilizadas atualmente. Neste capítulo, também é abordado o princípio de funcionamento das células solares e novas tecnologias na fabricação de lâminas semicondutoras.

As definições sobre os principais parâmetros de fornecimento de energia e qualidade de células solares são mostradas no capítulo 4, tais como potência, fator de forma, entre outros, além da apresentação das equações para a obtenção desses parâmetros. Ainda no capítulo 4 é apresentado um circuito elétrico equivalente ao de uma célula solar.

No capítulo 5, é feita a descrição do ambiente virtual utilizado para a realização das simulações, assim como são apresentados modelos utilizados nas simulações, e, por fim, a calibração das simulações através da comparação com o dispositivo referência (DR).

O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos, tais como corrente e tensão fotogerados, interação do espectro luminoso com o dispositivo simulado, o efeito da recombinação superficial em heterojunções e o comportamento do campo elétrico devido à nova camada de germânio introduzida no dispositivo.

Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as principais conclusões em relação aos aspectos abordados nesta pesquisa, assim como propostas para trabalhos futuros.

## 2. ENERGIA E GERAÇÃO SOLAR

Neste capítulo, são apresentados alguns conceitos sobre a energia solar e sua interação com a matéria para a geração de energia elétrica, e alguns dados sobre a geração de energia fotovoltaica no mundo e no Brasil e as suas perspectivas para o futuro da geração solar de energia elétrica.

### 2.1. A energia solar

A estrela mais próxima da Terra é o Sol. Essa estrela se situa a uma distância de 150 milhões de quilômetros da Terra e é 33 mil vezes maior que a mesma. O Sol pode atingir temperaturas próximas de 15 milhões de graus Celsius em seu interior, e 5600 graus Celsius em sua superfície. Ele também possui um diâmetro de 1,48 milhões de quilômetros e é uma enorme fonte de energia nuclear, irradiando-a a todo momento (LOPEZ, 2012).

A energia oriunda do Sol é resultado de reações de fusão nuclear. A cada segundo, aproximadamente  $6 \times 10^{11}$  Kg de  $H_2$  é convertido em He. Conversão essa que gera uma energia de  $4 \times 10^{20}$  J. A energia gerada é transmitida pelo espaço na forma de ondas eletromagnéticas que vão desde o ultravioleta até o infravermelho (0,1 a 3  $\mu m$ ). Estima-se também que o Sol emitirá energia nos próximos 10 bilhões de anos, o que transforma essa estrela em uma fonte inigualável de energia para o ser humano (SZE e NG, 2007).

A energia da onda eletromagnética é diretamente proporcional à frequência dela. Já quando a energia é relacionada ao comprimento de onda, o comportamento é oposto, ou seja, quanto maior o comprimento da onda eletromagnética, menor é a energia associada a essa mesma onda (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

A equação 2.1 demonstra esse efeito entre a frequência e a energia que uma determinada onda eletromagnética possui:

$$E = h . f \tag{2.1}$$

Na qual  $E$  é a energia da onda em Joules (J) ou elétron-volts (eV),  $h$  é a constante de proporcionalidade, conhecida como constante de Planck, cujo valor é de  $6,636 \times 10^{-34}$  e sua unidade de medida é o produto entre Joule e segundo (J.s), e  $f$  é a frequência da onda expressa em Hertz (Hz). Esta equação é também conhecida como a equação de Planck-Einstein (SZE e NG, 2007).

A velocidade da luz no vácuo é constante e tem seu módulo em, aproximadamente, 300.000 Km/s (VILLALVA e GAZOLI, 2012). Essa velocidade constante pode ser relacionada com o comprimento de onda e com a frequência de acordo com a equação 2.2:

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.2)$$

Onde  $c$  é velocidade da luz no vácuo,  $\lambda$  é o comprimento de onda expresso em submúltiplos de metro (m), e  $f$  é a frequência da onda, que é dada em Hertz (H) (JÄGER, ISABELLA, *et al.*, 2014).

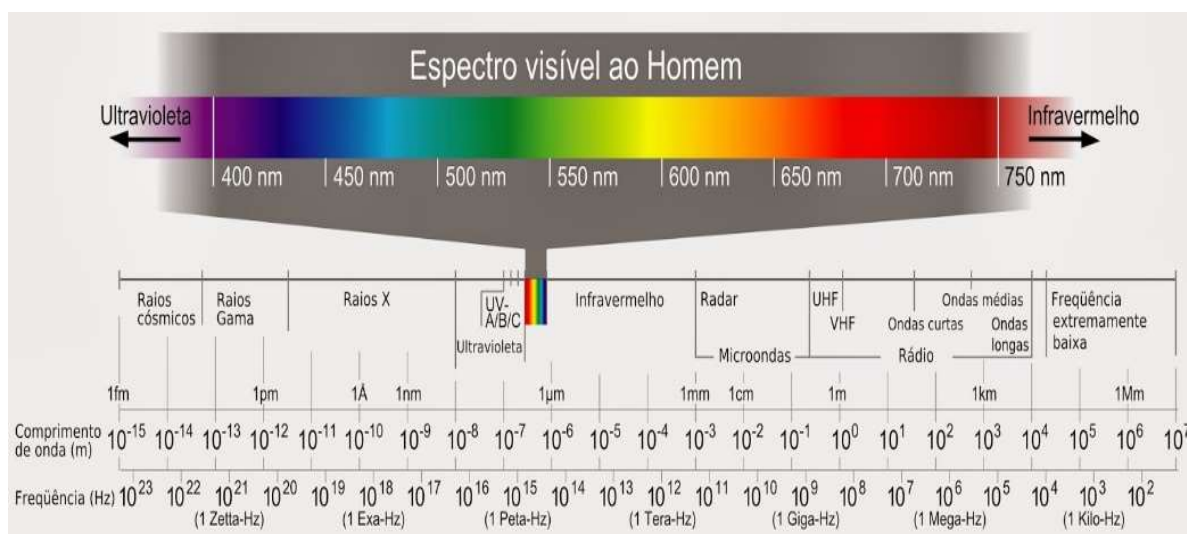
No espaço, antes de chegar à Terra e atingir sua atmosfera, a radiação emitida pelo sol é composta de 53% de radiação invisível, sendo que a maior parte é de luz ultravioleta e uma pequena porção é de infravermelha. Os outros 47% são compostos de luz visível ao olho humano (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

## **2.2. Espectro de energia solar e massa de ar**

O espectro de energia do Sol, comumente chamado de espectro solar, é o conjunto de todas as ondas eletromagnéticas emitidas pelo Sol. Conjunto esse que emite comprimentos de onda que vão desde muito pequenos, com aproximadamente  $10^{-8}$  m (como, por exemplo, os Raios Ultravioleta), até comprimentos de ondas pertencentes ao infravermelho (SZE e NG, 2007).

As faixas de comprimentos de ondas emitidas pelo Sol, incluindo as menores ao Ultravioleta e faixas que vão além do infravermelho, podem ser vistas na figura 2.

Figura 2 – Faixa espectral completa.



Fonte: (FOGAÇA, 2013)

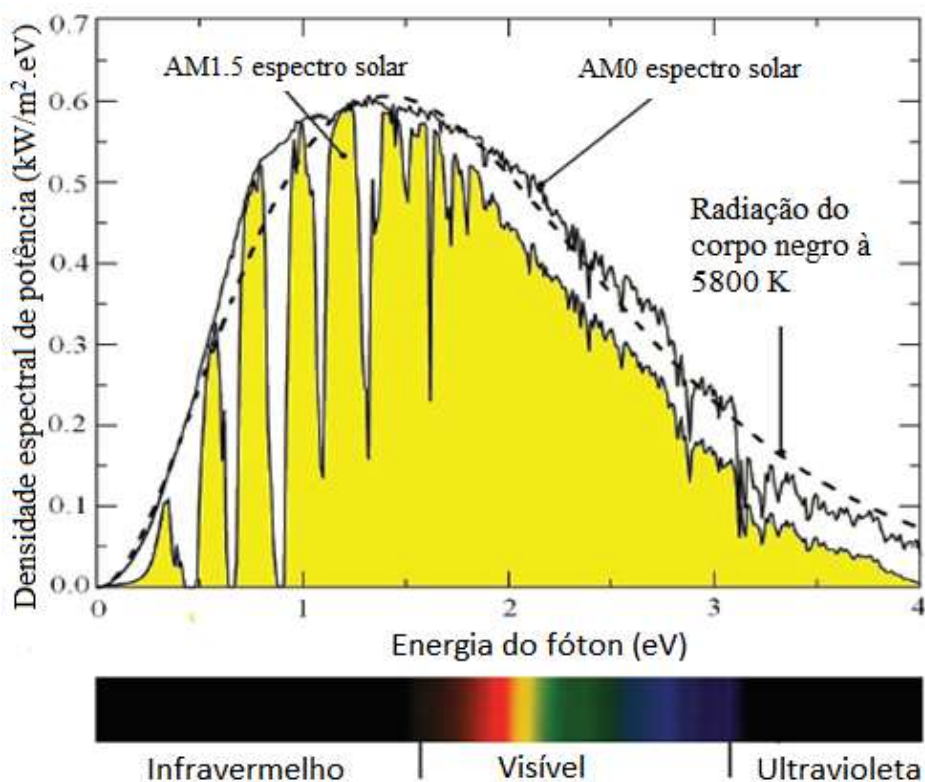
Quando a luz viaja pelo espaço, ela não perde energia, pois não há interação com a matéria. Porém, quando chega ao planeta Terra ela sofre alterações que influenciam na geração de energia elétrica.

O principal fator que faz com que a radiação do Sol perca intensidade é a quantidade de massa de ar que essa luz precisa atravessar para atingir a fonte geradora de eletricidade. Essa massa de ar é identificada pela sigla AM (*Air Mass*), e ela possui diferentes derivações tais como AM0 (que é a radiação solar fora da atmosfera terrestre), AM1.5 (que é a radiação utilizada como padrão para testes de células solares), entre outras (CHEN, 2011). A figura 3 mostra as diferentes densidades espectrais de potência para ondas contendo energia entre 0 a 4 eV, e para diferentes condições de massa de ar.

O fator AM também depende do ângulo de incidência da luz solar. Sendo assim, dependendo do ângulo incidente, maior é o obstáculo (camada de ar) que a luz precisa atravessar para chegar à célula solar, e, portanto, menor será a sua radiação. A energia contida na radiação solar para AM0 é de  $1.366 \text{ W/m}^2$ , e a energia contida para a radiação AM1.5 é de  $1.000 \text{ W/m}^2$  (CHEN, 2011).

As alterações que a radiação solar sofre ao entrar na atmosfera da Terra são devidas, principalmente, às partículas de poeira, moléculas do próprio ar e aerossóis encontrados na atmosfera tais como partículas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e partículas de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Figura 3 - Densidade de potência espectral da radiação solar.



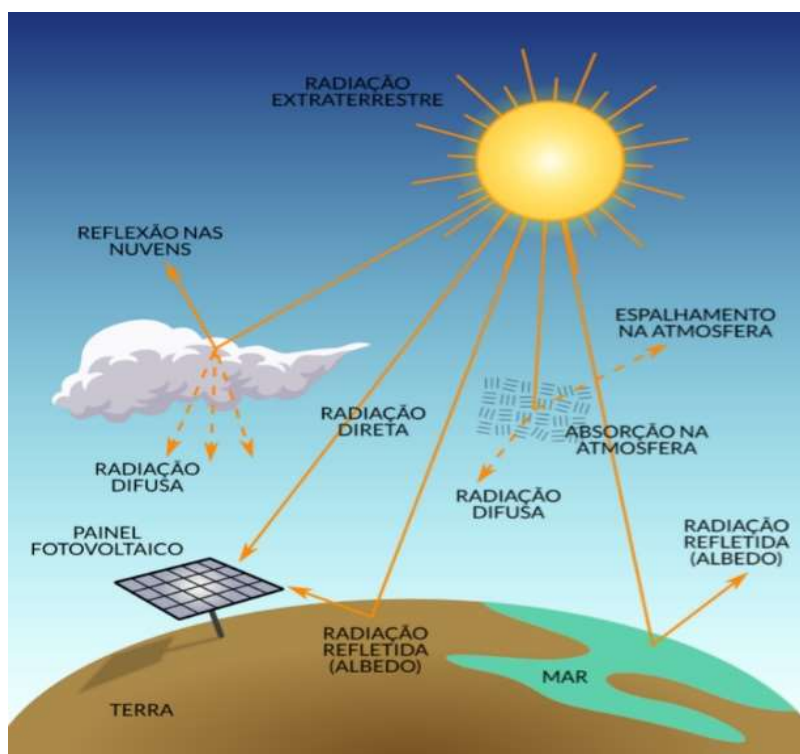
Fonte: Adaptado de (CHEN, 2011).

De toda a energia solar, 30% é refletida para o espaço e outros 20% são absorvidos na atmosfera terrestre (16% é absorvido por água presente na atmosfera, poeira e outros aerossóis, e 4% é absorvido pelas nuvens). Dessa forma, de toda a energia enviada pelo Sol, só é possível aproveitar, na superfície terrestre, 50% dela para conversão em energia elétrica ou outro tipo de energia (CHEN, 2011).

Outro ponto de grande importância é a forma como essa radiação chega à superfície terrestre. Ela pode incidir diretamente, ou seja, a radiação enviada pelo Sol não sofre nenhum tipo de reflexão. Quando isso acontece ela é chamada de radiação direta.

A radiação também pode chegar à superfície terrestre de forma indireta, ou seja, refletida por nuvens, pelo ar, por plantas, por montanhas, entre outros. A essa radiação é dado o nome de radiação difusa. Esses processos são esquematizados na figura 4.

Figura 4 - Componentes da radiação solar no planeta Terra.



Fonte: (TIEPOLO, PEREIRA, *et al.*, 2017)

### 2.3. Dados de geração solar no Mundo

A demanda de energia mundial aumenta rapidamente (IEA, 2019a). Dessa forma, a produção de energias renováveis e limpas ganha grande importância no panorama mundial. Dentre as fontes de energia renováveis, há a energia proveniente do Sol que é livre de carbono, contribuindo para a redução de emissões de CO<sub>2</sub> na natureza.

A energia solar não é completamente utilizada pelo ser humano e, conforme a figura 5, seu potencial é proporcionalmente muito maior que o consumo anual de energia pela humanidade, sendo superior às outras fontes energéticas existentes no planeta terra.

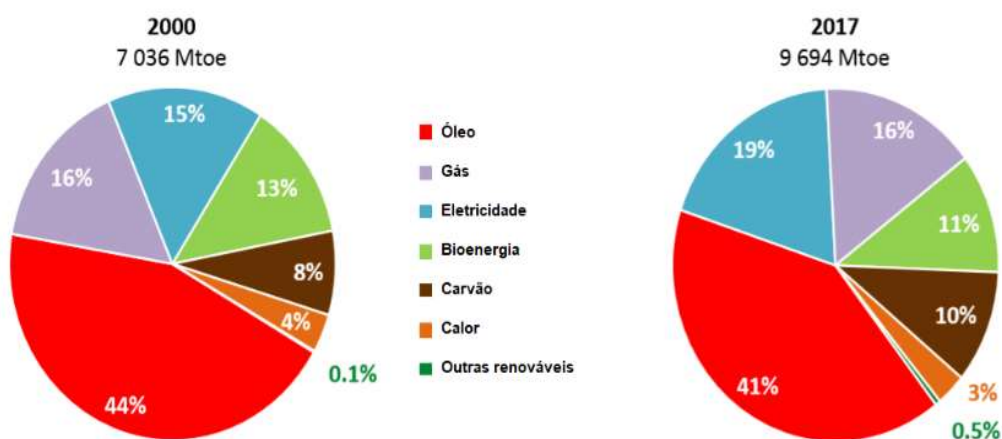
Figura 5 – Comparação dos potenciais máximos das fontes energéticas do planeta Terra.



Fonte: (MME, 2017)

Dados de 2017 mostram que a demanda mundial de energia elétrica aumentou cerca de 3% em relação a 2016, chegando a um total de 22.200 TeraWatts-hora (TWh). Esse consumo teve um aumento de cerca de 70% desde 2000, e, em 2017, representou 19% da energia gerada no mundo, e, conforme a figura 6, agora é o segundo maior combustível de uso final (IEA, 2018a).

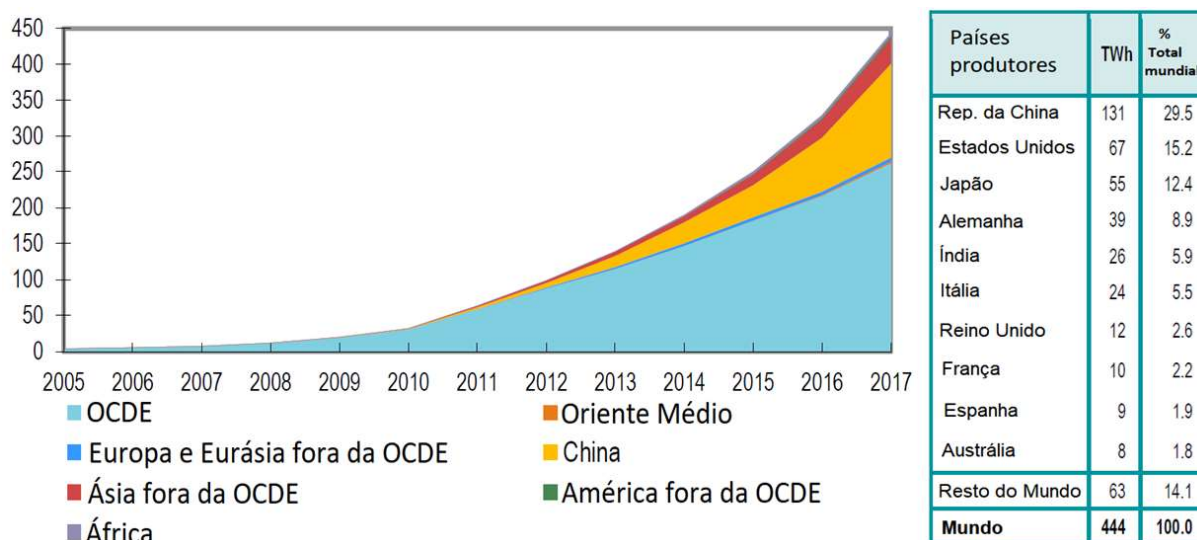
Figura 6 - Geração de energia mundial.



Fonte: Adaptado de (IEA, 2018a)

No cenário mundial, existe uma projeção de pouco crescimento da geração de energia através de combustíveis não renováveis. Por outro lado, há uma projeção de crescimento da parcela de energia elétrica gerada a partir de fontes renováveis, tais como hidroelétricas, eólicas e fotovoltaica (IEA, 2019b).

Figura 7 - Produção Mundial de Eletricidade PV (2005 - 2017).



Fonte: Adaptado de (IEA, 2019a)

O crescimento da parcela de energia gerada a partir do Sol nos últimos anos foi muito rápido, conforme mostrado na figura 7, principalmente em países integrantes da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico).

Em pouco mais de 10 anos a matriz energética a partir de células fotovoltaicas aumentou de pouco mais de 4 TWh para cerca de 328 TWh, e os países que mais contribuíram para esse aumento estão no continente europeu (IEA, 2019a), região que não possui um bom índice de insolação.

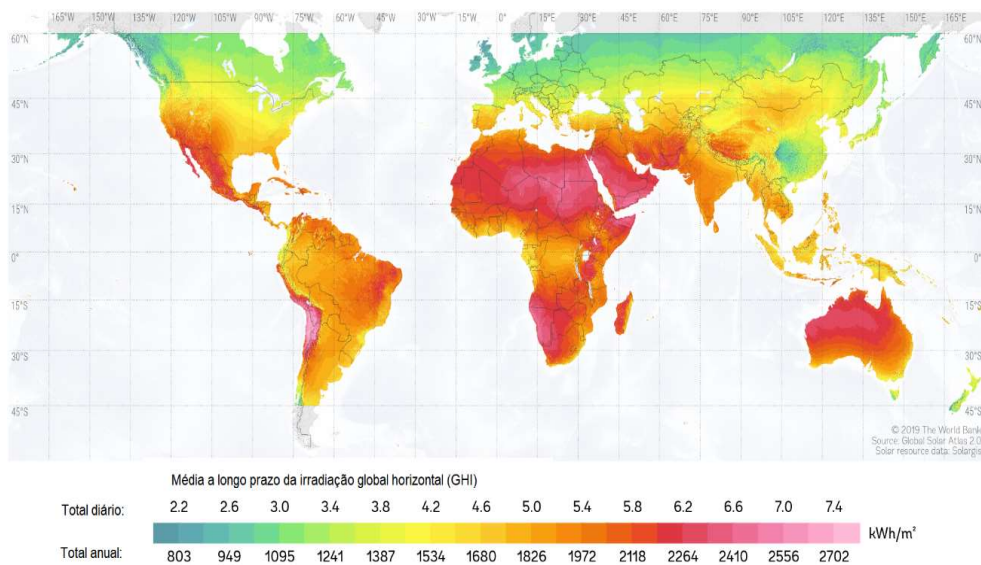
A geração fotovoltaica também é a matriz energética que mais cresce no mundo. Desde 1990 até 2017 seu crescimento foi de cerca de 34,8% ao ano (IEA, 2018b).

Isso reforça ainda mais a necessidade de estudos que venham a contribuir para um melhor rendimento dessa matriz e, conseqüentemente, um melhor aproveitamento da energia solar.

A figura 8 mostra a intensidade de insolação mundial. Ela representa a soma das radiações direta (aquela que chega diretamente à superfície terrestre) e a difusa (aquela que sofre atenuações devido a diversos fatores atmosféricos).



Figura 8 - Mapa da irradiância no planeta Terra.

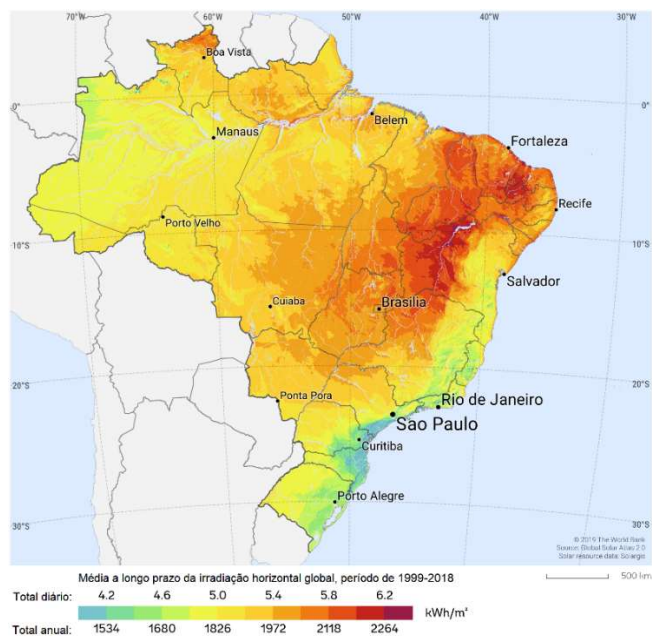


Fonte: Adaptado de (SOLARGIS)

## 2.4. Dados da geração solar no Brasil

O Brasil tem um grande potencial de geração fotovoltaica, já que grande parte de seu território tem um excelente nível de irradiação solar durante o ano inteiro, como é mostrado na figura 9.

Figura 9 - Mapa da irradiância no Brasil.

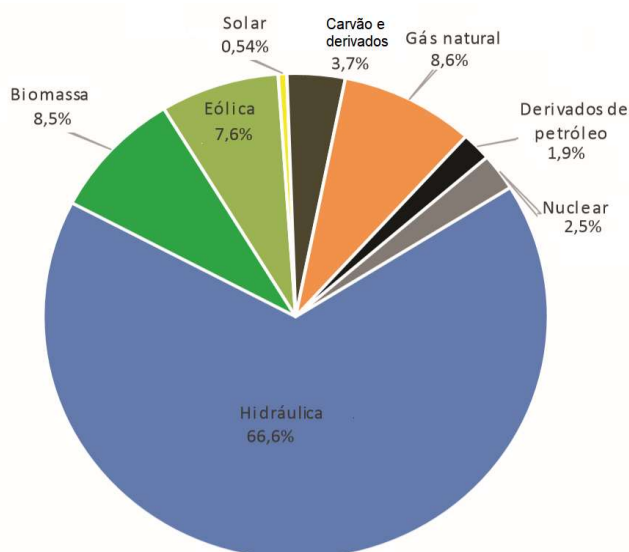


Fonte: Adaptado de (SOLARGIS)

A região Nordeste possui uma das melhores condições mundiais para a geração de energia fotovoltaica, na medida em que a variabilidade anual de incidência solar é pequena, tendo um baixo índice de nebulosidade e alta incidência de irradiação solar durante o ano inteiro, apresentando uma média anual que varia de 1.200 a 2.400 kWh/m<sup>2</sup>/ano (MME, 2017).

Em 2018, a capacidade total de geração brasileira de energia elétrica foi de 162.840 MW. Nesse mesmo ano o Brasil apresentou um crescimento significativo na geração fotovoltaica que passou de 935 MW em 2017 para 1.798 MW em 2018 (EPE, 2019). Todavia, em comparação com as outras fontes energéticas, a produção de energia solar está muito abaixo do potencial total de geração. Conforme a figura 10 mostra, a geração fotovoltaica representou 0,54% da geração total.

Figura 10 - Geração instalada no Brasil dividida por matriz energética.



Fonte: Adaptado de (EPE, 2019)

Estima-se que em 2026 o Brasil possa chegar a uma produção de 13 GW de energia solar e, que em 2050, essa geração possa alcançar 78 GW, o que representaria 9% da oferta total de eletricidade (MME, 2017). Além disso, fomentar esse tipo de matriz energética traria benefícios a regiões menos desenvolvidas no Brasil, já que as melhores áreas de irradiação estão localizadas nessas regiões, além de gerar emprego na cadeia de produção, uma vez que o território brasileiro é rico em silício, principal matéria prima para as células FV (MME, 2017).

Pesquisas na área da geração FV estão em destaque no mundo, e o Brasil planeja ser um destaque mundial na geração de energia solar, já que ele reconhece a grande importância dessa matriz energética e a necessidade de investimentos nessa área (MME, 2017).

## **2.5. O efeito fotovoltaico**

A descoberta do efeito fotovoltaico não é recente, Edmond Becquerel realizou um experimento em 1839, no qual placas (de prata ou platina) imersas em um eletrólito geravam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz (VALLÉRA e BRITO, 2006).

Tempos depois, em 1877, dois cientistas, Willian Grylls Adams e seu aluno Richard Evens Day, desenvolveram a primeira célula solar, que se tratava de um filme de selênio. Contudo a eficiência desse dispositivo era baixa, cerca de 0,5% (VALLÉRA e BRITO, 2006).

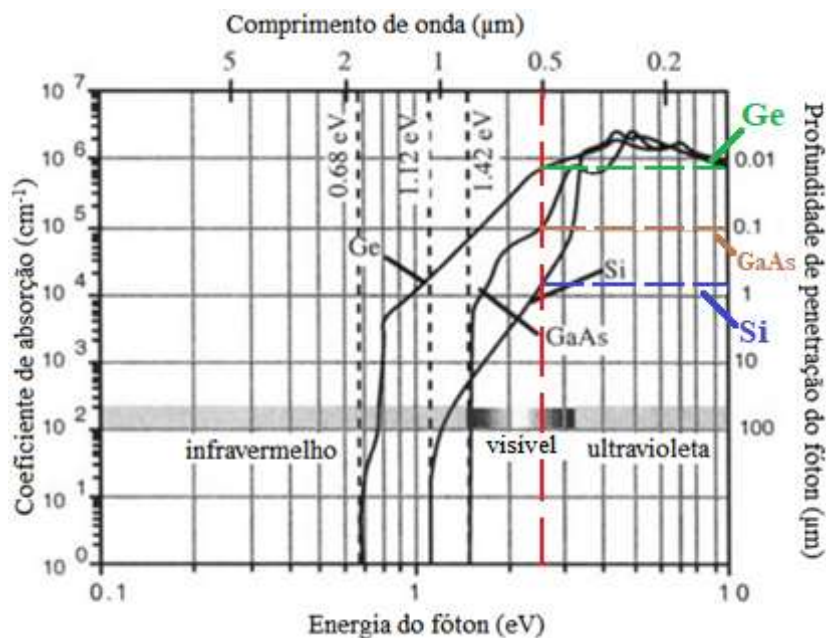
Contudo, foi só após grandes descobertas que a geração solar pôde evoluir e chegar ao patamar que está hoje, tais como a explicação de Albert Einstein sobre o efeito fotoelétrico (1905), o desenvolvimento da mecânica quântica, técnicas de dopagem e o desenvolvimento da física dos semicondutores (VALLÉRA e BRITO, 2006). A partir dessas bases, pôde-se entender com maior detalhamento os aspectos físicos que permitiam a produção de energia através da conversão direta da luz solar em eletricidade.

## **2.6. Coeficiente de absorção**

A propriedade de absorção em cada tipo de semicondutor determina a faixa de comprimento de onda que ele tem a capacidade de absorver. Ela é indicada pelo coeficiente de absorção ( $\alpha$ ).

Na figura 11, é mostrado o comportamento que a faixa espectral emitida pelo Sol tem em diferentes materiais semicondutores. O comportamento é mostrado para o silício (Si), o germânio (Ge) e o arseneto de gálio (GaAs). Na figura, temos (no eixo 'x' da parte de baixo do gráfico) a energia, em elétron-volts (eV), que o comprimento de onda possui, essa energia varia de 0,1 eV até 10 eV.

Figura 11 - Coeficiente de absorção e comprimento de penetração em função de  $\lambda$  e energia para diferentes materiais.



Fonte: Adaptado de (COLINGE e COLINGE, 2002)

No eixo 'x' da parte superior do gráfico temos os comprimentos de ondas emitidos pelo Sol, esse comprimento varia desde o infravermelho ao ultravioleta, passando pela região visível do espectro luminoso.

Na mesma figura (no eixo 'y' à direita) temos a profundidade de penetração que o fóton possui para cada tipo de material semiconductor. Ou seja, a onda eletromagnética (com o mesmo comprimento) possui comportamentos de penetração diferentes para cada tipo de material.

Como exemplo, temos o comprimento de onda de  $0,5 \mu\text{m}$  (com uma energia de aproximadamente  $2,5 \text{ eV}$ ). No germânio, esse comprimento de onda consegue chegar a profundidades de, aproximadamente,  $0,01 \mu\text{m}$ .

Até esse ponto, a maior parte da energia contida no comprimento de onda citado já foi absorvida pelo material, e a quantidade de pares elétron-lacuna que são gerados a partir desse ponto não é tão significativa para incrementar a corrente fotogerada (COLINGE e COLINGE, 2002).

O mesmo comprimento de onda (0,5  $\mu\text{m}$ ) no arseneto de gálio tem um comportamento diferente, tendo a maior parte de sua energia absorvida até uma profundidade de aproximadamente 0,1  $\mu\text{m}$ . A partir desse ponto (assim como no germânio), a quantidade de pares elétron-lacunas gerada não incrementa mais, significativamente, a corrente fotogerada (SZE e NG, 2007).

