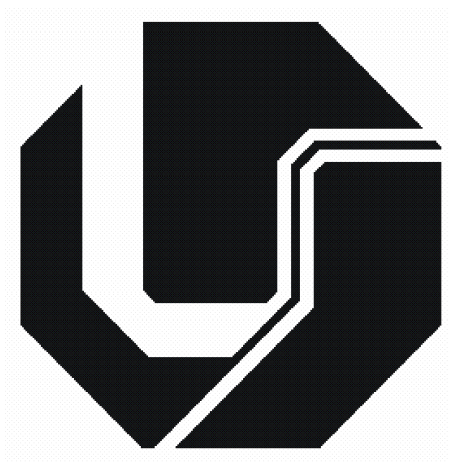


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**MODELAMENTO COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO  
DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS BASEADO NAS PROPRIEDADES  
FÍSICAS DOS MATERIAIS**

**FERNANDO BARBOSA MATOS**

**FEVEREIRO  
2006**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MODELAMENTO COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO  
DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS BASEADO NAS PROPRIEDADES  
FÍSICAS DOS MATERIAIS**

**Área de Concentração: Eletricidade Rural e Fontes  
Alternativas de Energia**

Dissertação de Mestrado apresentada por Fernando Barbosa Matos à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS. Aprovada 17/02/2006 pela banca examinadora:

Prof. José Roberto Camacho, PhD (UFU) – Orientador  
Prof. Carlos Henrique Salerno, Dr (UFU)  
Prof. Ricardo Rüther, PhD (UFSC)  
Prof. Sebastião Camargo Guimarães Jr., Dr (UFU)

**UBERLÂNDIA - MG  
2006**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

- M433 Matos, Fernando Barbosa, 1977-  
m Modelamento computacional do comportamento de células fotovoltaicas baseado nas propriedades físicas dos materiais / Fernando Barbosa Matos. - Uberlândia, 2006.  
125f. : il.  
Orientador: José Roberto Camacho.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia  
Progra-  
ma de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
Inclui bibliografia.  
1. 1. Sistemas de energia elétrica - Teses. 2. Geração de energia fotovoltaica - Teses. I. Camacho, José Roberto. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.311

**FERNANDO BARBOSA MATOS**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO DE  
CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

Dissertação **APROVADA** pelo  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Uberlândia

Área de Concentração: Eletricidade  
Rural e Fontes de Energia Alternativa

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. José Roberto Camacho, PhD (UFU) – Orientador

---

Prof. Carlos Henrique Salerno, Dr (UFU)

---

Prof. Ricardo Rüther, PhD (UFSC)

---

Prof. Sebastião Camargo Guimarães Jr., Dr (UFU)

*“Este trabalho é dedicado à memória de Gildásio de Souza Matos por sua luta e esforço para dar uma boa educação aos seus filhos”*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador e mentor José Roberto Camacho por ter me guiado em tão árdua caminhada para a conclusão desse trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Urutaí por me ceder gentilmente seus equipamentos para a realização dessa pesquisa.

À minha família pelo apoio incondicional nessa intrépida jornada.

À minha amada esposa Josiane Silvério Calaça Matos por sempre acreditar em mim, mesmo quando eu mesmo não acreditava e por sua paciência e dedicação que foram de fundamental importância para a concretização desse objetivo.

MATOS, Fernando Barbosa. **MODELAMENTO COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS BASEADO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS** 2006. 125f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG.

### **Resumo**

O Objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que permitirá aos pesquisadores e profissionais que trabalham com energia solar a rápida verificação do comportamento de células solares baseada nos materiais utilizados na confecção das mesmas, assim como, verificar o seu funcionamento a partir dos mais diversos cenários de operação.

Este modelo é desenvolvido a partir das propriedades físicas dos materiais componentes, e do conceito de troca dos materiais constituintes da célula solar, assim como os parâmetros de funcionamento são rapidamente simulados pelo programa, permitindo a comparação entre diferentes tecnologias, obtendo-se assim uma ampla visão do comportamento das mesmas.

O programa elaborado a partir do modelo matemático presente na literatura, permite uma rápida visualização das simulações que mostram o comportamento de células fotovoltaicas, como também dos módulos solares construídos sob essas configurações.

Assim ao pesquisador é poupado tempo, material, e recursos financeiros, entre outros, pois os resultados são rapidamente obtidos com alto nível de fidelidade ao comportamento real destes dispositivos atualmente presentes no mercado.

Palavras Chaves: Energia Solar, Célula Fotovoltaica, Modelagem Computacional, Simulação por Computador, Propriedades Físicas.

MATOS, Fernando Barbosa. **MODELAMENTO COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS BASEADO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS** 2006. 125f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG.

### **Abstract**

The main task in this work is the development of a computational tool that will allow researchers and professionals in the field of solar energy a fast verification of the behavior of solar cells based in the materials used for their assembling, and also to check their operation from different operating scenarios.

This model is developed from physical properties of component materials. The change of materials of solar cells, and also the working parameters are quickly simulated by the program allowing a comparison among different technologies allowing a broad vision of their behavior.

The program elaborated from mathematical model present in the literature, allows a quick visualization of simulation of answers of photovoltaic cells behavior, as well as the behavior of the whole solar panel built under specified electrical configurations.

Therefore, the researcher will save time, materials, and financial resources, among other savings, since the results are quickly obtained with a high degree of fidelity to the real behavior of the solar panels present today in the market.

Key words: Solar Energy, Photovoltaic Cell, Computer Modeling, Computer Simulation, Physical Properties.



## Lista de Figuras

Figura 1.1: Espectro da Luz Solar .....	7
Figura 2.1: Tabela Periódica .....	17
Figura 2.2: Escala de Condutividade.....	17
Figura 2.3: Estrutura cristalina do cubo de corpo centrado (bbc) .....	20
Figura 2.4: Estrutura Cristalina do cubo de face centrada (fcc).....	21
Figura 2.5: Estrutura de Diamante do Si e do Ge.....	21
Figura 2.6: Estrutura zinblende do GaAs .....	22
Figura 3.1: Algoritmo para a determinação da Energia do fóton incidente .....	41
Figura 3.2: Espectro Solar da Luz incidente do Sol .....	42
Figura 3.3: Espectro Solar da Luz Branca.....	43
Figura 3.4: Algoritmo para a determinação do número de fótons incidentes para cada comprimento de onda .....	45
Figura 3.5: Algoritmo para o cálculo do valor do coeficiente de extinção para todos comprimentos de onda da análise.....	47
Figura 3.6: Algoritmo para o Cálculo da constante de absorção $\alpha$ .....	48
Figura 3.7: Algoritmo para a determinação da intensidade luminosa para cada comprimento de onda .....	49
Figura 3.8: Algoritmo para o cálculo do valor do número de onda .....	49
Figura 3.9: Algoritmo para a determinação do momento do fóton para cada comprimento de onda.....	50
Figura 3.10: Algoritmo para a determinação da energia para cada nível quântico .....	51
Figura 3.11: Algoritmo para a determinação do vetor $\beta_n$ para a Resolução da fotocorrente.....	60
Figura 3.12: Algoritmo para a determinação do vetor $\gamma_n$ para a Resolução da fotocorrente.....	60
Figura 3.13: Algoritmo para a determinação do Vetor $\lambda_n$ para a solução da fotocorrente.....	61
Figura 3.14: Algoritmo que demonstra o resultado final da fotocorrente no semiconductor tipo N.....	61
Figura 3.15: Algoritmo para a determinação do vetor $\beta_p$ para a Resolução da fotocorrente.....	63
Figura 3.16: Algoritmo para a determinação do vetor $\gamma_p$ para a Resolução da fotocorrente.....	63
Figura 3.17: Algoritmo para a determinação do Vetor $\lambda_p$ para a solução da fotocorrente.....	64

Figura 3.18: Algoritmo que representa o Resultado final da fotocorrente no semiconductor tipo P.....	64
Figura 3.19: Algoritmo do gráfico da característica tensão versus corrente da célula fotovoltaica.....	66
Figura 3.20: Gráfico característico da tensão pela corrente de uma célula fotovoltaica.....	66
Figura 3.21: Algoritmo para a determinação do ponto de máxima potência e desenho do gráfico potência versus tensão.....	67
Figura 3.22: Gráfico característico da potência pela tensão de uma célula fotovoltaica.....	67
Figura 4.1: Seção de Entrada de Dados do Sistema.....	78
Figura 4.2: Seção de Fótons do programa de modelagem computacional.....	79
Figura 4.3: Seção absorção do programa de modelagem computacional.....	81
Figura 4.4: Tela do gráfico alfa gerado pelo programa de modelagem computacional mostrando os gráficos da constante alfa e do coeficiente de extinção.....	82
Figura 4.5: Seção Corrente Intrínseca do programa de modelagem de dados.....	84
Figura 4.6: Imagem da tela referente aos componentes da fotocorrente.....	85
Figura 4.7: Imagem da tela de exibição dos gráficos da corrente pela tensão e da potência pela tensão.....	86
Figura 4.8: Imagem da tela de resultados da célula fotovoltaica.....	88
Figura 4.9: Imagem da seção do módulo fotovoltaico.....	90
Figura 4.10: Distribuição da radiação solar de acordo com o comprimento de onda.....	91
Figura 5.1: Gráfico comparativo da tensão pela corrente da Experiência a1 versus a Experiência a2.....	96
Figura 5.2: Gráfico comparativo da potência pela tensão da Experiência a1 versus a Experiência a2.....	97
Figura 5.3: Gráfico comparativo da tensão pela corrente da Experiência b1 versus a Experiência b2.....	100
Figura 5.4: Gráfico comparativo da potência pela tensão entre as Experiências b1 e b2.....	101
Figura 5.5: Gráfico comparativo entre as experiências a1, a1-a e a1-b em termos da tensão pela corrente.....	103
Figura 5.6: Gráfico comparativo entre as curvas de potência das Experiências a1 e a1-a.....	104
Figura 5.7: Gráfico comparativo das características de tensão e corrente das Experiências a1, a1-c e a1-d.....	106
Figura 5.8: Gráfico comparativo das curvas característica de potência entre as Experiências a1, a1-c e a1-d.....	107
Figura 5.9: Gráfico comparativo das características de tensão e corrente entre as experiências a1, a1-e, a1-f, a1-g.....	110
Figura 5.10: Gráfico comparativo das curvas de potência entre as experiências a1, a1-e, a1-f e a1-g.....	110
Figura 5.11: Foto do painel solar utilizado nos testes.....	113

Figura 5.12: Temperatura média anual no estado de Goiás .....	115
Figura 5.13: Horas de Insolação anual no Estado de Goiás .....	116
Figura 5.14: Fração do céu coberto por nuvens anualmente .....	117

## Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1: Semi-Metais</i> .....	18
<i>Tabela 2.2: Valor da Energia Gap para os semicondutores usados na modelagem</i> .....	36
<i>Tabela 5.1: Variação dos dopantes de acordo com o tipo base dos semicondutores constituintes da célula solar</i> .....	93
<i>Tabela 5.2: Parâmetros das Experiências</i> .....	93
<i>Tabela 5.3: Valor da concentração dos dopantes</i> .....	94
<i>Tabela 5.4: Resultados iniciais da Experiência a1 (Silício dopado com Fósforo (lado N) e Boro (lado P))</i> .....	95
<i>Tabela 5.5: Resultados iniciais da Experiência a2(Silício dopado com Arsênio (lado N) e Alumínio (lado P))</i> .....	95
<i>Tabela 5.6: Resultados Finais da Experiência a1 (Silício dopado com Fósforo (lado N) e Boro (lado P))</i> .....	95
<i>Tabela 5.7: Resultados Finais da Experiência a2 (Silício dopado com Arsênio (lado N) e Alumínio (lado P))</i> .....	96
<i>Tabela 5.8: Configuração do Painel Solar</i> .....	97
<i>Tabela 5.9: Resultado do painel solar construído com células fotovoltaicas utilizadas na Experiência a1</i> .....	98
<i>Tabela 5.10: Resultado do painel solar construído com células fotovoltaicas utilizadas na Experiência a2</i> .....	98
<i>Tabela 5.11: Parâmetros de dopagem das experiências</i> .....	99
<i>Tabela 5.12: Resultados iniciais da Experiência b1 (Germânio dopado com Fósforo (lado N) e Boro (lado P))</i> .....	99
<i>Tabela 5.13: Resultados iniciais da Experiência b2 (Germânio dopado com Arsênio (lado N) e Alumínio (lado P))</i> .....	99
<i>Tabela 5.14: Resultados Finais da Experiência b1(Germânio dopado com Fósforo (lado N) e Boro (lado P))</i> .....	100
<i>Tabela 5.15: Resultados Finais da Experiência b2 (Germânio dopado com Arsênio (lado N) e Alumínio (lado P))</i> .....	100
<i>Tabela 5.16: Resultado do painel confeccionado com células da Experiência b1</i> .....	101
<i>Tabela 5.17: Resultado do painel solar da Experiência b2</i> .....	102
<i>Tabela 5.18: Concentração dos dopantes</i> .....	102
<i>Tabela 5.19: Resultados iniciais comparativos entre as experiências a1 e a1-a</i> .....	103
<i>Tabela 5.20: Dados comparativos entre as experiências a1, a1-a e a1-b</i> .....	103
<i>Tabela 5.21: Tabela comparativa entre painéis solares confeccionados com células das experiências a1, a1-a</i> .....	104
<i>Tabela 5.22: Intensidade luminosa</i> .....	105

Tabela 5.23: <i>Resultados iniciais da comparação entre as experiências a1, a1-c e a1-d</i> .....	105
Tabela 5.24: <i>Resultados finais da comparação das experiências a1, a1-c e a1-d</i> .....	106
Tabela 5.25: <i>Dados dos painéis solares submetidos a diferentes situações de iluminação</i> .....	107
Tabela 5.26: <i>Temperatura das experiências analisadas</i> . ....	108
Tabela 5.27: <i>Resultados iniciais da análise da temperatura</i> .....	109
Tabela 5.28: <i>Resultados finais da análise da variação da temperatura</i> .....	109
Tabela 5.29: <i>Resultado do painel solar obtido a partir de diversas temperaturas</i> .....	111
Tabela 5.30: <i>Características de cada painel solar utilizado</i> .....	112
Tabela 5.31: <i>Tabela comparativa entre os resultados do painel solar e a simulação realizada</i> .....	118

## Lista de Símbolos

.net	-----	Designação para a tecnologia Dot Net Framework
A	-----	Área da célula fotovoltaica em $\text{cm}^2$
$A_{Cn}$	-----	Área de captura no semicondutor tipo N em $\text{nm}^2$
$A_{Cp}$	-----	Área de captura no semicondutor tipo P em $\text{nm}^2$
Ag	-----	Prata
Al	-----	Alumínio
As	-----	Arsênio
Au	-----	Ouro
$a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$	-----	Carbeto de silício amorfo hidrogenado
B	-----	Boro
bcc	-----	Cubo de corpo centrado
c	-----	Velocidade da luz em km/s
C	-----	Carbono
C#	-----	Linguagem de programação C – Sharp
C++	-----	Linguagem de programação C plus – plus
CEFET	-----	Centro Federal de Educação Tecnológica
Cu	-----	Cobre
CdS	-----	Sulfureto de Cádmio
CdTe	-----	Cádmio - Telúrio
CLR	-----	Common Language Runtime (Linguagem comum em tempo de execução)
CTS	-----	Common Type System (Sistema Comum de Tipos)
d	-----	Nível Difuso
$DEE_{CC}$	-----	Densidade Efetiva de Estados na Camada de Condução
$DEE_{CV}$	-----	Densidade Efetiva de Estados na Camada de Valência
$D_n$	-----	Constante de difusão dos portadores minoritários tipo elétron
$D_p$	-----	Constante de difusão dos portadores minoritários tipo lacuna
E	-----	Energia do fóton
$E_C$	-----	Energia cinética
$E_g$	-----	Energia Gap ou Energia de Separação em eV
f	-----	Nível Fundamental
fcc	-----	Cubo de face centrada
Fe	-----	Ferro