Temos também o silício, que apresenta um outro comportamento, tendo a maior parte de sua energia absorvida até uma profundidade de aproximadamente 1  $\mu\text{m}$ . Além disso, tem o mesmo efeito apresentado para o germânio e para o arseneto de gálio (pares elétron-lacunas gerados não influenciam mais, significativamente, na corrente fotogerada) (SZE e NG, 2007).

Portanto, quanto à capacidade de penetração da onda eletromagnética, a figura 11 mostra que o tipo de material tem uma interação diferente com os fótons contidos nas ondas luminosas. A figura 11 também mostra os pontos citados anteriormente para o comprimento de onda de 0,5  $\mu\text{m}$  e a capacidade de penetração nos semicondutores citados (germânio, arseneto de gálio e silício).

Por fim, temos o coeficiente de absorção, que é a capacidade que o material semicondutor tem de interagir com os fótons, ou seja, absorvê-los. Sendo assim, esse fator determina em qual profundidade a onda será absorvida. Um baixo valor do coeficiente  $\alpha$  indica que a luz penetra mais profundamente no material antes de interagir totalmente com o material e um alto valor indica que a onda interage com o material nas proximidades da superfície do mesmo (SZE e NG, 2007). Na figura 11, esse coeficiente varia de  $10^0$  a  $10^7 \text{ cm}^{-1}$ , e pode ser visto no eixo 'y' à esquerda.

Tabela 1 - Propriedades dos materiais mais usados em células solares.

<b>Material</b>	<b>Ge</b>	<b>CuInSe<sub>2</sub></b>	<b>Si</b>	<b>GaAs</b>	<b>CdTe</b>
<b>Tipo</b>	Indireto	Direto	Indireto	Direto	Direto
<b>Banda proibida (eV)</b>	0,67	1,04	1,12	1,43	1,49
<b>Limite de Absorção (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	1,85	1,19	1,12	0,87	0,83
<b>Coeficiente de Absorção (<math>\text{cm}^{-1}</math>)</b>	$5,0 \times 10^4$	$1,0 \times 10^5$	$1,0 \times 10^3$	$1,5 \times 10^4$	$3,0 \times 10^4$

Fonte: (CHEN, 2011)

Pontos importantes, além da banda proibida, devem ser levados em consideração na escolha do material semicondutor utilizado na fabricação de células solares, tais como o coeficiente de absorção de ondas eletromagnéticas (citado acima) do espectro que se deseja converter. A tabela 1 mostra dados dos materiais mais comuns utilizados na confecção de células solares.

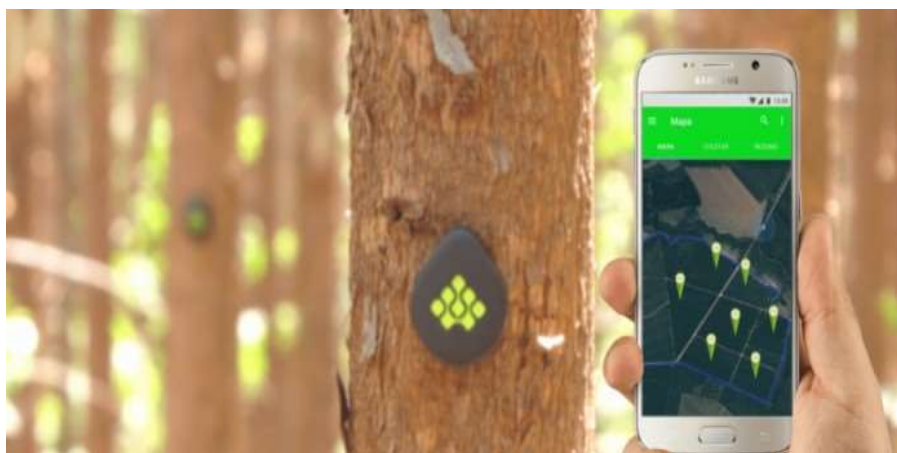
## 2.7. Aplicabilidade do dispositivo simulado

O dispositivo fotovoltaico simulado tem dimensões micrométricas, sua aplicabilidade pode ser feita em diversos dispositivos que exigem baixa potência de alimentação, tais como sensores de campo, e sensores médicos para monitoramento de pacientes.

Uma possível aplicação seria na alimentação de um dispositivo de monitoramento florestal (TUNES, 2018). Esse dispositivo é mostrado na figura 12.

Como exemplo de aplicação, a célula fotovoltaica poderia ser acoplada ao dispositivo de monitoramento florestal. Dessa forma, durante o dia, a célula fotovoltaica alimentaria o dispositivo de monitoramento e uma bateria acoplada ao mesmo. Durante a noite, a bateria, que foi alimentada pela célula fotovoltaica, alimentaria o dispositivo. Essa autonomia, aumentaria o tempo de vida útil da bateria e, conseqüentemente, a necessidade de troca da bateria seria prolongada.

Figura 12 - Dispositivo de monitoramento florestal no qual a célula fotovoltaica simulada poderia ser acoplada.



Fonte: (TUNES, 2018)

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão abordados diferentes materiais semicondutores, assim como recentes tecnologias de confecção de lâminas para a fabricação de transistores e outros dispositivos, tais como células solares.

Serão abordados também tipos de células solares comerciais e o princípio de funcionamento da junção PN, essencial para o entendimento completo de uma célula solar.

#### 3.1. Semicondutores

Semicondutores são materiais que apresentam uma resistividade situada entre a resistividade dos metais e a dos isolantes, quando encontrado na temperatura ambiente, podendo ter suas características elétricas alteradas, quando submetidos a mudanças em sua composição cristalina (MELLO e BIASI, 1975).

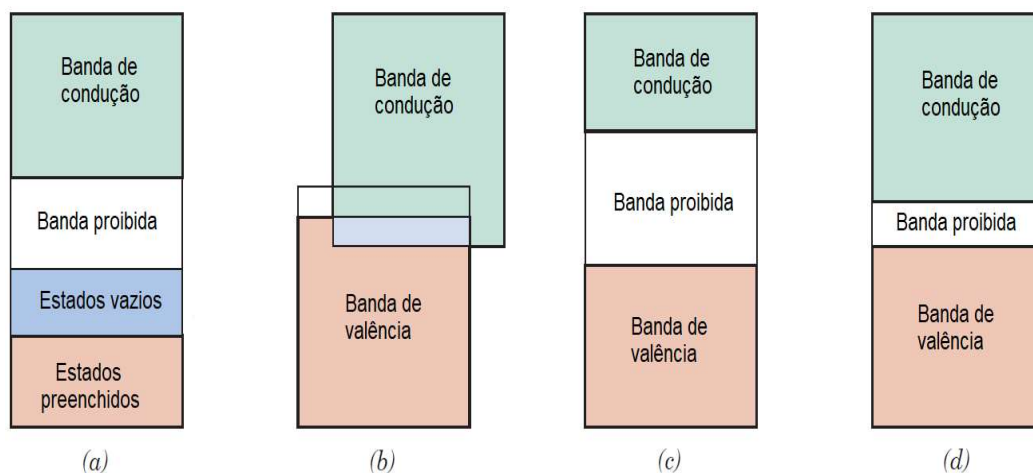
A principal diferença entre condutor, semicondutor e isolante é a energia necessária para fazer um elétron saltar da camada de valência para a camada de condução e, assim, tornar-se livre para se mover no material e gerar corrente elétrica.

A figura 13 mostra as quatro estruturas de bandas de elétron em sólidos a 0 Kelvin (K). Na figura 13a, a banda de valência é parcialmente preenchida com elétrons. Esse tipo de banda é encontrado em alguns metais como o cobre (CALLISTER JR., 2007; COLINGE e COLINGE, 2002).

Na figura 13b há uma sobreposição entre uma banda preenchida e uma banda vazia. Esse tipo de configuração é encontrado em metais como o Magnésio. Tanto a figura 13a quanto a 13b representam estruturas de bandas existente nos metais (CALLISTER JR., 2007).

Sendo assim, ao fornecer uma pequena quantidade de energia, os elétrons se tornam livres para moverem-se através do material (CALLISTER JR., 2007; COLINGE e COLINGE, 2002).

Figura 13 - Estrutura eletrônica de bandas a 0K.



Fonte: Adaptado de (CALLISTER JR., 2007)

As figuras 13c e 13d são similares. A única diferença é a magnitude da banda proibida. Portanto para que o elétron saia da camada de valência e salte para a camada de condução (tornando-se livre) é necessária uma determinada quantidade de energia. A figura 13c representa materiais isolantes que necessitam de uma energia maior para o deslocamento do elétron da camada de valência para a camada de condução. Entre esses materiais, tem-se o Oxido de Silício ( $\text{SiO}_2$ ) que precisa de 9 elétron-Volts (eV) e o diamante que precisa de 5,47 eV (COLINGE e COLINGE, 2002).

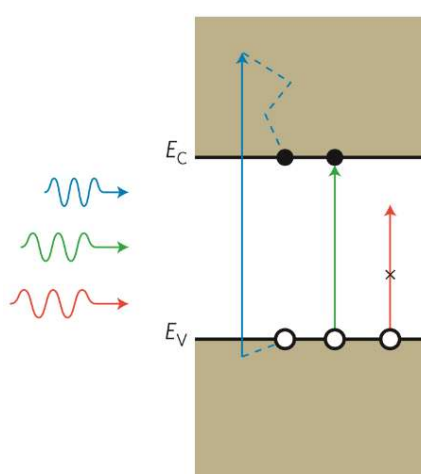
Já a figura 13d apresenta materiais semicondutores que precisam de uma energia menor para o salto do elétron para a camada de condução. Entre eles, tem-se o silício (o mais comum utilizado na confecção de dispositivos eletrônicos) que precisa de uma energia de 1,12 eV, e o germânio, que precisa de 0,67 eV (COLINGE e COLINGE, 2002).

Sendo assim, o conceito básico do efeito fotovoltaico trata da interação entre o pacote de energia contida na luz (Fóton) e o elétron da camada de valência. Essa interação ioniza o elétron, deixando-o livre para se movimentar ao longo do material. A ionização deixa uma lacuna na camada de valência, gerando, assim, o par elétron-lacuna (CHEN, 2011).



Para que essa ionização ocorra, a energia do Fóton deve ser suficiente para que um elétron da camada de valência consiga vencer a banda proibida e passe para a camada de condução. Se a energia for menor, não haverá geração. Caso a energia seja igual, ou maior, a geração ocorrerá (CHEN, 2011), como é possível visualizar na figura 14.

Figura 14 - Interação das ondas eletromagnéticas com o material semiconductor, a partir do conceito de diagramas de bandas de energia do semiconductor.



Fonte: Adaptado de (CHALABI e BRONGERSMA, 2013)

Entretanto, a simples geração de pares elétron-lacuna não produz corrente elétrica. É necessário que ocorra a movimentação dessas partículas, e essa movimentação é realizada pelo campo elétrico existente na junção pn da célula solar, sem que seja necessária a aplicação de uma tensão externa.

Os semicondutores podem ser divididos em intrínseco e extrínseco. O semicondutor intrínseco é aquele que não possui impurezas (átomos de outros elementos) em quantidades que alterem suas características elétricas, e a quantidade de portadores (elétrons e lacunas) é gerada pela agitação térmica do próprio cristal. Sendo assim, o número de elétrons é igual ao número de lacunas existente (MELLO e BIASI, 1975).

Para um cristal submetido à temperatura ambiente de 300 K (aproximadamente 25 °C), a quantidade de elétrons livres é de  $1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . Conforme altera-se a temperatura, a concentração de elétrons e lacunas também é alterada.

Diminuindo-se a temperatura, o número de pares elétron-lacunas decresce, e aumentando-se a temperatura, o número de pares elétron-lacunas aumenta (COLINGE e COLINGE, 2002).

Os semicondutores extrínsecos são aqueles nos quais, intencionalmente e controladamente, são adicionadas impurezas com a finalidade de alterar o comportamento elétrico do material. Eles podem ser do tipo  $p$  e do tipo  $n$ . O material do tipo  $p$  é aquele no qual é acrescentado um elemento da coluna 3A, tal como Boro (B), Gálio (Ga) e Índio (In) (COLINGE e COLINGE, 2002).

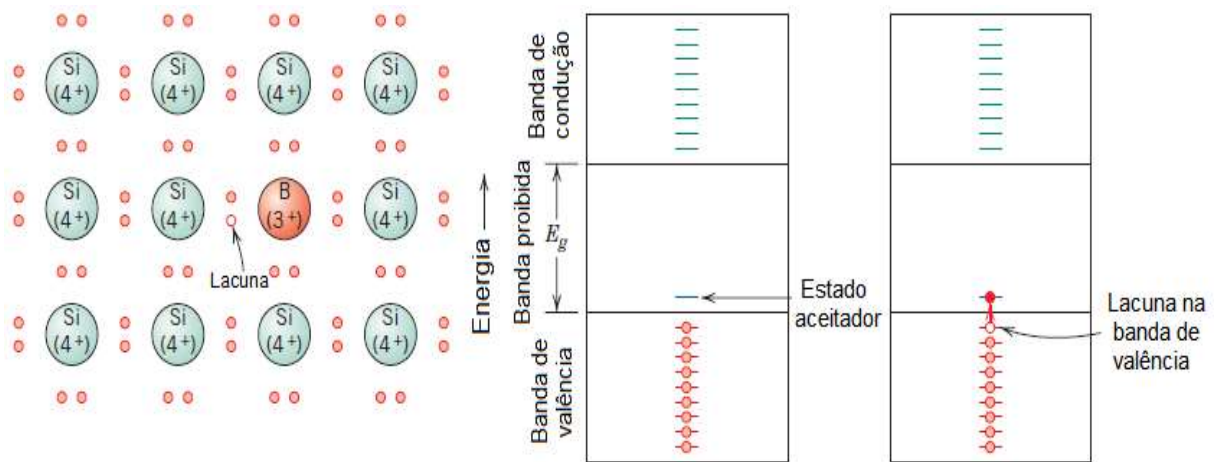
Esses elementos possuem 3 elétrons na camada de valência e são denominados elementos aceitadores. O acréscimo desse elemento faz com que fique faltando uma ligação covalente entre um átomo de silício e o elemento dopante, permitindo assim que apareça um espaço vazio (lacuna).

As lacunas acrescentadas no cristal através da dopagem encontram-se em um nível de energia diferente do nível energético da camada de valência. Essas lacunas estão localizadas em um nível alguns meV acima da parte superior da camada de valência, denominado estado aceitador ( $E_A$ ), que pode ser visto na figura 15 (COLINGE e COLINGE, 2002).

Na temperatura ambiente, os elétrons da camada de valência têm energia térmica suficiente para saltarem para o novo nível de energia introduzido pelo elemento aceitador, deixando uma lacuna na camada de valência. Essas recombinações entre as lacunas existentes no novo nível energético e os elétrons da camada de valência permitem que as lacunas geradas se comportem como portadores, influenciando na condução elétrica do semicondutor (COLINGE e COLINGE, 2002). Esse processo pode ser visto na figura 15.

Esse acréscimo também faz com que as lacunas se tornem os portadores majoritários, superando o número de elétrons.

Figura 15 – Novo estado energético de um material semiconductor dopado com Boro (estado aceitador em um semiconductor tipo p).



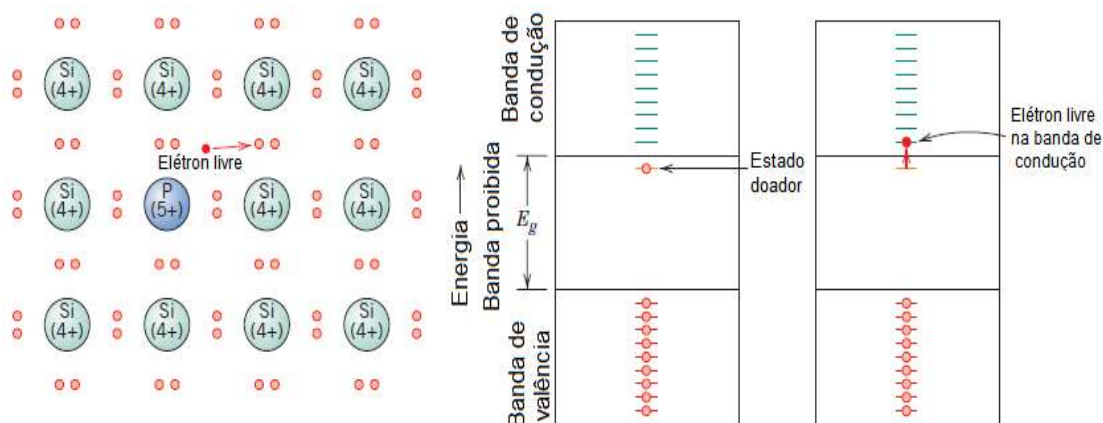
Fonte: Adaptado de (CALLISTER JR., 2007)

O semiconductor tipo  $n$  é aquele no qual é acrescentado um elemento da coluna 5A, tais como Fósforo (P), Arsênio (As) e Antimônio (Sb) (COLINGE e COLINGE, 2002). Esses elementos possuem 5 elétrons na camada de valência e são denominados elementos doadores. O acréscimo desse elemento faz com que um elétron fique sobrando na ligação covalente entre um átomo de silício e o elemento dopante, permitindo assim, que ele circule livremente pelo cristal.

Os elétrons acrescentados no cristal através da dopagem encontram-se em um nível de energia diferente do nível energético da camada de condução. Esses elétrons estão localizados em um nível alguns meV abaixo da parte inferior da camada de condução, o estado doador ( $E_D$ ), que pode ser visto na figura 16 (COLINGE e COLINGE, 2002).

Na temperatura ambiente, os elétrons que se encontram no estado doador têm energia térmica suficiente para saltarem para a camada de condução, deixando uma lacuna no novo nível de energia introduzido pelo dopante doador. Esse salto do elétron do estado doador para a camada de condução permite que o elétron se torne livre para se movimentar através do cristal semiconductor, influenciando na condução elétrica do mesmo (COLINGE e COLINGE, 2002). Esse processo pode ser visto na figura 16. Esse acréscimo também faz com que os elétrons se tornem os portadores majoritários, superando o número de lacunas.

Figura 16 - Novo estado energético de um material semiconductor dopado com Fósforo (estado doador em um semiconductor tipo n).



Fonte: Adaptado de (CALLISTER JR., 2007)

### 3.2. Junção PN

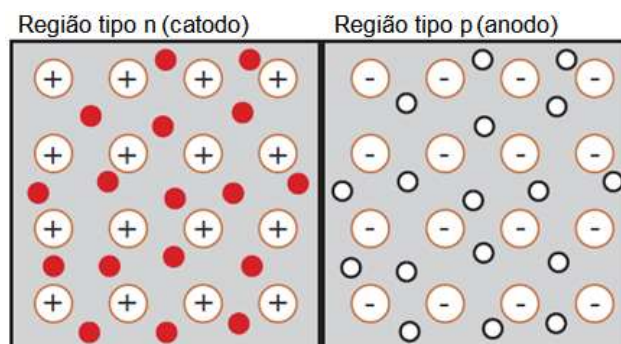
A junção pn é formada quando um semiconductor tipo  $p$  (dopado com elementos aceitadores) é unido com um outro semiconductor tipo  $n$  (dopado com elementos doadores), formando assim uma junção metalúrgica, como esquematizado na figura 17.

Essa junção pode ser formada por semicondutores iguais (por exemplo, silício tipo  $n$  e silício tipo  $p$ ), sendo chamada de homojunção, ou formada por semicondutores diferentes (por exemplo, germânio tipo  $n$  e silício tipo  $p$ ), sendo chamada de heterojunção (COLINGE e COLINGE, 2002).

Quando essa junção é formada, elétrons do cristal tipo  $n$ , onde são portadores majoritários, migram para o cristal tipo  $p$ . Essa movimentação é chamada de difusão. Esse fluxo é contínuo e cria cargas em ambos os lados da junção (cátions no cristal tipo  $n$ , e ânions no cristal tipo  $p$ ), essas cargas criam um campo elétrico que puxa os elétrons para o cristal tipo  $n$  e as lacunas para o cristal tipo  $p$ . A movimentação de elétrons provocada pela difusão (corrente de difusão), flui no sentido do catodo para o anodo, enquanto a movimentação de elétrons provocada pelo campo elétrico criado (corrente de deriva) flui no sentido contrário, do anodo para o catodo (JÄGER, ISABELLA, *et al.*, 2014).

Antes que apareça um equilíbrio entre as correntes, a quantidade de elétrons que passa para o cristal tipo  $p$ , por difusão, é maior que a quantidade de elétrons puxada pelo campo elétrico (JÄGER, ISABELLA, *et al.*, 2014).

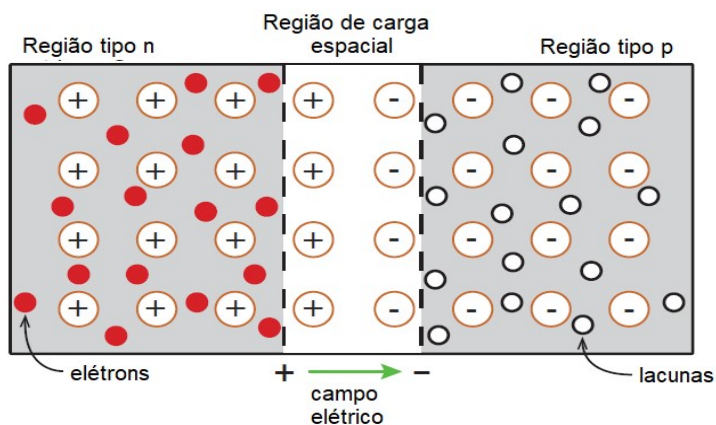
Figura 17 - Junção pn.



Fonte: Adaptado de (JÄGER, ISABELLA, *et al.*, 2014)

Dessa forma, o campo elétrico criado devido à difusão vai aumentando de intensidade, na medida em que a quantidade de cátions e ânions vai aumentando. Quando esse campo atinge um valor que contrabalança a movimentação de elétrons por difusão, o fluxo é interrompido, e há um equilíbrio entre a corrente de difusão e a corrente de deriva. Dessa forma, é criada a região de carga espacial, também conhecida como região de depleção, como mostrado na figura 18 (JÄGER, ISABELLA, *et al.*, 2014).

Figura 18 - Formação da carga espacial na junção pn.

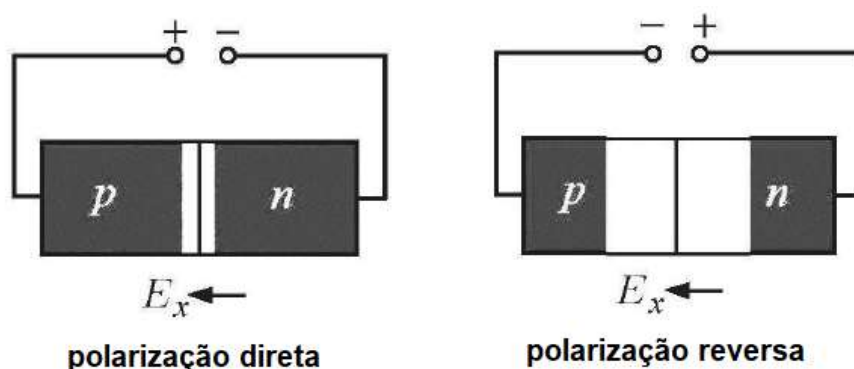


Fonte: Adaptado de (JÄGER, ISABELLA, *et al.*, 2014)

O dispositivo criado pode, então, ser polarizado direta ou reversamente. Quando é polarizado diretamente (potencial positivo no anodo, região tipo  $p$ ), essa polarização aplica um campo elétrico contrário ao campo elétrico da junção, diminuindo a região de carga espacial, permitindo, assim, o fluxo de corrente elétrica.

Quando é polarizado reversamente (potencial positivo no catodo, região tipo  $n$ ), o campo elétrico aplicado soma-se ao campo elétrico existente na junção, fazendo com que a região de carga espacial aumente, bloqueando a passagem de corrente elétrica (SZE e NG, 2007). Essas duas situações são vistas na figura 19.

Figura 19 - Polarização direta e reversa da junção pn em um diodo.



Fonte: Adaptado de (CHEN, 2011)

### 3.3. Principais tipos de células solares comerciais

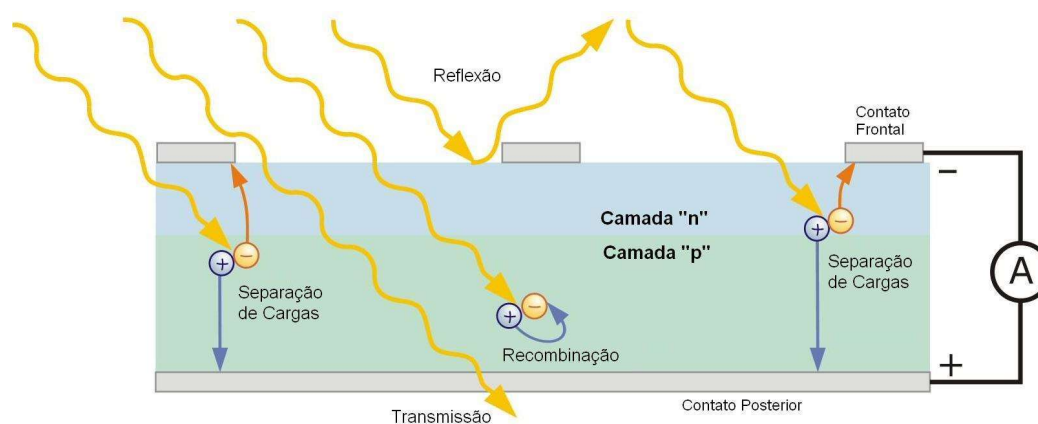
Na figura 20, é mostrada uma célula solar típica. Ela é formada por uma camada de silício dopada com elementos aceitadores (dopagem tipo  $p$ ), e uma camada mais fina dopada com elementos doadores (dopagem tipo  $n$ ) formando assim uma junção pn. A região do tipo  $p$  é levemente dopada e a região tipo  $n$  é altamente dopada (CHEN, 2011).

Sendo assim, ela é basicamente um diodo. Ela possui, tanto na parte superior quanto na parte inferior, contatos para a captação dos pares elétron-lacunas gerados, tornando possível a circulação de elétrons (corrente elétrica). Essa circulação é possível devido ao campo elétrico criado na junção pn que leva os elétrons para a região dopada com elementos doadores e as lacunas para a região dopada com elementos aceitadores (corrente de deriva).

Entretanto, para que exista a corrente de deriva, deve existir a corrente de difusão, que forma a região de carga espacial (camada de depleção).

As células solares comerciais são texturizadas para que as perdas dos reflexos da luz incidente sejam minimizadas. Possuem também uma camada antirreflexo na superfície superior com o mesmo objetivo. Na parte inferior, elas possuem uma camada feita de pasta de alumínio com a finalidade de reprimir a recombinação de portadores minoritários foto gerados, (MÜNZER, HOLDERMANN, *et al.*, 1999).

Figura 20 - Célula solar típica de silício.



Fonte: Adaptado de (QUASCHNING, 2009).

As células são associadas em série, para que a contribuição na produção de tensão de cada célula seja somada, aumentando assim a tensão total produzida.

Elas também são associadas em paralelo, para que, do mesmo jeito que a tensão, a corrente produzida por cada célula seja somada, aumentando, assim, a corrente total produzida. Esse é um dos motivos pelos quais as células solares são montadas no formato de matrizes e colocadas em módulos (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Atualmente, existem três tipos de classificação para as células solares: as células de primeira geração, que se baseiam na junção pn como é o caso da célula solar de silício cristalino (mono e policristalino). Esse tipo de célula é a dominante comercialmente (RAPHAEL, SILVA, *et al.*, 2018).



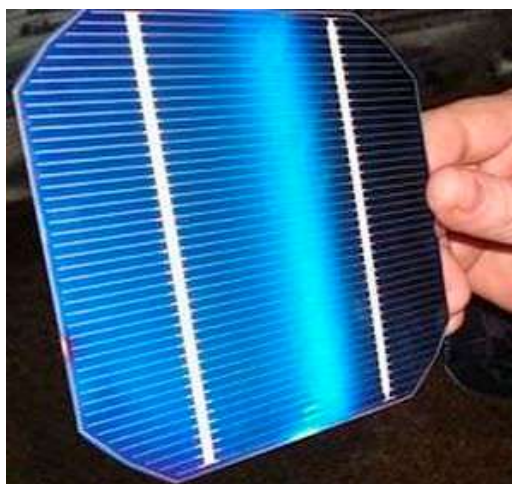
Há as células de segunda geração, que se baseiam em filmes finos. Essas células apresentam um baixo custo de fabricação. Todavia, apresentam um menor rendimento. E, por fim, as células de terceira geração que usam uma tecnologia baseadas em materiais orgânicos (RAPHAEL, SILVA, *et al.*, 2018).

### 3.3.1. Silício monocristalino

A célula solar de silício monocristalino, figura 21, possui uma espessura de 0,3 mm e um custo de produção maior que as demais (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Entretanto, é a célula, daquelas produzidas em larga escala, que apresenta o melhor rendimento na conversão fotovoltaica (entre 15 a 18%). Esse tipo de célula deve ser acondicionado em módulos, a fim de que tenham resistência mecânica necessária para aplicação nos mais diversos ambientes. Isso se faz necessário, pois são rígidas e, portanto, quebradiças (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Figura 21 - Célula solar feita de silício monocristalino.



Fonte: (MAHARISHI SOLAR TECHNOLOGY, 2009)

A célula solar feita de silício representou, em 2018, 80% do mercado fotovoltaico mundial. A célula solar mais utilizada é feita de silício cristalino (c-Si), e a obtenção desse material através do processo Czochralski (CZ) e do processo *float zone*, em 2018, representou 35% das células comerciais produzidas no mundo (GIBSON, 2019).



### 3.3.2. Filmes finos

A tecnologia de células de filmes finos se baseia na deposição de material sobre um substrato rígido ou flexível, utilizando uma menor quantidade de material semicondutor em sua fabricação. Baseia-se também em processos de fabricação mais simples e, conseqüentemente, mais baratos. Estudos mostram uma tendência de crescimento em sua eficiência (KOWSAR, RAHAMAN, *et al.*, 2019).

A deposição do material pode ser feita pelo método físico, deposição em fase de vapor, ou pelo método químico, deposição em fase líquida (SILVA, 2011). Esse tipo de células também utiliza menos energia durante o processo de fabricação. Dessa maneira, além de economizar na quantidade de material, os custos com a fabricação também são menores (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Outra vantagem é que esse tipo de material apresenta uma maior absorção da luz, gerando mais potência. Entretanto, esse tipo de célula tem uma degradação mais acelerada do que as células cristalinas (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

O termo filme fino é usado para indicar células como a célula de silício amorfo (a-Si), a célula CIGS (cobre, índio, gálio, selênio), a célula CdTe (telureto de cádmio) e a CZTS (sulfeto de cobre, zinco, estanho), além das células orgânicas, perovskita e também as células *tandem* (múltiplas junções) (RAPHAEL, SILVA, *et al.*, 2018).

O a-Si foi o primeiro material utilizado na fabricação de células de películas finas. Ele é um material não tóxico, abundante na crosta terrestre. Não necessita de altas temperaturas durante seu processo de fabricação, fato que permite a produção sobre materiais baratos e flexíveis. Pode ser depositado em grandes áreas e precisa de uma fina película para funcionar adequadamente, entre 1 a 2  $\mu\text{m}$  de espessura (CHOPRA, PAULSON e DUTTA, 2004).