Fem	-----	Força Eletromotriz da célula fotovoltaica em volts
FF	-----	Fill Factor (Fator de ganho da célula fotovoltaica)
F <sub>ph</sub>	-----	Quantidade de Fótons Incidentes
Fr	-----	Fração da luz incidente em J.s/cm <sup>2</sup>
Gap	-----	Energia que separa a banda de valência da banda de condução em eV
Ge	-----	Germânio
GaAs	-----	Arsenieto de Gálio
GPS	-----	Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)
h	-----	Constante de Planck
H	-----	Hidrogênio
Hz	-----	Hertz
IL	-----	Intensidade da luz incidente após percorrer uma distância no material em J.s/cm <sup>2</sup>
IL <sub>0</sub>	-----	Intensidade da luz incidente sobre o material em J.s/cm <sup>2</sup>
I <sub>0</sub>	-----	Corrente reversa de saturação ou corrente intrínseca do semiconductor em ampéres
I <sub>f</sub>	-----	Intensidade da fotocorrente total em ampéres
I <sub>fn</sub>	-----	Intensidade da corrente fotogerada no semiconductor tipo N em ampéres
I <sub>fp</sub>	-----	Intensidade da corrente fotogerada no semiconductor tipo P em ampéres
I <sub>m</sub>	-----	Corrente no ponto de potência máxima em ampéres
In	-----	Índio
I <sub>SC</sub>	-----	Corrente de curto circuito em ampéres
JIT	-----	Just in time (Tempo de Execução)
k	-----	Coefficiente de Extinção
K	-----	Constante de Boltzmann
L <sub>n</sub>	-----	Distância percorrida pelo portador minoritário elétron em nm
L <sub>p</sub>	-----	Distância percorrida pelo portador minoritário lacuna em nm
m <sub>ee</sub>	-----	Massa efetiva do elétron
m <sub>el</sub>	-----	Massa efetiva da lacuna
MSIL	-----	Microsoft Intermediate Language (Linguagem Intermediária da Microsoft)
N	-----	Nitrogênio
n <sub>i</sub>	-----	Concentração intrínseca do semiconductor
N <sub>A</sub>	-----	Concentração de impurezas aceitadoras em átomos por cm <sup>3</sup>
N <sub>D</sub>	-----	Concentração de impurezas doadoras em átomos por cm <sup>3</sup>
NREL	-----	Laboratório Nacional de Energia Renovável
O	-----	Oxigênio

$p$	-----	Nível Principal
$P_{MAX}$	-----	Potência Máxima em watts
$PN$	-----	Junção dos semicondutores tipo P e tipo N
$Pt$	-----	Platina
$q$	-----	Carga do elétron
$R_i$	-----	Resistência Interna da célula fotovoltaica
$R_c$	-----	Resistência do contato em ohms
$R_p$	-----	Resistência em paralelo em ohms
$R_s$	-----	Resistência em série em ohms
$s$	-----	Nível Sharp
$Si$	-----	Silício
$SiO_2$	-----	Dióxido de Silício
$T$	-----	Temperatura em Kelvin
$TI$	-----	Tecnologia da Informação
Tipo N	-----	Semicondutor extrínseco dopado com cargas doadoras
Tipo P	-----	Semicondutor extrínseco dopado com cargas aceitadoras
USA	-----	Estados Unidos da América
URSS	-----	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
$V_{Bi}$	-----	Barreira potencial da junção PN em volts
$V_{OC}$	-----	Tensão em circuito aberto em volts
$V_m$	-----	Tensão no ponto de potência máxima em volts
$VRS_n$	-----	Velocidade de Recombinação Superficial no semicondutor tipo N em nm/s
$VRS_p$	-----	Velocidade de Recombinação Superficial no semicondutor tipo P em nm/s
$V_{Tn}$	-----	Velocidade térmica no semicondutor tipo N em nm/s
$V_{Tp}$	-----	Velocidade térmica no semicondutor tipo P em nm/s
$w$	-----	Profundidade de penetração em nm
$W_n$	-----	Comprimento da camada de depleção sobre o semicondutor tipo N em nm
$W_p$	-----	Comprimento da camada de depleção sobre o semicondutor tipo P em nm
$Zn$	-----	Zinco
$\alpha$	-----	Constante de absorção do material
$\epsilon$	-----	Permissividade
$\xi$	-----	Campo elétrico
$\lambda$	-----	Comprimento de onda em nm
$\Theta$	-----	Limiar Fotoelétrico



$\sigma$	-----	Conductividade
$\tau_n$	-----	Tempo de vida do portador minoritário elétron em s
$\tau_p$	-----	Tempo de vida do portador minoritário lacuna em s
$f$	-----	Frequência da onda em Hz
$\rho$	-----	Resistividade do material

## Sumário

Resumo .....	iv
Abstract .....	v
Lista de Figuras .....	vi
Lista de Tabelas .....	ix
Lista de Símbolos .....	xi
<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Histórico e Revisão Bibliográfica .....	3
1.2 A Luz e seus Princípios Básicos .....	3
1.3 Conteúdo do Trabalho .....	13
<b>CAPÍTULO II – A FÍSICA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS</b> .....	<b>15</b>
2.1 Introdução .....	15
2.2 Semimetais .....	16
2.3 Semicondutores .....	18
2.4 Estrutura Cristalina dos Semicondutores .....	20
2.4.1 Elétrons no Cristal do Semicondutor .....	22
2.5 Nível Fermi .....	23
2.6 Densidade de Estados .....	24
2.7 Semicondutores Extrínsecos .....	25
2.8 A Junção PN .....	27
2.8.1 A Natureza da Junção PN .....	28
2.8.2 Função da Junção PN .....	29
2.9 Gap Direto e Gap Indireto .....	30
2.10 Propriedades Ópticas dos Materiais .....	31
2.10.1 Introdução .....	31
2.10.2 Índice de Refração, $n$ .....	31
2.10.3 Coeficiente de Extinção, $K$ .....	32
2.10.4 Constante de Absorção $\alpha$ e a Constante de Penetração $W$ .....	33
2.11 Absorção do espectro Solar .....	33
2.11.1 Introdução .....	33
2.11.2 O Processo de Absorção do Espectro Solar .....	34
2.11.3 Influência das Características Físicas da Célula .....	35
2.11.4 Influência da Intensidade Luminosa .....	37
2.11.5 Influência da Temperatura .....	38
<b>CAPÍTULO III – FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA</b> .....	<b>39</b>
3.1 Introdução .....	39
3.2 Apresentação das Equações e Algoritmos .....	39
<b>CAPÍTULO VI – O PROGRAMA DE MODELAGEM COMPUTACIONAL DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS</b> .....	<b>72</b>
4.1 A Linguagem de Programação Utilizada .....	72
4.2 A Plataforma .Net Framework .....	72
4.3 O Programa Desenvolvido .....	73
4.3.1 Entrada de Dados .....	75
4.3.2 Fótons .....	78

4.3.3	Absorção .....	80
4.3.4	Gráfico Alpha .....	81
4.3.5	Corrente Intrínseca .....	82
4.3.6	Componentes da Fotocorrente .....	84
4.3.7	Gráfico Si/Ge e Gráfico GaAs .....	86
4.3.8	Resultados da Célula .....	86
4.3.9	Módulo Fotovoltaico .....	88
<b>CAPÍTULO V – EXPERIMENTOS REALIZADOS .....</b>		<b>92</b>
5.1	Introdução .....	92
5.2	Análise do Primeiro Grupo: Variação dos Dopantes.....	92
5.2.1	Experiência Sobre os Dopantes do Silício (a1 e a2).....	93
5.2.2	Experiência Sobre os Dopantes de Germânio (b1 e b2).....	98
5.3	Alteração na Concentração dos Dopantes .....	102
5.4	Análise da Influência da Iluminação .....	105
5.5	Influência da Temperatura no Desempenho da Célula Solar .....	108
5.6	Verificação dos Resultados .....	111
5.6.1	Localização do Equipamento.....	112
5.6.2	Temperatura, Insolação, Nebulosidade .....	114
<b>CAPÍTULO VI – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>		<b>119</b>
6.1	Introdução.....	119
6.2	Discussão de Resultados.....	119
6.3	Conclusão .....	121
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>123</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>126</b>
	Projeto de Revisão ABNT NBR10899 .....	I
	Manual de Execução Rápida do Programa de Modelagem Computacional .....	VIII
	Célula Fotovoltaica N° 8032.....	XXII

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A sociedade moderna faz extensivo uso das fontes de energia para sua sustentabilidade, para a execução das suas atividades diárias, para a produção de bens e serviços, e para o conforto dos seus indivíduos. Dentre as formas de energia existentes destacam-se o petróleo, carvão mineral, gás natural e energia nuclear amplamente utilizadas nos países da Europa, Ásia e América do norte entre outros continentes.

Essas fontes de energia são utilizadas principalmente para a geração de eletricidade através de termoelétricas, ou como combustível para automóveis.

No Brasil ocorre um cenário um pouco diferente, pois além do uso das formas de energia supracitadas, o país também faz extensivo uso de outros recursos disponibilizados pela natureza. Devido à abundância de rios e a topografia favorecida em muitos desses casos, instalou-se no Brasil como principal fonte da matriz energética o uso das hidrelétricas, como por exemplo, a hidrelétrica Itaipu Binacional, a maior do mundo em energia firme.

Também tem se destacado no país o uso de biomassa para a elaboração de combustíveis para os automóveis, como é o caso do álcool obtido da cana-de-açúcar e recentemente do biodiesel podendo ser produzido de diversas culturas como: soja, girassol, mamona, babaçu entre outras.

Além dessas fontes de energia, o Brasil se destaca pela privilegiada condição geográfica que favorece a ampla utilização de outros tipos de recursos energéticos providos pela natureza como a energia eólica e a energia solar. No Brasil a energia eólica é mais abundante nas regiões litorâneas, onde a constância de ventos favorece o aproveitamento desse tipo de recurso.

O Brasil tem mais de 8.000 Km de litoral, o que torna propício o uso de energia eólica para complementar a matriz energética ou para fornecer eletricidade a pequenas localidades onde a instalação da rede convencional é altamente dispendiosa, como acontece em Fernando de Noronha e em locais remotos como a Amazônia Brasileira.

Da mesma forma, no caso da energia solar, o Brasil apresenta uma grande vantagem,

pois a média de insolação para o aproveitamento da luz solar está na faixa de 5 a 6 horas diárias, ou seja, o Brasil é banhado com uma média superior a 2000 kWh/m<sup>2</sup> por ano como está descrito em KININGER (2003).

Outro fator preponderante que auxilia o uso da energia solar no país se dá pelo fato de que grande parte do território nacional estar localizado entre as linhas do Equador e o Trópico de Capricórnio, o que favorece em muito a recepção dos raios provenientes do sol pelos módulos solares.

Essa fantástica condição natural que o Brasil apresenta com diversas riquezas de fontes naturais de energia limpa e renovável, coloca o país em uma posição de destaque perante o novo cenário mundial, onde o foco principal é a auto-sustentabilidade e a diminuição gradativa de emissão de poluentes. Esse foco é evidenciado em diversos acordos internacionais como a “Carta do Rio” na ECO 92 e mais recentemente pelo “Protocolo de Kyoto”.

Embora essa sustentabilidade seja a tendência para o futuro das nações, o uso em larga escala de fontes, hoje denominadas de energia alternativa, só serão utilizadas em escala industrial caso seja comprovada sua viabilidade técnica e principalmente econômica, sendo esta última o fator preponderante para a sua utilização.

Assim é importante levantar o conjunto de características particulares e peculiares que vão influenciar na sua utilização de cada fonte energética. Logo é necessário conhecer a fundo todo o processo de funcionamento dessas fontes através de modelos que permitam aos pesquisadores ou indústrias determinar essas características e seu comportamento.

A informática vem aliada a esses modelos podendo fornecer de forma rápida e precisa essas respostas, dando assim subsídios para que os envolvidos no processo possam tomar as decisões referentes ao desenvolvimento das mesmas, no que diz respeito aos materiais utilizados para produzir eletricidade a partir da luz solar. A aplicação da informática para a elaboração de um modelo computacional que explique o funcionamento de um dispositivo, como uma célula solar, se faz imprescindível para que essa tecnologia esteja completamente compreendida e dominada.

No caso da modelagem computacional do comportamento de uma célula solar, que é o foco desse trabalho, a pesquisa torna-se um trabalho multidisciplinar por se tratar de um assunto que envolve diversos campos do conhecimento como Física, Química, Matemática, Engenharia Elétrica e Ciências da Computação.

Através desse modelo computacional será possível prever todo o comportamento da célula solar para qualquer condição de insolação e para diversos tipos de materiais utilizados

para a confecção da mesma, assim como também conhecer o comportamento dos módulos solares, sendo possível obter uma rápida configuração para os mais diversos tipos de aplicações. Por tanto será possível prever as respostas esperadas para diferentes condições climáticas e para a utilização de diferentes materiais, economizando-se em protótipos e em tempo. Como resultado tem-se uma redução no custo de pesquisa e desenvolvimento de células solares e também a possibilidade de modelar o comportamento de estações solares já implementadas.

## **1.1 Histórico e Revisão Bibliográfica**

Para que possa ser apresentado o panorama atual da modelagem computacional sobre sistemas fotovoltaicos, torna-se necessário citar os diversos autores que abordaram esse tema sob diversos prismas, e que contribuíram para a evolução sistemática dessa tecnologia. Partindo da formulação das teorias sobre o entendimento da luz até as mais modernas técnicas de obtenção de eletricidade a partir da luz do sol.

Será apresentada de forma resumida uma coletânea de pesquisas realizadas inicialmente por físicos que destacaram os princípios, regras e fundamentos para o funcionamento da energia fotovoltaica.

Posteriormente serão apresentadas diversas pesquisas envolvendo a conversão da luz solar em energia elétrica, assim como também algumas pesquisas relacionadas à modelagem computacional de forma a se destacar a metodologia de pesquisa aqui desenvolvida.

## **1.2 A Luz e seus princípios básicos**

Durante séculos, o entendimento do conceito de luz fez com que cientistas buscassem teorias que explicassem como o ser humano pode ver os objetos a sua volta e diferencia-los através de cores.

As primeiras teorias, idealizadas pelos antigos filósofos gregos, consideravam a luz como uma entidade que era emanada da vista da pessoa que observava o objeto, ou seja, a pessoa era o senhor e responsável por como os objetos eram vistos. Posteriormente percebeu-se que a luz deveria ser emanada dos objetos para o globo ocular dos observadores, pois pessoas diferentes observavam o mesmo objeto da mesma forma.