Essa célula apresenta um rendimento comercial de cerca de 5% e, para células experimentais, já apresentou um rendimento de cerca de 10% (CHEN, 2011).

A célula de CdTe apresenta um excelente rendimento dentro da família das células de filmes finos. Em sua primeira versão, ela atingiu uma eficiência de cerca de 2% (KOWSAR, RAHAMAN, *et al.*, 2019).

Entretanto, dados publicados no final de 2018 demonstram uma eficiência de até 21% (GREEN, HISHIKAWA, *et al.*, 2019).

A fabricação desse tipo de célula apresenta dois problemas principais: o primeiro é seu custo de fabricação. Isso acontece uma vez que o telúrio (Te) é um material raro e, conseqüentemente, caro. O segundo é que o outro material utilizado em sua fabricação, o cádmio (Cd), é um elemento tóxico o que traz problemas durante sua fabricação (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

A célula de CZTS apresenta vantagens quando comparada à célula de CdTe. Ela tem um custo menor, na medida em que os materiais utilizados em sua fabricação (sulfeto de cobre, zinco, estanho) não são raros na crosta terrestre, e, adicionalmente, é uma liga que não apresenta toxicidade (SAHA, CHOWDHURY e HASSAN, 2016).

No entanto, sua desvantagem está na menor eficiência de conversão fotovoltaica, que é cerca de 10% (GREEN, HISHIKAWA, *et al.*, 2019). Uma das razões dessa menor eficiência é baixa tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$  – *Voltage open circuit*). Essa redução pode ser associada a defeitos existentes no material. Contudo, pesquisas realizadas recentemente mostraram progresso na diminuição desses defeitos através de aprimoramento no controle do recozimento da liga (PEHARZ, SATZINGER, *et al.*, 2017).

A célula de CIGS, assim como a célula de CdTe, apresenta um ótimo rendimento, cerca de 22,9% (GREEN, HISHIKAWA, *et al.*, 2019). Essa liga apresenta um coeficiente de absorção 100 vezes maior do que o silício. Por esse motivo, ele é capaz de absorver mais de 90% do infravermelho próximo à luz visível e a própria luz visível, mesmo com películas muito finas (2  $\mu\text{m}$  de espessura) (CHEN, 2011).

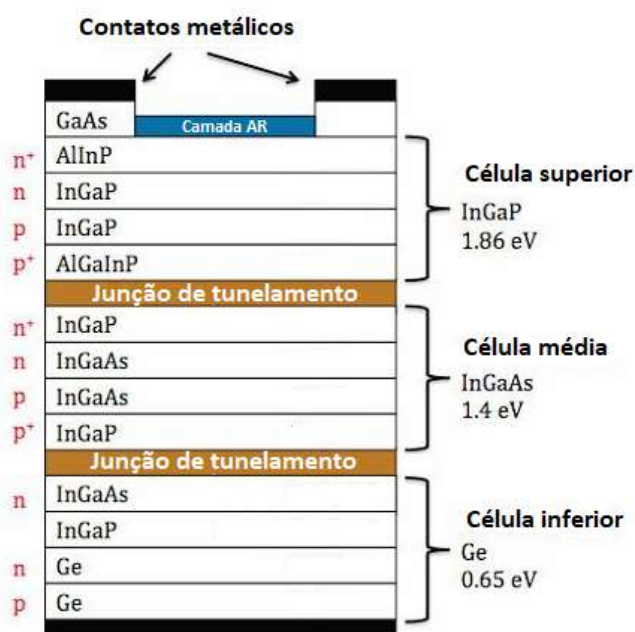
Apesar de seu alto rendimento, esse tipo de célula apresenta problemas em sua fabricação. Grande parte dos elementos que a constituem é abundante na crosta terrestre. Contudo, o Índio (In) e o Gálio (Ga) são elementos escassos. Além disso, existe o problema da toxicidade do Selênio (Se).

Apesar desse elemento não apresentar alta toxicidade, compostos formados por ele, tais como o seleneto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{Se}$ ), são extremamente tóxicos, portanto prejudiciais ao meio ambiente (KOWSAR, RAHAMAN, *et al.*, 2019).

A célula tandem baseia-se no aproveitamento de diferentes faixas do espectro solar por diferentes semicondutores através de suas heterojunções.

Sendo assim, sua construção é feita através da sobreposição de diversas camadas formando uma pilha de semicondutores (CHEN, 2011), como se pode observar na figura 22. Para que se tenha o melhor aproveitamento do espectro solar essas camadas, devem ser organizadas de acordo com suas diferenças de largura de banda proibida (HAMID, ABDELKADER, *et al.*, 2017).

Figura 22 - Célula tandem com diversas junções PN.



Fonte: Adaptado de (HISOUR, 2019)

Esse tipo de célula solar tem um ótimo rendimento. Seu rendimento atual varia de 12,7% a 38,8%, dependendo da ordem de colocação das camadas e dos tipos de semicondutores empregados em sua fabricação (GREEN, HISHIKAWA, *et al.*, 2019).

As células mais usadas são das famílias III-V da tabela periódica. Isso porque esses elementos possuem diferentes comportamentos óticos. Os principais problemas desse tipo de construção são a incompatibilidade das constantes da rede cristalina dos materiais empregados, e o alto custo de fabricação empregados para esse tipo de célula solar. (CHEN, 2011). Todavia, estudos mostram que essa incompatibilidade pode ser gerenciada e até eliminadas (HAMID, ABDELKADER, *et al.*, 2017)

A célula de perovskita vem ganhando destaque entre os outros tipos de células, já que, em pouco tempo de estudo (aproximadamente meia década), ela obteve um alto rendimento (RAPHAEL, SILVA, *et al.*, 2018).

Ela atingiu, em 2018, um rendimento de cerca de 20,9% (GREEN, HISHIKAWA, *et al.*, 2019). As primeiras células de perovskita que usam eletrólitos líquidos foram criadas em 2009 pelo grupo de Miyasaka (FAN, PENG, *et al.*, 2014).

Perovskita é um nome dado a um grupo de compostos, e sua fórmula geral é  $ABC_3$ , dos quais A e B são cátions e C é um ânion. Um exemplo é o composto  $CH_3NH_3PbCl_3$ , no qual A é representado por  $CH_3NH_3^+$ , B é representado por  $Pb^{2+}$ , e C é representado por Cl<sup>-</sup>. Apesar de ter uma estrutura simples, ela possui muitas variações (RAPHAEL, SILVA, *et al.*, 2018).

Esse composto apresenta um alto coeficiente de absorção, alta mobilidade dos portadores e um *bandgap* direto. Esses fatores, aliados ao baixo custo de fabricação, mostram que a célula de perovskita pode se tornar uma nova direção no desenvolvimento de células solares, e competir com células convencionais de silício (POESPAWATI, DZIKRI, *et al.*, 2018). A eficiência de cada, dividida por tipo, e seus fatores de forma (FF) podem ser visualizados na tabela 2. As eficiências de outros tipos de células podem ser encontradas em (GREEN, HISHIKAWA, *et al.*, 2019).

Tabela 2 - Eficiência de algumas células solares.

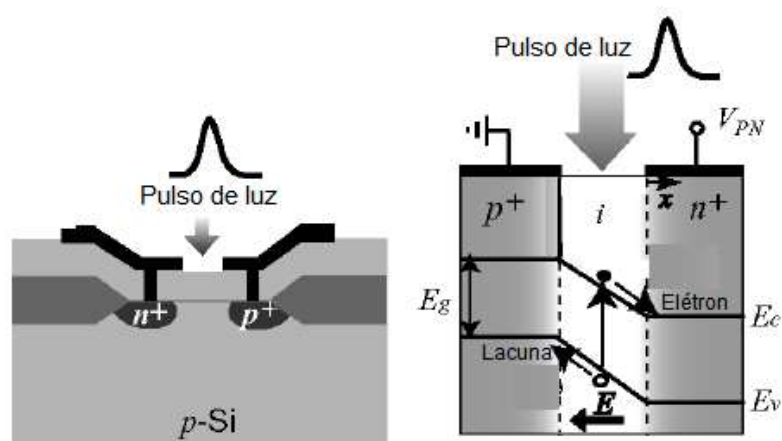
Tipo	Eficiência máxima (%)	FF (%)
<b>Cristalino</b>		
Si (cristalino)	26,7 ± 0,5	84,9
Si (policristalino)	22,3 ± 0,4	80,5
<b>Filmes finos</b>		
Si (amorfo)	10,2 ± 0,3	69,8
CdTe	21,0 ± 0,4	79,4
CZTS	10,0 ± 0,2	65,1
CIGS	22,9 ± 0,5	79,5
<b>Multijunções</b>		
GaAsP/Si	20,1 ± 1,3	80,3
InGaP/GaAs/InGaAs	37,9 ± 1,2	86,7
Perovskita	20,9 ± 0,7	74,5

Fonte: Adaptado de (GREEN, HISHIKAWA, *et al.*, 2019)

### 3.4. Diodo PIN

O diodo  $p-i-n$  pode ser definido como sendo um diodo comum (junção  $p-n$ ) que possui uma camada de material intrínseco entre a região tipo  $p$  e a região tipo  $n$  (figura 23). Na prática, a região intrínseca é levemente dopada e possui alta resistividade. Esse dispositivo possui alta tensão de ruptura quando polarizado reversamente, assim como uma baixa e constante capacitância (SZE e NG, 2007).

Figura 23 - Diodo  $p-i-n$  usado como foto-sensor.



Fonte: Adaptado de (KONNO, MATSUSHIMA, et al., 2004)

Esse tipo de dispositivo possui grande aplicação em circuitos de micro-ondas, rádio frequência, modulação e demodulação (ABIRI, SALEHI, et al., 2010). São utilizados também como foto-sensores com alta velocidade de detecção em determinados comprimentos de onda (AFZALIAN e FLANDRE, 2005).

Esse dispositivo pode ser usado como célula solar. Ele possui uma corrente no escuro (quando não está sob a incidência de luz) muito baixa (SOUZA, BULTEEL, et al., 2010), fato que melhora bastante o desempenho de uma célula solar, conforme equação 3.1, a qual define a corrente do diodo. Ela é composta por  $q$  (que é a carga elementar do elétron),  $k$  (que é a constante de Boltzmann),  $T$  (que é a temperatura absoluta em Kelvin (K)) e  $V$  (que é a tensão nos terminais da célula) (SZE e NG, 2007), além da corrente de saturação ( $I_s$ ).

A equação 3.1 também leva em consideração a corrente total gerada pela célula solar ( $I_{ph}$ ) para calcular a corrente fornecida pela mesma ( $I$ ).

$$I = I_S \left[ \exp^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right] - I_{ph} \quad (3.1)$$

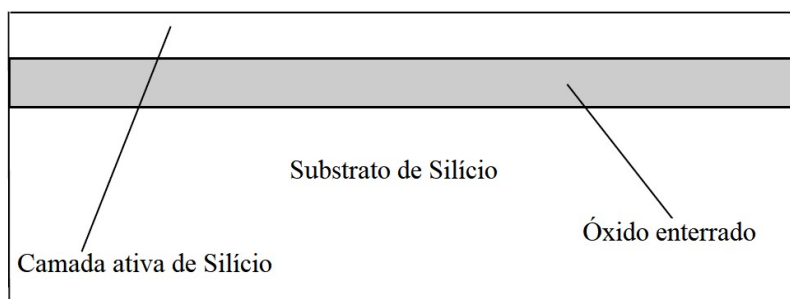
Pesquisas recentes mostram a utilização desse dispositivo dentro de uma lâmina com tecnologia SOI (*Silicon-On-Insulator*), com a finalidade de fornecer energia para circuitos que precisam de pouquíssima potência (ULP – *UltraLow-Power*), apresentando uma melhora na integração entre os circuitos alimentados e esse diodo usado como célula solar, na medida em que ambos encontram-se no mesmo encapsulamento (SILVA, DORIA e SOUZA, 2018).

### 3.5. A tecnologia SOI

Silício sobre isolante (SOI – *Silicon-On-Insulator*) é uma tecnologia que consiste na separação de um fino filme de silício do restante do substrato do dispositivo (figura 24). Essa tecnologia foi desenvolvida na década de 1960 para aplicação militar e espacial, já que para essas aplicações eram necessários dispositivos que tivessem uma tolerância maior à radiação.

Entretanto, devido ao pouco conhecimento sobre essa tecnologia, os processos de fabricações eram ineficientes e caros. Sendo assim, ela não foi adotada imediatamente (KR, SINGH, *et al.*, 2011).

Figura 24 - Estrutura de uma lâmina SOI.



Fonte: Adaptado de (REED e KNIGHTS, 2004)

A lâmina SOI permitiu, a partir do final dos anos 90, com um maior entendimento dos processos de fabricação e do comportamento dessa tecnologia, a fabricação de circuitos extremamente pequenos, os circuitos ULSI (*Ultra Large Scale Integration*), que permitiu a criação de diversos chips de pequeno tamanho com uma capacidade de processamento elevada (CELLER e CRISTOLOVEANU, 2003).

A lâmina SOI trouxe várias vantagens quando comparado à tecnologia convencional, tais como baixa corrente de fuga, capacitância reduzida, maior tolerância à radiação ionizante, melhor imunidade contra efeitos de canal curto, baixo consumo de potência e uma maior capacidade de redução de escala de circuitos (LIU, ZHU, *et al.*, 2019).

Atualmente, há diversos materiais usados na fabricação da lâmina SOI. Um tipo de lâminas fabricada é a SOS (*Silicon-On-Sapphire*), e o material utilizado na fabricação do isolante é a alumina ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  também chamada de safira). Além da diversidade de material, também existe diversas técnicas utilizadas na fabricação dessas lâminas, entre elas a mais utilizada é a técnica de fabricação denominada *Smart Cut*, que representa 90% das fabricações de lâminas SOI (COLINGE, 2004).

## 4. PARÂMETROS IMPORTANTES PARA A CÉLULA SOLAR

O conhecimento de alguns parâmetros na célula solar é essencial para se verificar o rendimento e o máximo de potência que o dispositivo pode gerar. Neste capítulo, são apresentados e definidos esses parâmetros em um dispositivo utilizado com célula fotovoltaica.

### 4.1. Eficiência quântica e rendimento

Durante o processo de geração de potência elétrica fotovoltaica, nem todo fóton incidente gerará par elétron-lacunas. Sempre existirá uma parcela de energia que não será aproveitada.

A eficiência quântica de uma célula solar pode ser definida como a razão entre o número de portadores (pares elétron-lacunas) produzidos e o número de fótons incidentes na célula. Existem dois tipos de eficiências que devem ser definidas, a externa e a interna. A eficiência quântica externa leva em consideração todos os fótons incidentes na superfície do material, já a eficiência quântica interna leva em consideração somente os fótons que não são refletidos pelo material (MARKVART e CASTAÑER, 2005).

Já o rendimento é a razão entre a potência que a célula fornece e a irradiância solar incidente, irradiância essa que deve ser multiplicada pela área de captação da célula. Ele pode ser calculado através da equação 4.1, na qual  $\eta$  é o rendimento (%),  $I_m$  é a corrente de trabalho da célula (ampère),  $V_m$  é a tensão de trabalho (volts),  $A$  é a área de captação luminosa ( $m^2$ ) e  $P_{in}$  é a irradiância incidente ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) (SZE e NG, 2007). Dessa maneira, pode-se calcular qual porcentagem é efetivamente aproveitada na transformação da irradiância em energia elétrica.

$$\eta = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{in} \cdot A} = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{in} \cdot A} \quad (4.1)$$



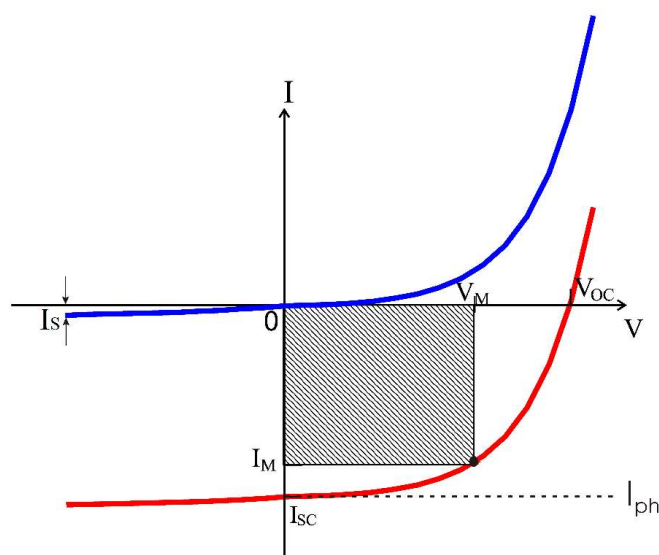
## 4.2. Curva característica I x V de uma célula solar

A melhor forma de verificar as características de geração de uma célula solar é através da curva da corrente foto gerada pela tensão foto gerada (curva I x V da figura 25). É através dela que se pode avaliar o rendimento, o fator de forma (FF), a corrente de curto-circuito, a corrente de trabalho, a tensão de circuito aberto e a tensão de trabalho.

Na figura 25, é possível ver a corrente foto gerada (curva vermelha), na qual também pode-se verificar os pontos de tensão e corrente nominais gerados pela célula (respectivamente  $V_M$  e  $I_M$ ).

É possível ver também a máxima corrente gerada pela célula ( $I_{sc}$ ), que é a corrente gerada considerando um curto-circuito na saída da célula e a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), que é a tensão gerada considerando-se um circuito aberto na saída da célula. Também é possível verificar o Fator de Forma (FF), que é a área hachurada. Esse fator de forma pode ser encontrado realizando-se a razão entre a potência de trabalho ( $V_M \times I_M$ ) e os extremos gerados pela célula solar ( $I_{sc} \times V_{oc}$ ).

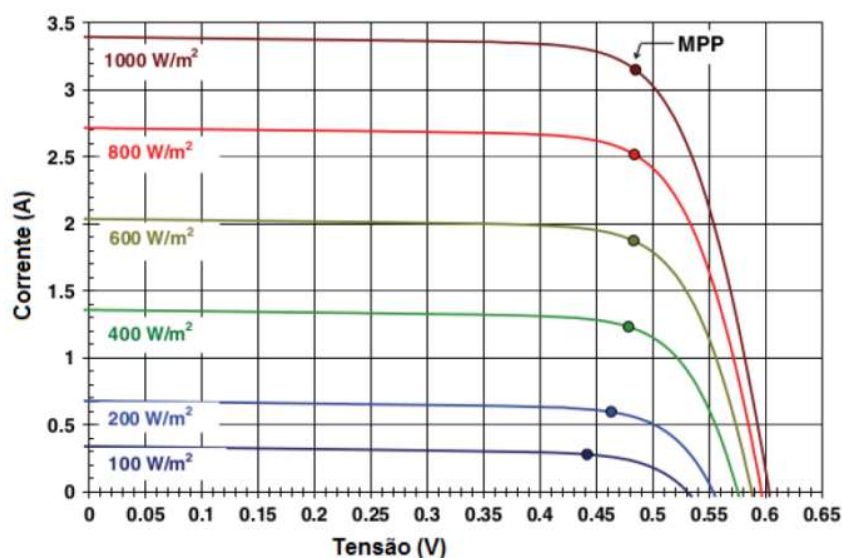
Figura 25 - Curva característica corrente por tensão foto gerada – I x V.



Fonte: adaptado de (CALDERÓN e AGUIRRE, 2017)

Para que seja possível um entendimento facilitado de que é um dispositivo gerador, o valor da corrente foto gerada foi colocado em módulo. Isso é realizado pois, por convenção, considera-se que dispositivos geradores têm seu comportamento plotado no primeiro quadrante do plano cartesiano (VILLALVA e GAZOLI, 2012). Dessa maneira, obtêm-se a curva da figura 26, na qual a corrente é positiva, caracterizando uma fonte geradora de potência.

Figura 26 - Curva característica I x V para diferentes irradiações.



Fonte: (HÄBERLIN, 2012)

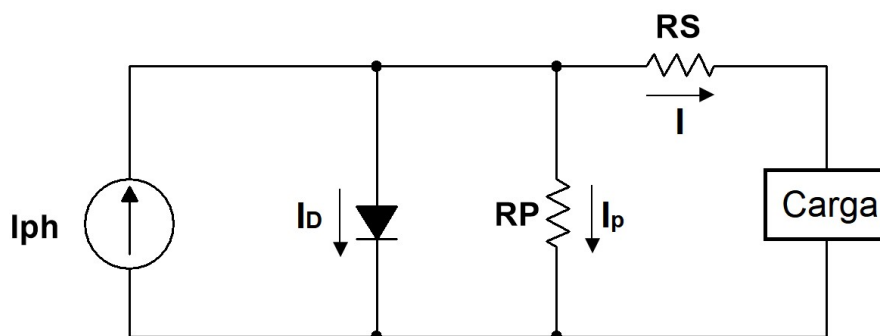
Ainda na figura 26, é possível visualizar a diminuição da máxima potência gerada (MPP) quando há mudanças na irradiação que o módulo solar recebe (CALDERÓN e AGUIRRE, 2017).

### 4.3. Circuito equivalente

Uma célula solar pode ser representada pelo circuito elétrico da figura 27, no qual  $I_{ph}$  é a corrente gerada pela célula,  $I_D$  é a corrente no diodo (a corrente de polarização direta da junção pn). A corrente de fuga, causada por impurezas próximas à junção pn (recombinações na região de depleção) e na borda das células solares, é representada por  $I_p$ .

A corrente  $I_p$  passa pela resistência paralela ao diodo representada por  $R_p$ .  $R_s$  representa a resistência do material semicondutor e dos contatos metálicos na célula solar, e  $I$  é corrente fornecida para a carga (MARKVART e CASTAÑER, 2005).

Figura 27 - Circuito equivalente da célula solar.



Fonte: Autor

Em uma célula ideal, as resistências mostradas na figura 27 não estariam presentes, e a equação 3.1 permitiria o cálculo da corrente (SZE e NG, 2007). Considerando as perdas nas resistências presentes no dispositivo real, a corrente pode ser calculada através da equação 4.2 (MARKVART e CASTAÑER, 2005).

$$I = I_s \left[ \exp \frac{V + IR_s}{kT} - 1 \right] - I_{ph} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (4.2)$$

#### 4.4. Corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto

A corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) é a corrente fornecida pela célula quando seus terminais estão curtos-circuitados, ou seja, quando a tensão de saída é zero. Pode-se visualizar na figura 28 que essa é a máxima corrente que o dispositivo consegue fornecer. Para um dispositivo ideal,  $I_{sc}$  pode ser considerada igual à corrente fotogerada ( $I_{ph}$ ), já que não é considerada a resistência em paralelo.

Já, para um dispositivo real, deve-se considerar a corrente  $I_p$ , apesar de pequena devido aos altos valores de  $R_p$  quando comparados à  $R_s$  (LOULOU, TURKESTAN, *et al.*, 2018).

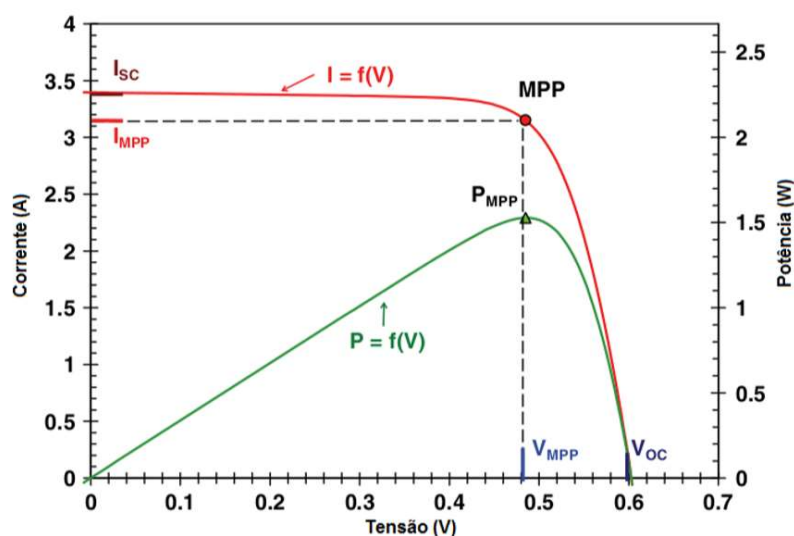
A tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) é a tensão que a célula solar fornece quando seus terminais estão em aberto, ou seja, a tensão fornecida quando a corrente na carga é zero, ou muito pequena. Como é possível observar na figura 28 é a máxima tensão que a célula solar consegue fornecer. A tensão de circuito aberto pode ser obtida através da equação 4.3 (SZE e NG, 2007).

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_D} + 1\right) \quad (4.3)$$

#### 4.5. Ponto de máxima potência

A máxima potência (MPP – *Maximum Power Point*) fornecida por uma célula solar é a máxima potência que a célula solar pode fornecer sob determinadas condições de temperatura e irradiância.

Figura 28 - Curva de corrente e potência em função da tensão para uma célula de 156 mm x 156 mm.



Fonte: Adaptado de (HÄBERLIN, 2012)

Ela pode ser obtida através do produto entre a tensão nominal gerada pela célula ( $V_{MPP}$ ), que é a tensão elétrica que a célula fornece no ponto de máxima potência, e a corrente nominal gerada pela mesma ( $I_{MPP}$ ), que é corrente elétrica que a célula fornece no ponto de máxima potência, ambos os valores em condições determinadas de temperatura e irradiância.

Na figura 28, é possível verificar alguns parâmetros de geração de uma célula solar. Na figura é possível ver a tensão nominal, a corrente nominal, a potência de trabalho, a tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) e a corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ). Os dois últimos parâmetros são obtidos nas condições na qual não existe carga ligada à célula ( $V_{OC}$ ), e carga ligada à célula com impedância próxima de zero ( $I_{SC}$ ), respectivamente.

Dessa forma, pode-se dizer que a maior potência entregue à carga encontra-se em algum ponto entre a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito. Esse ponto pode sofrer variações indesejadas quando há variações da carga, ou mesmo, quando sofrem algum tipo de diminuição da incidência solar como, por exemplo, sombreamento (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

O ponto de máxima potência é obtido através da equação 4.4, na qual  $P_m$  representa a máxima potência que a célula consegue fornecer ( $P_{MPP}$ ) (SZE e NG, 2007), como é possível verificar na figura 28.

$$P_m = I_m V_m = I_{SC} V_{OC} FF \quad (4.4)$$

#### 4.6. Fator de forma

O fator de forma ( $FF$  – *Fill Factor*) é definido como sendo a razão entre a máxima potência fornecida pela célula e o produto entre a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito (equação 4.5). Este fator também é diferente para cada material utilizado na fabricação das células solares (JÄGER, ISABELLA, *et al.*, 2014).

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{SC} V_{OC}} \quad (4.5)$$

Quanto mais próximo da unidade for o FF, melhor é a eficiência da conversão da célula solar. Esse fator é fortemente influenciado pela resistência ôhmica ( $R_s$ , que representa a resistência do material semicondutor e dos contatos metálicos na célula solar) e pela corrente de recombinação (KHANNA, MUELLER, *et al.*, 2013).

## 5. MODELAGEM EM AMBIENTE VIRTUAL

O dispositivo estudado foi simulado em ambiente virtual para que fosse possível alterar suas características construtivas (diferentes posições da camada de germânio e diferentes espessuras das camadas semicondutoras), sem que fosse necessária a fabricação de um dispositivo real.

Tabela 3 - Parâmetros iniciais para validação da simulação do dispositivo de referência.

Parâmetros	Valores iniciais
Temperatura	300 K (25 °C)
Comprimento de onda incidente	0,397 $\mu\text{m}$
Irradiância	100 mW/cm <sup>2</sup>
Massa de ar	AM1.5
Ângulo de incidência do feixe luminoso	90°

Fonte: Autor.

Os parâmetros iniciais (*set up*) que foram utilizados na programação em ambiente virtual são apresentados na tabela 3. Nela, é possível visualizar as características do feixe luminoso incidente durante a validação do dispositivo e a temperatura ambiente.

Na tabela 4, são apresentadas as medidas e as características de dopagem do dispositivo referência utilizado na validação do dispositivo em ambiente virtual.

Dessa forma, foi possível analisar o comportamento físico de diversos parâmetros, tais como geração de corrente quando a célula está sob iluminação e sem iluminação, características de recombinação superficial em heterojunções, resposta ao espectro luminoso e características internas do dispositivo. Tudo isso sem a necessidade de embutir custos de fabricação inviáveis à pesquisa.

Tabela 4 - Medidas e características do dispositivo de referência utilizado na validação.

Parâmetros	Valores iniciais
Espessura da camada de silício	0,8 $\mu\text{m}$
Comprimento da região de anodo	9 $\mu\text{m}$
Comprimento da região intrínseca	8 $\mu\text{m}$
Comprimento da região de catodo	9 $\mu\text{m}$
Espessura da camada de óxido ( $\text{SiO}_2$ ) de porta	0,28 $\mu\text{m}$
Comprimento do óxido ( $\text{SiO}_2$ ) de porta	26 $\mu\text{m}$
Espessura da camada de óxido ( $\text{SiO}_2$ ) enterrado	0,4 $\mu\text{m}$
Comprimento do óxido ( $\text{SiO}_2$ ) enterrado	26 $\mu\text{m}$
Espessura da camada antirreflexo ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	0,05 $\mu\text{m}$
Comprimento da camada antirreflexo ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	26 $\mu\text{m}$
Largura do dispositivo	14,5 mm
Concentração de dopantes na região de anodo	$1 \times 10^{20}$ átomos de Boro/ $\text{cm}^3$
Concentração de dopantes na região intrínseca	$1 \times 10^{15}$ átomos de Boro/ $\text{cm}^3$
Concentração de dopantes na região de catodo	$4 \times 10^{20}$ átomos de Arsênio/ $\text{cm}^3$

Fonte: Autor.

### 5.1. Software utilizado

O Atlas é um programa que se baseia na física dos semicondutores, e trabalha de forma preditiva, isto é, por meio de cálculos, prevê o comportamento elétrico de um dispositivo.

É possível, através desse programa, gerar diferentes condições de entrada, tais como diversas polarizações (direta ou reversa), e incidência de ondas eletromagnéticas, inclusive a incidência do espectro da luz visível. O Atlas é um módulo do pacote TCAD da Silvaco. Esse TCAD inclui outros módulos tais como: TonyPlot, Athena e DevEdit (SILVACO, INC., 2016).



Dessa forma, é possível obter gráficos que representam as condições de saída do dispositivo simulado, permitindo interpretar o seu comportamento e tendências e, assim, pode-se prever o desempenho de um dispositivo real.