Ambas as teorias, entretanto, não respondiam a questão da escuridão da noite e das

trevas que encobriam os objetos deixando-os invisíveis ao observador. Uma nova teoria trazia a solução para a questão, os objetos deveriam refletir a luz proveniente do sol ao olho do observador, tornando-o visível durante o dia e envolto em trevas durante a noite, pois não existia luz para iluminar os objetos.

Séculos depois o cientista inglês Isaac Newton (1643 – 1727) propôs a Teoria Corpuscular da Luz, que explicava diversos fenômenos envolvendo a luz. Dentre esses fenômenos podemos destacar as leis da reflexão e da refração como descrito em TIPLER (1991). Porém a lei da refração da teoria corpuscular de Newton partia da hipótese da velocidade da luz ao atravessar um meio como o vidro ou a água ser maior que a velocidade da luz no ar, o que se demonstrou falso por experimentos realizados na época.

Uma outra teoria começou a ganhar importância por explicar tanto a refração quanto à reflexão de maneira absolutamente precisa. Era a Teoria Ondulatória da Luz defendida pelo cientista holandês Christians Huygens (1629 – 1695) e Robert Hooke (1635 – 1703), descrito em TIPLER (1991). Essa nova teoria permitia também explicar o surgimento de cores em experimentos envolvendo películas finas devido à variação do comprimento de onda.

Foi somente em 1801 que a teoria ondulatória sobrepôs definitivamente a teoria corpuscular ao explicar os fenômenos da difração e da interferência por Thomas Young (1773 – 1829) e principalmente com os experimentos de Augustin Fresnel (1788 – 1827), estabelecendo assim a base matemática para a teoria ondulatória, como relatado em TIPLER (1991).

Embora a Teoria Ondulatória da Luz conseguisse até o momento explicar os experimentos realizados, esta não foi capaz de explicar a interação da luz com os meios materiais. Uma das interações da luz com a matéria foi relacionada à observação do efeito fotovoltaico feita pelo físico francês Edmund Becquerel (1820-1891), em 1839, na época com 19 anos de idade, como está descrito no trabalho de MAH (1998). Ele observou que ao experimentar uma pilha eletrolítica, composta de dois eletrodos de metal, que quando expostos à luz, alguns materiais produziam pequenas quantidades de corrente elétrica.

Inicialmente pensou-se que o efeito fotovoltaico era um efeito restrito ao âmbito dos metais. Posteriormente em 1873 outro físico francês Willoughby Smith (1828 -1891) escreve um artigo para a revista *Natural* intitulado “*O Efeito da Luz no Selênio durante a passagem de uma Corrente Elétrica*”. Outro artigo, publicado agora na revista *Scientific American* e intitulado “*O efeito curioso da luz sobre o selênio*” marcava o início do estudo do efeito da luz em semicondutores.

Posteriormente um outro artigo publicado, denominado “*Selênio: Qualidades elétricas*

*e o efeito da teoria da luz*” proporcionaram a investigação de diversos outros fenômenos e a descoberta de diversos dispositivos como, por exemplo, a criação do olho eletrônico por Werner Siemens (1816 – 1892) em 1875, a formulação da teoria de transmissão de imagens à distância de Adriano de Paiva (1847 – 1907) em 1878, entre outras.

Em 1876 Wilham Adams (1836 – 1915) e Richard Day descobriram uma fotocorrente no selênio, quando este estava em contato com dois condutores de platina aquecidos como descrito em NELSON (2003).

Em 1887 o físico alemão Heinrich Hertz (1857 – 1894) comprovou a teoria ondulatória de Maxwell (1831 – 1879) e descobriu um efeito que a luz provocava sobre certos materiais metálicos, que era a possibilidade de arrancar um elétron da superfície metálica. A esse evento deu-se o nome de efeito fotovoltaico. Embora este efeito não fosse explicado pela teoria ondulatória, e sim pela teoria corpuscular.

Em 1894 Charles Fritts construiu o que é considerada a primeira célula solar, baseada em junções de Selênio com camadas de ouro ultrafinos. Sua conversão era menor que 1% e seu custo de produção proibitivamente alto para qualquer pretensão comercial.

Wilhelm Hallwachs (1859 – 1922) em 1904 descobriu uma série de materiais que eram sensíveis à luz. Em seus experimentos. Foi o primeiro físico a estudar profundamente o efeito fotoelétrico e o efeito da fotoemissão, baseado na emissão de luz ultravioleta.

Em 1905 Albert Einstein (1879 -1955) adotou as idéias de Max Planck (1858 – 1947) da quantização da energia usadas para explicar a radiação do corpo negro e para explicar o fenômeno conhecido como a Catástrofe do Infravermelho, e as aplicou para explicar o efeito fotoelétrico observado por Hertz, como descrito em BASSALO (2005).

A explicação de Einstein para o efeito fotovoltaico marcava o início da Teoria Quântica e lhe renderia o seu primeiro Prêmio Nobel de Física em 1921. Nela, Einstein partiu da hipótese de que a quantização da energia seria uma propriedade fundamental da energia eletromagnética descrito em seu artigo: “*Sobre um ponto de vista heurístico concernente à produção e transformação da luz*”. Nesse trabalho Albert Einstein alicerça os fundamentos básicos para o estudo do efeito fotoelétrico, efeito fotovoltaico e emissão de luz.

O artigo Einstein discorre sobre o fato que a energia não seria contínua, mas distribuída discretamente em pequenas quantidades ou pulsos denominados fótons. A energia de cada fóton é independente da intensidade da luz, pois essa apenas influenciaria na quantidade de fótons. A energia do fóton estaria ligada com a frequência do mesmo (ou do comprimento de onda). Um fóton só poderia arrancar um elétron do material se este (fóton) tivesse energia suficiente para fazê-lo. Caso o fóton tivesse uma energia associada menor que



um valor mínimo, o elétron não poderia ser arrancado da superfície. Esse valor mínimo de energia do fóton ficou conhecido como limiar fotoelétrico, que é dependente do material (função trabalho) e da energia dos fótons incidentes.

Qualquer fóton que tivesse energia superior ao limiar fotoelétrico conseguiria excitar o elétron e arrancá-lo da superfície. Por tanto, conhecida essa propriedade da luz de excitar elétrons em meios materiais, foi possível a geração de eletricidade a partir da luz, fornecendo os subsídios básicos para a exploração da energia fotovoltaica. Esses princípios foram determinados no início do século XX e são a base para a confecção da modelagem computacional proposta neste trabalho.

Embora essa nova teoria conseguisse explicar todos os fenômenos até então estudados sobre o comportamento da luz, uma questão ficava à sombra da verdade. A luz seria uma onda ou formada por partículas?

A luz apresenta propriedades ondulatórias (reflexão, refração, difração, interferência e efeito Doppler) e corpusculares (efeito fotoelétrico e efeito Compton).

Uma nova teoria veio elucidar a questão e é hoje aceita como a mais provável para explicar o comportamento da luz, o princípio da dualidade onda-partícula.

Segundo o físico francês Louis De Broglie (1892-1987) as partículas subatômicas (elétrons, prótons, etc.) também possuem características ondulatórias. Esse fato foi comprovado por Clinton Davisson (1881-1958), Lester Germer (1896-1971) e G. P. Thomson (1892-1975).

De acordo com o relatado em TIPLER (1991), esse princípio satisfaz todos os experimentos realizados e explica o comportamento do efeito fotovoltaico e o espalhamento Compton (que é provocado quando a energia do fóton é muito grande, não há a ocorrência do efeito fotoelétrico e sim o espalhamento do fóton e do elétron). Esse princípio reza que a luz se propaga como se fosse uma onda e troca energia como se fosse uma partícula.

A luz branca visível proveniente do sol é composta por uma mistura das cores tais como violeta, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho. É preciso salientar que outras ondas eletromagnéticas como os raios ultravioletas, altamente nocivos à saúde, vêm juntamente com a luz branca, ou simplesmente luz.

Na Figura 1.1 é apresentado como estão divididas as cores provenientes da luz branca do sol.

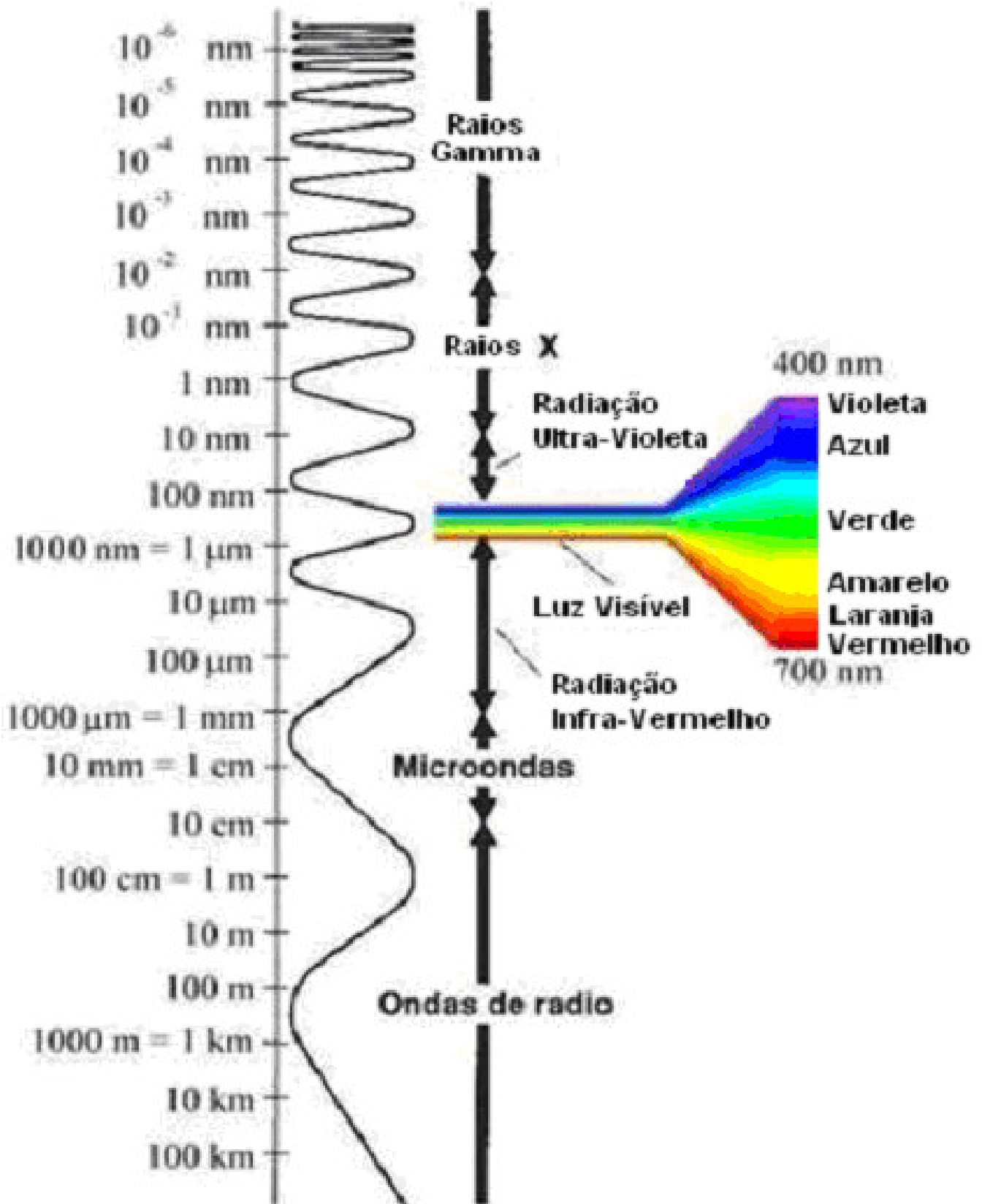


Figura 1.1: Espectro da Luz Solar

A luz tem velocidade de aproximadamente  $2,99 \times 10^8$  m/s e demora cerca de oito minutos para sair do Sol e chegar a superfície da Terra. Como a intensidade da luz que chega a terra é de aproximadamente  $1400 \text{ W/m}^2$  por segundo na estratosfera e de cerca de  $1000 \text{ W/m}^2$  na superfície terrestre, o total de fótons incidentes na terra é aproximadamente  $4 \times 10^{17}$  fótons por segundo por centímetro quadrado.

Em 1910 Robert Andrews Millikan (1868 – 1953) comprovou as teorias escritas por Albert Einstein sobre o efeito fotoelétrico e sobre a primeira determinação direta da constante de Planck.

Com as regras do efeito fotoelétrico e fotovoltaico pré-estabelecidas, o rumo das investigações científicas partia agora para a elaboração de materiais que possuíssem essa propriedade e ao mesmo tempo reduzissem o custo de produção das células fotovoltaicas.

Um dos primeiros a investigar os materiais a serem empregados foi o físico Jan Czochralski (1885 – 1953). Sua principal obra foi o estudo de crescimento de cristais de silício. O processo de crescimento de cristais de Silício a partir de um único cristal de silício recebe seu nome (método Czochralski), e ao cristal gerado é dado o nome de Silício monocristalino, como está descrito PAJACZKOWSKA (s.d.). O silício monocristalino obtido pelo método de crescimento Czochralski é hoje a principal base para a criação de células fotovoltaicas usadas comercialmente.

Durante a década de 50, diversos estudos dirigiram-se para o estudo da junção p-n, e suas características, além do estudo de novos materiais que poderiam ser utilizados na confecção de células fotovoltaicas. O estudo do semicondutor Germânio indicava sua potencialidade para utilização na confecção das células fotovoltaicas.

Em 1954, um grupo de pesquisadores realizou a primeira aplicação prática de células solares baseada em silício monocristalino. Dentre esse grupo de pesquisadores destacam-se Gerald L. Pearson (1905 -1987), Calvin Fuller e Daryl Chapin. Nessa mesma época foi descoberto o efeito fotovoltaico no arsenieto de gálio (GaAs) por Welker e nos cristais de sulfureto de Cadmo (CdS) por Reynolds e Leies.

Em 1959 são iniciados os primeiros experimentos de células solares baseadas em silício policristalino, que é um outro método de crescimento de cristais de silício que tem como vantagem um menor custo de produção.

Entre as décadas de 60 e 70, o uso das células fotovoltaicas para a obtenção de energia elétrica ganhou um grande impulso devido à corrida espacial entre os EUA (Estados Unidos da América) e a URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas). Devido a sua longevidade sob uso diário, possibilidade de ajuste na configuração e tamanho, praticamente

dispensando manutenção e por ter sua fonte de energia disponível sem qualquer problema climático, o suprimento de energia ideal para satélites era o baseado em energia fotovoltaica. Hoje em dia, os satélites de praticamente todos os países que dominam a tecnologia espacial utilizam como fonte de suprimento energético a energia fotovoltaica.

A pesquisa por novos materiais passíveis de utilização na confecção de células fotovoltaicas ganhou grande impulso principalmente nos Estados Unidos e países da Europa. Em 1976 são criadas as primeiras células de silício amorfo por Christopher Wronski e Carlson. O processo de produção do silício amorfo envolve menos esforço e energia do que o processo de fabricação do silício mono e policristalino. Porém sua eficiência é menor que nos outros dois casos, além do fato do silício amorfo sofrer degradação de sua performance devido à ação do tempo, como apresentado em MAH (1998).

Até então o aproveitamento da energia solar estava voltada praticamente para aplicações espaciais, mas em 1973 a crise mundial do petróleo permitiu a abertura de um novo horizonte de pesquisa para aplicações terrestres da energia fotovoltaica. Diversos centros de pesquisa espalhados pelo mundo como o NREL (*National Renewable Energy Laboratory* - Laboratório Nacional de Energia Renovável) nos Estados Unidos, pesquisam o fenômeno de conversão da luz solar em eletricidade e diversos materiais para a composição das células solares.

Em 1975 Jacques Pankove publica o livro *Optical Processes in Semiconductors* (Processos ópticos em semicondutores), onde são abordados os principais aspectos sobre os processos ópticos que ocorrem nos materiais semicondutores. Neste livro é feita uma detalhada explanação sobre os estados de energia nos semicondutores, a influência que os parâmetros externos tem sobre o funcionamento de semicondutores, o processo de absorção da luz em semicondutores sobre diversos aspectos, os processos ocorridos na junção pn, o efeito fotoquímico e fotovoltaico. PANKOVE (1975). Muitos dos conceitos utilizados neste trabalho se baseiam nessa obra.

Dentre os materiais mais recentemente pesquisados pode-se destacar os baseados em filmes finos, em células com multijunções e com a tecnologia de polímeros químicos que estão fora do escopo deste trabalho.

O principal material utilizado para a confecção de células fotovoltaicas comerciais é baseado em silício, devido a sua facilidade de obtenção, domínio da tecnologia de confecção e abundância do material. Mesmo assim o NREL possui diversas linhas de pesquisas sobre a utilização do silício (Si) para aplicações fotovoltaicas.

Destacam-se as seguintes pesquisas realizadas pelo NREL:

- **Diagnostico de dispositivos de silício (Si):** Pretende fornecer o diagnóstico do comportamento das células de silício com a adição de defeitos e impurezas controladas por meio de experimentos.
- **Estudo dos defeitos e impurezas no silício:** Baseia-se em zonas flutuantes com controle do nível de defeito cristalográfico ou níveis de impurezas controladas e seus efeitos sobre o tempo de vida dos portadores de carga minoritários. Assim como o impacto na eficiência da célula fotovoltaica. Esse estudo visa descobrir a faixa de impurezas e defeitos incluindo os limites de deslocamento dos grânulos, lacunas no Silício, influencia do hidrogênio (H), nitrogênio (N) e ferro (Fe). Como descrito em CISZEK (1989) a compreensão dos níveis de defeitos e impurezas permitiu estabelecer o tempo de vida dos portadores minoritários superior a 20 ms, e um rendimento na célula solar de 22% de eficiência.
- **O Crescimento do filamento de Silício:** Este estudo consiste na exploração do crescimento dos cristais de silício em finos filamentos para um potencial uso em aplicações como sistemas fotovoltaicos multiconcentrador, guiado por luz infravermelha entre outras. Os filamentos são crescidos por um simples cristal de silício com alto grau de pureza suportando zonas de flutuação. O tempo de vida dos portadores varia entre 42  $\mu$ s a 660  $\mu$ s, como descrito em CISZEK et al. (1997).
- **Eletrodeposição de silício:** que consistem no desenvolvimento de um método para a deposição de um fino substrato de silício a um baixo custo. As finas camadas de silício são eletrodepositadas no silício cristalino, em grades metalúrgicas de silício e em substratos de prata. Finas camadas da espessura na faixa de 10 a 60  $\mu$ m tem sido utilizadas, como descrito em MOORE (1997).

A pesquisa por células solares de filmes finos a base de silício também tem sido objeto de diversos estudos, como por exemplo o uso do carbeto de silício amorfo hidrogenado ( $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ ) ou outras ligas de silício obtidas através de ( $a\text{-Si}_{1-x}\text{A}_x\text{:H}$ , onde  $A=(\text{Ge}), (\text{N}), (\text{C}), (\text{O})$ ) devido à possibilidade de se controlar o GAP (Energia necessária para um elétron sair da banda de valência para a banda de condução) óptico, como descrito em PRADO (1997).

Diversas pesquisas tentam prever o comportamento dos materiais utilizados na confecção das células fotovoltaicas, quando expostos a outros materiais, como descrito em SILVA (2000). Nesse trabalho, Silva executa a simulação Monte Carlo do crescimento da película  $\text{SiO}_2$  na fina camada de silício.

Uma grande preocupação no estudo do efeito fotovoltaico é o comportamento dos portadores de carga gerados pela agitação térmica ou devido a fotogeração por colisão com os fótons provenientes da luz branca. Em seu artigo Junyou Pan (2000) intitulado “*Numeric modeling of the photogeneration of free charge carriers*” (Modelagem numérica da fotogeração de portadores livres de carga) destaca a importância da compreensão desse tema.

Outra pesquisa desenvolvida por SOUSA (2002), diz respeito aos efeitos impostos aos níveis de energia do elétron em poços quânticos Si/SiO<sub>2</sub> pela presença de relações suaves das interfaces e a interface de captura dos portadores.

A obra de TIPLER (1991) apresentou os fundamentos físicos básicos para o início do estudo do comportamento das células fotovoltaicas. Os princípios do efeito fotovoltaico, da dualidade onda-partícula e física quântica foram obtidas dessa obra.

O conhecimento do funcionamento dos materiais semicondutores foi de grande relevância para a realização deste trabalho. Esses fundamentos foram obtidos através de vários livros, documentos, artigos e dissertações, como o trabalho de BRUM (1983).

Mukund R. Patel, em sua obra “*Wind and Solar Power Systems*” (Sistemas de Energia Eólico e Solar) de 1999 apresentou principalmente diversos conceitos comparativos entre a energia solar e a energia eólica.

No ano de 2000 Roger Messenger e Jerry Ventre publicam o livro “*Photovoltaic System Engineering*” (Engenharia dos Sistemas Fotovoltaicos) que apresenta um panorama atual da situação energética do mundo, destacando a energia solar e o efeito estufa. Neste livro são apresentadas também conceitos relacionados aos módulos solares e todos os equipamentos envolvidos no funcionamento do mesmo, assim como os conceitos físicos. Dentre esses equipamentos destacam-se os controladores de carga, inversores e baterias. Uma importante consideração sobre custo também é abordada, assim como a física das células fotovoltaicas. As principais equações e considerações sobre o comportamento físico das células fotovoltaicas foram obtidas dessa obra.

Ainda no ano de 2000 Rolf E. Hummel publica o livro “*Electronic Properties of Materials*” (Propriedade Eletrônica dos Materiais) que apresentou os principais conceitos do comportamento elétrico, térmico e magnético dos materiais.

A obra “*Caracterização Elétrica de Tecnologia MOS*” de MARTINO et al. de 2003 apresentou diversos conceitos sobre a física dos semicondutores, material básico para a construção das células fotovoltaicas.

Também em 2003 Kininger publicou um relatório “*Photovoltaic Systems Technology*” (Tecnologia dos Sistemas Fotovoltaicos), que tratou do panorama da situação energética

mundial. Alguns conceitos pertinentes sobre a radiação solar, e os princípios dos sistemas fotovoltaicos.

A substituição de testes em laboratórios convencionais pela modelagem e simulação computacional torna-se cada vez mais rotineira e indispensável, tanto pela economia de recursos e tempo quanto por ser a única alternativa viável para a análise e previsão de determinadas situações e/ou parâmetros.

Baseadas em fundamentação matemática presente na teoria do objeto de estudo, a modelagem computacional permite uma visão integrada do problema analisado por diversos cenários e pontos de vistas distintos.

Um exemplo disso é um artigo publicado por GRANDI (s.d.) intitulado “*Hardware Modeling of Photovoltaic Panels*” (Modelagem física de painéis fotovoltaicos), no qual propõe a modelagem e implementação de um modelo físico de um circuito de potência derivado de um modelo de um circuito básico de células fotovoltaicas. Nessa mesma linha pode-se citar o artigo de LEE (1991) intitulado “*Numerical Modeling of CdS/CdTe Solar Cells: A Parameter Study*” (Modelagem numérica de células solares de CdS/CdTe: Um estudo de parâmetros) no qual destaca-se a importância da modelagem computacional para a previsão do comportamento de células solares baseadas nos materiais (CdS) e (CdTe). O trabalho de OMAN (s.d.) também trata do estudo do material (CdS) e (CdTe), de forma que o destaque está na modelagem da corrente intrínseca. Seu trabalho é intitulado “*Device Performance Characterization and Modeling of Recombination Current in CdTe/CdS pn Junction Diodes*” (Caracterização do Desempenho e Modelamento da Corrente de Recombinação em Diodos de junção pn de CdTe/CdS).

Um outro destaque de pesquisa envolvendo a modelagem computacional é o trabalho de QUASCHNING (1995) intitulado “*Numerical Simulation of Photovoltaic Generators with Shaded Cells*” (Simulação numérica de geradores fotovoltaicos com células sombreadas), onde o comportamento dos geradores fotovoltaicos quando possuem células sombreadas é estimado por métodos numéricos.

Portanto, para que o modelo computacional reflita a realidade de estudo, é necessário a elaboração de algoritmos computacionalmente viáveis que resolvam o modelo matemático que descreve o fenômeno.

No caso da simulação do efeito fotovoltaico, certos parâmetros, como seu funcionamento a zero °C, alteração da concentração de dopantes, troca dos materiais constituintes da célula fotovoltaica, entre outros, só se tornam possíveis com a aplicação do

modelamento computacional. Assim é destacado a importância do uso de uma ferramenta que permita a modelagem computacional de células fotovoltaicas, onde os resultados podem ser facilmente obtidos e analisados de forma a se compreender o funcionamento e o comportamento da mesma diante a variação de seus constituintes básicos e dos cenários de funcionamento do mesmo.

Com base nesse levantamento histórico e bibliográfico, foi possível avaliar os diversos pontos e aspectos que cercam o projeto, e estabelecer a importância de se conhecer profundamente o comportamento das células fotovoltaicas baseadas em suas características físicas. Da mesma forma, ficou evidenciado a importância do uso da tecnologia da informação para a confecção de uma modelagem computacional que expressasse resultados de forma rápida e precisa.

Assim com o estudo feito sobre as células fotovoltaicas aliado com a ferramenta computacional desenvolvida durante a realização do projeto, que serão apresentados nos próximos capítulos, são um importante instrumento no entendimento do funcionamento de células solares baseadas em suas características físicas e submetidas a diferentes condições de funcionamento.

### **1.3. Conteúdo do Trabalho**

Este trabalho está dividido em diversas partes que visam fornecer uma organização de forma a facilitar a leitura e o entendimento dos diversos conceitos aplicados.

Inicialmente no Capítulo II será apresentada a física das células fotovoltaicas de forma a detalhar o funcionamento interno desses dispositivos e sua interação com a luz solar, aspectos como a estrutura cristalina, a formação dos semicondutores, região de junção, a camada de depleção e a absorção do espectro solar.

O Capítulo III destina-se a formulação matemática para a elaboração do modelo computacional de células fotovoltaicas baseada nas suas características físicas e nos cenários de operação. Assim nesse capítulo serão apresentadas as equações utilizadas no programa de modelagem, assim como os algoritmos mais importantes utilizados na confecção do software.

No Capítulo IV é apresentado o programa implementado neste trabalho, assim como seus diversos módulos e a tecnologia utilizada para a confecção do mesmo, permitindo aos pesquisadores um completo entendimento do funcionamento do software de modelagem computacional de células fotovoltaicas.



No capítulo V é apresentado o resultado de uma série de experiências relativas a modelagem de células solares, utilizando-se da comparação entre células com diferentes constituições físicas e submetidas a diversos cenários de operação, de forma a demonstrar os diferentes resultados obtidos e destacar a importância de um software de modelagem computacional para prever esses diferentes resultados. Também nesse capítulo é feita a validação dos resultados encontrados com a verificação dos resultados aplicados em dispositivos reais.

No capítulo VI é feita a discussão de resultados e apresentada a conclusão da pesquisa, assim como também são apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros.

## CAPÍTULO II

### A FÍSICA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

#### 2.1 Introdução

Para ser possível estabelecer um modelo computacional de uma célula fotovoltaica é necessário conhecer o comportamento físico das mesmas e seu relacionamento com a luz. Da mesma forma, para se compreender esse comportamento físico envolvido no funcionamento das células solares, é necessário fazer referência inicialmente às propriedades ópticas e elétricas dos materiais constituintes desse tipo de dispositivo.

Tanto as propriedades ópticas, elétricas como as propriedades térmicas, magnéticas e eletrônicas dos materiais são explicadas através da teoria dos elétrons aplicada aos sólidos como descrito em HUMMEL (2001).

A teoria quântica trata justamente do comportamento sub-atômico dos materiais e foi capaz de explicar diversos experimentos e comportamentos esperados para a luz. Da mesma forma, essa teoria explica diversas propriedades de materiais sólidos e sua interação tanto com a luz quanto com elétrons.

Dentre os diversos efeitos observados na interação entre a luz e os diversos tipos de materiais, destaca-se uma classe de fenômenos que consiste na geração de corrente elétrica a partir da exposição de um material semicondutor a luz solar. Quando um dispositivo é construído com o objetivo específico de aproveitamento dessa corrente elétrica fotogerada, baseado em determinados parâmetros de construção, esse dispositivo é denominado de célula solar.

Uma célula solar é basicamente constituída por dois semicondutores, sendo um do tipo N e outro do tipo P. A estrutura do material constituinte da célula fotovoltaica é de fundamental importância para a determinação de seu comportamento.

Diferentes elementos podem ser usados para a confecção do semicondutor, que vai ser à base da célula fotovoltaica, sendo também grande o número de possibilidades na utilização

de elementos dopantes para a formação dos semicondutores do tipo N e tipo P.

O semicondutor tipo N constituirá a parte que será iluminada pela luz solar, enquanto o semicondutor do tipo P fica na parte inferior da célula solar. A união desses dois tipos de semicondutores forma a junção PN, que é uma região especial que será tratada mais adiante.

Mas para ocorrer a fotocorrente, é necessário que os fótons incidentes consigam chegar na região da junção PN, ou na camada de depleção ou esteja nas proximidades dessas regiões. Assim a descrição da estrutura desses elementos cristalinos ajuda a compreender o comportamento desses materiais quando exposto à luz.

## 2.2 Semimetais

Segundo BRADY (2000), o conceito do átomo surgiu à cerca de 2300 anos pela proposta dos filósofos gregos Leucipo (500 a.C. - 430 a.C.) e Demócrito (460 a.C. - 370 a.C.), que expressaram a hipótese da matéria ser composta por pequenas partículas denominada átomos, que seriam partículas básicas e indivisíveis. Mas somente nos séculos XVIII e XIX esses conceitos saíram do campo filosófico e ganharam o mundo científico.

No começo do século XIX, o cientista inglês John Dalton (1766 – 1844) utilizou os conceitos dos átomos para explicar as leis da Conservação da Massa e das Proporções Definidas e deduziu que os átomos deveriam ter propriedades para cada material. Porém no final do século XIX e início do século XX, experimentos mostravam que os átomos deveriam ser compostos por sub-partículas mais simples, denominadas partículas subatômicas. Assim um átomo seria formado por um núcleo contendo as sub-partículas prótons e nêutrons rodeados por uma nuvem de sub-partículas conhecidas como elétrons. Essas sub-partículas são as responsáveis pelas propriedades químicas e físicas dos elementos.