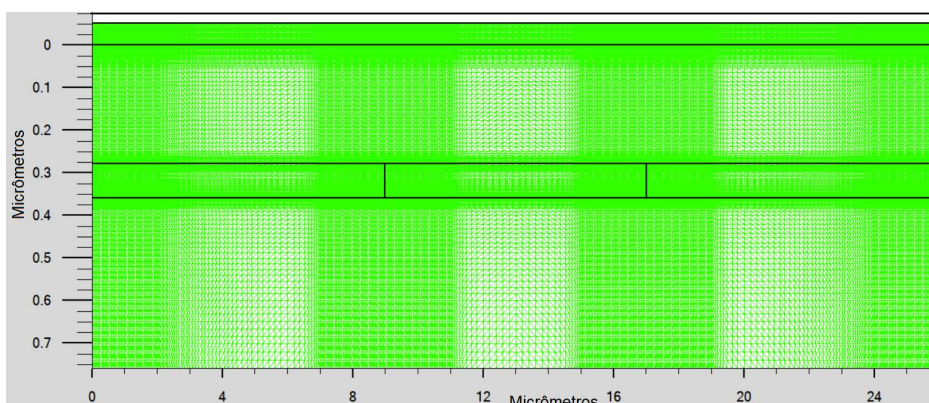
Ele utiliza uma grade bidimensional ou tridimensional, que consiste em um determinado número de pontos chamados nós. Ao se aplicar um conjunto de equações diferenciais, derivadas das leis de Maxwell, nesta grade, é possível simular o transporte de portadores através da estrutura (SILVACO, INC., 2016).

Isso implica que o desempenho elétrico de um dispositivo pode ser modelado tanto em corrente contínua (CC), como em corrente alternada (CA) (SILVACO, INC., 2016).

Para que seja possível realizar as simulações, o dispositivo deve ser discretizado em uma malha de pontos.

Essa malha é utilizada para resolver as equações fundamentais dos semicondutores em cada um dos cruzamentos entre linhas e colunas, os quais são denominados nós. A malha desenvolvida para a calibração do dispositivo simulado pode ser vista na figura 29, na qual é possível visualizar que a maior concentração de pontos se encontra na interface entre regiões com diferentes tipos de materiais e diferentes tipos de concentração de dopantes (dopagem), região em que se faz necessária uma maior precisão nos cálculos.

Figura 29 - Malha criada para a validação do dispositivo simulado.



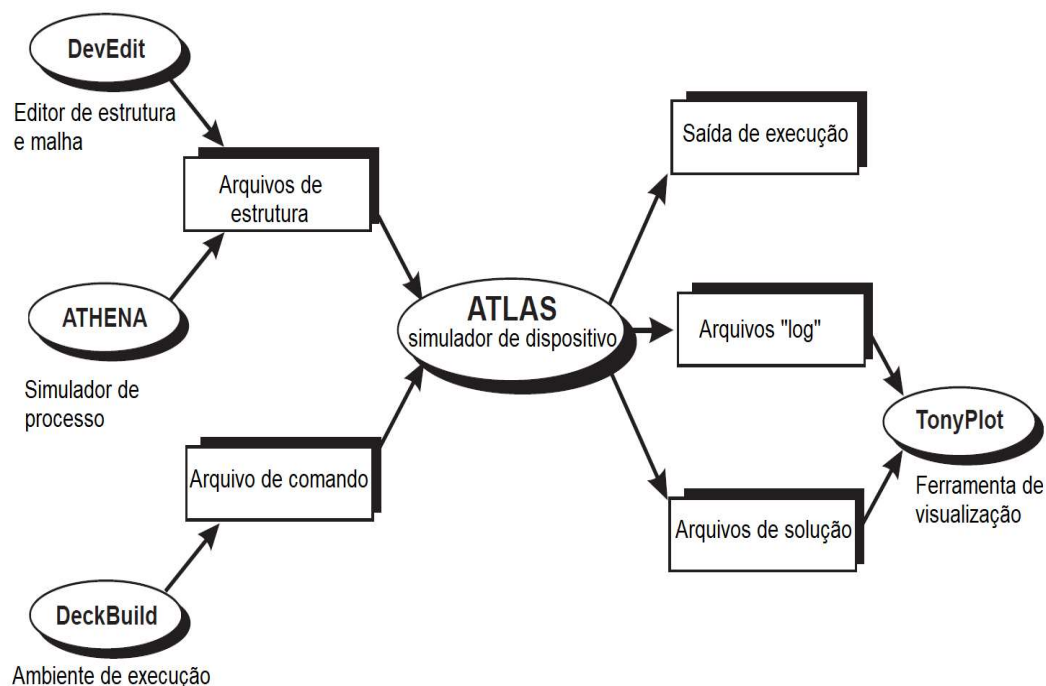
Fonte: Autor.

Simulações de dispositivos baseadas na física de semicondutores, tornaram-se importantes por dois motivos: o primeiro é que quase sempre é muito mais rápido e mais barato do que experimentos reais; e o segundo é que fornece informações que são difíceis de se medir, tais como mobilidade dos portadores, concentração dos portadores e campo elétrico através do dispositivo (SILVACO, INC., 2016).

Esse software gera arquivos de execução, que mostram o progresso e as mensagens de avisos e erros à medida que a simulação acontece. Ele gera também arquivos de saída com a extensão “.log”, que armazenam as informações das características elétricas (corrente, tensão, etc.) do dispositivo simulado.

Por fim, gera arquivos que permitem a visualização do dispositivo e de suas variáveis em um determinado ponto da polarização. Arquivos que podem ser visualizados no TonyPlot, que é o módulo de visualização de curvas e dispositivos do TCAD (SILVACO, INC., 2016). O fluxo de informações no software é apresentado na figura 30.

Figura 30 - Fluxograma de entradas e saídas do TCAD.



Fonte: Adaptado de (SILVACO, INC., 2016)

## 5.2. Modelos físicos utilizados

Modelos físicos são utilizados na simulação para prever o comportamento de dispositivos sob determinadas condições como, por exemplo, a interação entre o dispositivo e a luz, taxa de geração e recombinação, entre outros (SILVACO, INC., 2016).

Eles devem ser especificados na simulação e variam conforme a aplicação. Caso não sejam estipulados alguns modelos necessários na programação, a simulação não poderá prever o comportamento do dispositivo de forma fidedigna (SILVACO, INC., 2016).

Para que fosse realizada a calibração (validação), e as curvas geradas na simulação fossem próximas do dispositivo referência (dispositivo real), neste trabalho foram utilizados os seguintes modelos no simulador Atlas da Silvaco:

- a) **optr**: este é o modelo de recombinação ótica. Ele deve ser usado quando são simulados dispositivos que interagem com o espectro luminoso. Esse comando ativa o modelo geral de recombinação ótica (SILVACO, INC., 2016).
- b) **li**: este modelo foi utilizado para simular ganhos óticos e recombinações espontâneas em múltiplos poços quânticos na banda de valência (LI, DZURKO, *et al.*, 1992).
- c) **ubgn**: este modelo relaciona as alterações na banda proibida às massas efetiva da banda de condução e da banda de valência,  $m_C$  e  $m_V$ , e à constante dielétrica estática  $\epsilon_s$  (SILVACO, INC., 2016).
- d) **ccsmob**: este modelo é utilizado como modelo de mobilidade que inclui a dependência do dispositivo à temperatura (T), inclui a dependência à concentração de elementos dopantes (N) e à concentração de elétrons (n) no dispositivo e à interação entre os portadores de carga (DORKEL e LETURCQ, 1981). A aplicação desse modelo é importante quando o dispositivo tem altas concentrações de portadores (SILVACO, INC., 2016).

- e) **fldmob**: este é um modelo de degradação de mobilidade dependente do campo elétrico lateral (CAUGHEY e THOMAS, 1967). Ele é necessário para modelar qualquer tipo de efeito de velocidade de saturação (SILVACO, INC., 2016).
  
- f) **klaassen**: este modelo de mobilidade também inclui dependência à temperatura (T), à concentração de elétrons (n) (KLAASSEN, 1992a), e à concentração de dopantes (N) (KLAASSEN, 1992b). Todavia é aplicado para mobilidade separada dos portadores minoritários e majoritários. Esse modelo relaciona a mobilidade em baixo campo elétrico e é recomendado para dispositivos bipolares. O modelo Klaassen é responsável por uma gama mais ampla de efeitos no substrato dos dispositivos simulados (SILVACO, INC., 2016).
  
- g) **consrh**: modelo de recombinação que leva em consideração o tempo de vida dependente da concentração de dopantes (ROULSTON, ARORA e CHAMBERLAIN, 1982), ele é recomendado para dispositivos de silício (SILVACO, INC., 2016).
  
- h) **auger**: modelo utilizado em recombinações para silício altamente dopado e excitado (DZIEWIOR e SCHMID, 1977).
  
- i) **impact selberherr**: este modelo trabalha com ionização por impacto na região de carga espacial, ele depende da temperatura de trabalho do dispositivo simulado (SILVACO, INC., 2016).

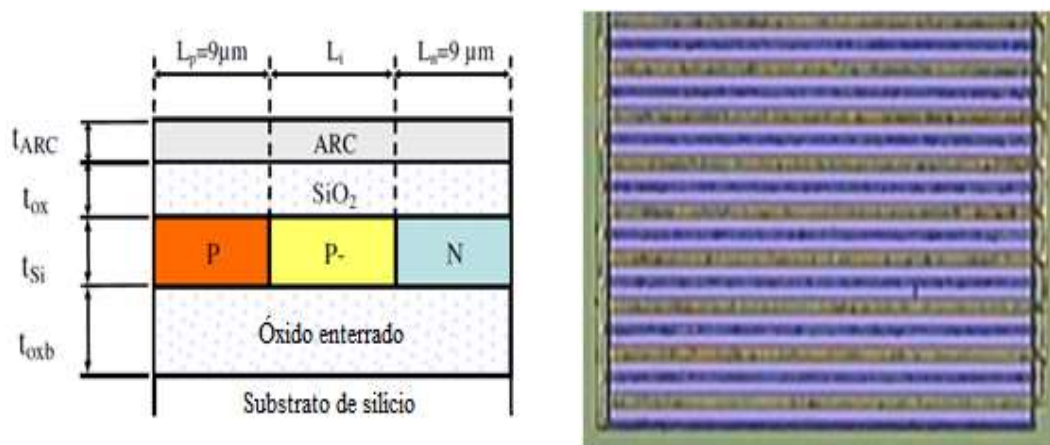
### 5.3. Validação

A validação das características do dispositivo simulado foi feita mediante os resultados experimentais de um dispositivo real. Neste trabalho, chamaremos este dispositivo como “dispositivo referência”. Esse dispositivo pode ser visto na figura 31.

Esse dispositivo é um diodo PIN construído entre duas camadas de óxido de silício. Acima da camada de óxido de silício existe uma camada de filme antirreflexo

( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A região de ânodo e a região de catodo têm  $9\ \mu\text{m}$  de comprimento, e são separadas por uma região de silício intrínseco com  $8\ \mu\text{m}$  de comprimento (SOUZA, BULTEEL, *et al.*, 2010).

Figura 31 - Dispositivo referência utilizado para validação da simulação.



Fonte: Adaptado de (SOUZA, BULTEEL, *et al.*, 2010)

A região de ânodo possui uma concentração de dopantes de  $1 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$  de boro, a região de catodo possui  $4 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$  de arsênio, e a região intrínseca possui a dopagem natural da lâmina, ou seja, uma concentração de  $1 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$  de boro. A região de silício tem uma espessura de  $80\ \text{nm}$  com uma largura de  $14,5\ \text{mm}$ . Toda a estrutura PIN citada encontra-se dentro de uma lâmina SOI (SOUZA, BULTEEL, *et al.*, 2010).

A estrutura desenvolvida no simulador para a calibração do dispositivo real pode ser vista na figura 32, na qual podem ser observadas, de cima para baixo, a camada antirreflexo ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), a primeira região de óxido de silício, a região ativa de silício (da esquerda para a direita temos a região de anodo, a região intrínseca e a região de catodo) e, finalmente, a região do óxido de silício enterrado.

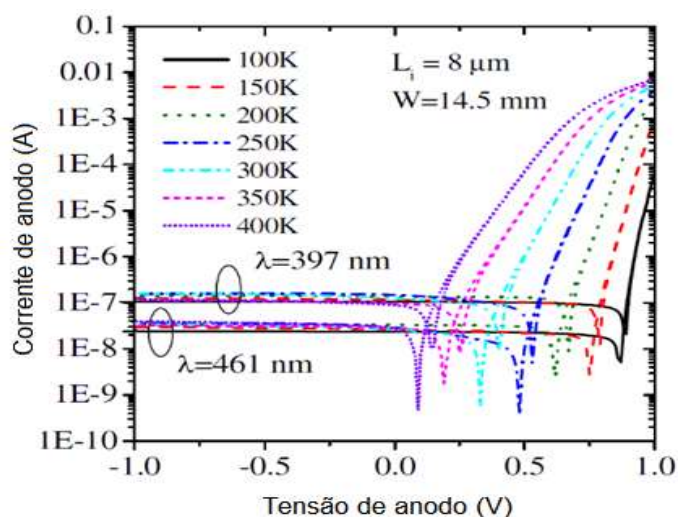
Figura 32 – Estrutura do dispositivo referência simulado.



Fonte: Autor.

A calibração do dispositivo foi realizada incidindo-se uma onda eletromagnética com um comprimento específico de 397 nm (comprimento de onda da região ultravioleta) (CHEN, 2011).

Figura 33 - Curvas do dispositivo referência.



Fonte: Adaptado de (SOUZA, BULTEEL, et al., 2010).

A calibração monocromática do dispositivo com um comprimento de onda pequeno foi realizada porque o dispositivo referência foi utilizado como um detector de luz azul e ultravioleta (SOUZA, BULTEEL, et al., 2010), como pode ser visto na figura 33.

Foi, então, necessário simular nas mesmas condições de iluminação, utilizando-se assim uma luz monocromática. As características do dispositivo utilizado como referência podem ser vistos na tabela 5. Os resultados obtidos nas medições do dispositivo referência pode ser vistos na figura 33 (SOUZA, BULTEEL, *et al.*, 2010).

Tabela 5 - Características do dispositivo referência.

Parâmetros	Valores iniciais
Comprimento de onda incidente	0,397 $\mu\text{m}$
Espessura da camada de silício	0,8 $\mu\text{m}$
Comprimento da região de anodo	9 $\mu\text{m}$
Comprimento da região intrínseca	8 $\mu\text{m}$
Comprimento da região de catodo	9 $\mu\text{m}$
Espessura da camada de óxido ( $\text{SiO}_2$ ) de porta	0,28 $\mu\text{m}$
Espessura da camada de óxido ( $\text{SiO}_2$ ) enterrado	0,4 $\mu\text{m}$
Espessura da camada antirreflexo ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	0,05 $\mu\text{m}$
Comprimento da camada antirreflexo ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	26 $\mu\text{m}$
Largura do dispositivo	14,5 mm
Concentração de dopantes na região de anodo	$1 \times 10^{20}$ átomos de Boro/ $\text{cm}^3$
Concentração de dopantes na região intrínseca	$1 \times 10^{15}$ átomos de Boro/ $\text{cm}^3$
Concentração de dopantes na região de catodo	$4 \times 10^{20}$ átomos de Arsênio/ $\text{cm}^3$

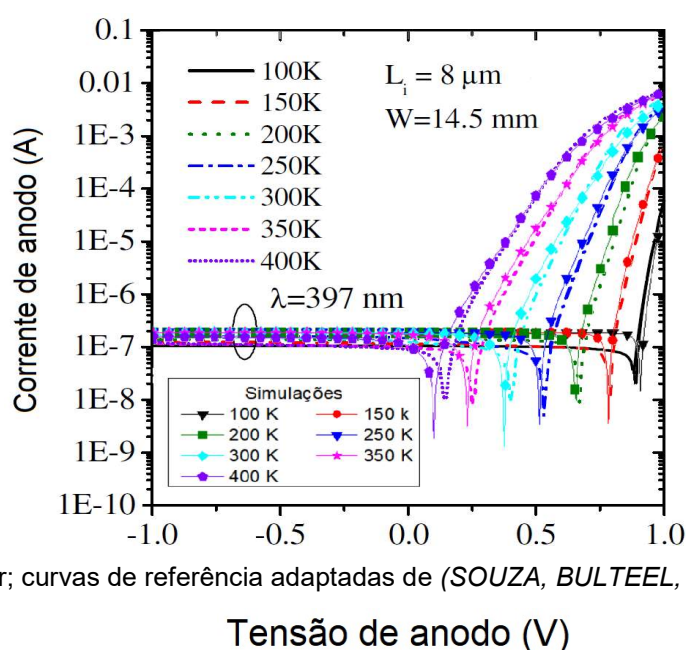
Fonte: (SOUZA, BULTEEL, *et al.*, 2010)

Após a criação da malha e a especificação das regiões do dispositivo (tipo de material, dimensões das regiões e concentração de dopantes nas regiões com semicondutores), aplicou-se uma tensão no anodo do diodo PIN criado, que variou de -1 Volt a 1 Volt, para verificar o comportamento da corrente elétrica gerada pela onda eletromagnética incidente, e compará-la com a curva obtida no dispositivo referência.

É possível observar na figura 34 que a curva simulada ficou muito próxima da curva de referência, o que demonstra que a calibração foi bem-sucedida, e o dispositivo simulado em ambiente virtual apresentou um comportamento elétrico muito próximo ao desejável.

Não foi possível calcular o erro devido à falta dos dados do dispositivo de referência. Por esse motivo, a aproximação foi feita apenas visualmente, através da figura 34.

Figura 34 - Curva de corrente x tensão para a calibração do dispositivo simulado.



Fonte: Autor; curvas de referência adaptadas de (SOUZA, BULTEEL, et al., 2010).

Após a calibração do dispositivo referência, iniciou-se o processo de mudanças físicas no dispositivo em ambiente virtual tais como, alteração da espessura do material semiconductor, condições de iluminação de monocromática para policromática e a inserção de um novo tipo de semiconductor no dispositivo com uma banda proibida diferente da banda do silício.

Dessa forma, após a calibração, o dispositivo simulado foi utilizado como célula solar, que é o principal objetivo desta pesquisa, com a intenção de aplicação na alimentação de circuitos de ultrabaixa potência (ULP – *Ultra Low Power*).

Dessa maneira, serão verificados diversos fatores que determinam a eficiência de uma célula solar e sua capacidade de fornecimento de energia elétrica.



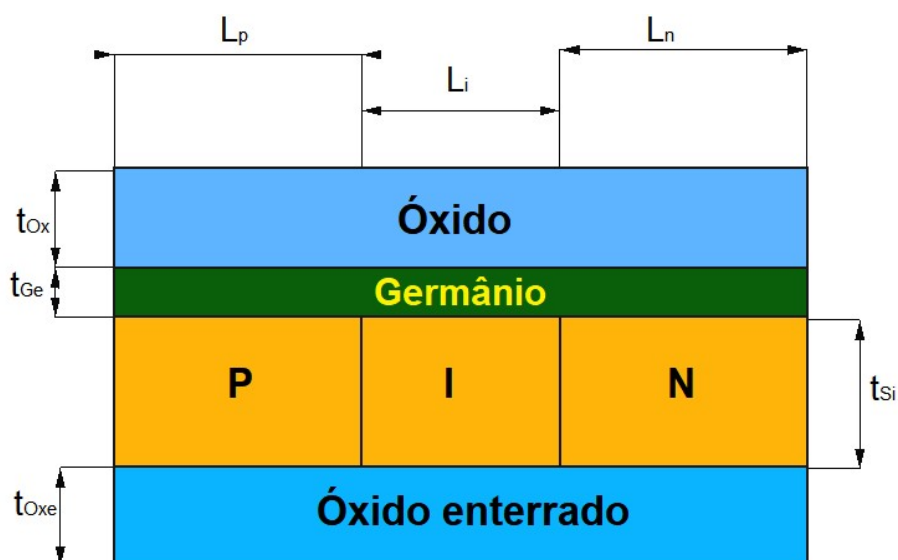
## 6. RESULTADOS OBTIDOS

Neste trabalho, construiu-se dois tipos de dispositivos e, entre esses, foram realizadas algumas variações nas espessuras das camadas semicondutoras, a fim de obter melhoras na absorção luminosa, aumento na geração de corrente elétrica e na conversão fotovoltaica, além de minimizar as perdas decorrentes da recombinação superficial na heterojunção.

Os dois principais dispositivos construídos são mostrados nas figuras 35 e 36, nas quais é possível verificar que a principal variação (alteração em relação ao dispositivo referência) foi o incremento de uma camada de germânio no dispositivo e a posição dessa camada. Um dos dispositivos tem uma camada de germânio por cima da camada de silício e o outro tem uma camada de germânio por baixo da camada de silício.

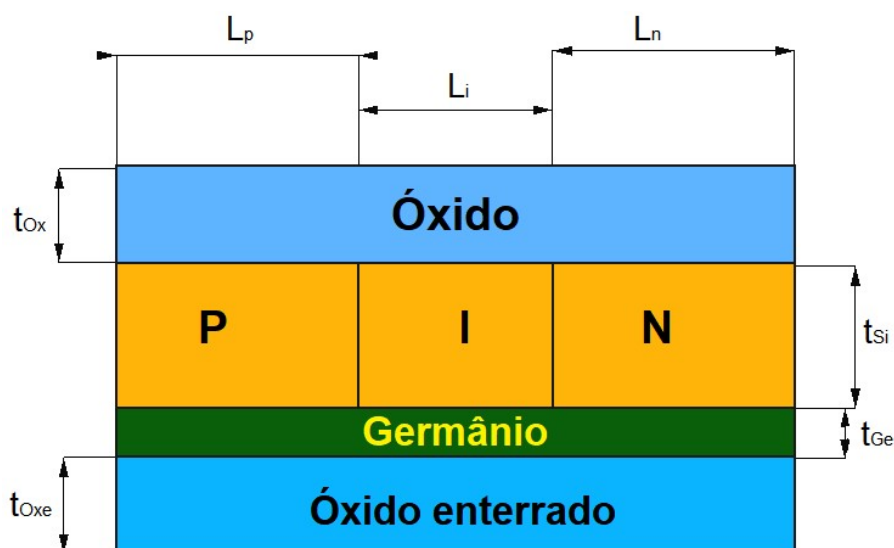
A espessura de germânio sempre será menor que a espessura de silício, já que uma das principais intenções da pesquisa é obter um rendimento superior ao do dispositivo de referência sem um incremento excessivo de germânio.

Figura 35 – Esquema de uma célula solar com germânio por cima de uma camada de silício.



Fonte: Autor.

Figura 36 – Esquema de uma célula solar com germânio por baixo de uma camada de silício.



Fonte: Autor.

Os dispositivos simulados, mostrados nas figuras 35 e 36, apresentam as seguintes medidas: comprimento da região de anodo ( $L_p$ ), comprimento da região de catodo ( $L_n$ ), comprimento da região intrínseca ( $L_i$ ), espessura do óxido de porta ( $t_{ox}$ ), espessura do óxido enterrado ( $t_{oxe}$ ), espessura da camada de silício ( $t_{si}$ ) e espessura da camada de germânio ( $t_{ge}$ ).

Tabela 6 – Dimensões de uma célula solar híbrida com 0,1  $\mu\text{m}$  de espessura de material semiconductor.

Medidas	Dispositivo 1 (germânio sobre silício)	Dispositivo 2 (germânio abaixo do silício)
$L_p$ ( $\mu\text{m}$ )	9	9
$L_n$ ( $\mu\text{m}$ )	9	9
$L_i$ ( $\mu\text{m}$ )	8	8
$t_{ox}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,28	0,28
$t_{oxe}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,4	0,4
$t_{si}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,08	0,08
$t_{ge}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,02	0,02

Fonte: Autor.

Foram simulados no total 10 dispositivos fotogeradores, sendo 5 com germânio sobre o silício, e 5 com germânio abaixo do silício. As tabelas de 6 a 10 mostram as dimensões dos dispositivos simulados.

Tabela 7 - Dimensões de uma célula solar híbrida com 1  $\mu\text{m}$  de espessura de material semiconductor.

Medidas	Dispositivo 3 (germânio sobre silício)	Dispositivo 4 (germânio abaixo do silício)
$L_p$ ( $\mu\text{m}$ )	9	9
$L_n$ ( $\mu\text{m}$ )	9	9
$L_i$ ( $\mu\text{m}$ )	8	8
$t_{\text{Ox}}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,28	0,28
$t_{\text{Oxe}}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,4	0,4
$t_{\text{Si}}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,8	0,8
$t_{\text{Ge}}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,2	0,2

Fonte: Autor.

Tabela 8 - Dimensões de uma célula solar híbrida com 8,02  $\mu\text{m}$  de espessura de material semiconductor.

Medidas	Dispositivo 5 (germânio sobre silício)	Dispositivo 6 (germânio abaixo do silício)
$L_p$ ( $\mu\text{m}$ )	9	9
$L_n$ ( $\mu\text{m}$ )	9	9
$L_i$ ( $\mu\text{m}$ )	8	8
$t_{\text{Ox}}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,28	0,28
$t_{\text{Oxe}}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,4	0,4
$t_{\text{Si}}$ ( $\mu\text{m}$ )	8	8
$t_{\text{Ge}}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,02	0,02

Fonte: Autor.

Tabela 9 - Dimensões de uma célula solar híbrida com 8,2  $\mu\text{m}$  de espessura de material semiconductor.

Medidas	Dispositivo 7 (germânio sobre silício)	Dispositivo 8 (germânio abaixo do silício)
$L_p$ ( $\mu\text{m}$ )	9	9
$L_n$ ( $\mu\text{m}$ )	9	9
$L_i$ ( $\mu\text{m}$ )	8	8
$t_{ox}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,28	0,28
$t_{Oxe}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,4	0,4
$t_{Si}$ ( $\mu\text{m}$ )	8	8
$t_{Ge}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,2	0,2

Fonte: Autor.

Tabela 10 - Dimensões de uma célula solar híbrida com 10  $\mu\text{m}$  de espessura de material semiconductor.

Medidas	Dispositivo 9 (germânio sobre silício)	Dispositivo 10 (germânio abaixo do silício)
$L_p$ ( $\mu\text{m}$ )	9	9
$L_n$ ( $\mu\text{m}$ )	9	9
$L_i$ ( $\mu\text{m}$ )	8	8
$t_{ox}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,28	0,28
$t_{Oxe}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,4	0,4
$t_{Si}$ ( $\mu\text{m}$ )	8	8
$t_{Ge}$ ( $\mu\text{m}$ )	2	2

Fonte: Autor.

Após a obtenção dos resultados da corrente fotogerada no dispositivo referência (a uma temperatura de 300 K), simulou-se, então, três dispositivos híbridos (heterojunção entre silício e germânio) com três espessuras diferentes de germânio (0,01  $\mu\text{m}$ , 0,02  $\mu\text{m}$  e 0,03  $\mu\text{m}$ ). Todavia, a espessura final da região semicondutora foi fixada em 0,1  $\mu\text{m}$ . Esse dispositivo foi chamado de dispositivo padrão de controle DPC.

A escolha de uma camada de espessura de  $0,02 \mu\text{m}$  de germânio, acima do silício, foi feita através da comparação dos resultados das três células híbridas, com germânio por cima da camada de silício, citadas no parágrafo anterior a uma célula feita puramente de germânio.

Para que isso fosse possível, foi simulada uma célula com as mesmas dimensões da estrutura de referência ( $0,01 \mu\text{m}$  de espessura de material semiconductor), entretanto, no lugar do silício, utilizou-se o germânio como material semiconductor, ou seja, foi simulado um dispositivo inteiramente de germânio com  $0,1 \mu\text{m}$  de espessura total de material semiconductor.

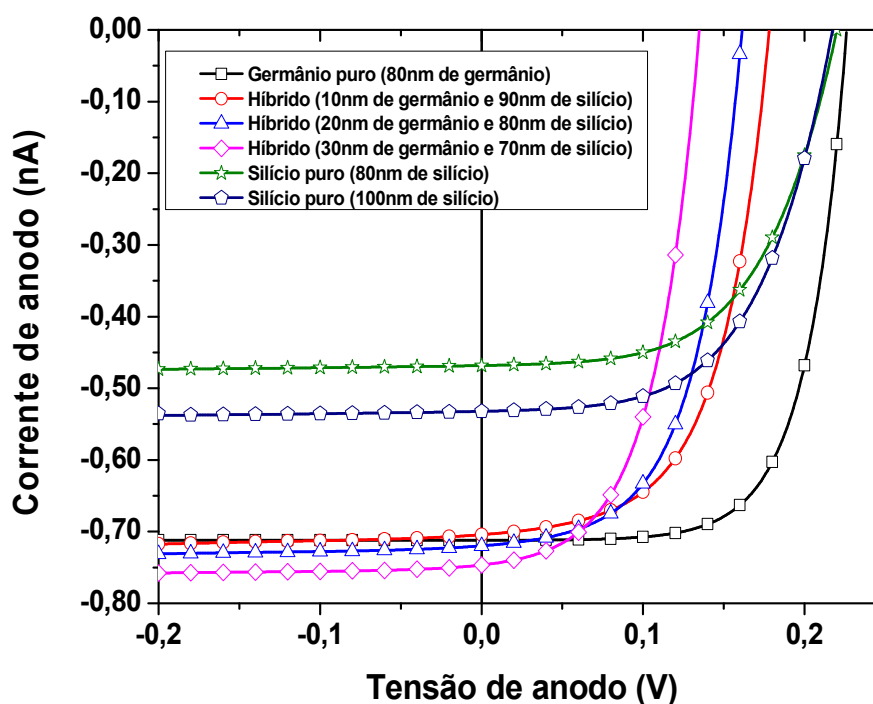
Através da comparação da potência gerada entre esse dispositivo puramente de germânio e os dispositivos híbridos de  $0,1 \mu\text{m}$  de espessura (germânio por cima do silício), chegou-se a uma conclusão de que o dispositivo híbrido com  $0,02 \mu\text{m}$  de germânio e  $0,08 \mu\text{m}$  de silício gerou uma potência próxima do dispositivo puramente de germânio.

Sendo assim, foi feita uma padronização da espessura para que fosse possível a verificação do ganho, caso ocorresse, para dispositivos com uma mesma quantidade de material semiconductor e, a partir das alterações nas espessuras de silício e germânio, pudéssemos escolher a melhor combinação de espessura para uma heterojunção.

A corrente fotogerada, mostrada na figura 37, é negativa (encontra-se no quarto quadrante do plano cartesiano), pois como a célula solar nada mais é que um diodo que fornece potência ao invés de absorvê-la, a corrente gerada flui do anodo para o catodo, ou seja, a corrente sai do anodo, passa pelo circuito acoplado à célula e chega ao catodo.

No sentido convencional de circulação de corrente, dispositivo funcionando como diodo, a corrente flui do catodo para o anodo, ou seja, a corrente sai do catodo, passa pelo circuito acoplado ao diodo e chega ao anodo.

Figura 37 - Corrente fotogerada em função da tensão comparando diferentes dispositivos puros e híbridos (germânio por cima do silício) à 300 K.



Fonte: Autor.

Dessa forma, obtivemos as seguintes combinações de materiais semicondutores na célula solar: célula 1 – 0,09  $\mu\text{m}$  de silício e 0,01  $\mu\text{m}$  de germânio; célula 2 – 0,08  $\mu\text{m}$  de silício e 0,02  $\mu\text{m}$  de germânio; e célula 3 – 0,07  $\mu\text{m}$  de silício e 0,03  $\mu\text{m}$  de germânio. Os resultados dessas simulações podem ser vistos na figura 37.

É possível observar (fig. 37) que os dispositivos híbridos tiveram uma pequena melhora na corrente fotogerada quando comparados ao dispositivo inteiramente de germânio, esse incremento pode ser explicado pelo acréscimo de material semicondutor.