É possível agrupar os elementos de acordo com suas propriedades comuns. Entre os grupamentos possíveis destaca-se o que classifica os elementos em Gases Nobres, Metais, Ametais e Semimetais como pode ser visto na Figura 2.1.

Os elementos classificados como semimetais são as bases para a construção de dispositivos semicondutores, que por sua vez são os dispositivos utilizados para a construção de células solares.

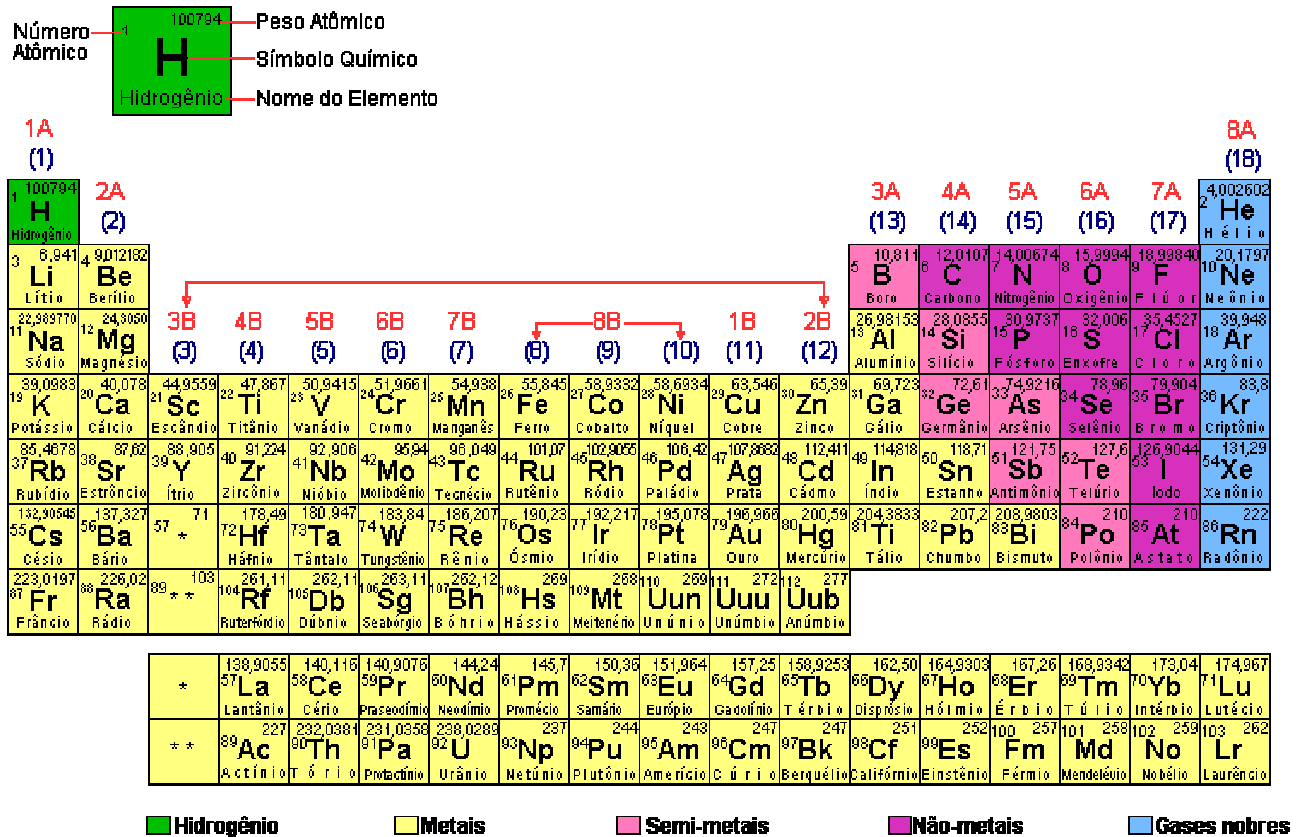


Figura 2.1: Tabela Periódica

A principal característica observada nos Semimetais está o fato da condutividade do mesmo estar entre a dos metais e dos ametais, sendo possível controlar a forma de como uma corrente elétrica atravessa o material como pode ser observado pela Figura 2.2.

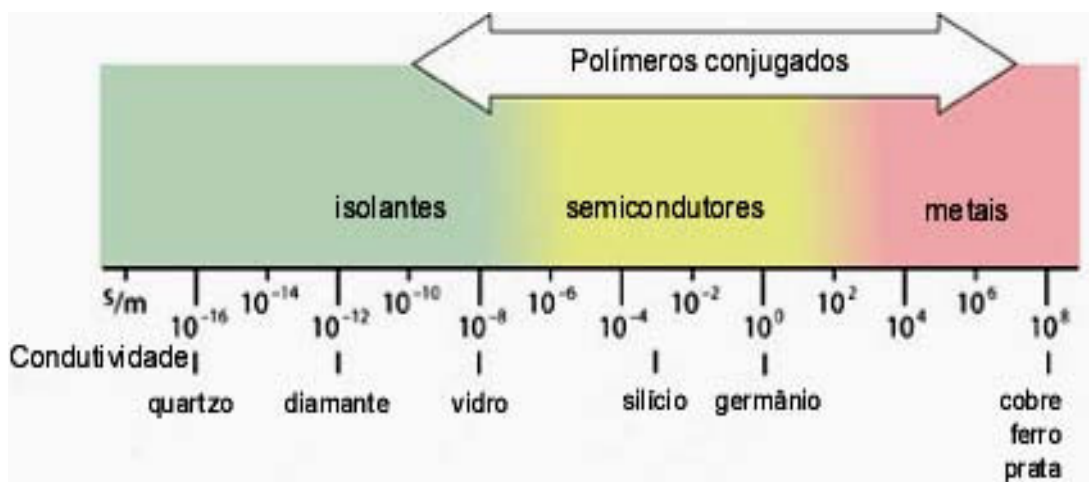


Figura 2.2: Escala de Condutividade

Os elementos constituintes do grupo dos semimetais assim como suas principais propriedades estão presentes na Tabela 2.1.

*Tabela 2.1: Semi-Metals*

Num. Atômico (Z)	Símbolo	Elemento	Massa Atômica	Período	Grupo	Elétrons na Última Camada	
						Camada	Numero de Elétrons
5	B	Boro	10,811	2	III A	L	3
14	Si	Silício	28,085	3	IV A	M	4
32	Ge	Germânio	72,610	4	IV A	N	4
33	As	Arsênio	74,921	4	V A	N	5
51	Sb	Antimônio	121,760	5	V A	O	5
52	Te	Telúrio	127,600	5	VI A	O	6
84	Po	Polônio	208,980	6	VI A	P	6

### 2.3 Semicondutores

Os semicondutores são dispositivos construídos com os elementos pertencentes ao grupo dos semimetais, podendo envolver elementos pertencentes a outros grupos, dependendo da sua aplicabilidade. Segundo PANKOVE (1975), para se compreender o funcionamento de um dispositivo semicondutor é necessário entender o conceito de bandas de energia. O modelo de Feynman (1918 – 1988) é usado para descrever o funcionamento da estrutura das bandas de energia dos semicondutores.

Pelo modelo de Feynman cada banda formada apresenta um número muito grande de estados permitidos. Uma banda pode estar separada da próxima banda por uma faixa de energia proibida ou banda proibida, ou seja, sem estados permitidos.

A largura desta banda proibida pode variar bastante, dependendo do elemento químico constituinte do sólido, e conseqüentemente do grupo que o elemento pertence (Metal, Semimetal ou Ametal) podendo inclusive ser negativo, ou seja, com a sobreposição de duas bandas consecutivas.

Estas bandas de energia correspondem às soluções possíveis da equação de Schrödinger (1887 – 1961) para diferentes distâncias entre os átomos.

As propriedades de condução de um material puro podem ser diretamente relacionadas

à estrutura dos elétrons do material.

Um metal tem uma banda parcialmente preenchida de níveis de energia, fornecendo, assim, liberdade para que os elétrons se movam entre eles, movendo-se, dessa forma, através do material.

Um isolante tem uma banda completamente preenchida possuindo, portanto um grande vão de energia antes da próxima banda subjacente. Os elétrons podem se mover apenas se adquirirem a energia necessária para saltar para esse conjunto de níveis vazios. Quanto maior for o espaçamento de energia, mais difícil se tornará conseguir isso e, conseqüentemente, melhor o isolante.

Os semicondutores têm bandas preenchidas, como um isolante, mas com um vão de banda relativamente pequeno para os níveis não-preenchidos. Assim, alguns elétrons podem ter a energia necessária para fornecer essa mobilidade.

À temperatura de zero kelvin, tanto o semicondutor como o próprio isolante se comporta como isolantes. Aumentando-se a temperatura, acima de zero Kelvin, de um material semicondutor, com largura da banda proibida reduzida, alguns poucos elétrons da banda de valência adquirem energia térmica da rede e poderão pular dos seus estados da banda de valência para estados vazios da banda de condução.

Desta forma, existe uma condição em que os elétrons, tanto da banda de valência (banda não mais totalmente preenchida) como da banda de condução (apenas parcialmente preenchida), podem conduzir corrente elétrica. A condutividade será, no entanto bem reduzida, tendo em vista o número reduzido de elétrons na banda de condução, bem como uma banda de valência quase preenchida.

Esta situação, no entanto não ocorre em materiais isolantes, que têm largura da banda proibida de valor grande o suficiente, a não ser que a temperatura seja muito elevada, como descrito em SWART (s.d.).

Cada semicondutor tem a sua estrutura de banda específica, com parâmetros específicos de banda proibida, Energia de Separação (Energia Gap,  $E_g$ ), massa efetiva, estrutura direta ou indireta e outros. Segundo SWART (s.d.), os dispositivos semicondutores se dividem em duas categorias, os semicondutores intrínsecos e os semicondutores extrínsecos, como será abordado mais adiante.

Os semicondutores extrínsecos formam, de acordo com sua dopagem, formam os semicondutores tipo N e tipo P. Quando semicondutores do tipo N e tipo P são colocados juntos, surge na região de contato entre os dois denominados junção, com características próprias que será explorado mais adiante.

## 2.4 Estrutura Cristalina dos Semicondutores

Os semicondutores são constituídos de cristais, nas quais as principais características são a simetria e regularidade na organização dos seus átomos que forma uma rede (*lattice*) por todo o material. Assim, certamente um material composto por uma estrutura cristalina pode ser descrito como um acúmulo de células unitárias que possuem a mesma forma e se repetem periodicamente HUMMEL(2001). Essas células cristalinas são basicamente estruturadas de duas formas, sendo elas o cubo de corpo centrado (*body-centered cubic – bcc*) e o cubo de face centrada (*face-centered cubic – fcc*).

As redes cristalinas baseadas na estrutura *bcc* possuem um átomo no centro de um cubo, no qual este mesmo está ligado a outros oito átomos que estão localizados exatamente nos cantos do cubo. Os átomos que estão presentes nos cantos do cubo se ligam ao átomo no interior do cubo através das diagonais e aos átomos vizinhos adjacentes por arestas, como pode ser observado na Figura 2.3.

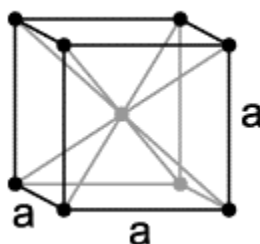


Figura 2.3: Estrutura cristalina do cubo de corpo centrado (bcc)

Já as redes cristalinas baseadas em células com estrutura *fcc* não possuem um átomo no centro do cubo, mas sim um átomo no centro de cada face do cubo. Este átomo está ligado aos outros quatro átomos que formam a face do cubo, e os átomos dos cantos do cubo, além da ligação com o átomo do centro da face, estão ligados com seus átomos vizinhos adjacentes por arestas, como pode ser observado na Figura 2.4.

Ambas as estruturas unitárias supracitadas permitem sua organização numa longa cadeia de átomos de forma bem regular, e é justamente essa regularidade que permite aos semicondutores possuírem propriedades tão singulares utilizadas na confecção de células solares.

Outro fator de destaque nessas estruturas é a possibilidade do crescimento do material, formando grandes estruturas modulares. A organização dessas estruturas unitária pode ser disposta de diversas maneiras, o que permitem a formação de diversas macroestruturas.

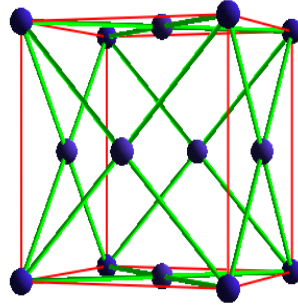


Figura 2.4: Estrutura Cristalina do cubo de face centrada (fcc)

Os materiais semicondutores utilizados neste trabalho, foram o silício (Si), o Germânio (Ge) e o Arsenieto de Gálio (GaAs), que possuem uma estrutura cristalina denominada Diamante (no caso do Si e Ge) e *Zinblende* para o (GaAs) que tem ambos como base à estrutura *fcc* como célula unitária.

A organização de células unitárias baseadas em *fcc* forma a macrorganização denominada **diamante** que ocorre pela interpenetração de duas células *fcc*. Cada célula *fcc* desloca-se em  $\frac{1}{4}$  de seu comprimento no sentido da outra célula, formando um tetraedro com os demais átomos da rede. Essa estrutura de diamante é observada nos semicondutores de Silício e Germânio, como pode ser observado na Figura 2.5.

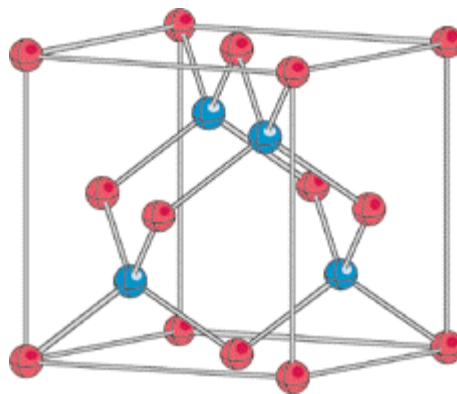


Figura 2.5: Estrutura de Diamante do Si e do Ge

Assim como a organização estrutural em diamante, a estrutura *zinblende*, também conhecida como *sphalerite* também é formada pela interpenetração de duas células unitárias do tipo *fcc*, que se deslocam em  $\frac{1}{4}$  no sentido uma da outra, formando um tetraedro. Porém essa estrutura é formada quando são utilizados elementos com átomos distintos como é o caso



dos semicondutores baseados em (GaAs).

Assim um átomo de um elemento está no centro do tetraedro do elemento vizinho, como pode ser observado pela Figura 2.6.