No dispositivo de germânio puro, temos 0,08  $\mu\text{m}$  de espessura de material semicondutor e para os dispositivos híbridos temos 0,1  $\mu\text{m}$  de espessura de material semicondutor, ou seja, temos um acréscimo de 0,02  $\mu\text{m}$  de material semicondutor. Portanto, com uma espessura maior de material semicondutor, temos uma corrente fotogerada maior.

Entretanto, houve uma diminuição na tensão de circuito aberto, pois devido ao incremento de uma região de carga espacial (junção entre o germânio e o silício) ocorreu um incremento na corrente  $I_D$ . Como o  $V_{OC}$  depende do logaritmo natural, e esse logaritmo depende inversamente da corrente  $I_D$ , obtivemos, então, uma menor tensão de circuito aberto.

Assim, optou-se por utilizar uma camada de germânio de  $0,02 \mu\text{m}$  de espessura no DPC ( $0,1 \mu\text{m}$  de material semiconductor), uma vez que o dispositivo híbrido, com essa configuração, apresentou um ganho intermediário na corrente fotogerada e uma perda intermediária na tensão de circuito aberto.

Dessa forma, alguns dos dispositivos simulados posteriormente seguiram a mesma proporção de 20% de germânio e 80% de silício (dispositivos 1, 2, 3, 4, 9 e 10). Houve também variações que não seguiram a proporção de 20% de germânio, gerando os dispositivos 5, 6, 7 e 8. Essas medidas podem ser verificadas nas tabelas de 6 a 10.

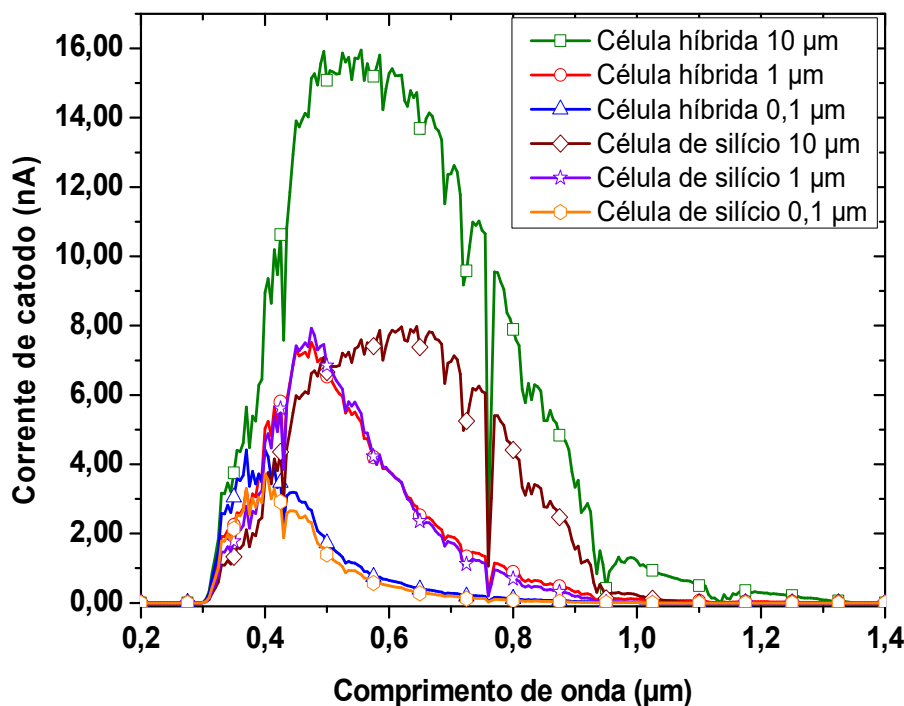
### **6.1. Resposta ao espectro solar**

Como o objetivo do dispositivo era ser usado como célula solar, o DPC não foi incluído nas análises posteriores, uma vez que o dispositivo com espessuras nanométricas não seria capaz de absorver a maior parte do espectro luminoso analisado ( $0,2 \mu\text{m}$  até  $1,4 \mu\text{m}$ ). Dessa forma, sua aplicação como célula solar seria ineficiente.

Essa baixa absorção espectral pode ser visualizada na figura 38, a qual demonstra que o dispositivo de  $0,1 \mu\text{m}$  tem um pico de absorção em  $400 \text{ nm}$  (nanômetro) e, após esse comprimento de onda ( $\lambda$ ), a absorção cai rapidamente.

Para os dispositivos de  $1$  e  $10 \mu\text{m}$  temos um aproveitamento maior do espectro luminoso estudado. Esse incremento acontece porque existe uma relação entre a absorção de determinados comprimentos de ondas e a espessura do material semiconductor (GREEN, 2008). Como mencionado na seção 2.6.

Figura 38 – Corrente do catodo em função do comprimento de onda para de células solares de silício e híbridas.



Fonte: Autor.

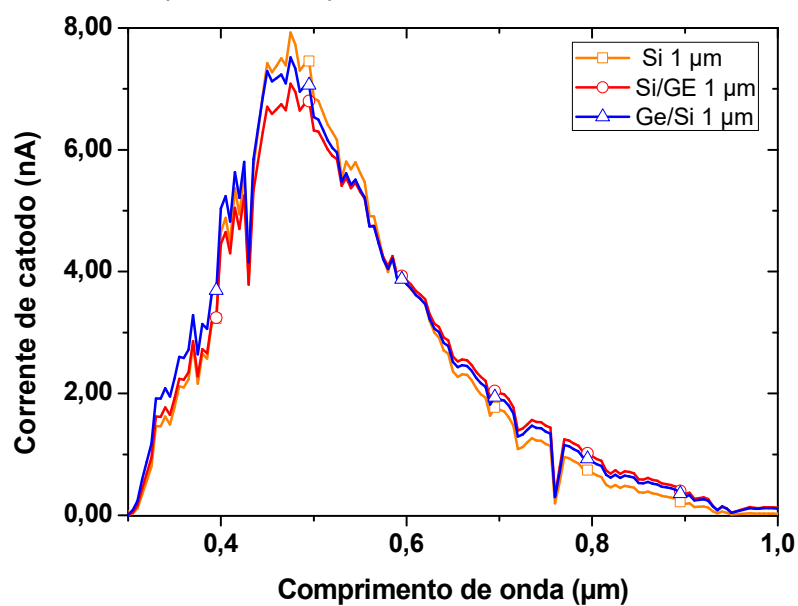
As figuras 39, 40, 41 e 42 apresentam as absorções espectrais dos dispositivos com a camada de germânio em comparação aos dispositivos puramente de silício.

Na figura 39, temos os dispositivos com 1 μm de espessura total de semicondutor. Nela, é possível visualizar que há um pico de absorção onde o dispositivo de silício tem um melhor rendimento (entre 0,45 e 0,6 μm). No restante do espectro, os dispositivos híbridos têm uma melhor absorção espectral. Entretanto, a diferença é muito pequena. Por conta dessa pequena diferença, os comportamentos das respostas espectrais estão muito próximos, dificultando um pouco a visualização na figura 39.

Pela figura 40, observa-se que essa diferença de geração de corrente torna-se maior. Isso, porque o volume de material semicondutor é maior e, portanto, mais fótons são absorvidos pelos materiais, pois quanto maior a espessura do semicondutor, mais fótons são absorvidos. Todavia, o coeficiente de absorção cai com o aumento da profundidade de penetração da onda eletromagnética.

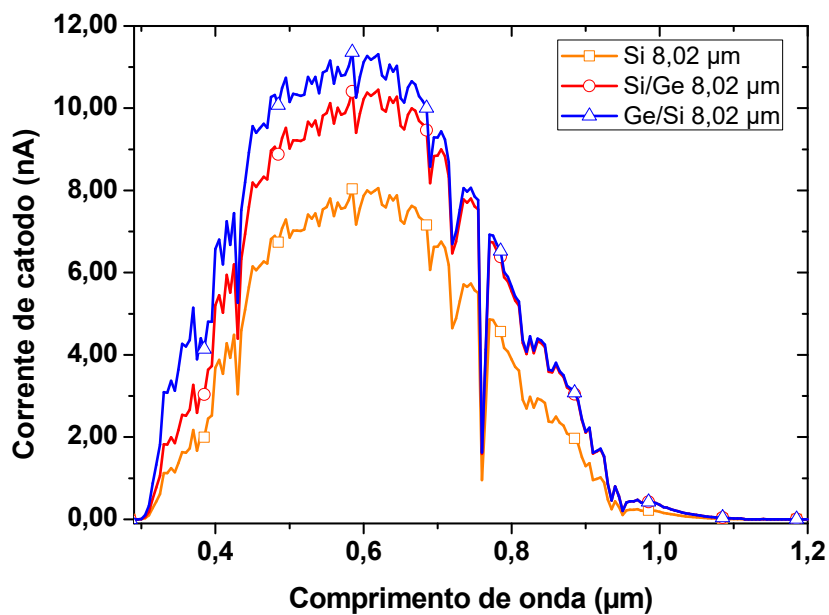


Figura 39 - Corrente do catodo em função do comprimento de onda para de células solares com espessura de 1  $\mu\text{m}$  de material semiconductor.



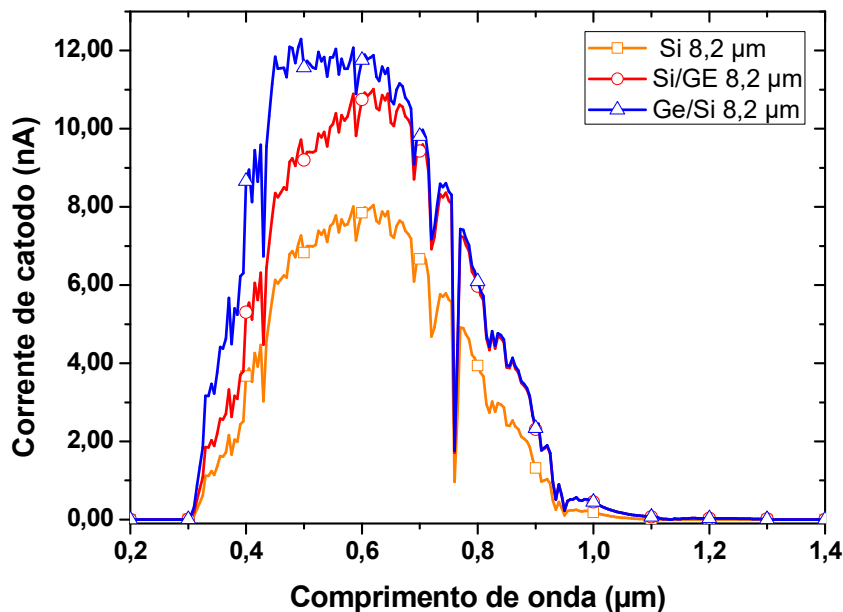
Fonte: Autor.

Figura 40 - Corrente do catodo em função do comprimento de onda para de células solares com espessura de 8,02  $\mu\text{m}$  de material semiconductor.



Fonte: Autor.

Figura 41 - Corrente do catodo em função do comprimento de onda para de células solares com espessura de 8,2  $\mu\text{m}$  de material semiconductor.



Fonte: Autor.

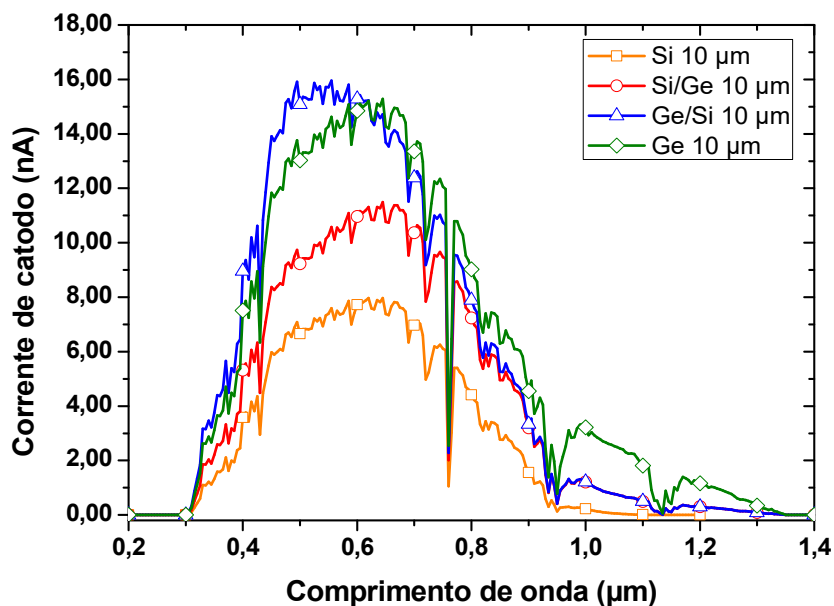
Pela figura 41, constatou-se que o incremento na espessura da camada de germânio da ordem de 10 vezes, trouxe uma melhora na absorção espectral e, conseqüentemente, um incremento na fotogeração de corrente.

Isso devido ao comportamento do germânio em relação ao espectro luminoso, que apresenta um melhor resultado quando comparado com o silício. Isto é, uma maior capacidade de absorção de fótons que o germânio apresenta, em uma profundidade menor, quando comparado ao silício.

Através da figura 42, é possível observar a geração de corrente para dispositivos híbridos, inteiramente de silício e inteiramente de germânio, todos com 10  $\mu\text{m}$  de espessura total de material semiconductor.

Constatou-se que o dispositivo inteiramente de germânio não teve um incremento significativo na absorção espectral. Isso acontece porque a maior parte do espectro estudado (0,2 a 1,4  $\mu\text{m}$ ) é absorvido até uma profundidade de aproximadamente 2  $\mu\text{m}$ .

Figura 42 - Corrente do catodo em função do comprimento de onda para de células solares com espessura de 10  $\mu\text{m}$  de material semiconductor.



Fonte: Autor.

Sendo assim, a maior parte da energia contida na faixa espectral é absorvida até 2  $\mu\text{m}$  de profundidade, outra parte consegue penetrar em uma profundidade maior que 2  $\mu\text{m}$ , entretanto essa segunda parte não influenciará significativamente na geração de potência.

É possível observar, na figura 42, que há um pico de absorção no dispositivo híbrido até o comprimento de onda de 0,5  $\mu\text{m}$  maior do que no dispositivo inteiramente de germânio. Os gráficos da absorção das figuras 40, 41 e 42 demonstram que uma camada de germânio por cima da camada de silício trouxe um incremento significativo na absorção espectral, já que os picos de geração, para os dispositivos híbridos com uma camada de silício de 8  $\mu\text{m}$ , foram de 11, 12 e 16 nA, para as camadas de 0,02, 0,2 e 2  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

Já, para o dispositivo com a camada de germânio abaixo do silício, os picos de geração foram de 10, 11 e 11 nA para os mesmos dispositivos. Portanto, um incremento menor que o dispositivo anterior.

Esse incremento em relação ao dispositivo inteiramente de silício é explicado pelo melhor coeficiente de absorção que o germânio tem quando comparado ao coeficiente do silício. Sendo assim, o germânio consegue absorver melhor o espectro estudado, gerando uma quantidade maior de energia do que o silício.

Além desse fator, o germânio tem uma melhor mobilidade de portadores do que o silício (SZE e NG, 2007), fator que também contribui para a melhora na corrente fotogerada, já que, devido a essa melhor mobilidade, os elétrons e as lacunas conseguem se movimentar mais rapidamente na rede cristalina do semiconductor.

## 6.2. Profundidade de penetração luminosa

A capacidade de penetração da luz em determinados materiais é um ponto importante para determinar a aplicabilidade de um material semiconductor e a espessura que o material deve ter para determinadas faixas do espectro luminoso.

Fótons induzem transições eletrônicas entre bandas, que determinam o intervalo de energia de cada tipo de semiconductor. Essa capacidade ótica de transformação de energia luminosa em alteração da condição do elétron, ou seja, a capacidade que a energia contida na luz (fóton) tem de interagir com o elétron e permitir que o elétron saia da camada de valência (tornando-se livre para circular na estrutura cristalina de um material), é caracterizada pelo índice de refração complexo (SZE e NG, 2007), que é dado pela equação 6.1.

$$\bar{n} = n_r - jk_e \quad (6.1)$$

A parte real do índice de refração complexo, representada por  $n_r$ , determina a velocidade de propagação da onda eletromagnética. Essa velocidade pode ser calculada através da expressão 6.2, na qual  $c$  é a velocidade de luz no vácuo,  $v$  é a velocidade da luz no meio em que a luz é analisada,  $\lambda$  é o comprimento de onda no meio em que a luz se encontra e  $\lambda_0$  é o comprimento de onda da luz no vácuo (SZE e NG, 2007).

$$n_r = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (6.2)$$

Já a parte imaginária do índice de refração, representada por  $k_e$ , determina o coeficiente de absorção da onda eletromagnética. Essa parte imaginária também é chamada de coeficiente de extinção. O coeficiente de absorção de um material pode ser obtido através equação 6.3 (SZE e NG, 2007).

$$\alpha = \frac{4\pi k_e}{\lambda} \quad (6.3)$$

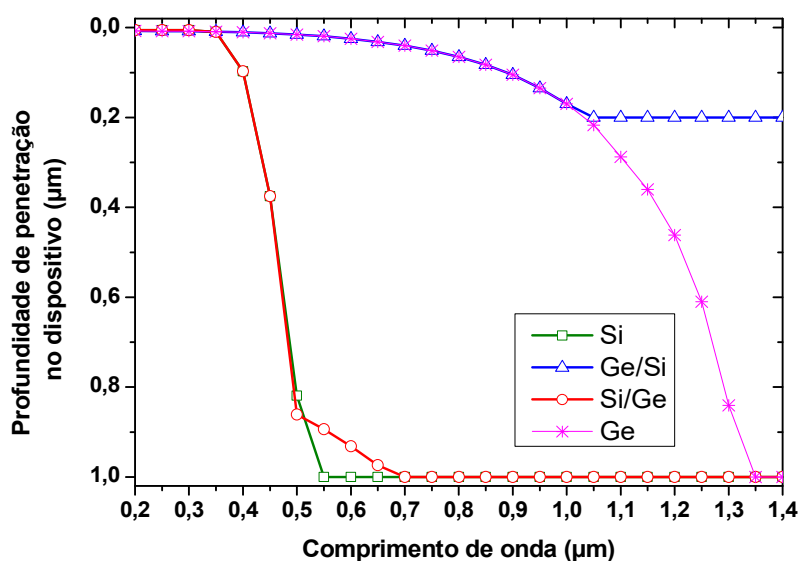
O ponto que determina até onde a energia da onda eletromagnética tem influência na corrente foto gerada no dispositivo é dado por  $e^{-1}$  (FEYNMAN, LEIGHTON e SANDS, 2010), ou seja, a capacidade de penetração da onda luminosa é dada até o ponto em que essa onda perde 63,21% de sua energia inicial.

Portanto, a partir do ponto em que a onda luminosa perde aproximadamente dois terços de sua energia, os pares elétron-lacunas gerados já não contribuem significativamente para a corrente gerada na célula solar, determinando, assim, a profundidade de penetração da onda eletromagnética em questão (FEYNMAN, LEIGHTON e SANDS, 2010).

As equações citadas acima são usadas no processo de simulação do programa Atlas para demonstrar o comportamento da luz no material semiconductor (SILVACO, INC., 2016).

As figuras 43 e 45 apresentam a profundidade de penetração (ponto no qual a onda eletromagnética perde aproximadamente 2/3 de sua energia inicial) para os dispositivos simulados de 1  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$  de espessura de material semiconductor, respectivamente.

Figura 43 - Profundidade de penetração da luz em função do comprimento de onda para dispositivos de 1  $\mu\text{m}$  de espessura (escala linear).



Fonte: Autor.

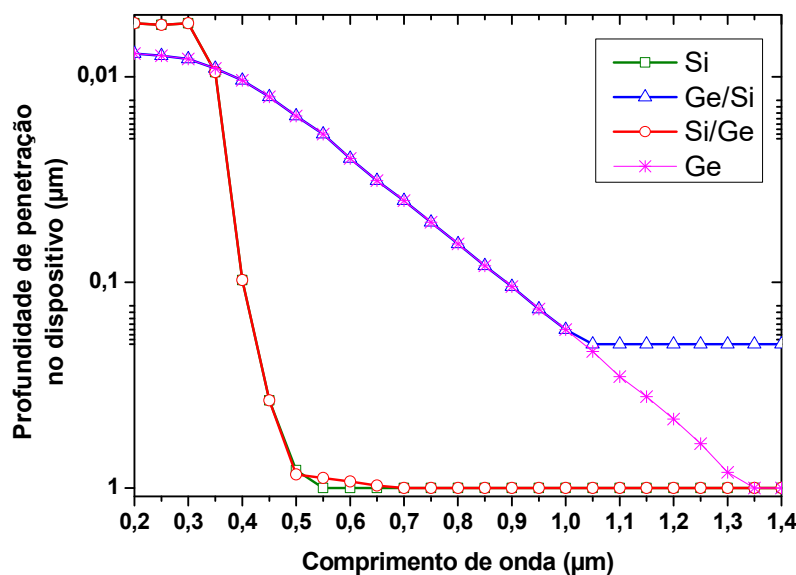
Nelas são demonstradas as curvas do dispositivo inteiramente de silício (Si), do dispositivo com a camada de germânio acima da camada de silício (Ge/Si), do dispositivo com germânio abaixo da camada de silício (Si/Ge), e o dispositivo inteiramente de germânio (Ge). Nas figuras 44 e 46 são mostradas as mesmas penetrações. Entretanto, a espessura encontra-se em escala logarítmica.

É possível observar, na figura 43, que no dispositivo puramente de silício, a luz é totalmente absorvida até o comprimento de onda de  $0,55 \mu\text{m}$ , após esse comprimento, a energia contida no espectro luminoso não é totalmente aproveitada.

Esse comportamento é determinado pelo coeficiente de extinção que o silício possui e que varia para cada comprimento de onda aplicado ao dispositivo (GREEN, 2008).

Ainda na figura 43, observa-se que a célula com germânio por baixo tem um comportamento muito parecido com a célula inteiramente de silício. Porém, entre  $0,5$  e  $0,7 \mu\text{m}$ , a profundidade de penetração luminosa tem uma pequena diminuição quando comparada à célula de silício.

Figura 44 - Profundidade de penetração da luz em função do comprimento de onda para dispositivos de  $1 \mu\text{m}$  de espessura (escala logarítmica).



Fonte: Autor.

Isso ocorre devido aos diferentes índices de refração, e, conseqüentemente, aos diferentes coeficientes de absorção do germânio em relação ao silício para cada comprimento de onda (JELLISON JR., 1992).

Já para comprimentos de ondas maiores que  $0,7 \mu\text{m}$ , não há mais geração significativa de pares elétron-lacunas. Sendo assim, para esses comprimentos, o dispositivo perde rendimento na geração.

Essa diferença de absorção luminosa acontece porque, para um comprimento de onda de aproximadamente  $0,55 \mu\text{m}$ , o coeficiente de absorção do silício é um pouco maior que  $10^4 \text{ cm}^{-1}$ , e, ainda no silício, a onda consegue penetrar uma profundidade de aproximadamente  $1 \mu\text{m}$ .

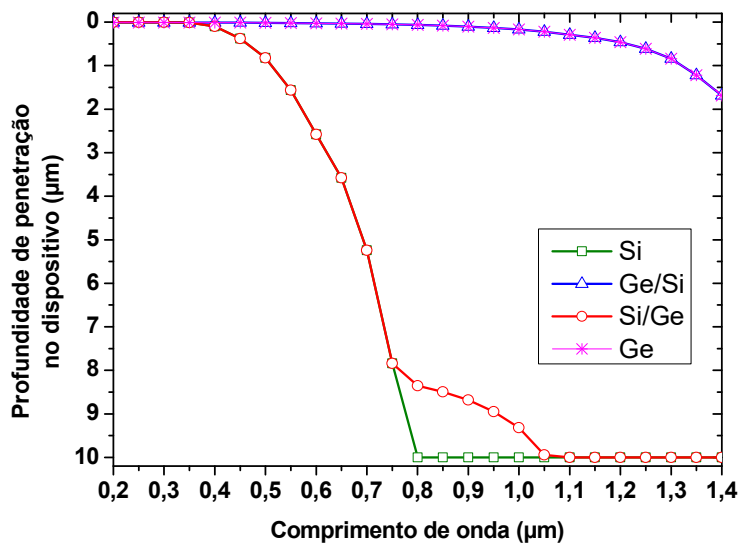
Já para o germânio, o comprimento de onda de  $0,55 \mu\text{m}$  consegue penetrar a uma profundidade de aproximadamente  $0,02 \mu\text{m}$ , e nessa profundidade o coeficiente de absorção do germânio é um pouco menor que  $10^6 \text{ cm}^{-1}$  (SZE e NG, 2007), como é possível visualizar na figura 11.

Todavia, como a maior parte da energia luminosa já foi coletada pelo silício, a faixa de onda que o germânio consegue absorver por completa é pequena,  $0,5 \mu\text{m}$  a  $0,7 \mu\text{m}$ , e a partir dessa faixa o comportamento é o mesmo que o dispositivo totalmente de silício. Já o dispositivo com germânio por cima do silício consegue absorver completamente uma faixa bem maior do que os outros dispositivos, até  $1,05 \mu\text{m}$ .

Isso devido a melhora na absorção do germânio (CIESIELSKI, SKOWRONSKI, *et al.*, 2018). Como agora o material com melhor coeficiente de absorção está por cima, ele é capaz de absorver uma faixa maior do espectro luminoso, chegando até  $1,05 \mu\text{m}$ . Após esse comprimento de onda, a espessura de  $0,2 \mu\text{m}$  de germânio também não é capaz de gerar pares elétron-lacunas suficiente para influenciar na corrente elétrica fotogerada.

A figura 45 mostra que para a profundidade de penetração dos dispositivos de  $10 \mu\text{m}$ , o comportamento geral é o mesmo da figura 43. Uma mudança ocorre apenas na faixa absorvida pelas camadas semicondutoras. O dispositivo de silício, com uma espessura de  $10 \mu\text{m}$ , consegue, agora, absorver totalmente ondas com até  $0,8 \mu\text{m}$ , e tem uma geração pouco significativa para ondas maiores que isso, como é possível visualizar na figura 45.

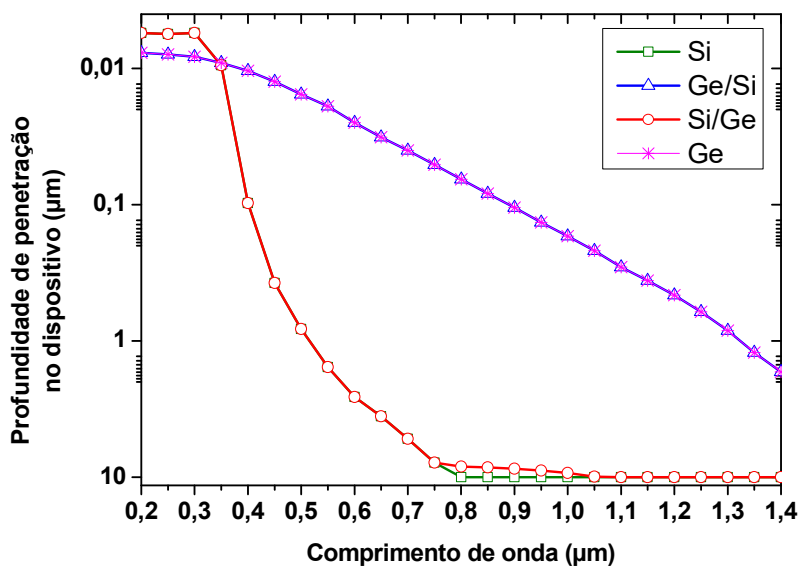
Figura 45 - Profundidade de penetração da luz em função do comprimento de onda para dispositivos de 10  $\mu\text{m}$  de espessura (escala linear).



Fonte: Autor.

O dispositivo com germânio abaixo também teve um incremento na absorção completa de ondas eletromagnéticas. O incremento agora vai de 0,8 a 1,05  $\mu\text{m}$ , quando comparado ao dispositivo inteiramente de silício. Porém, agora, para o dispositivo com germânio abaixo, há geração significativa de pares elétron-lacunas até um comprimento de onda de 1,1  $\mu\text{m}$ .

Figura 46 - Profundidade de penetração da luz em função do comprimento de onda para dispositivos de 10  $\mu\text{m}$  de espessura (escala logarítmica).



Fonte: Autor.



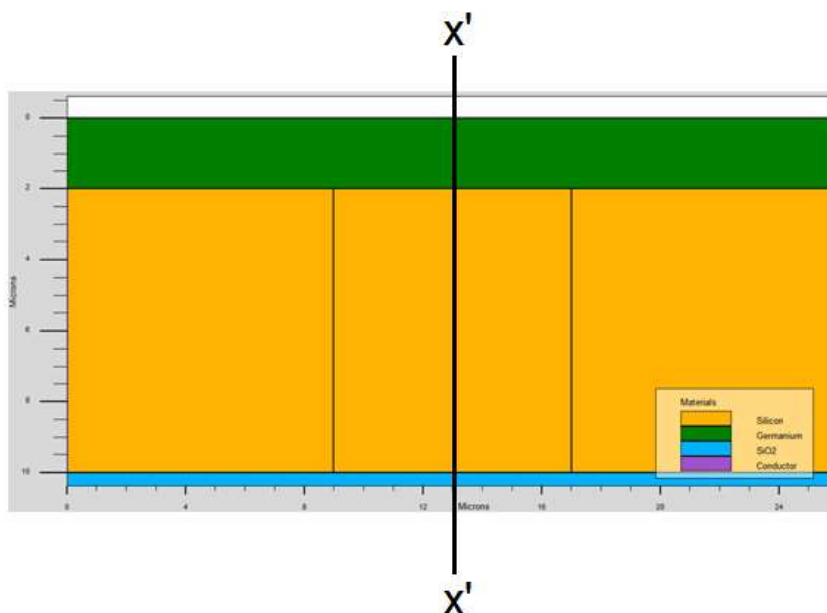
A célula solar com germânio por cima teve um aproveitamento completo das ondas eletromagnéticas estudadas, já que, antes mesmo de que a luz consiga atingir uma profundidade de 2  $\mu\text{m}$ , todos os comprimentos são absorvidos pela camada de germânio (2/3 da energia inicial da onda), e somente uma pequena parte é aproveitada pelo silício.

Essa parte aproveitada pela camada de silício pode ser visualizada na figura 42. Nela é possível ver que o dispositivo híbrido tem um melhor rendimento entre 0,3 e 0,6  $\mu\text{m}$  quando comparado ao dispositivo inteiramente de germânio, o que demonstra um melhor rendimento da heterojunção nessa faixa de onda.

A figura 47 mostra um corte vertical (perpendicular ao eixo x). A figura 48 mostra o comportamento da fotogeração nos quatros dispositivos de 10  $\mu\text{m}$  (puramente silício, puramente de germânio, germânio por cima e germânio por baixo), referente ao corte citado anteriormente.

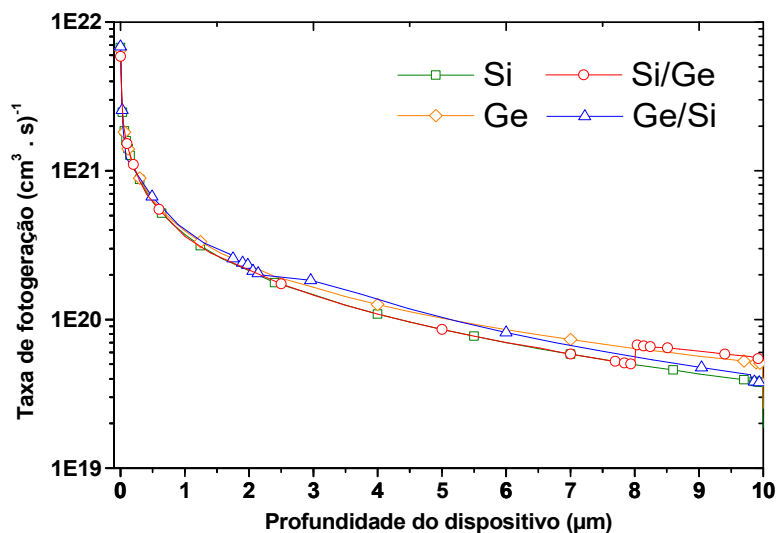
Nela, é possível ver a taxa de fotogeração para os quatros dispositivos citados, ou seja, verificar o comportamento de todo o espectro estudado dentro da célula solar simulada.

Figura 47 – Corte vertical do dispositivo híbrido de 10  $\mu\text{m}$  para visualização da fotogeração.



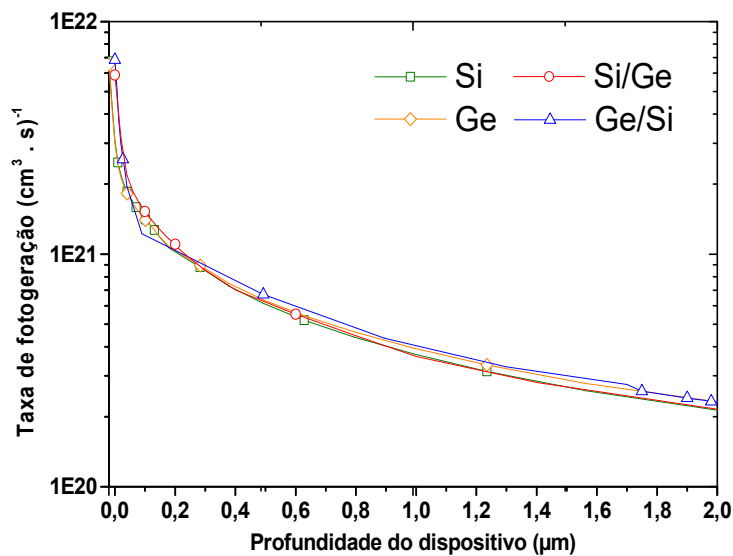
Fonte: Autor.

Figura 48 – Taxa de fotogeração em função da profundidade do dispositivo híbrido em uma célula fotovoltaica de 10  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Autor.

Figura 49 – Taxa de fotogeração em função da profundidade do dispositivo híbrido em uma célula fotovoltaica de 10  $\mu\text{m}$  (visualização da profundidade entre a superfície até 2  $\mu\text{m}$ ).

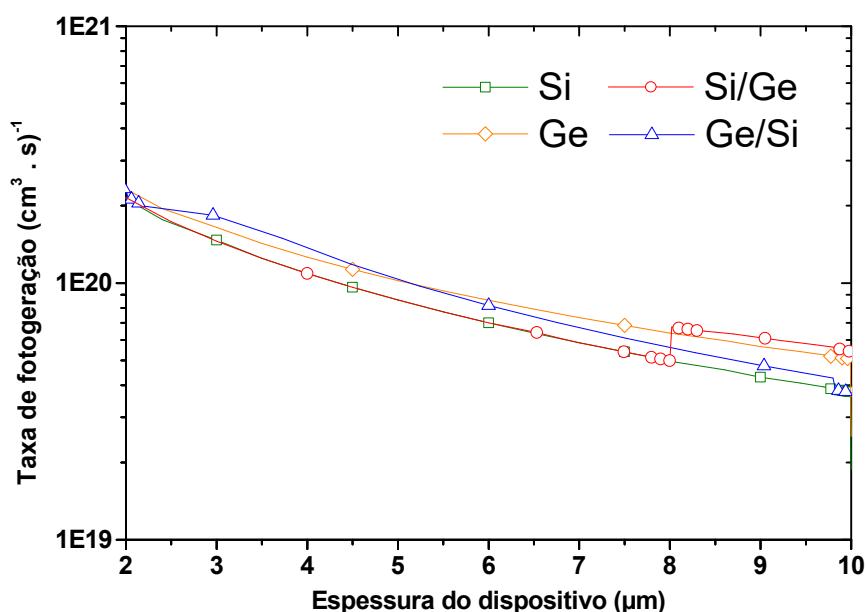


Fonte: Autor.

Pode-se visualizar, na figura 49, que, até aproximadamente 0,2  $\mu\text{m}$  de profundidade, o dispositivo de silício com germânio abaixo gera mais pares elétron-lacunas (quando comparado ao dispositivo com germânio acima). Após esse ponto, o dispositivo de germânio acima tem uma melhora na taxa fotogeração.

A figura 50 mostra que, entre 2 e 5  $\mu\text{m}$ , o dispositivo com germânio por cima teve uma maior taxa de fotogeração que os outros. Entre uma profundidade de 5  $\mu\text{m}$  a 8  $\mu\text{m}$ , o dispositivo inteiramente de germânio tem um desempenho melhor na fotogeração. Após a profundidade de 8  $\mu\text{m}$ , o dispositivo com germânio abaixo tem o melhor desempenho na taxa de fotogeração, quando comparado aos outros dispositivos.

Figura 50 - Taxa de fotogeração em função da profundidade do dispositivo híbrido em uma célula fotovoltaica de 10  $\mu\text{m}$  (visualização da profundidade entre 2  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$ ).



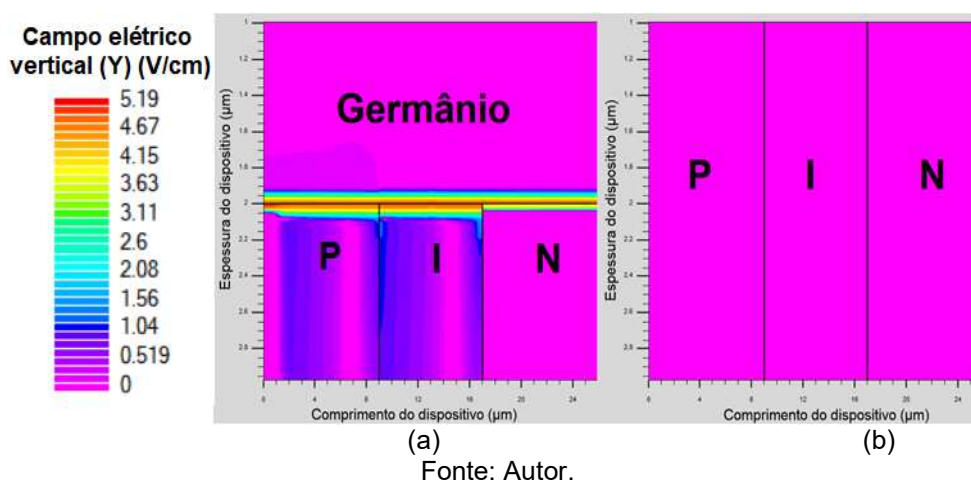
Fonte: Autor.

Dessa forma, pode-se dizer, no geral, que o acréscimo da camada de germânio trouxe benefícios na absorção espectral para dispositivos com uma espessura maior que 1  $\mu\text{m}$ , e, em alguns pontos da faixa espectral, o dispositivo híbrido teve uma melhor resposta do que um dispositivo feito inteiramente de germânio, e que, dependendo da faixa que se queira captar, um dispositivo com uma heterojunção tem um melhor comportamento elétrico. Portanto, funcionando como uma célula solar, o dispositivo teve um bom comportamento na fotogeração.

### 6.3. Campos elétricos Horizontal e Vertical

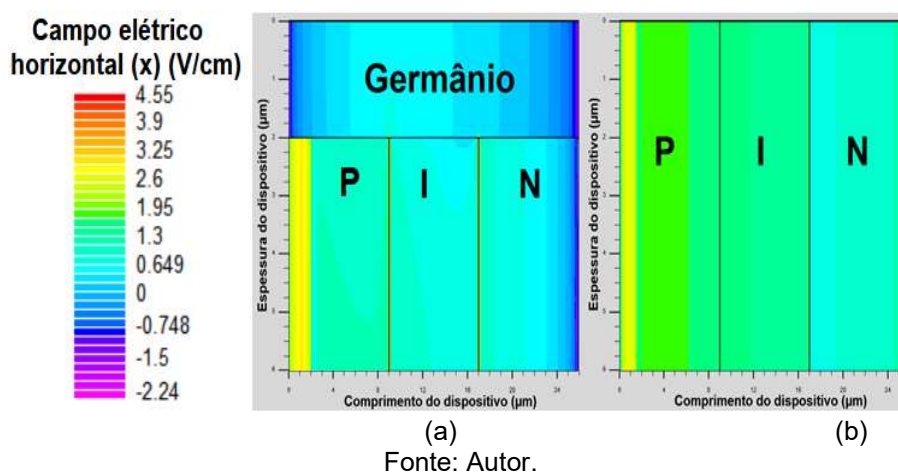
Com a introdução de uma nova camada semicondutora com características físicas diferentes (mobilidade, banda proibida com energias diferentes, resistividade), uma nova junção metalúrgica foi criada, e, nela, o aparecimento de mais uma região de carga espacial. A existência de uma região com outro campo elétrico melhora o dispositivo no aspecto de captação de pares elétron-lacunas para a geração de corrente elétrica.

Figura 51 - Campo elétrico vertical na direção da espessura (a) híbrido (b) inteiramente de silício.



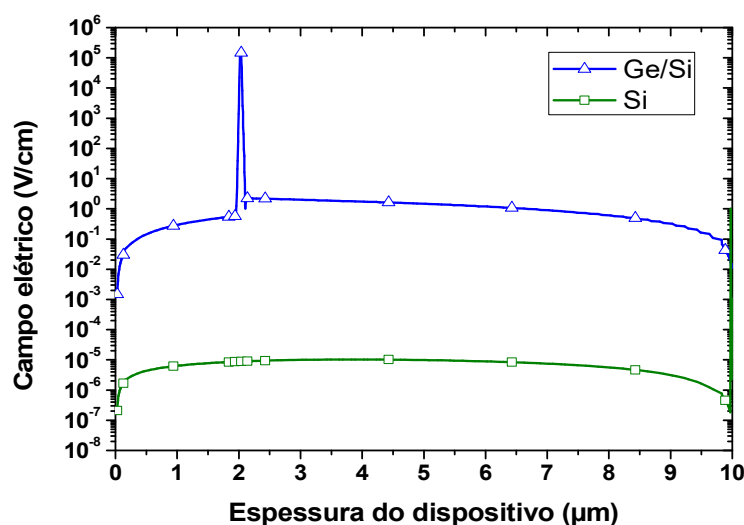
A figura 51 mostra esse novo campo elétrico vertical, criado na célula solar híbrida, e a figura 52 mostra a alteração que o acréscimo dessa nova camada trouxe no campo elétrico ao longo das regiões de anodo, região intrínseca e da região de catodo. Ambas as figuras mostram dispositivos de 10 μm.

Figura 52 - Campo elétrico horizontal ao longo do dispositivo (a) híbrido (b) inteiramente de silício.



É possível observar na figura 51, que na junção em 2  $\mu\text{m}$ , houve o aparecimento da nova região de carga espacial, o que proporcionou um aumento na produção de corrente elétrica. Já, a figura 52, mostra uma pequena diminuição na intensidade do campo elétrico horizontal, na região de silício, e uma queda maior nas extremidades da região de germânio.

Figura 53 – Campo elétrico vertical em relação à profundidade do dispositivo (espessura) nos dispositivos híbrido e inteiramente de silício.



Fonte: Autor.

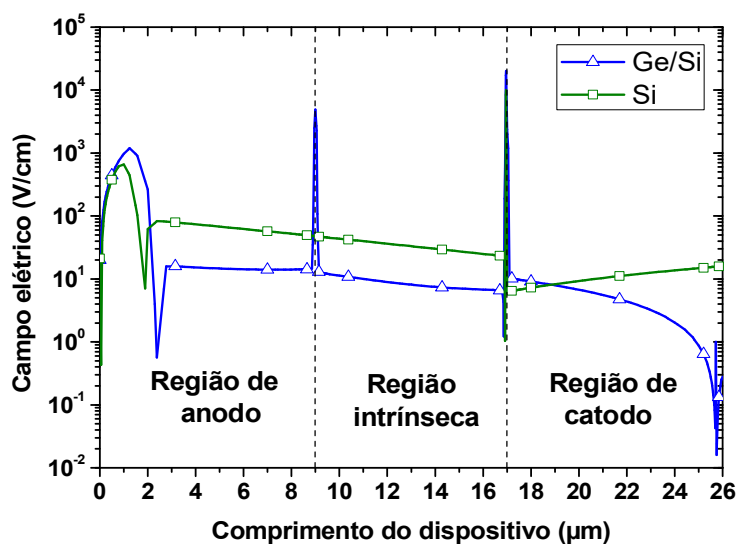
As figuras 53 e 54 mostram, em corte, os valores dos campos elétricos mostrados nas duas figuras anteriores (fig. 51 e 52). É possível ter uma melhor ideia de valores, e comparar de forma mais efetiva as alterações ocorridas devido ao acréscimo da camada de germânio.

O corte vertical (seção da altura) foi realizado exatamente no meio do dispositivo (13  $\mu\text{m}$  em x), tanto na célula inteiramente de silício, como na célula com a camada de germânio por cima, figura 53.

Nessa imagem, é possível observar que, no dispositivo com a camada de germânio por cima, aparece um pico no local da nova junção metalúrgica. Esse pico tem uma intensidade de aproximadamente  $1 \times 10^5$  Volts por centímetro (V/cm), já no dispositivo inteiramente de silício, o campo elétrico é bem uniforme e muito baixo quando comparado ao dispositivo com a camada de germânio por cima, cerca de  $5 \times 10^{-6}$  V/cm.

A figura 54 apresenta o corte horizontal dos dispositivos (seção do comprimento). Esse corte foi feito exatamente no meio da célula solar (5  $\mu\text{m}$ ) em relação ao eixo y.

Figura 54 - Corte da figura 5, perpendicular ao eixo y (comprimento) nos dispositivos híbrido e inteiramente de silício.



Fonte: Autor.

É possível visualizar que, mais uma vez, apareceu um pico de campo elétrico no dispositivo com germânio por cima, em relação ao dispositivo somente de silício. Isso implicou o aumento da corrente elétrica gerada e, conseqüentemente, incrementou a potência gerada pela célula solar.

O pico aconteceu em 9  $\mu\text{m}$ . Na região de depleção criada entre a região de anodo e a região intrínseca do diodo PIN, o aumento chegou a quase  $4 \times 10^3$  V/cm, o que representa um valor significativo para o dispositivo.

Existiram outras alterações ao longo do comprimento do dispositivo como, por exemplo, em suas extremidades, como pode ser visualizado na figura 54, a qual mostra um pequeno aumento no início da região de anodo, uma queda na região de catodo e um pequeno aumento entre a região intrínseca e a região de catodo.

O aumento do campo elétrico, no início da região de anodo, e o decréscimo dele, no final da região de catodo, pode ter sido ocasionado pelo aumento de concentração, nas extremidades do dispositivo, de portadores de cargas.

Isso pode ter ocorrido devido ao acréscimo da camada de germânio, uma vez que a energia necessária para criar um par elétron-lacuna no germânio é menor que no silício.

Sendo assim, temos uma injeção significativa de pares elétron-lacunas, alterando as cargas geradas pela célula solar, e conseqüentemente, alterando o campo elétrico no dispositivo híbrido, quando comparado ao dispositivo inteiramente de silício.

Destaca-se aqui, que os dispositivos abordados nessa seção foram apenas dispositivos com espessura de 10  $\mu\text{m}$ , uma vez que essa medida apresentou a melhor geração de corrente quando comparada a outras espessuras. Além disso, foi mostrada apenas a célula com germânio por cima, porque esse dispositivo apresentou o melhor desempenho geral no funcionamento como célula solar.

#### **6.4. Recombinações superficiais**

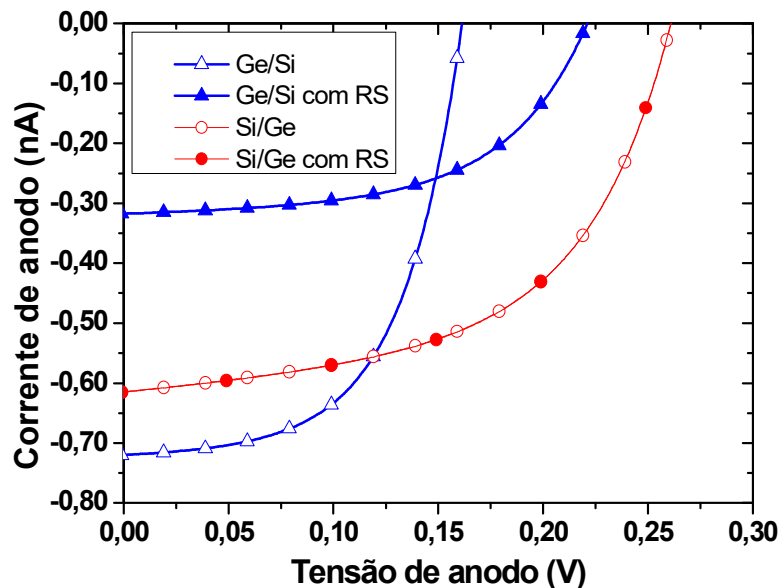
Um outro parâmetro importante na qualidade de fornecimento de energia em uma célula solar é a recombinação superficial, ou seja, as recombinações entre os portadores na interface entre o germânio, o silício e o óxido de silício.

A velocidade de recombinação superficial tem grande influência na fotogeração de corrente e, conseqüentemente, na qualidade desse fornecimento (GHANNAM, POORTMANS, *et al.*, 2003).

A figura 55 apresenta a fotogeração sem recombinação entre interfaces e com recombinação entre interfaces para o dispositivo padrão de 0,1  $\mu\text{m}$ . Nela, é possível verificar que o dispositivo com germânio por baixo não apresenta uma diferença entre as gerações de corrente. Isso, porque a maior parte de corrente é gerada na região de silício, sendo assim, ocorre pouca recombinação superficial.

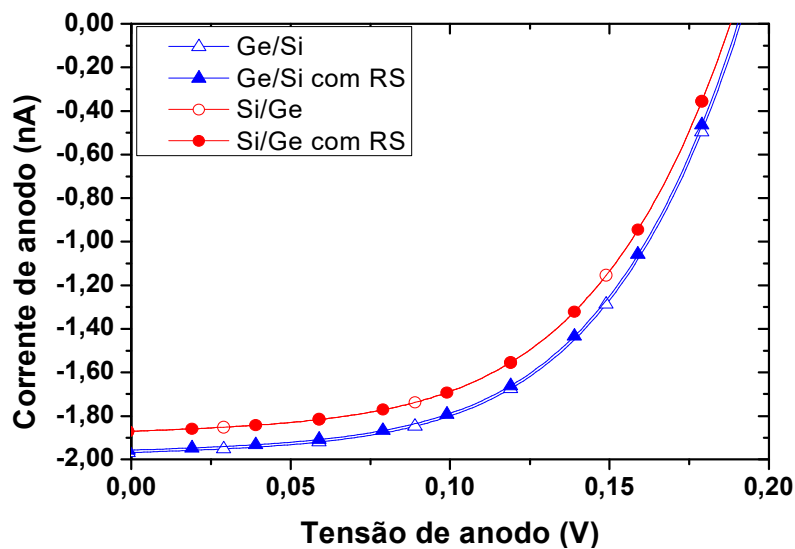
Entretanto, para o dispositivo com germânio por cima, camada na qual ocorre a maior parte da fotogeração, a recombinação na interface é bem significativa, gerando uma perda na geração de corrente.

Figura 55 – Corrente de anodo gerada em função da tensão de anodo com influência da recombinação superficial entre interfaces (célula de 0,1  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: Autor.

Figura 56 – Corrente de anodo gerada em função da tensão de anodo com influência da recombinação superficial entre interfaces (célula de 1  $\mu\text{m}$ ).

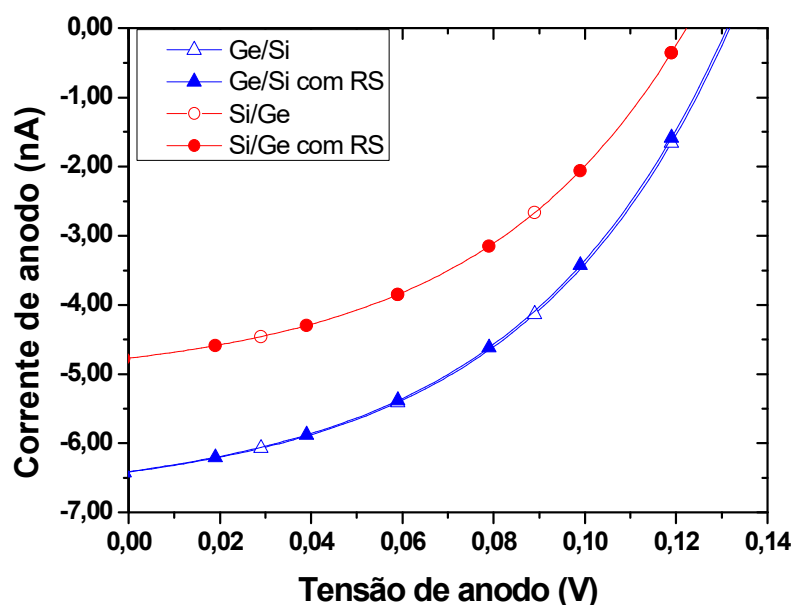


Fonte: Autor.

A recombinação superficial tem uma taxa maior do que a recombinação no volume do semicondutor (TRITA, CRISTIANI, *et al.*, 2007), sendo também dependente da concentração de dopantes (CUEVAS, BASORE, *et al.*, 1996) e do tempo de vida do portador minoritário (MALYUTENKO e CHYRCHYK, 2006).



Figura 57 – Corrente de anodo gerada em função da tensão de anodo com influência da recombinação superficial entre interfaces (célula de 10  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: Autor.

Na figura 56, é possível ver que, ao aumentar o volume da célula sem aumentar a área da interface (espessura de 1  $\mu\text{m}$  com as mesmas dimensões de comprimento a largura), a recombinação superficial perde, significativamente, a influência na fotogeração, e dessa forma as perdas são minimizadas, principalmente no dispositivo com germânio por cima.

Na figura 57, é possível observar que a diferença entre a curva com recombinação superficial e a curva sem recombinação superficial é ainda menor no dispositivo de 10  $\mu\text{m}$ .

Levando-se em consideração uma largura de 26  $\mu\text{m}$  para o dispositivo simulado, totalizando, através de cálculos realizados pelo simulador, uma área de  $6,76 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ , a célula com germânio por cima forneceu uma corrente de trabalho, sem recombinação superficial, de 114,56  $\eta\text{A}$ . Já com a recombinação superficial na interface, ela vai para 113,52  $\eta\text{A}$ , uma diferença de 0,98  $\eta\text{A}$ .

No dispositivo com germânio por baixo não há diferença na corrente de trabalho, 84,1253  $\eta\text{A}$  para a simulação sem a recombinação superficial e 84,1253  $\eta\text{A}$  para a simulação com recombinação superficial.

Além dos aspectos citados que influenciam na taxa de recombinação superficial (tempo de vida dos portadores minoritários e da concentração de dopantes no material semiconductor), cada tipo de material também apresenta uma velocidade diferente de recombinação superficial (YABLONOVITCH, ALLARA, *et al.*, 1986) e (KERR e CUEVAS, 2001). Por esse motivo, a velocidade de recombinação é determinada pelo material com a menor taxa de recombinação superficial.

### **6.5. Relação corrente X tensão**

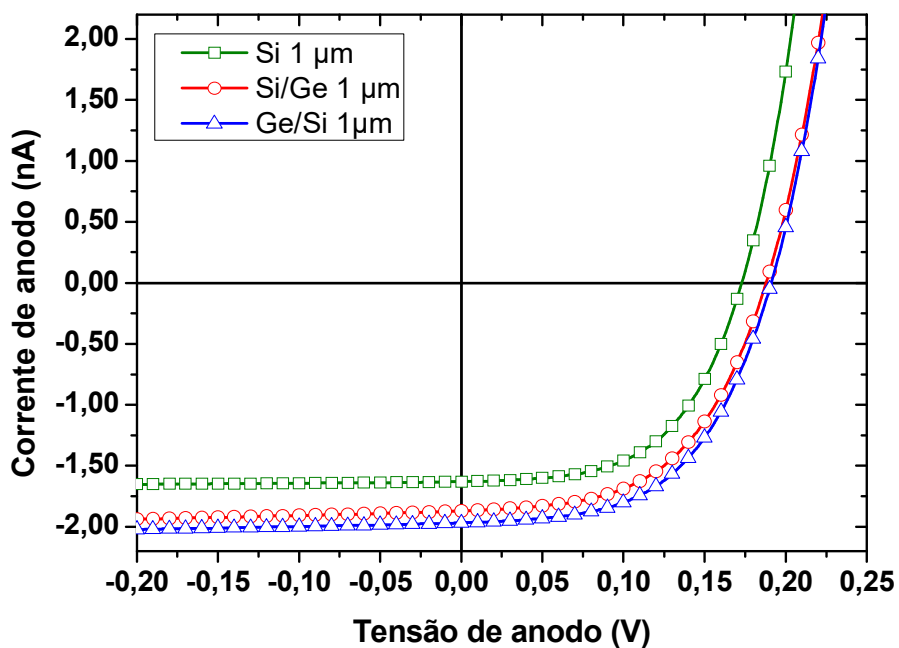
As simulações para a obtenção da corrente fotogerada na célula solar foram feitas através da variação da tensão e da aplicação de um feixe luminoso sobre o dispositivo.

A tensão no dispositivo gerador variou de -0,2 V a 0,5 Volts (V) e, com isso, foi possível verificar o ponto de máxima corrente (corrente de curto circuito) e o ponto de máxima tensão (tensão de circuito aberto), além da obtenção da corrente e da tensão de trabalho do dispositivo (curvas obtidas em ambiente de simulação 2D).

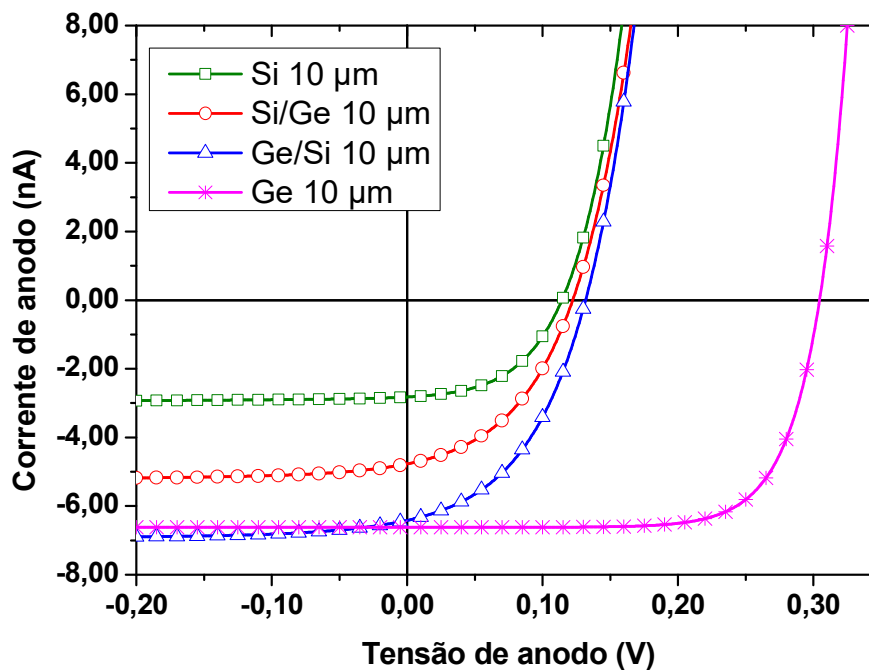
As figuras 58 e 59 mostram as correntes geradas para dispositivos de 1 e 10  $\mu\text{m}$  de espessura total, respectivamente. É possível verificar as correntes e as tensões geradas por cada célula solar. Verifica-se, ainda, na figura 58, que houve incrementos de corrente e tensão nos dispositivos híbridos em comparação ao dispositivo puramente de silício.

A corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto para célula inteiramente de silício foram de aproximadamente 1,6 nA e 0,17 V, respectivamente.

Na figura 58, a corrente de curto-circuito gerada no dispositivo com germânio por baixo foi de, aproximadamente, 1,9 nA e a tensão de circuito aberto foi de aproximadamente 0,18 V. A célula com germânio por cima teve uma melhora de rendimento ainda maior do que o outro dispositivo híbrido.

Figura 58 - Curva I x V para dispositivos de 1  $\mu\text{m}$ .

Fonte: Autor.

Figura 59 - Curva I x V para dispositivos de 10  $\mu\text{m}$ .

Fonte: Autor.

Na figura 59, verifica-se um incremento ainda maior na corrente de curto-circuito quando a espessura do dispositivo aumenta. No entanto existe uma diminuição significativa na tensão de circuito aberto em todos os dispositivos de 10  $\mu\text{m}$  simulados, quando se compara os dispositivos de 1  $\mu\text{m}$ .

Esse fenômeno ocorre devido ao aumento da área da região de carga espacial existente na célula solar. A região de heterojunção permanece com sua área inalterada. Contudo, a área da região de homojunção aumenta (junção p-i-n), na medida em que a espessura da região de silício aumenta 10 vezes (de 0,8  $\mu\text{m}$  para 8  $\mu\text{m}$ ).

Esse aumento de área na região de depleção aumenta a corrente de saturação, que passa de 34,2 fA (Femtoampere), quando a espessura da camada de silício é de 0,08  $\mu\text{m}$ , para 4,28 pA (Pico ampere), quando a espessura da camada de silício é de 10  $\mu\text{m}$ .

Tabela 11 - Valores para  $I_s$  do dispositivo de 10  $\mu\text{m}$ .

Parâmetros	Valores
$A^1$	Depende da área da junção PN ( $\text{cm}^2$ )
$q^2$	$1,60219 \times 10^{-19}$ (C)
$N_c^1$	$1,8 \times 10^{22}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_v^1$	$7,2 \times 10^{21}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_A^1$	$1 \times 10^{15}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_D^1$	$4 \times 10^{20}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
$D_p^2$	36,63 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
$D_n^2$	12,16 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
$\tau_n^2$	$1 \times 10^{-7}$ (s)
$\tau_p^2$	$1 \times 10^{-7}$ (s)
$E_g^2$	1,08 (eV)
$k^2$	$8,6173324 \times 10^{-5}$ (eV/K)
$T^1$	300 (K)

1 – Dados inseridos pelo programador.

2 – Dados internos do próprio *software*.