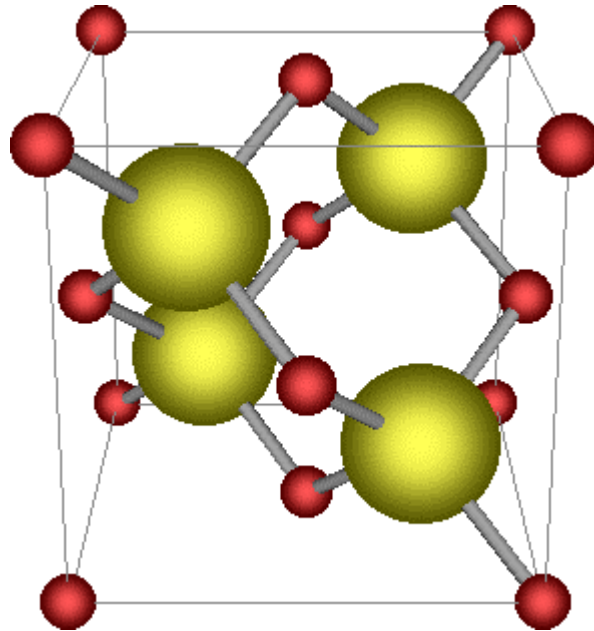


Figura 2.6: Estrutura zinblende do GaAs

Ambas as estruturas formam sólidos altamente organizados que permitem a fácil locomoção de elétrons pela rede cristalina, favorecendo no caso das células solares a condução de corrente.

#### 2.4.1 Elétrons no Cristal do Semicondutor.

Como descrito em HUMMEL (2001) a estrutura cristalina dos semicondutores proporciona cerca de  $10^{22}$  ligações por  $\text{cm}^3$  de material. Os elétrons que contribuem para a geração de corrente elétrica, no caso das células solares, estão presentes na camada de valência dos átomos.

É utilizada a estrutura de bandas (ou camadas) para explicar o comportamento dos semicondutores, onde os elétrons presentes na camada de valência necessitam de um pouco de energia para saltar de nível, como mencionado anteriormente. Quando esse nível é atingido, o

elétron sai da camada de valência para camada de condução do material, tornando-se um elétron livre. Para se compreender como ocorre esse fenômeno é necessário conhecer certas propriedades inerentes aos semicondutores que serão apresentadas a seguir.

## 2.5 Nível Fermi

Desenvolvido por Enrico Fermi (1901-1954) essa teoria estabeleceu o maior nível de energia para os elétrons à temperatura de zero Kelvin. Essa teoria reza que a essa temperatura todos os elétrons irão ocupar os menores níveis de energia. A esse nível de energia denomina-se como *nível Fermi* ou *energia Fermi*. O nível de energia cinético de uma nuvem de elétrons pode ser determinado por fórmulas estatísticas denominadas Fermi-Dirac, ou Função Fermi em função da temperatura, como descrita na Equação (2.1).

$$f = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right) + 1} \quad (2.1)$$

Onde:

$f$  : Função Fermi

$E$  : Energia Gap

$E_f$  : Energia Fermi

$k$  : Constante de Boltzmann

$T$  : Temperatura em Kelvin

A temperaturas superiores a zero Kelvin, o nível Fermi vai estabelecer uma probabilidade de 50% de se encontrar um elétron num determinado nível de energia. Assim é possível utilizar a distribuição Fermi-Dirac para se determinar a densidade de elétrons (ou lacunas) em um determinado nível de energia, de um certo material, pois o nível Fermi é dependente do material. Tem-se que este nível (Fermi) encontra-se geralmente próxima do centro da camada proibida.

Devido à agitação térmica, vibração da rede cristalina, colisões entre outros fenômenos, o elétron chega ao nível Fermi, mas é atraído novamente para a camada de valência, pois o mesmo não possui energia suficiente para chegar a camada de condução.

## 2.6 Densidade de Estados

Cada camada de um semicondutor possui um conjunto de níveis de energia distribuída sobre a mesma, como está relatado em PANKOVE (1975). Da mesma forma o comprimento da célula unitária da rede cristalina do semicondutor influencia no valor do nível de energia, sendo, portanto de suma importância se conhecer as características e a composição da rede cristalina do mesmo.

Os níveis de energia podem ser sobrepostos, de acordo com o valor assumido pelos números quânticos para as diversas direções no eixo tridimensional. Ou seja, existe o mesmo nível de energia para diferentes direções do espaço. A esses conjuntos de mesmo nível de energia em diferentes direções denomina-se **Estado de Energia**.

Os números quânticos podem assumir somente valores inteiros, não negativos e não nulos, formando apenas 1 octeto da esfera espacial das possíveis direções na qual a energia pode crescer como pode ser observado na Equação (2.2), onde  $n$  é o número quântico e os índices  $x, y$  e  $z$  representam os eixos de coordenadas.

$$E_s = \frac{\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 \cdot \pi^2}{2m} \cdot (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) \quad (2.2)$$

Onde:

- $E_s$  : Estado de Energia
- $h$  : Constante de Planck
- $m$  : Massa Efetiva do Elétron
- $n_\alpha$  : Número Quântico

Onde  $\alpha = x, y$  ou  $z$ .

Os estados de energia podem ou não estar povoados com elétrons. A **densidade populacional** é obtida multiplicando-se o número de possíveis níveis de energia pela probabilidade desses níveis estarem ocupados com elétrons.

A ocupação dos estados de energia por elétrons obedece ao Princípio de Exclusão de Pauli, proposto pelo físico austríaco Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958) em 1925. Segundo o Princípio de Pauli, cada estado de energia pode ser ocupado somente por elétrons com *spins* opostos, ou seja, um com *spin* positivo e outro com *spin* negativo.

Como consequência desse princípio, cada nível de energia (*Sharp – s, Principal – p, Difuse – d e Fundamental – f*) possui um número máximo de elétrons que pode suportar sendo dois para o nível *s*, seis para o nível *p*, dez para o nível *d* e 14 para o nível *f*.

Os semicondutores estudados nesse trabalho são representantes da coluna IV-A da tabela periódica de elementos apresentados na Figura 2.1, sendo o Silício com número atômico igual a 14 e o Germânio com número atômico igual a 32. Ambos os elementos possuem 4 elétrons na sua última camada sendo no caso do Si o preenchimento dos níveis de energia igual a  $3s^23p^2$  e no caso do Ge o preenchimento dos níveis de energia igual a  $4s^24p^2$ . No caso dos semicondutores há uma sobreposição de estados dos níveis *s* e *p* tanto na camada de valência quanto na camada de condução.

Como descrito em HUMMEL (2001), a sobreposição ocorre da seguinte maneira:

*“Os oito estados de mais alta energia formado pelos  $s + p$  estados, sendo dois de nível  $s$  e seis de nível  $p$ , separam-se em duas bandas ( $s + p$ ), cada uma dessas bandas consiste em um estado  $s$  e três estados  $p$ . O menor estado  $s$  pode acomodar um elétron por átomo, enquanto os três estados  $p$  podem acomodar três elétrons por átomo. Com isso a camada de valência pode certamente acomodar quatro elétrons por átomo, o que é verdadeiro também para a camada de condução. Devido o Germânio e o Silício possuírem quatro elétrons de valência por átomo, sendo eles representantes do grupo IV da tabela periódica, a camada de valência é completamente preenchida com elétrons e a camada de condução permanece vazia”.*

Assim, este modelo de bandas é usado para explicar por que os semicondutores se comportam como isolantes a temperatura de zero Kelvin e como condutores a altas temperaturas.

## 2.7 Semicondutores Extrínsecos

Um semicondutor puro, sem adição impurezas, é chamado de semicondutor intrínseco. Nesse tipo de semicondutor, o número de elétrons e de lacunas é o mesmo, pois eles são gerados aos pares pela agitação térmica. Quando a temperatura for de zero Kelvin, não há geração de par elétron-lacuna.

Quando certas impurezas são adicionadas ao semicondutor de forma controlada, denomina-se esse semicondutor como dopado ou **extrínseco**. Impurezas de elementos químicos das colunas III-A e V-A da tabela periódica constituem dopantes para semicondutores elementares como (Si) e (Ge).

No caso de semicondutores compostos como (GaAs) e similares, a dopagem, com alteração da concentração de portadores, pode ser obtida por elementos das colunas II, IV e

VI da tabela periódica como descrito em SWART (s.d.).

A adição de impurezas em um semiconductor altera a taxa de criação de elétrons e lacunas. Ao serem adicionadas concentrações de impurezas da coluna V-A da tabela periódica à rede cristalina do (Si), o átomo da impureza é de valência cinco, por tanto terá um elétron em excesso que não tem como formar um par de ligação covalente.

Este quinto elétron, sem formar par de ligações químicas, ficará fracamente ligado ao seu átomo, sendo facilmente liberado com pouca adição de energia tornando-se um elétron livre do cristal. Assim este elétron passa para a banda de condução do cristal, aumentando a concentração  $n$  de elétrons.

Portanto com o aumento da concentração  $n$ , tem-se como resultado num aumento na taxa de recombinação dos portadores e conseqüentemente, uma redução na concentração das lacunas. Os elétrons se tornaram portadores majoritários e as lacunas, portadores minoritários.

Como a condução elétrica deste material será feita predominantemente por cargas negativas (elétrons), o mesmo será chamado de material tipo N (de **n**egativo). A impureza da coluna V-A, que liberou o seu quinto elétron, é chamado de doadora, por ter “doador” um elétron. Como dopantes doadores para (Si) tem-se os seguintes elementos: Fósforo (P), Arsênio (As) e Antimônio (Sb).

O átomo doador, após doar seu quinto elétron, transforma-se num íon de carga  $+q$ . A criação destes íons positivos é concomitante com a geração equivalente de elétrons de carga negativa na banda de condução, de forma que a neutralidade de cargas do material é preservada.

Da mesma forma ao se adicionar agora uma pequena concentração de um elemento da coluna III-A da tabela periódica à rede cristalina de (Si), o novo átomo é de valência três, ou seja, apresenta a falta de um elétron, deixando a ligação covalente incompleta com um dos quatro átomos vizinhos de (Si). Esta ligação química incompleta pode facilmente receber um elétron de uma ligação química vizinha, formando-se assim uma lacuna.

Em outras palavras, com pouca energia um elétron da banda de valência do cristal passa para o estado vazio associado ao átomo da coluna III-A, aumentando assim a concentração  $p$  de lacunas. Assim com o aumento da concentração  $p$ , resulta num aumento na taxa de recombinação dos portadores e conseqüentemente, uma redução na concentração dos elétrons.

Logo, a adição de elementos da coluna III-A ao cristal de Si, forma um incremento na concentração  $p$  e uma redução na concentração  $n$ . Nesta situação, as lacunas serão portadores majoritários e os elétrons, portadores minoritários.

Como a condução elétrica deste material será feita predominantemente por cargas positivas (lacunas), o mesmo será chamado de material tipo P (de **p**ositivo). A impureza da coluna III-A, que recebeu o elétron proveniente da banda de valência, é chamada de aceitadora, por ter “aceito” um elétron. Uma lacuna é em suma a ausência de um elétron.

Como dopantes aceitadores para (Si) e (Ge) tem-se os seguintes elementos: Boro (B), Alumínio (Al), Gálio (Ga) e o Índio (In). Dentre estes, o (B) é o dopante aceitador mais usado.

O átomo aceitador, após receber seu quarto elétron transforma-se num íon de carga  $-q$ . A criação destes íons negativos é concomitante com a geração equivalente de lacunas de carga positiva na banda de valência, de forma que a neutralidade de cargas do material é preservada.

Para as aplicações relacionadas à geração elétrica a partir da luz do sol, o semiconductor dever ser dopado com elementos que facilitem a circulação de elétrons dentro do mesmo. Essa circulação é muito difícil se forem usados semicondutores intrínsecos na confecção de células solares devido ao pequeno número de elétrons por centímetro cúbico de material, cerca de  $10^{19} \text{ cm}^3$ .

Assim o uso de semicondutores extrínsecos ou dopado com demais elementos proporciona a implementação desse tipo de dispositivo.

## **2.8 A Junção PN**

A junção PN é a região de maior importância para uma célula fotovoltaica, pois é essa região a responsável pela efetiva geração e condução de corrente elétrica a partir da absorção da luz.

A junção PN pode ocorrer de duas formas distintas, a homojunção, que acontece quando um mesmo semiconductor base é usado para formar os semicondutores do tipo N e tipo P. Esse é o caso do Silício (Si) e do Germânio (Ge), que quando dopado, por exemplo, com Fósforo (P) se torna um semiconductor tipo N e quando dopado como Boro (B) se torna um semiconductor tipo P.

Ao serem colocados juntos, a base do semiconductor é a mesma (o Si), portanto a junção PN formada é devida ao contato de dois semicondutores de mesma natureza, formando assim a homojunção.

Da mesma forma o Arsenieto de Gálio (GaAs) também forma uma homojunção quando um semiconductor do tipo N formado, por exemplo, pela adição de Si entra em conto

com o semicondutor tipo P formado, por exemplo, pela adição de Zinco (Zn).

Se existisse uma mistura desses tipos de semicondutores, ou seja, um semicondutor do tipo N formado de Si com dopagem de (P) e este colocado em contato com um semicondutor tipo P formado de Ge com dopagem de (B), teria ocorrido uma heterojunção.

Tanto a homojunção quanto a heterojunção são utilizadas para a confecção de células fotovoltaicas.

Geralmente as células baseadas na homojunção são células simples com apenas um semicondutor do tipo N e outro do tipo P, e são utilizadas para a absorção de uma faixa específica do espectro solar, e que são o tema desse trabalho.

Já as células baseadas em heterojunção são utilizadas para montar células compostas em forma de pilha, denominadas células multicamadas, onde existem várias camadas tipo N e tipo P intercaladas, fazendo com que o espectro de absorção da célula baseada nessa tecnologia seja ampliado.

### 2.8.1 A Natureza da Homojunção PN

Como está descrito em PANKOVE (1975) a junção PN é um componente de vital importância para os dispositivos semicondutores. Como mencionado no item anterior, a junção PN surge quando semicondutores do tipo N e do tipo P são colocados em contato.

Um semicondutor do tipo N possui excesso de portadores de carga negativa, (os elétrons) enquanto o semicondutor tipo P possui uma carência desse tipo de portador, ou pode-se afirmar que existe um excesso de portadores positivos denominados lacunas que é a denominação para a ausência de elétrons numa determinada ligação.

Ao entrar em contato as faces dos semicondutores tipo N e P, ocorre a tendência de equilíbrio entre a concentração desses portadores próximos da junção. Essa redistribuição dos portadores ocorre em torno do nível Fermi do semicondutor.

Esse processo se estende por certo comprimento para o lado do semicondutor tipo N e do semicondutor tipo P. Assim na vizinhança da junção PN um dipolo é formado, consistindo em doadores íons positivos no lado N e de aceitadores íons negativos no lado P. O dipolo gerado forma um campo elétrico na qual conduz o elétron da camada de condução para o semicondutor tipo N e a lacuna na camada de valência para o semicondutor tipo P.

Assim PANKOVE (1975) afirma que a junção PN apropriada é definida onde a localização do nível Fermi é a metade da energia *Gap* ou da energia de separação entre as camadas de valência e condução. O dipolo estende-se de ambos os lados da junção, formando

uma região denominada camada de depleção.

A junção PN forma um capacitor, constituído de regiões de condução e regiões onde a camada de depleção funciona como um isolante. Quando uma tensão  $V$  é aplicada de forma direta, há um incremento na capacitância da junção. Quando a tensão  $V$  é aplicada de forma reversa, a capacitância diminui. Assim como existe uma capacitância, existe um campo elétrico  $\xi$  na junção PN.