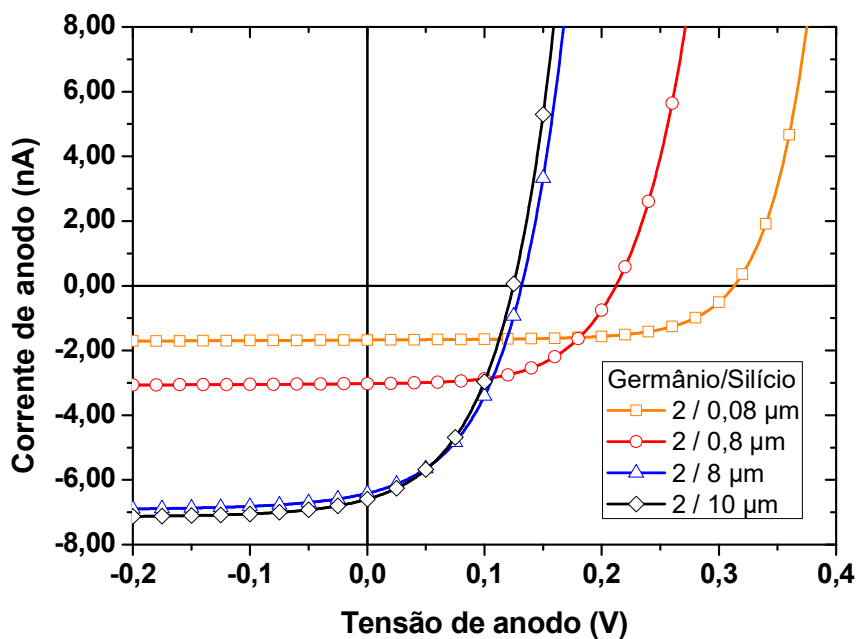
Fonte: Autor.

Como a tensão  $V_{oc}$  depende do logarítmico, e esse logaritmo depende inversamente da corrente de saturação, a tensão de circuito aberto sofre uma queda em seu valor, conforme há um aumento na área das homojunções.

Esse fenômeno pode ser visualizado na figura 60, na qual são mostrados 4 dispositivos com espessuras diferentes. Para visualizar a queda da tensão de circuito aberto sem que outro fator, além do aumento da homojunção tivesse influência, a espessura da camada de germânio não foi alterada ( $2 \mu\text{m}$ ), alterando-se apenas a espessura da camada de silício e, conseqüentemente, a área da homojunção p-i-n.

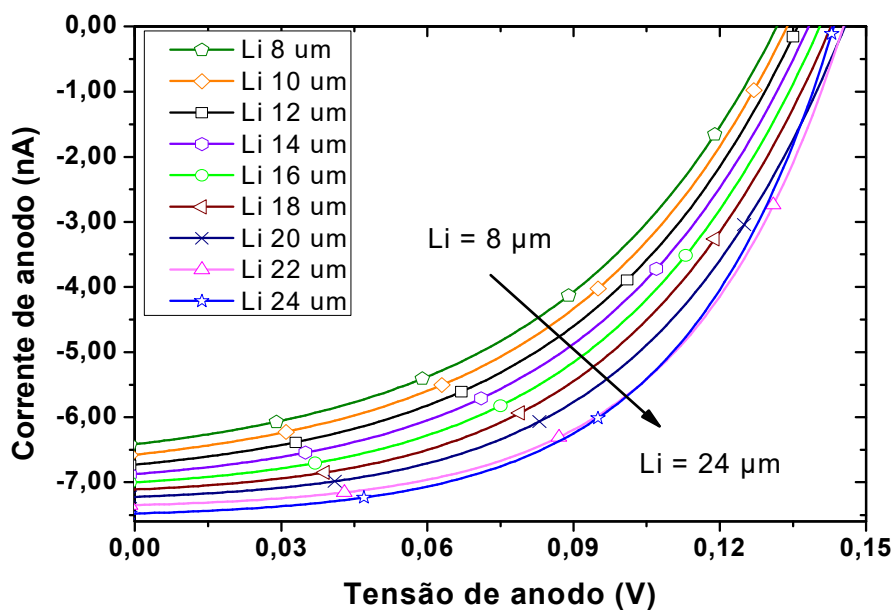
Com o aumento somente da camada de silício, há, conseqüentemente, o aumento da corrente fotogerada, uma vez que o volume do material semiconductor aumenta. Entretanto, como é possível visualizar na figura 60, há uma diminuição da tensão gerada pelo dispositivo fotovoltaico, como mencionado anteriormente.

Figura 60 - queda de  $V_{oc}$  devido ao aumento da área da região de depleção.



Fonte: Autor.

Figura 61 - Variação de corrente e tensão com a variação da região intrínseca



Fonte: Autor.

Além da alteração da área da camada de depleção para verificar o comportamento da corrente e da tensão fotogerada, alterou-se o comprimento da região intrínseca do diodo PIN, com a finalidade da verificação do comportamento de fotogeração com esse parâmetro. A figura 61 mostra o resultado da corrente e da tensão no dispositivo de 10 µm, quando o comprimento da região intrínseca é alterado.

É possível verificar que o aumento da região intrínseca resultou em uma melhora em todos os parâmetros da célula solar,  $V_{OC}$ ,  $V_m$ ,  $I_{SC}$ ,  $I_m$ , FF e na potência gerada, o que demonstra a importância dessa região na captação de pares elétron-lacunas e, conseqüentemente, na maior capacidade de fornecimento de energia elétrica.

Entretanto, é importante salientar, que o comprimento de difusão do elétron para as simulações é de 19,1 µm, o que explica a diminuição da tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ), para comprimentos da região intrínseca maiores que 20 µm, como pode ser visualizado na figura 61.

As tabelas 12 e 13 mostram alguns parâmetros na simulação quando se considera um dispositivo em três dimensões com 10 µm de espessura, ou seja, os resultados foram obtidos através da multiplicação pela largura do dispositivo (W), largura essa que media 26 µm.

Resultados, tais como rendimento ( $\eta$ ), e o Fator de Forma (FF) são mostrados tanto nas tabelas 12 e 13, como também no gráfico 62 (que mostra o FF da célula fotovoltaica), no gráfico 63 (que mostra o rendimento da célula fotovoltaica), no gráfico 64 (que mostra a corrente de trabalho da célula fotovoltaica), no gráfico 65 (que mostra a tensão de trabalho da célula fotovoltaica) e no gráfico 66 (que mostra a potência fornecida pela célula fotovoltaica).

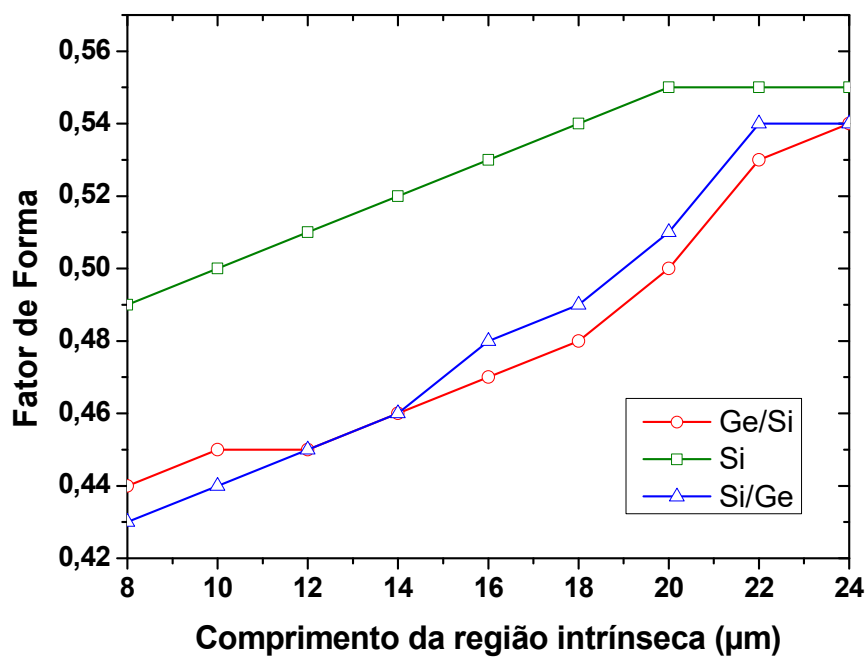
Todos os comportamentos mostrados são do dispositivo fotovoltaico com 10  $\mu\text{m}$  de espessura de material semicondutor.

Tabela 12 - Variação do  $\eta$  e do FF devido à variação da região intrínseca

Li ( $\mu\text{m}$ )	Germânio por cima		Silício		Germânio por baixo	
	$\eta$ (%)	FF	$\eta$ (%)	FF	$\eta$ (%)	FF
8	1.42	0.44	0.60	0.49	0.96	0.43
10	1.51	0.45	0.70	0.50	1.07	0.44
12	1.60	0.45	0.81	0.51	1.20	0.45
14	1.69	0.46	0.93	0.52	1.33	0.46
16	1.78	0.47	1.06	0.53	1.47	0.48
18	1.89	0.48	1.20	0.54	1.61	0.49
20	2.01	0.50	1.36	0.55	1.77	0.51
22	2.19	0.53	1.40	0.55	1.97	0.54
24	2.21	0.54	1.41	0.55	2.05	0.54

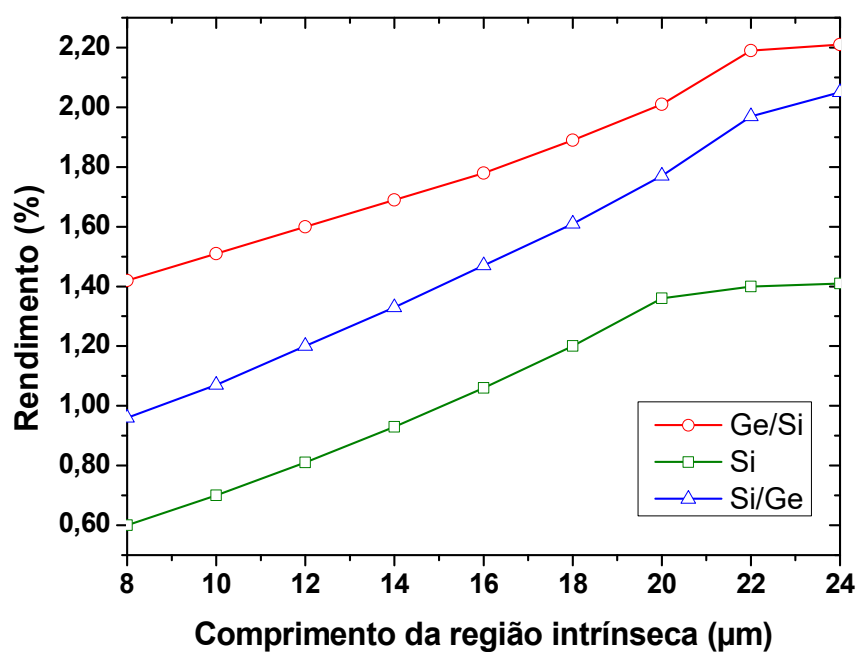
Fonte: Autor.

Figura 62 - Fator de forma da célula fotovoltaica em função do comprimento da região intrínseca para dispositivos de 10  $\mu\text{m}$  de espessura.



Fonte: Autor.

Figura 63 - Rendimento da célula fotovoltaica em função do comprimento da região intrínseca para dispositivos de 10  $\mu\text{m}$  de espessura.



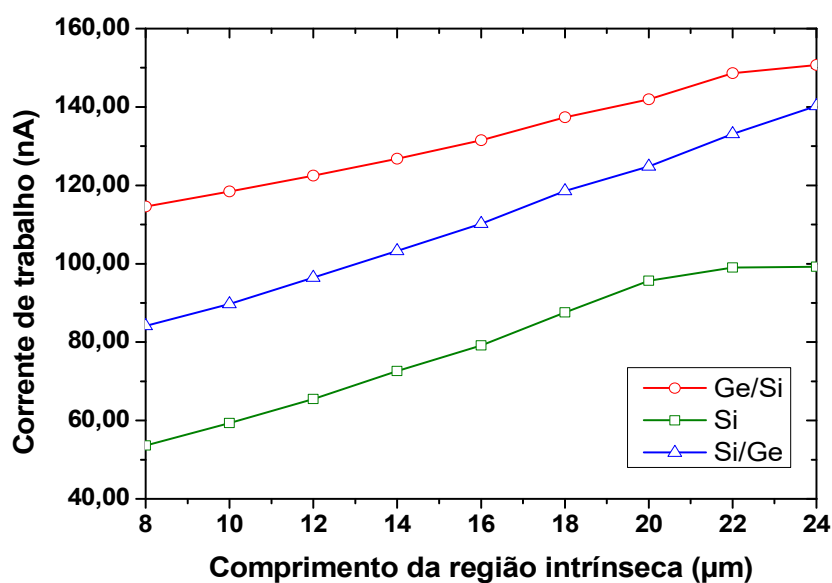
Fonte: Autor.



Tabela 13 - Variação de  $P_m$  devido ao aumento da região intrínseca

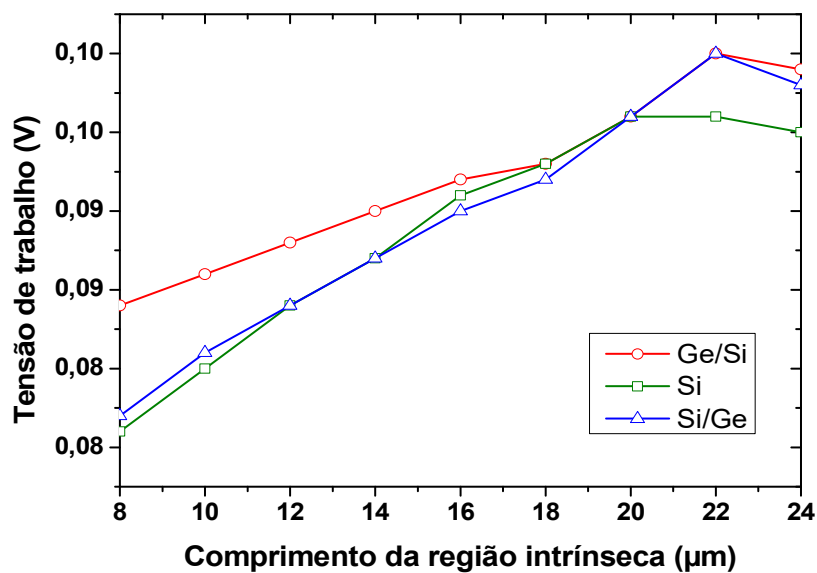
Li ( $\mu\text{m}$ )	Germânio por cima			Silício			Germânio por baixo		
	$I_m$ (nA)	$V_m$ (V)	$P_m$ (nW)	$I_m$ (nA)	$V_m$ (V)	$P_m$ (nW)	$I_m$ (nA)	$V_m$ (V)	$P_m$ (nW)
8	114,56	0,084	9,62	53,59	0,076	4,07	84,13	0,077	6,48
10	118,41	0,086	10,18	59,37	0,08	4,75	89,72	0,081	7,27
12	122,44	0,088	10,77	65,49	0,084	5,50	96,44	0,084	8,10
14	126,75	0,090	11,41	72,64	0,087	6,32	103,27	0,087	8,98
16	131,5	0,092	12,10	79,12	0,091	7,20	110,19	0,090	9,92
18	137,38	0,093	12,78	87,59	0,093	8,15	118,56	0,092	10,91
20	141,91	0,096	13,62	95,63	0,096	9,18	124,85	0,096	11,99
22	148,64	0,10	14,86	99,04	0,096	9,51	133,14	0,10	13,31
24	150,67	0,099	14,92	99,25	0,095	9,43	140,26	0,098	13,75

Fonte: Autor.

Figura 64 - Corrente de trabalho da célula fotovoltaica em função do comprimento da região intrínseca para dispositivos de 10  $\mu\text{m}$  de espessura.

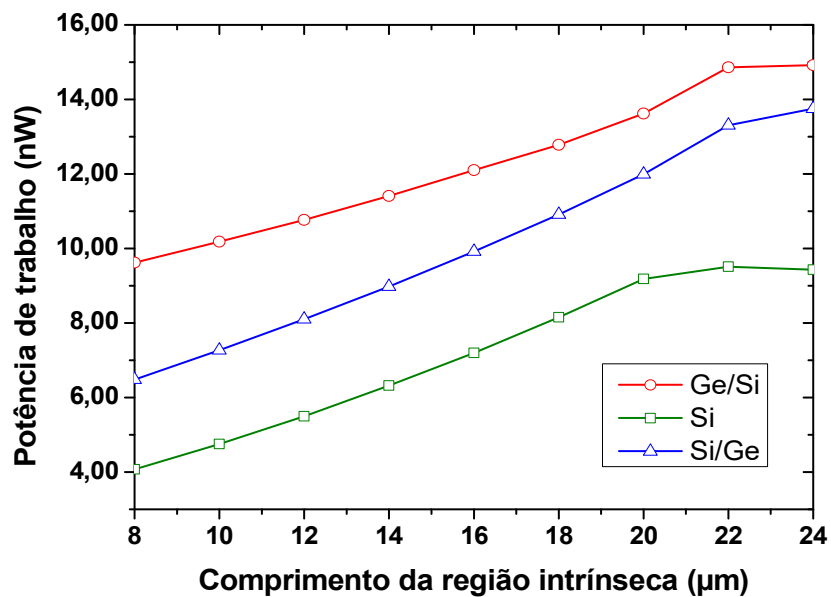
Fonte: Autor.

Figura 65 - Tensão de trabalho da célula fotovoltaica em função do comprimento da região intrínseca para dispositivos de 10  $\mu\text{m}$  de espessura.



Fonte: Autor.

Figura 66 - Potência de trabalho da célula fotovoltaica em função do comprimento da região intrínseca para dispositivos de 10  $\mu\text{m}$  de espessura.

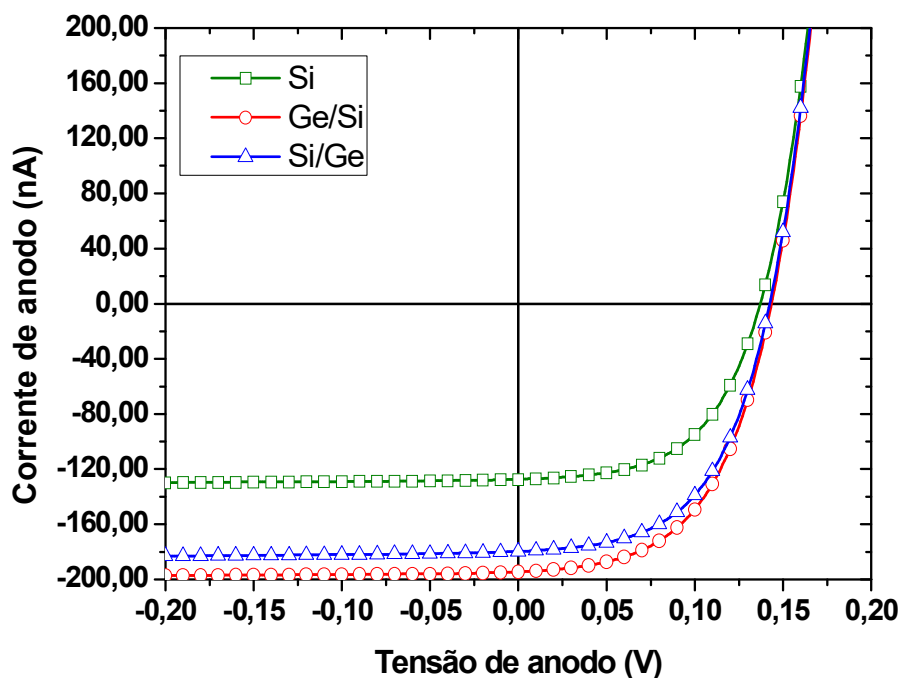


Fonte: Autor.

A simulação foi realizada em 2D e, através de cálculos realizados pelo próprio software, obteve-se os resultados de rendimento e Fator de Forma nos dispositivos simulados considerando-se um dispositivo em 3 dimensões (3D). Isso foi realizado através do cálculo da área do dispositivo, ou seja, foi feita a multiplicação dos resultados obtidos na simulação 2D pela largura  $W$  ( $26 \mu\text{m}$ ).

Essa etapa da programação pode ser visualizada na linha 318 do apêndice, a qual mostra a programação utilizada na simulação do dispositivo com germânio acima do silício.

Figura 67 – Corrente de anodo em função da tensão de anodo considerando um dispositivo 3D com  $L_i$  de  $24 \mu\text{m}$ .



Fonte: Autor.

A comparação das curvas dos dispositivos com um comprimento da região intrínseca de  $24 \mu\text{m}$  pode ser vista na figura 67, na qual é possível visualizar a corrente de anodo gerada.

A tabela 14 mostra a comparação dos parâmetros dos dispositivos de  $10 \mu\text{m}$  de espessura com as dimensões de comprimento e largura originais: potência de trabalho do dispositivo ( $P_m$ ), o rendimento ( $\eta$ ), a tensão de trabalho ( $V_m$ ), a corrente de trabalho ( $I_m$ ), a corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ), a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e o Fator de Forma (FF).

Nela, é possível ver a melhora que os dispositivos híbridos tiveram em relação ao dispositivo de silício, e qual dispositivo com a heterojunção teve o melhor desempenho na fotogeração de energia elétrica.

Estes resultados mostrados na tabela 14 foram obtidos através de simulações nas seguintes condições de ambiente: temperatura de 300 Kelvin (aproximadamente 26 °C), irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> e densidade de potência espectral utilizada para testes laboratoriais (AM1.5).

Tabela 14 - Principais parâmetros de uma célula solar com 10 µm de espessura

Parâmetros	Célula com germânio por cima	Célula com germânio por baixo	Célula de germânio	Célula de silício
<b>Pm (nW)</b>	9.62	6.48	37,92	4.07
<b>η (%)</b>	1.42	0.96	5,61	0.60
<b>Vm (V)</b>	0.084	0.077	0,24	0.076
<b>Im (nA)</b>	114.56	84.13	155,43	53.59
<b>Isc (nA)</b>	166.79	124.00	172,10	73.39
<b>Voc (V)</b>	0.132	0.122	0,30	0.114
<b>FF</b>	0.44	0.43	0,72	0.49

Fonte: Autor.

## 7. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre diodos PIN atuando como célula solar, nos quais foi acrescentada em suas estruturas, uma camada de germânio, acima da camada de silício, o que possibilitou uma melhora na geração fotovoltaica.

Primeiramente, observou-se a capacidade de absorção do dispositivo híbrido em relação ao dispositivo inteiramente de silício. Constatou-se que o comportamento do dispositivo híbrido, sob o feixe de luz aplicado (faixa que variou de 200 nm a 1400 nm), aumentou com a introdução da camada de germânio em sua estrutura, pois o germânio, para determinados comprimentos de onda, tem um melhor coeficiente de absorção, sendo capaz de, em uma profundidade menor, absorver mais fótons que o silício. Significando assim que, para uma mesma espessura, o germânio gera mais corrente do que o silício. Portanto, quando temos a associação de dois tipos de semicondutores, a célula tem uma capacidade maior de fornecimento de energia.

Uma segunda análise foi o estudo da influência da recombinação superficial no dispositivo com multicamadas. Foi possível constatar que, quando o volume do semicondutor é grande, a recombinação não tem uma influência significativa na corrente fotogerada, podendo ser desprezada para dispositivos com uma espessura maior que 1  $\mu\text{m}$ . Por outro lado, se a área de interface for grande quando comparada à espessura, a recombinação é determinante para o dispositivo com germânio por cima do silício.

Um terceiro tópico analisado foi a influência do aumento da espessura do material semicondutor na potência gerada pela célula solar. Observou-se que a corrente gerada pelo dispositivo foi maior quando a espessura da célula solar era maior.

Todavia, houve perdas na tensão de circuito aberto, devido ao aumento da área da junção no silício, contato entre as regiões de anodo, intrínseca e o catodo. Isso demonstrou que há uma relação de equilíbrio entre a corrente gerada e a tensão.

O quarto ponto analisado foi o desempenho geral dos dispositivos solares, onde se observou que o dispositivo que teve o melhor desempenho foi a célula com uma espessura de 10  $\mu\text{m}$ , com a camada de germânio por cima do silício.

Esse dispositivo apresentou um rendimento 48,46% maior quando comparado ao dispositivo com uma camada de germânio abaixo da camada de silício, com a mesma espessura, e um rendimento 136,37% maior quando comparado ao dispositivo inteiramente de silício.

No entanto, o fator de forma do dispositivo com germânio acima do silício foi de 0,44, enquanto a célula inteiramente de silício teve um fator de forma de 0,49. Isso ocorreu porque o aumento na tensão fornecida não acompanhou a mesma taxa de crescimento existente na corrente.

Por fim, é possível dizer que, apesar das perdas de tensão, o ganho de corrente foi eficiente, concluindo então, que os resultados foram satisfatórios e a fabricação de um dispositivo real com as características estudadas seria viável, com relação ao desempenho (uma vez que nesse trabalho não foi abordado a questão do processo de fabricação da lâmina utilizada para a confecção do dispositivo fotovoltaico). Isso porque o ganho de potência da célula híbrida com germânio por cima foi significativo quando comparado com as demais células solares simuladas.

Contudo, nenhuma das células híbridas teve um rendimento superior ao da célula inteiramente de germânio. Essa célula teve todos os parâmetros mostrados na tabela 13 superiores aos das outras células simuladas. Isso aconteceu devido a melhor absorção de fótons e a maior mobilidade de portadores que o germânio tem quando comparado ao silício, gerando, assim, uma maior corrente, uma maior tensão e, conseqüentemente, uma maior potência fotogerada do que todas as outras estruturas simuladas neste trabalho.

Como sugestão para trabalhos futuros, seria de grande interesse a alteração do germânio por outros materiais, tais como arseneto de gálio (GaAs), telureto de cádmio (CdTe), entre outros, para a comparação do rendimento para cada célula solar. Podendo, assim, verificar o comportamento de cada umas das alterações em relação à temperatura, verificação de qual célula teria o melhor Fator de Forma, e, por consequência, especificar a melhor célula solar para cada tipo de aplicação.

## **8. PUBLICAÇÕES GERADAS DURANTE O TRABALHO**

### **Trabalhos completos publicados em anais de eventos**

1. SILVA, F. A.; ANDRADE, M. G. C. Multi-Layers Devices for Solar Cells Application. In: XIV Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology – SEMINATEC, Campinas – Brazil, 2019.
2. SILVA, F. A.; ANDRADE, M. G. C.; DORIA, R. T. Multi-Layers Lateral SOI PIN Photodiodes for Solar Cells Applications. In: Symposium on Microelectronics Technology and devices (IEEE), 34th SBMicro, São Paulo – Brazil, 2019.

## REFERÊNCIAS

- ABIRI, et al. **Multi-application PIN diode**. Second Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System. Beijing: IEEE. 2010.
- AFZALIAN, ; FLANDRE,. Physical modeling and design of thin-film SOI lateral PIN photodiodes. **IEEE Transactions on Electron Devices** , v. 52, n. 6, p. 1116-1122, June 2005. ISSN 0018-9383.
- BULTEEL, O.; DELMARE, R.; FLANDRE, D. **High-Efficiency Solar Cell Embedded in SOI Substrate for ULP Autonomous Circuits**. IEEE International SOI Conference. Foster City: [s.n.]. 2009.
- CALDERÓN, C. L.; AGUIRRE, J. Solar cells as a pedagogical alternative. **Revista de Física**, n. 55, p. 44-55, July - December 2017.
- CALLISTER JR., W. D. **Materials Science and Engineering: An introduction**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- CAUGHEY, D. M.; THOMAS, R. E. Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field. **Proceedings of the IEEE**, v. 55, n. 12, p. 2192-2193, December 1967. ISSN 0018-9219.
- CELLER, ; CRISTOLOVEANU,. Frontiers of Silicon-on-Insulator. **Journal of Applied Physics** , v. 93, n. 9, p. 4955-4978, 1 May 2003.
- CHALABI, H.; BRONGERSMA, M. L. Plasmonics: Harvest season for hot electrons. **Nature Nanotechnology**, v. 8, p. 229-230, Abril 2013.
- CHEN, C. J. **Physics of Solar Energy**. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- CHOPRA, K. L.; PAULSON, P. D.; DUTTA, V. Thin-Film Solar Cells: An Overview. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 12, n. 2-3, p. 69-92, March-May 2004.
- CIESIELSKI, et al. Permittivity of Ge, Te and Se thin films in the 200–1500 nm spectral range. Predicting the segregation effects in silve. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 81, p. 64-67, July 2018.
- COLINGE, J. P. **Silicon-On-Insulator Technology Materials to VLSI**. 3. ed. New York: Springer, 2004. ISBN 1-4020-7773-4.



COLINGE, J. P.; COLINGE, C. A. **Physics of Semiconductor Devices**. 1. ed. New York: Springer, 2002.

CRISTOLOVEANU, S. Introduction to Silicon On Insulator materials and devices. **Microelectronic Engineering**, v. 39, n. 1-4, p. 145-154, December 1997.

CRISTOLOVEANU, S.; LI, S. S. **Electrical Characterization of Silicon-On-Insulator Materials and Devices**. 1. ed. New York: Springer, 1995.

CUEVAS, et al. Surface recombination velocity of highly doped ntype silicon. **Journal of Applied Physics**, v. 80, n. 6, p. 3370-3375, May 1996.

DENG, H. et al. **High-performance monocrystalline silicon could lead the photovoltaic power generation in the future**. China Semiconductor Technology International Conference. Shanghai: IEEE. 15-16 March 2015.

DEPUYDT, B.; THEUWIS, A.; ROMANDIC, I. Germanium: From the first application of Czochralski crystal growth to large diameter dislocation-free wafers. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 9, p. 437-443, October 2006.

DORKEL, J. M.; LETURCQ, P. Carrier Mobilities in Silicon Semi-Empirically Related to Temperature, Doping, and Injection Level. **Solid-State Electronics**, v. 24, n. 9, p. 821-825, September 1981.

DZIEWIOR, J.; SCHMID, W. Auger coefficients for highly doped and highly excited silicon. **Applied Physics Letters**, v. 31, n. 5, p. 346-348, September 1977.

EPE. **Balanco energético Nacional: Ano base 2018**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p. 14-17. 2019.

FAN, et al. **Fabrication of planar heterojunction perovskite solar cells**. International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE). Kwei-Shan: IEEE. 7-10 May 2014.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **Lectures on Physics**. [S.l.]: Basic Books, v. 2, 2010. ISBN 978-0-465-07998-8.

FOGAÇA, J. R. V. Espectro eletromagnético dos elementos químicos. **Brasil escola**, 2013. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/espectro-eletromagnetico-dos-elementos-quimicos.htm>>. Acesso em: 09 Agosto 2019.

FORHAN, N. A. E. **Fabricação de novas heteroestruturas a partir de estruturas SOI obtidas pela técnica "Smat-Cut"**. Tese de Doutorado (Engenharia Elétrica-Microeletrônica) - Escola Politecnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 140. 2006.

GHANNAM, M. Y. et al. **Theoretical study of the impact of bulk and interface recombination on the performance of GaInP/GaAs/Ge triple junction tandem solar cells**. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka: IEEE. 2003.

GIBSON, E. A. **Solar Energy Capture Materials**. Londres: Royal Society of Chemistry, v. 3, 2019. ISBN 978-1-78801-107-5.

GREEN, M. A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 92, n. 11, p. 1305-1310, November 2008.

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (Version 53). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 27, n. 1, p. 3-12, January 2019.

HÄBERLIN, H. **Photovoltaics: system design and practice**. [S.l.]: Wiley-Blacwell, 2012.

HALL, R. N. Electron-Hole Recombination in Germanium. **Physical Review**, v. 87, n. 2, p. 387, July 1952.

HALLER, E. E. Germanium: From its discovery to SiGe devices. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 9, p. 408-422, October 2006.

HAMID, et al. **Simulations of an InGaP/GaAs/SiGe tandem solar cell using AMPS**. International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS). Hammamet: IEEE. 23-25 March 2017.

HISOUR. Tecnologia de células fotovoltaicas de junção múltipla. **HiSour.com**, 2019. Disponível em: <<https://www.hisour.com/pt/multi-junction-photovoltaic-cell-technology-39624/>>. Acesso em: 11 Setembro 2019.

IEA. **World Energy Outlook 2018**. International Energy Agency. Paris, p. 661. 2018a.

IEA. **Renewables information: Overview**. International Energy Agency. Paris, p. 12. 2018b.

- IEA. **Key world energy statistics**. International Energy Agency. Paris, p. 80. 2019a.
- IEA. World Energy Outlook: The gold standard of energy analysis. **www.iea.org**, 2019b. Disponível em: <<https://www.iea.org/weo/weo2018/secure/>>. Acesso em: 12 Agosto 2019.
- JÄGER, et al. **Solar Energy: Fundamentals, Technology, and Systems**. 1. ed. Delft: Delft University of Technology, 2014.
- JELLISON JR., G. E. Optical functions of GaAs, GaP, and Ge determined by two-channel polarization modulation ellipsometry. **Optical Materials**, v. 1, n. 3, p. 151-160, September 1992.
- JN. Criado chip subcutâneo para monitorizar consumo de álcool. **Jornal de Notícias**, 10 Abril 2018. Disponível em: <<https://www.jn.pt/inovacao/criado-chip-subcutaneo-para-monitorizar-consumo-de-alcool-9249101.html>>. Acesso em: 7 Novembro 2019.
- KERR, J.; CUEVAS,. Very low bulk and surface recombination in oxidized silicon wafers. **Semiconductor Science and Technology**, v. 17, n. 1, p. 35-38, December 2001.
- KHANNA, et al. A Fill Factor Loss Analysis Method for Silicon Wafer Solar Cells. **IEEE Journal of Photovoltaics** , v. 3, n. 4, p. 1170-1177, October 2013. ISSN 2156-3403.
- KLAASSEN, D. B. M. A unified mobility model for device simulation—II. Temperature dependence of carrier mobility and lifetime. **Solid-State Electronics**, v. 35, n. 7, p. 961-967, July 1992a.
- KLAASSEN, D. B. M. A unified mobility model for device simulation—I. Model equations and concentration dependence. **Solid-State Electronics**, v. 35, n. 7, p. 953-959, July 1992b.
- KONNO, K. et al. Frequency-Domain-Based Carrier Transport Model, jan. 2004.
- KOWSAR, A. et al. Progress in Major Thin-film Solar Cells: Growth Technologies, Layer Materials and Efficiencies. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 9, n. 2, p. 579-597, June 2019.

KR, R. et al. Silicon on insulator technology review. **International Journal of Engineering Science & Emerging Technologies**, v. 1, n. 1, p. 1-16, 1 May 2011. ISSN 2231 – 6604.

LI, Z.-M. et al. Self-Consistent Two-Dimensional Model of Quantum-Well Semiconductor Lasers: Optimization of a GRIN-SCH SQW Laser Structure. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 28, n. 4, p. 792-803, April 1992. ISSN 0018-9197.

LIM, B. et al. **Permanent deactivation of the boron-oxygen recombination center in silicon solar cells**. Proc. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference. Valencia: ResearchGate. 1 January 2008.

LIU, J. et al. Photodiode with Low Dark Current Built in Silicon-on-Insulator Using Electrostatic Doping. **Solid-States Electronics**, 26 November 2019.

LOPEZ, R. A. **Energia Solar para Produção de Eletricidade**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2012.

LOULOU, M. et al. **Current dependence of series and shunt resistances of solar cells**. 9th International Renewable Energy Congress (IREC). Hammamet: IEEE. 2018.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas & Minerais Industriais: Usos e especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

MAHARISHI SOLAR TECHNOLOGY. Products Maharishi Solar. **Site Maharish Solar**, 2009. Disponível em: <<http://www.maharishisolar.com/products.php?productid=3>>. Acesso em: 9 Setembro 2019.

MALYUTENKO, V.; CHYRCHYK, S. Surface recombination velocity in Si wafers by photoinduced thermal emission. **Applied Physics Letters**, v. 89, n. 5, p. 051909-1 - 051909-3, 2 August 2006.

MARKVART, T.; CASTAÑER, L. **Solar cells: materials, manufacture and operation**. 1. ed. Oxford: Elsevier, v. 1, 2005. ISBN 78-1-85617-457-1.

MARQUES, P. S. G. **Caracterização e Purificação de Quartzos para Indústria Fotovoltaica**. Trabalho de Graduação (Engenharia Metalúrgica) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 50. 2013.

MELLO, H. A. D.; BIASI, R. S. D. **Introdução à física dos semicondutores**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA. , 1975.

MME. **Energia Solar no Brasil e no Mundo**. Ministério de Minas e energia. Brasília. 2017.

MORI, V.; SANTOS, R. L. C.; SOBRAL, L. G. S. **Metalurgia do Silício**: Processos de Obtenção e Impactos Ambientais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. 42 p.

MÜNZER, K. A. et al. Thin Monocrystalline Silicon Solar Cells. **IEEE Transactions on Electron Devices**, 46, n. 10, October 1999. 2055-2061.

PALAIS, O.; ARCARI, A. Contactless measurement of bulk lifetime and surface recombination velocity in silicon wafers. **Journal of Applied Physics**, v. 93, n. 8, p. 4686-4690, 15 April 2003.

PEHARZ, G. et al. **Challenges in the industrial production of CZTS monograin solar cells**. IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). Washington: IEEE. 25-30 June 2017.

POESPAWATI, N. et al. **Perovskite Solar Cells Based on Organic-metal halide Perovskite Materials**. 4th International Conference on Nano Electronics Research and Education (ICNERE). Hamamatsu: IEEE. 27-29 November 2018.

QUASCHNING, V. **Regenerative Energiesysteme**: Technologie - Berechnung - Simulation. [S.l.]: Hanser Verlag München , 2009.

RAPHAEL, E. et al. Células Solares de perovskitas: Uma nova tecnologia emergente. **Química nova**, São Paulo, v. 41, n. 1, p. 61-74, Fevereiro 2018.

REED, G. T.; KNIGHTS, A. P. **Silicon Photonics**: An Introduction. Chichester: John Wiley & Sons Ltda., 2004. ISBN 0-470-87034-6.

ROSENBERG, E. Germanium: environmental occurrence, importance and speciation. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 8, p. 29-57, March 2009.

ROULSTON, D. J.; ARORA, N. D.; CHAMBERLAIN, S. G. Modeling and measurement of minority-carrier lifetime versus doping in diffused layers of n+-p silicon diodes. **IEEE**

**Transactions on Electron Devices** , v. 29, n. 2, p. 284-291, February 1982. ISSN 0018-9383.

SAGA, T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. **NPG Asia Materials**, v. 2, p. 96-102, July 2010.

SAHA, S.; CHOWDHURY, R.; HASSAN, M. M. S. **Improvement of the output performance of CZTS thin film solar cell**. 2nd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (ICECTE). Rajshahi: IEEE. 8-10 December 2016.

SAMPAIO, J. A. et al. **Silício Grau Solar – Uma Revisão das Tecnologias de Produção**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2019.

SHOCKLEY, W.; READ, JR., W. T. Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons. **Physical Review**, v. 87, n. 5, p. 835-842, September 1952.

SILVA, F.; DORIA, R.; SOUZA, M. **Influence of the Intrinsic Length on the Behavior of PIN Diodes Fabricated on SOI Substrates Working as Solar Cells**. 33rd Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro). Bento Gonçalves: IEEE. 2018.

SILVA, T. J. V. **Obtenção e caracterização de filmes finos de ZnO**. Monografia do curso de graduação em Física da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 49. 2011.

SILVACO, INC. **Atlas User's Manual: Device Simulation Software**. Santa Clara, p. 1715. 2016.

SOLARGIS. Global Solar Atlas. **www.globalsolaratlas.info**. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/download/world>>. Acesso em: 17 Fevereiro 2020.

SOUZA, M. D. et al. Analysis of Lateral SOI PIN Diodes for the Detection of Blue and UV Wavelengths in a Wide Temperature Range. **ECS Transactions**, v. 31, n. 1, p. 199-206, Set 2010.

SOUZA, R. D. Painel Solar (Placa Solar): A Verdade Sobre o Preço e Como Funciona. **BlueSol energia solar**, 12 Dezembro 2016. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/painel-solar-preco-e-como-funciona/>>. Acesso em: 15 Agosto 2019.

SZE, S. M.; NG, K. K. **Physics of Semiconductor Devices**. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

TEIXEIRA, T. B. **Influência da temperatura em aglomerados auto-reconfiguráveis de células solares fotovoltaicas**. Monografia de PósGraduação em Física (Especialista em Microeletrônica – Microfabricação) - UFMG. Belo Horizonte, p. 72. 2008.

TIEPOLO, G. M. et al. **Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná**. 1. ed. Curitiba: UTFPR, 2017.

TRITA, A. et al. Measurement of carrier lifetime and interface recombination velocity in Si–Ge. **Applied Physics Letters**, v. 91, n. 4, p. 041112-1 - 041112-3, 26 July 2007.

TUNES, S. Tecnologia IoT para monitoramento florestal remoto. **FAPESP Pesquisa para inovação**, 19 Junho 2018. Disponível em: <[http://pesquisaparinovacao.fapesp.br/tecnologia\\_iot\\_para\\_monitoramento\\_floresta\\_l\\_remoto/677](http://pesquisaparinovacao.fapesp.br/tecnologia_iot_para_monitoramento_floresta_l_remoto/677)>. Acesso em: 7 Novembro 2019.

VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio Século de História Fotovoltaica. **Gazeta de Física**, Lisboa, v. 29, p. 10-15, 2006.

VEISSID, N.; PEREIRA, E. B. Estimativa do Albedo Planetário empregando dados do Experimento Célula Solar do satélite brasileiro SCD2. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 18, n. 1, p. 25-38, Março 2000. ISSN 0102-261X.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2012.

WIKIPÉDIA. Silício. **Wikipédia: A enciclopédia livre**, 26 Junho 2019a. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Silício>>. Acesso em: 5 Setembro 2019.

WIKIPÉDIA. Germânio. **Wikipédia: A enciclopédia livre**, 4 Junho 2019b. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Germânio>>. Acesso em: 5 Setembro 2019.

WIKIWAND. Pin Diode. **Wikiwand**, 2019. Disponível em: <<https://www.wikiwand.com/de/Pin-Diode>>. Acesso em: 16 Setembro 2019.

XU, Y. et al. Efficient Polycrystalline Silicon Solar Cells with Double Metal Oxide Layers. **Dalton Transactions**, v. 48, n. 11, p. 3687-3694, 2019.

YABLONOVITCH, E. et al. Unusually Low Surface-Recombination Velocity on Silicon and Germanium Surfaces. **Physical Review Letters**, v. 57, n. 2, p. 249-252, 14 July 1986.

ZENITANI, H. et al. **Mobility Model for Advanced SOI-MOSFETs Including Back-Gate Contributions**. International Conference on Solid State Devices and Materials. Tsukuba: [s.n.]. 2014. p. 856-857.



## APÊNDICE

Linguagem de programação utilizada para simular o dispositivo híbrido de 10  $\mu\text{m}$  de espessura total, com germânio acima do silício.

```
#iniciando o programa
1. go atlas simflags=" -P 7"

#iniciando a malha
2. mesh space.mult=1

#especificando formato da malha
3. x.mesh loc=0 spac=0.05
4. x.mesh loc=0.5 spac=0.05
5. x.mesh loc=1 spac=0.2
6. x.mesh loc=2 spac=0.4
7. x.mesh loc=3 spac=0.4
8. x.mesh loc=4 spac=0.4
9. x.mesh loc=5 spac=0.4
10. x.mesh loc=6 spac=0.4
11. x.mesh loc=7 spac=0.4
12. x.mesh loc=8 spac=0.2
13. x.mesh loc=8.5 spac=0.05
14. x.mesh loc=9 spac=0.05
15. x.mesh loc=9.5 spac=0.05
16. x.mesh loc=10 spac=0.4
17. x.mesh loc=11 spac=0.4
18. x.mesh loc=12 spac=0.4
19. x.mesh loc=13 spac=0.4
20. x.mesh loc=14 spac=0.4
21. x.mesh loc=15 spac=0.4
22. x.mesh loc=16 spac=0.2
23. x.mesh loc=16.5 spac=0.05
24. x.mesh loc=17 spac=0.05
25. x.mesh loc=17.5 spac=0.05
26. x.mesh loc=18 spac=0.2
27. x.mesh loc=19 spac=0.4
28. x.mesh loc=20 spac=0.4
29. x.mesh loc=21 spac=0.4
30. x.mesh loc=22 spac=0.4
31. x.mesh loc=23 spac=0.4
32. x.mesh loc=24 spac=0.4
33. x.mesh loc=25 spac=0.2
34. x.mesh loc=25.5 spac=0.05
35. x.mesh loc=26 spac=0.05

36. y.mesh loc=-0.28 spac=0.04
37. y.mesh loc=0 spac=0.008
38. y.mesh loc=0.02 spac=0.008
39. y.mesh loc=0.04 spac=0.04
40. y.mesh loc=0.09 spac=0.4
41. y.mesh loc=1.7 spac=0.4
42. y.mesh loc=1.8 spac=0.04
43. y.mesh loc=1.9 spac=0.02
44. y.mesh loc=2 spac=0.02
45. y.mesh loc=2.1 spac=0.02
46. y.mesh loc=2.2 spac=0.8
47. y.mesh loc=9.8 spac=0.8
48. y.mesh loc=9.9 spac=0.02
49. y.mesh loc=10 spac=0.02
```

```
50. y.mesh loc=10.05 spac=0.02
51. y.mesh loc=10.1 spac=0.1
52. y.mesh loc=10.38 spac=0.1

#Especificando cada região do dispositivo
53. region num=1 x.min=0 x.max=9 y.min=2 y.max=10.0 material=silicon
54. region num=2 x.min=9 x.max=17 y.min=2 y.max=10.0 material=silicon
55. region num=3 x.min=17 x.max=26 y.min=2 y.max=10.0 material=silicon
56. region num=4 x.min=0 x.max=26 y.min=0.0 y.max=2 material=germanium
57. region num=5 x.min=0 x.max=26 y.min=10.0 y.max=10.38 material=oxide
58. region num=6 x.min=0 x.max=26 y.min=-0.28 y.max=0.0 material=oxide

#Especificando tamanho e posição dos eletrodos
59. electrode num=1 name=anode y.min=2.05 y.max=10.0 x.min=-0.01 x.max=0
60. electrode num=2 name=cathode y.min=2.05 y.max=10.0 x.min=26 x.max=26.01

#Dopagem de cada região de material semiconductor
61. doping region=1 gaussian boron dir=x peak=0 conc=1e20 characteristic=1
62. doping region=2 uniform boron conc=1e15
63. doping region=3 gaussian arsenic dir=x peak=26 conc=4e20
    characteristic=30
64. doping region=4 uniform boron conc=1e15

#Dados de interface do dispositivo e velocidade de recombinação superficial
65. interface thermionic s.s s.i
66. interface material=germanium s.n=5.8e4
67. interface region=1 s.n=1e5
68. interface region=2 s.n=1e5

# Modelos físicos utilizados para simulação
69. models optr ubgn analytic ccsmob fldmob kla li srh consrh auger print
    temp=300
70. impact selberherr

#características do silício na região de anodo
71. material region=1 nc300=1.8e22
72. material region=1 nv300=0.72e22
73. material region=1 ubgn.c=3.9e-6
74. material region=1 ubgn.b=3.1e13
75. impact region=1 csub.n=2e18
76. material region=1 augn=2.8e-33
77. material region=1 augp=9.9e-34

#características do silício na região intrínseca
78. material region=2 nc300=1.8e22
79. material region=2 nv300=0.72e22
80. material region=2 ubgn.c=3.9e-6
81. material region=2 ubgn.b=3.1e13
82. impact region=2 csub.n=2e18
83. material region=2 augn=2.8e-33
84. material region=2 augp=9.9e-34

#características do silício na região de catodo
85. material region=3 nc300=1.8e22
86. material region=3 nv300=0.72e22
87. material region=3 eg300=1.5
88. material region=3 ubgn.c=3.9e-8
89. material region=3 ubgn.b=3.1e16
90. impact region=3 csub.n=4e18
91. material region=3 augn=2.8e-33
92. material region=3 augp=9.9e-34
```

```
#Especificando feixe de luz incidente no dispositivo
93. beam num=1 x.origin=13 y.origin=-0.4 angle=90 AM1.5 wavel.start=0.2
    wavel.end=1.2 wavel.num=101

#métodos utilizados para convergência
94. method gummel newton

#Simulando interação entre o dispositivo e a luz incidente
95. solve init
96. solve previous
97. solve prev b1=0.0001
98. solve prev b1=0.001
99. solve prev b1=0.01
100. solve prev b1=0.1
101. solve b1=1.0
102. log
    outf=celula_com_germanio_por_cima_2000nm_silicio_8000nm_com_luz.log
103. solve vanode=-0.2 vstep=0.001 vfinal=0.4 name=anode
104. log off

#Simulando dispositivo sem a luz incidente
105. solve init
106. solve previous
107. log
    outf=celula_com_germanio_por_cima_2000nm_silicio_8000nm_sem_luz.log
108. solve vanode=-0.2 vstep=0.001 vfinal=0.3 name=anode
109. log off

#Chamando novamente o início do programa
110. go atlas simflags=" -P 7"

#iniciando a malha
111. mesh space.mult=1

#especificando formato da malha
112. x.mesh loc=0 spac=0.05
113. x.mesh loc=0.5 spac=0.05
114. x.mesh loc=1 spac=0.2
115. x.mesh loc=2 spac=0.4
116. x.mesh loc=3 spac=0.4
117. x.mesh loc=4 spac=0.4
118. x.mesh loc=5 spac=0.4
119. x.mesh loc=6 spac=0.4
120. x.mesh loc=7 spac=0.4
121. x.mesh loc=8 spac=0.2
122. x.mesh loc=8.5 spac=0.05
123. x.mesh loc=9 spac=0.05
124. x.mesh loc=9.5 spac=0.05
125. x.mesh loc=10 spac=0.4
126. x.mesh loc=11 spac=0.4
127. x.mesh loc=12 spac=0.4
128. x.mesh loc=13 spac=0.4
129. x.mesh loc=14 spac=0.4
130. x.mesh loc=15 spac=0.4
131. x.mesh loc=16 spac=0.2
132. x.mesh loc=16.5 spac=0.05
133. x.mesh loc=17 spac=0.05
134. x.mesh loc=17.5 spac=0.05
135. x.mesh loc=18 spac=0.2
136. x.mesh loc=19 spac=0.4
```

```
137. x.mesh loc=20 spac=0.4
138. x.mesh loc=21 spac=0.4
139. x.mesh loc=22 spac=0.4
140. x.mesh loc=23 spac=0.4
141. x.mesh loc=24 spac=0.4
142. x.mesh loc=25 spac=0.2
143. x.mesh loc=25.5 spac=0.05
144. x.mesh loc=26 spac=0.05

145. y.mesh loc=-0.28 spac=0.04
146. y.mesh loc=0 spac=0.008
147. y.mesh loc=0.02 spac=0.008
148. y.mesh loc=0.04 spac=0.04
149. y.mesh loc=0.09 spac=0.4
150. y.mesh loc=1.7 spac=0.4
151. y.mesh loc=1.8 spac=0.04
152. y.mesh loc=1.9 spac=0.02
153. y.mesh loc=2 spac=0.02
154. y.mesh loc=2.1 spac=0.02
155. y.mesh loc=2.2 spac=0.8
156. y.mesh loc=9.8 spac=0.8
157. y.mesh loc=9.9 spac=0.02
158. y.mesh loc=10 spac=0.02
159. y.mesh loc=10.05 spac=0.02
160. y.mesh loc=10.1 spac=0.1
161. y.mesh loc=10.38 spac=0.1

#Especificando cada região do dispositivo
162. region num=1 x.min=0 x.max=9 y.min=2 y.max=10.0 material=silicon
163. region num=2 x.min=9 x.max=17 y.min=2 y.max=10.0 material=silicon
164. region num=3 x.min=17 x.max=26 y.min=2 y.max=10.0 material=silicon
165. region num=4 x.min=0 x.max=26 y.min=0.0 y.max=2 material=germanium
166. region num=5 x.min=0 x.max=26 y.min=10.0 y.max=10.38 material=oxide
167. region num=6 x.min=0 x.max=26 y.min=-0.28 y.max=0.0 material=oxide

#Especificando tamanho e posição dos eletrodos
168. electrode num=1 name=anode y.min=2.05 y.max=10.0 x.min=-0.01 x.max=0
169. electrode num=2 name=cathode y.min=2.05 y.max=10.0 x.min=26
    x.max=26.01

#Dopagem de cada região de material semiconductor
170. doping region=1 gaussian boron dir=x peak=0 conc=1e20 characteristic=1
171. doping region=2 uniform boron conc=1e15
172. doping region=3 gaussian arsenic dir=x peak=26 conc=4e20
    characteristic=30
173. doping region=4 uniform boron conc=1e15

#Dados de interface do dispositivo e velocidade de recombinação superficial
174. interface thermionic s.s s.i
175. interface material=germanium s.n=5.8e4
176. interface region=1 s.n=1e5
177. interface region=2 s.n=1e5

#Modelos físicos utilizados para simulação
178. models optr ubgn analytic ccsmob fldmob kla li srh consrh auger print
    temp=300
179. impact selberherr

#características do silício na região de anodo
180. material region=1 nc300=1.8e22
181. material region=1 nv300=0.72e22
```

```
182. material region=1 ubgn.c=3.9e-6
183. material region=1 ubgn.b=3.1e13
184. impact region=1 csub.n=2e18
185. material region=1 augn=2.8e-33
186. material region=1 augp=9.9e-34

#características do silício na região intrínseca
187. material region=2 nc300=1.8e22
188. material region=2 nv300=0.72e22
189. material region=2 ubgn.c=3.9e-6
190. material region=2 ubgn.b=3.1e13
191. impact region=2 csub.n=2e18
192. material region=2 augn=2.8e-33
193. material region=2 augp=9.9e-34

#características do silício na região de catodo
194. material region=3 nc300=1.8e22
195. material region=3 nv300=0.72e22
196. material region=3 eg300=1.5
197. material region=3 ubgn.c=3.9e-8
198. material region=3 ubgn.b=3.1e16
199. impact region=3 csub.n=4e18
200. material region=3 augn=2.8e-33
201. material region=3 augp=9.9e-34

#Especificando feixe de luz incidente no dispositivo
202. beam num=1 x.origin=13 y.origin=-0.4 angle=90 AM1.5

#métodos utilizados para convergência
203. method gummel newton

#Simulando interação entre o dispositivo e a luz incidente para resposta
espectral
204. solve init
205. solve previous
206. solve prev b1=0.0001
207. solve prev b1=0.001
208. solve prev b1=0.01
209. solve prev b1=0.1
210. log
outf=resposta_espectral_celula_com_germanio_por_cima_2000nm_silicio_8000nm.
log

#Simulação da interação do dispositivo para diversos comprimentos de onda
211. solve b1=1.0 beam=1 lambda=0.2 wstep=0.005 wfinal=1.4

#Chamando novamente o início do programa
212. go atlas simflags=" -P 7"

213. #iniciando a malha
214. mesh space.mult=1

#especificando formato da malha
215. x.mesh loc=0 spac=0.05
216. x.mesh loc=0.5 spac=0.05
217. x.mesh loc=1 spac=0.2
218. x.mesh loc=2 spac=0.4
219. x.mesh loc=3 spac=0.4
220. x.mesh loc=4 spac=0.4
221. x.mesh loc=5 spac=0.4
222. x.mesh loc=6 spac=0.4
```

```
223. x.mesh loc=7 spac=0.4
224. x.mesh loc=8 spac=0.2
225. x.mesh loc=8.5 spac=0.05
226. x.mesh loc=9 spac=0.05
227. x.mesh loc=9.5 spac=0.05
228. x.mesh loc=10 spac=0.4
229. x.mesh loc=11 spac=0.4
230. x.mesh loc=12 spac=0.4
231. x.mesh loc=13 spac=0.4
232. x.mesh loc=14 spac=0.4
233. x.mesh loc=15 spac=0.4
234. x.mesh loc=16 spac=0.2
235. x.mesh loc=16.5 spac=0.05
236. x.mesh loc=17 spac=0.05
237. x.mesh loc=17.5 spac=0.05
238. x.mesh loc=18 spac=0.2
239. x.mesh loc=19 spac=0.4
240. x.mesh loc=20 spac=0.4
241. x.mesh loc=21 spac=0.4
242. x.mesh loc=22 spac=0.4
243. x.mesh loc=23 spac=0.4
244. x.mesh loc=24 spac=0.4
245. x.mesh loc=25 spac=0.2
246. x.mesh loc=25.5 spac=0.05
247. x.mesh loc=26 spac=0.05

248. y.mesh loc=-0.28 spac=0.04
249. y.mesh loc=0 spac=0.008
250. y.mesh loc=0.02 spac=0.008
251. y.mesh loc=0.04 spac=0.04
252. y.mesh loc=0.09 spac=0.4
253. y.mesh loc=1.7 spac=0.4
254. y.mesh loc=1.8 spac=0.04
255. y.mesh loc=1.9 spac=0.02
256. y.mesh loc=2 spac=0.02
257. y.mesh loc=2.1 spac=0.02
258. y.mesh loc=2.2 spac=0.8
259. y.mesh loc=9.8 spac=0.8
260. y.mesh loc=9.9 spac=0.02
261. y.mesh loc=10 spac=0.02
262. y.mesh loc=10.05 spac=0.02
263. y.mesh loc=10.1 spac=0.1
264. y.mesh loc=10.38 spac=0.1

#Especificando cada região do dispositivo
265. region num=1 x.min=0 x.max=9 y.min=2 y.max=10.0 material=silicon
266. region num=2 x.min=9 x.max=17 y.min=2 y.max=10.0 material=silicon
267. region num=3 x.min=17 x.max=26 y.min=2 y.max=10.0 material=silicon
268. region num=4 x.min=0 x.max=26 y.min=0.0 y.max=2 material=germanium
269. region num=5 x.min=0 x.max=26 y.min=10.0 y.max=10.38 material=oxide
270. region num=6 x.min=0 x.max=26 y.min=-0.28 y.max=0.0 material=oxide

#Especificando tamanho e posição dos eletrodos
271. electrode num=1 name=anode y.min=2.05 y.max=10.0 x.min=-0.01 x.max=0
272. electrode num=2 name=cathode y.min=2.05 y.max=10.0 x.min=26
x.max=26.01

#Dopagem de cada região de material semiconductor
273. doping region=1 gaussian boron dir=x peak=0 conc=1e20 characteristic=1
274. doping region=2 uniform boron conc=1e15
```

```
275. doping region=3 gaussian arsenic dir=x peak=26 conc=4e20
    characteristic=30
276. doping region=4 uniform boron conc=1e15

#Dados de interface do dispositivo e velocidade de recombinação superficial
277. interface thermionic s.s s.i
278. interface material=germanium s.n=5.8e4
279. interface region=1 s.n=1e5
280. interface region=2 s.n=1e5

#Modelos físicos utilizados para simulação
281. models optr ubgn analytic ccsmob fldmob kla li srh consrh auger print
    temp=300
282. impact selberherr

# características do silício na região de anodo
283. material region=1 nc300=1.8e22
284. material region=1 nv300=0.72e22
285. material region=1 ubgn.c=3.9e-6
286. material region=1 ubgn.b=3.1e13
287. impact region=1 csub.n=2e18
288. material region=1 augn=2.8e-33
289. material region=1 augp=9.9e-34

# características do silício na região intrínseca
290. material region=2 nc300=1.8e22
291. material region=2 nv300=0.72e22
292. material region=2 ubgn.c=3.9e-6
293. material region=2 ubgn.b=3.1e13
294. impact region=2 csub.n=2e18
295. material region=2 augn=2.8e-33
296. material region=2 augp=9.9e-34

# características do silício na região de catodo
297. material region=3 nc300=1.8e22
298. material region=3 nv300=0.72e22
299. material region=3 eg300=1.5
300. material region=3 ubgn.c=3.9e-8
301. material region=3 ubgn.b=3.1e16
302. impact region=3 csub.n=4e18
303. material region=3 augn=2.8e-33
304. material region=3 augp=9.9e-34

# Especificando feixe de luz incidente no dispositivo
305. beam num=1 x.origin=13 y.origin=-0.4 angle=90 AM1.5 wavel.start=0.2
    wavel.end=1.2 wavel.num=101

#Métodos utilizados para convergência
306. method gummel newton

#Simulando interação entre o dispositivo e a luz incidente
307. solve init
308. solve previous
309. solve prev b1=0.0001
310. solve prev b1=0.001
311. solve prev b1=0.01
312. solve prev b1=0.1
313. solve b1=1.0
```

```
#Salvando em arquivo de dados
314. log
    outf=PIN_celula_com_germanio_por_cima_2000nm_silicio_8000nm_300_kelvin
    .log

#Gerando resultado de corrente gerada no dispositivo simulado
315. solve vanode=-1 vstep=0.001 vfinal=0.6 name=anode

#Salvando estrutura e dados de interação da estrutura simulada
316. structure
    outf=PIN_celula_com_germanio_por_cima_2000nm_silicio_8000nm_300_kelvin
    .str

#Extração dos principais valores da célula solar
317. extract init
    infile="PIN_celula_com_germanio_por_cima_2000nm_silicio_8000nm_300_kelvin.log"

#Colocando área ativa do dispositivo em cm2
318. set area=6.76e-6

#extraíndo dados da célula simulada com comprimento de 26 µm
319. extract name="Isc" y.val from curve(V."anode", (I."cathode"*26)) where
    x.val=0
320. extract name="Voc" x.val from curve(V."anode", (I."cathode"*26)) where
    y.val=0
321. extract name="Pm" max(curve(V."anode", (V."anode" *
    (I."cathode"*26))))
322. extract name="Vm" x.val from curve(V."anode",
    (V."anode"*(I."cathode"*26))) where y.val="$Pm"
323. extract name="Im" "$Pm"/"$Vm"
324. extract name="FF" "$Pm"/("$Isc" * "$Voc")
325. extract name="potencia_incidente" max(beam."1")
326. extract name="Eficiencia em %"
    ((abs("$Pm")/($potencia_incidente*$area))*100)

#Finalizando a simulação
327. quit
```