## 2.8.2 Função da Junção PN

Se ambos semicondutores tipo N e tipo P não estiverem excessivamente dopados, a região de depleção irá se estender significativamente em ambos semicondutores. Assim a aplicação de uma pequena corrente reversa de saturação, implicará na migração desses portadores para a junção.

Um par elétron-lacuna é gerado pela agitação térmica no semiconductor tipo N, onde a lacuna é um portador minoritário e possui um tempo de vida  $\tau_p$  antes que ocorra a recombinação com um elétron excedente. Da mesma forma, um par elétron-lacuna é gerado pela agitação térmica no semiconductor tipo P, onde o elétron é um portador minoritário e possui um tempo de vida  $\tau_n$  antes que ocorra a recombinação com uma lacuna excedente.

Antes que ocorra a recombinação vencido o tempo  $\tau_p$  (ou  $\tau_n$ ), o portador minoritário percorre uma distância  $L$  pelo material. Logo se este portador minoritário consegue chegar à camada de depleção, ele é lançado para o outro semiconductor. Ou seja, se o portador minoritário for uma lacuna no semiconductor tipo N, ao chegar na camada de depleção, está será atraída para o dentro da mesma e lançada ao semiconductor tipo P, aumentando a concentração de lacunas no lado P e de elétron no lado N, pois não ocorreu a recombinação.

Da mesma forma, se o portador minoritário for um elétron, quando este chegar à camada de depleção, será lançado para o semiconductor tipo N, aumentando a concentração de elétrons no lado N e também de lacunas no lado P.

Porém a taxa de geração de par elétron-lacuna por agitação térmica é a mesma de recombinação de par elétron-lacuna, o que deixa a concentração de portadores majoritários em equilíbrio constante, não favorecendo a geração de corrente elétrica.

Portanto para que ocorra a geração de corrente elétrica, é necessário à ocorrência de um fator externo que provoque a geração de par elétron-lacuna, o que será abordado posteriormente.



## 2.9 *Gap* Indireto e *Gap* Direto

Quando uma célula solar é iluminada, esta favorece a geração de par elétron-lacuna, devido ao fato da colisão dos fótons incidentes com os átomos do material. Assim, se o fóton tem energia superior ao limiar fotoelétrico, este é capaz de arrancar um elétron do átomo constituinte da célula fotovoltaica e deixando-o livre e criando em seu lugar uma lacuna.

Mas para que esse efeito possa ocorrer, é necessário observar o tipo de *Gap* ou energia de separação entre a camada de valência e a camada de condução do material constituinte da célula solar.

As células fotovoltaicas baseadas em (Si) e (Ge) são ditas de *Gap* indireto, isso por que a posição do pico superior da camada de valência não está alinhada com o pico inferior da camada de condução, deste modo caso os elétrons sejam excitados da camada de valência, com uma energia que seja superior a energia *Gap*, estes provavelmente não conseguirão chegar à camada de condução. Assim o elétron retornará a camada de valência devido à atração que a mesma influencia no elétron.

Para que possa ocorrer a condução elétrica em semicondutores de *Gap* indireto, é necessário um outro fenômeno externo que provoque a mudança do momento do elétron.

Esse fenômeno é a interação com um fônon da rede cristalina do semicondutor. Um fônon é uma sub-partícula criada pela vibração da rede cristalina do material, e tem a propriedade de alterar o momento do elétron quando estes se colidem. A interação com um fóton altera somente a energia do elétron, mas não seu momento.

A mudança de momento causada pela interação com um fônon permite que a partícula alcance a camada de condução, permitindo assim a condução elétrica se este elétron alcançar a camada de depleção, como será mencionado mais adiante. A interação entre elétrons e fônons está além do escopo desse trabalho, ficando como sugestão para trabalhos futuros.

Semicondutores formados de (GaAs), (InAs), (GaP) entre outros, possuem *Gap* direto, ou seja, o pico máximo da camada de valência está em conjunção com o pico mínimo da camada de condução.

Assim quando um átomo é bombardeado com um fóton que tenha energia maior que o potencial fotoelétrico, este ganha energia suficiente para sair da camada de valência e alcançar a camada de condução sem a necessidade de alteração no seu momento.

Semicondutores que possuem *Gap* direto tem uma maior facilidade de conduzir corrente elétrica devido ao fato de dispensar a interação com o fônon da rede cristalina do material.

Neste trabalho o semicondutor baseado em (GaAs) foi utilizado para representar o grupo dos semicondutores de *Gap* direto. O estudo dos demais semicondutores dessa classe apresenta-se como sugestão de trabalhos futuros.

## 2.10 Propriedades Ópticas dos Materiais

### 2.10.1 Introdução

Neste tópico serão abordadas as propriedades ópticas dos materiais, que são de fundamental importância para a verificação de seu comportamento quando submetidos à incidência da luz solar. Essas propriedades vão demonstrar como é feito a absorção da luz do sol e seu aproveitamento pelo material para a conversão em eletricidade, além de determinar a melhor faixa de aproveitamento do espectro solar para geração da mesma.

Diversos são os fatores que interferem na forma que o material aproveita a luz solar, os principais serão destacados logo abaixo.

### 2.10.2 Índice de refração, $n$

Segundo Willebrord van Roijen Snell (1580 – 1626), quando a luz passa de um meio de baixa densidade para um meio de alta densidade, o raio de incidência da luz sofre um desvio devido à mudança de velocidade de propagação da luz no meio, esse conceito ficou conhecido como lei de Snell.

Assim, o ângulo de refração  $\beta$  é menor que o ângulo de incidência  $\alpha$  formados entre a normal e a direção dos raios refratado e do incidente de acordo com a Equação (2.3).

$$n = \frac{\text{sen}(ai)}{\text{sen}(ar)} \quad (2.3)$$

onde:

$n$  : Índice de Refração

$ai$  : Ângulo de incidência

$ar$  : Ângulo de refração

Define-se que o índice de refração do vácuo é um e a velocidade da luz no vácuo é de  $2,99 \times 10^8$  m/s.

A magnitude do índice de refração depende do comprimento de onda da luz incidente, denominado dispersão. Portanto, quando a luz passa de um meio menos denso como o vácuo ou o ar para o meio mais denso como o interior do semicondutor, a velocidade tal como o comprimento de onda decrescem, a fim de manter a frequência, mantendo assim a energia constante.

Essa diminuição do comprimento de onda pode deslocar a faixa de operação do semicondutor para os comprimentos de ondas maiores, pois ao entrar no semicondutor, com a diminuição do comprimento de onda, alguns comprimentos que eram superiores ao limiar fotoelétrico ficaram abaixo do mesmo, não possuindo assim energia suficiente para arrancar o elétron da camada de valência do mesmo.

### 2.10.3 Coeficiente de Extinção, K.

Ao penetrar no material semicondutor, a luz tem seu comprimento de onda e sua velocidade diminuída rapidamente, bem como a intensidade da mesma cai à medida que a luz percorre uma distância dentro do material.

O índice de refração, quando observado em metais e semicondutores geralmente é um valor complexo, sendo formado de uma parte real e uma parte imaginária, como está descrito em PANKOVE (1975) e em HUMMEL (2001).

A parte imaginária do índice de refração é conhecida como *constante de extinção*, de *amortecimento*, ou *atenuação*; e define como a luz vai se extinguindo dentro do material semicondutor.

O coeficiente de extinção está diretamente relacionado com o tipo do material na qual a luz incide, através das constantes de condutividade  $\sigma$  e de permissividade  $\epsilon$ . Assim como também está diretamente relacionado com o comprimento da luz incidente no material, como descrito na Equação (2.4).

$$k^2 = \left(\frac{1}{2}\right)\epsilon \cdot \left[ \left[ 1 + \left( \frac{2\sigma}{v\epsilon} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (2.4)$$

onde:

- $k$  : Coeficiente de extinção
- $\varepsilon$  : Constante dielétrica
- $\sigma$  : Condutividade do material
- $\nu$  : Freqüência da onda incidente

Neste trabalho o coeficiente de extinção vai ser usado para a definição da constante de absorção  $\alpha$ .

#### 2.10.4 Constante de Absorção $\alpha$ e Profundidade de penetração $W$

A constante de absorção é utilizada para se calcular a intensidade luminosa restante a certa profundidade no material.

Assim como o coeficiente de extinção  $K$ , a constante de absorção é dependente do material e do comprimento de onda da luz incidente.

Com o valor de  $\alpha$ , é possível determinar a intensidade da luz numa certa profundidade dentro do material, e assim contabilizar a quantidade de fótons existentes nessa profundidade que auxiliam na geração de fotocorrente.

Calculando-se o inverso da constante de absorção, obtém-se a profundidade de penetração  $W$ , que é à distância na qual a intensidade da luz percorre no material sofrendo um decréscimo de  $1/e$  do seu valor original, onde  $e$  é o número de Neper, como descrito em HUMMEL (2001).

### 2.11 Absorção do Espectro Solar

#### 2.11.1 Introdução

A composição física da célula fotovoltaica interfere de sobremaneira na forma que a luz é absorvida pelo material semicondutor. Da mesma forma, parâmetros externos à célula influenciam nesse processo de absorção, evidenciando a influência do meio ambiente na geração de energia elétrica a partir da energia solar.

Neste item será apresentado o processo de absorção dos fótons pela célula fotovoltaica e os fatores que influenciam no desempenho da mesma.

### 2.11.2 O Processo de Absorção do Espectro Solar

A célula solar exposta ao sol é bombardeada por aproximadamente  $4 \times 10^{17}$  fótons por  $\text{cm}^2$ . Essa quantidade de fótons é equivalente a uma potência de cerca de  $1000 \text{ W/m}^2$ , assim, conhecer a forma de como as células solares absorvem esse espectro é de fundamental importância para a elaboração do modelo computacional.

Os fótons que possuem energia superior ao limiar fotoelétrico descrito em TIPLER (1991), estarão aptos a participar da geração de energia elétrica. Os fótons com energia abaixo desse limiar, apenas promoverão o aquecimento da célula, pois os mesmos não possuem energia suficiente para arrancar o elétron do átomo, o que vai influenciar negativamente no seu desempenho, como será observado adiante.

Assim, tomando como ponto de partida os fótons com energia superior ao limiar fotoelétrico, é necessário verificar o comportamento dos mesmos ao atingirem a célula.

Ao atingir a célula solar, um fóton arranca um elétron da camada de valência do átomo lançando-o para a camada de condução do mesmo. A esse processo denomina-se geração de um par elétron-lacuna, pois ao arrancar o elétron do átomo e deixá-lo livre, este elétron deixou uma lacuna em seu lugar. Devida à agitação térmica do material, a tendência é que o elétron livre caminhe pelo material. Neste momento, deve ser feita uma consideração em relação ao tipo de material onde ocorreu a formação do par elétron-lacuna.

Existem três situações onde pode haver ocorrido a geração do par elétron-lacuna na célula fotovoltaica. A primeira é se a geração ocorrer no semicondutor tipo N, a segunda se ocorrer no semicondutor tipo P e a terceira se ocorrer na camada de depleção. Logo serão analisados esses três aspectos para a construção do panorama de absorção.

Se a formação do par elétron-lacuna ocorreu no semicondutor tipo N, significa dizer que existe um excesso de elétrons nesse material, que são os portadores majoritários. Logo existe uma carência de lacunas nesse material, pois as lacunas são os portadores minoritários. Assim, a probabilidade de um elétron livre, que caminha pela rede cristalina, ser atraído pela lacuna formada pela fotogeração do par elétron-lacuna é grande.

Se um elétron cair na lacuna gerada anteriormente, a concentração de elétrons permanecerá constante, e assim não ocorrerá a geração de corrente elétrica.

Para que esse elétron seja atraído pela lacuna e caia novamente na camada de valência do átomo, o processo inverso da absorção do fóton deve ocorrer, ou seja, deve ocorrer a emissão de um fóton.

Da mesma forma se a formação do par elétron-lacuna ocorreu no semicondutor tipo P,

significa dizer que existe um excesso de lacunas nesse material, que são os portadores majoritários. Logo existe uma carência de elétrons nesse material, pois os elétrons são os portadores minoritários. Assim, a probabilidade de um elétron livre, que caminha pela rede cristalina, ser atraído pela lacuna formada pela fotogeração ou uma que esteja em excesso no semiconductor tipo P, é muito grande.

Se um elétron cair na lacuna, a concentração de elétrons permanecerá constante, assim como a concentração de lacunas, e assim não ocorrerá à geração de corrente elétrica.

Para que esse elétron seja atraído pela lacuna e caia novamente na camada de valência do átomo, o processo inverso da absorção do fóton deve ocorrer, ou seja, deve ocorrer a emissão de um fóton.

Devido a perdas de energia no sistema, principalmente devido a colisões entre átomos e partículas subatômicas, o fóton vai perdendo sua energia até cair a um nível inferior ao do limiar fotoelétrico, passando apenas a geração de calor no material.

Se, no entanto a formação do par elétron-lacuna for na camada de depleção ou próximo da camada de depleção tanto no semiconductor tipo N como tipo P, um processo diferente dos citados anteriormente irá acontecer.

O elétron na camada de condução será atirado para o semiconductor tipo N, pois a camada de depleção, funciona como um dipolo. Da mesma forma a lacuna fotogerada irá ser atirada para o semiconductor tipo P, devido ao mesmo fato da camada de depleção funcionar como um dipolo. Assim não haverá possibilidade de ocorrer à recombinação favorecida pela agitação térmica.

Logo a concentração dos elétrons irá subir no semiconductor tipo N, assim como a concentração de lacunas no semiconductor tipo P irá aumentar.

Esses elétrons em excesso irão promover a corrente elétrica que irá circular, quando contatos ligarem o semiconductor tipo N a uma carga, e essa carga a um semiconductor tipo P.

Essa circulação de elétrons vai tentar equilibrar a diferença de concentração entre os dois semicondutores, passando pela carga. A esse fenômeno denomina-se corrente elétrica.

### 2.11.3 Influência das características físicas da célula

A construção da célula fotovoltaica apresenta-se como um dos principais fatores que influenciam na forma que a mesma vai absorver o espectro solar e de como vai ser seu desempenho de conversão da energia luminosa em energia elétrica.

Um exemplo desse tipo de influência se deve ao tipo de elemento escolhido como

constituente básico da célula fotovoltaica. Neste trabalho serão focados os semicondutores baseados em Silício (Si), Germânio (Ge) e Arsenieto de Gálio (GaAs). Porém diversas outras bases para a elaboração dos semicondutores poderiam ser utilizadas como (InP), (GaSb), (InSb), entre outros tantos elementos.

O trabalho restringiu o foco de atuação a essas três possíveis bases dos semicondutores, pelo fato de serem os mais utilizados no mercado de fabricação de células solares, onde o Si se destaca como sendo o elemento mais fartamente usado no momento.

A escolha desses elementos básicos para a confecção dos semicondutores que irão formar a célula fotovoltaica, vai implicar principalmente na faixa de absorção do espectro solar. Isso se dá devido ao fato das características de permissividade e de condutividade ímpares de cada material.

Essas duas características afetam o valor do coeficiente de extinção  $K$  e o valor da constante de absorção  $\alpha$ .

Outro ponto que afeta a faixa de absorção das células fotovoltaicas está no valor da energia *Gap* dos elementos utilizados para a sua confecção. Quanto menor o valor da energia *Gap*, menor será o esforço necessário para que um fóton consiga arrancar um elétron da camada de valência para a camada de condução. A Tabela 3.2 mostra o valor da energia *Gap* para os semicondutores utilizados nesse trabalho a temperatura de 300 K e sem dopantes.

*Tabela 2.2: Valor da Energia Gap para os semicondutores usados na modelagem*

<i>Elemento</i>	<i>Energia GAP (eV)</i>
Ge	0,66
Si	1,12
GaAs	1,42

O tipo do *Gap* do semicondutor utilizado também se apresenta como uma forma de interferência no desempenho da mesma na absorção da luz solar.

Elementos que possuem o *Gap* direto, como é o caso do (GaAs) têm menos dificuldades na absorção de fótons, enquanto os elementos de *Gap* indireto, como é o caso do (Si) e do (Ge) necessitam além de fótons de maior energia e geralmente de interações com os fônons da rede cristalina do semicondutor, como já foi mencionado na seção 2.9.

O valor da energia *Gap* dos semicondutores é diminuído devido ao fato da dopagem com outros elementos químicos específicos, como já foi mencionado em seções anteriores. Tanto a concentração quanto o tipo de elemento usado para a dopagem tem influência na

forma de como o semicondutor vai conseguir absorver o espectro luminoso.

Um outro fator que tem grande influência na forma de como será feita a absorção dos fótons é a própria construção da célula fotovoltaica, tanto no que diz respeito à área de aproveitamento da célula quanto na espessura da mesma e pureza de seus elementos. Células com área de cobertura muito pequena favorecem as aplicações que necessitem de pequenas correntes, enquanto com áreas maiores privilegiam aplicações com correntes maiores.

Levando para o ponto de vista da espessura, uma célula fotovoltaica pode ser vista como um sanduíche, onde na parte superior estará o semicondutor tipo N, na região central fica a junção PN e a camada de depleção, e na parte inferior o semicondutor tipo P.

A espessura dessas camadas deve ser cuidadosamente planejada de forma que maximize a incidência de fótons na região da camada de depleção, favorecendo a geração de corrente elétrica e minimize a recombinação do par elétron-lacuna.

Assim, as células fotovoltaicas baseadas em Silício possuem uma melhor absorção do espectro luminoso com comprimento de onda entre 400 nm a 700 nm, enquanto o Germânio e o GaAs possuem um melhor aproveitamento em outras faixas do espectro solar.

#### 2.11.4 Influência da Intensidade Luminosa

A intensidade luminosa influencia de maneira mais determinante a forma de geração de energia elétrica pela célula fotovoltaica, pois vai influenciar diretamente na quantidade de fótons que irão incidir na célula.

Uma redução da iluminação da célula fotovoltaica traduz-se imediatamente na geração de corrente elétrica que a mesma produz. Isso se deve ao fato de menos fótons conseguir chegar à camada de depleção, e portando o crescimento da concentração de elétrons no semicondutor tipo N e de lacunas no semicondutor tipo P ser desacelerada a ponto de não ser mais possível manter uma carga externa.

Vale salientar que a diminuição da intensidade luminosa não diz respeito ao valor da energia que cada fóton possui, que permanece constante, mas sim ao fato de que a quantidade de fótons será diminuída.

A posição do sol em relação à célula fotovoltaica também se apresenta como um fator que modifica o funcionamento da mesma, pois, dependendo do ângulo de incidência dos raios solares, um conjunto luminoso contendo um certo valor de comprimento de onda será favorecido em detrimento de um outro conjunto de comprimentos de onda. A célula pode ter sua eficiência alterada em função desse fator.



### 2.11.5 Influência da Temperatura

Um último fator preponderante que influencia também de maneira veemente o funcionamento das células fotovoltaicas é o que diz respeito à temperatura na qual o sistema está trabalhando.

Quanto maior a temperatura, maior a influência negativa sobre o desempenho da célula fotovoltaica. Isso se deve pelo fato da temperatura promover a agitação térmica no material semicondutor, favorecendo a recombinação do par elétron-lacuna. Quanto maior for essa recombinação, menor será o desempenho da célula.

Da mesma forma a temperatura tem grande influência em outro quesito, que é a velocidade de recombinação superficial, que trata da recombinação do par elétron-lacuna na superfície do material semicondutor. O acréscimo da temperatura favorece o aumento da velocidade de recombinação superficial, e por tanto uma diminuição da corrente elétrica gerada.

## CAPÍTULO III

### FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA

#### 3.1 Introdução

Nesse capítulo será apresentada a fundamentação matemática necessária para a elaboração do modelo computacional das células fotovoltaicas. Este capítulo consiste em síntese numa compilação das equações utilizadas em diversos trabalhos envolvendo os princípios de funcionamento das células solares, e que de forma direta implicam na sua utilização para a elaboração do modelo computacional do comportamento da célula fotovoltaica, assim como também do painel solar construído com esse tipo de célula.

Conjuntamente serão apresentados os principais algoritmos utilizados no programa que representam a utilização de cada equação fornecendo assim a modelagem computacional de células fotovoltaicas baseadas em seus parâmetros físicos e cenários de execução.

#### 3.2 Apresentação das equações e algoritmos

A primeira equação apresentada relaciona o comprimento de onda de uma onda eletromagnética, como é o caso da luz do sol, e sua frequência da pela Equação (3.1). Como descrita em TIPLER (1991).

Essa conversão permite ao pesquisador observar o limiar fotoelétrico pelo prisma da frequência da onda luminosa incidente, o que pode facilitar o entendimento do comportamento da célula solar.

Assim a Equação (3.1) permite a conversão do comprimento de onda em frequência que é utilizada no software.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (3.1)$$

Onde:

$f$  : Freqüência da onda

$\lambda$  : Comprimento de Onda

$c$  : Velocidade da Luz

A segunda equação utilizada no processo de modelagem das células fotovoltaicas calcula a energia dos fótons da luz incidente a partir da freqüência da luz incidente ou do comprimento de onda da luz incidente. Essa relação é dada pelas Equações (3.2) e a Equação (3.3) como descrito em TIPLER (1991).

Usando-se a Equação. (3.2), a energia é obtida pela freqüência da onda de luz incidente, enquanto o uso da Equação (3.3) a energia é obtida diretamente do comprimento de onda da luz incidente.

Essas relações foram determinadas pelo físico Albert Einstein em 1905 e apresentaram os fundamentos necessários para o estudo dos efeitos fotoelétrico e fotovoltaico.

$$E = h.f \quad (3.2)$$

e

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \quad (3.3)$$

Onde:

$E$  : Energia do fóton incidente

$h$  : Constante de Planck

$f$  : Freqüência da onda incidente

$\lambda$  : Comprimento da onda incidente

Como descrito em TIPLER (1999) o valor da constante de Planck utilizada nessa formulação matemática vale  $h = 4,135669 \times 10^{-15}$ .

Para se encontrar o valor da energia do fóton na modelagem computacional da célula

fotovoltaica foi utilizada a fórmula matemática apresentada na Equação (3.3). Assim o algoritmo apresentado na Figura 3.1 demonstra como esses valores foram calculados.

```

Algoritmo 3.1
inicio
  h=4.135669 x 10-15;
  c=2.99792458 x 108;
  para i de λmin até λmax passo 1 faça
  inicio
    E[( i- λmin )]=(( h.c)/ i);
  fim_para;
fim_Algoritmo;

```

Figura 3.1: Algoritmo para a determinação da Energia do fóton incidente

A próxima equação utilizada nesse trabalho diz respeito ao limiar fotoelétrico ou a função trabalho, ou seja, a energia mínima que é necessária para que um elétron seja arrancado do material, ocorrendo assim o efeito fotovoltaico como mostrado na Equação (3.4) e descrito no trabalho de TIPPLER (1991).

$$\Theta = \frac{h.c}{\lambda_{\min}} \quad (3.4)$$

Onde:

- Θ: Função trabalho ou limiar fotoelétrico
- h: Constante de Planck
- λ: Comprimento de onda mínimo

É possível reparar na semelhança entre as Equação (3.3) e Equação (3.4), embora a conotação tenha mudado, tem-se basicamente que se  $E \geq \Theta$ , o fóton possui energia suficiente para arrancar um elétron do átomo favorecendo o efeito fotoelétrico e fotovoltaico, caso contrário, o fóton não vai conseguir arrancar o elétron do átomo. Assim Θ também é conhecido como limiar fotoelétrico.

Cada material possui um limiar fotoelétrico específico que pode ser alterado de acordo com a dopagem do material com outros tipos de elementos.

A quinta equação diz respeito à fração da intensidade luminosa que corresponde a cada

comprimento de onda compreendido entre os valores máximo e mínimo. Segundo TIPPLER (1991) a luz incidente na terra durante um dia ensolarado é de aproximadamente  $1000 \text{ W/m}^2$ , o que implica que a terra é bombardeada com aproximadamente  $4 \times 10^{17}$  fótons por  $\text{cm}^2/\text{s}$ . O espectro solar se divide em frações da acordo com a Figura 3.2 como descrito no Projeto de Revisão ABNT NBR 10899 de 2005 que trata da terminologia da energia solar fotovoltaica e que se encontra no Anexo I.

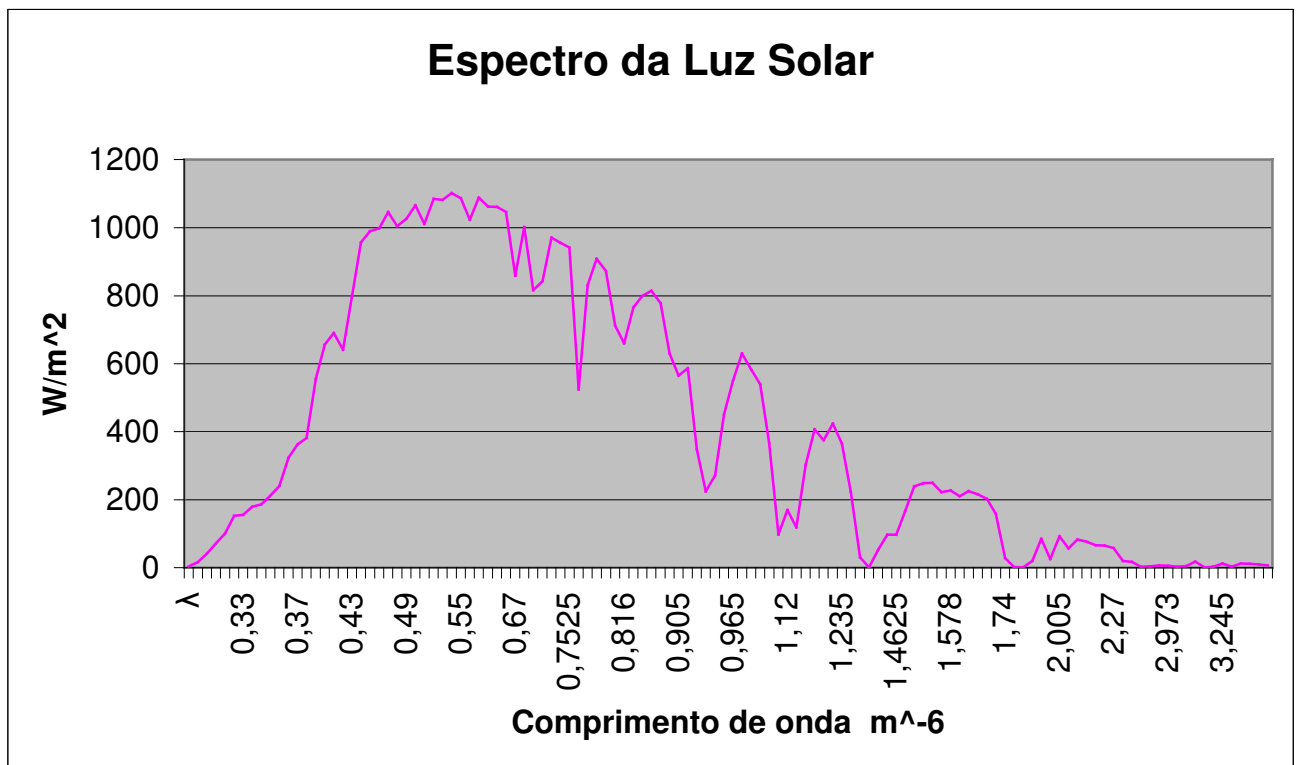


Figura 3.2: Espectro Solar da Luz incidente do Sol.

O espectro da luz visível que varia de 400 nm a 700 nm é apresentado no gráfico presente na Figura 3.3.

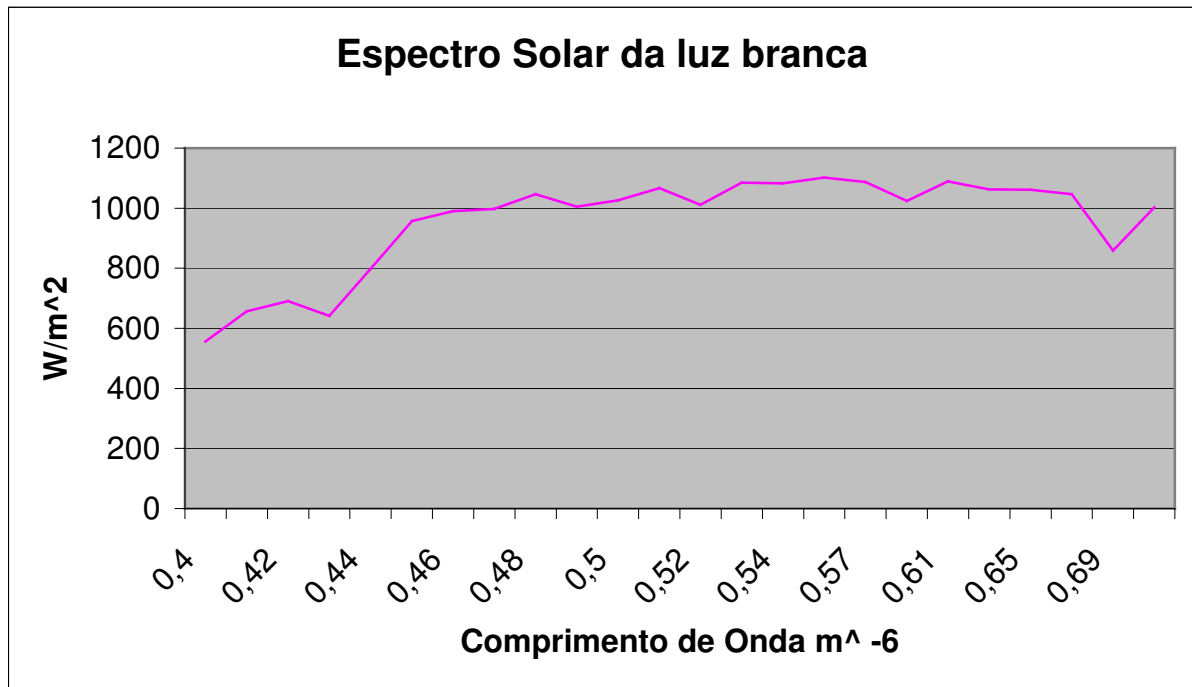


Figura 3.3: Espectro Solar da Luz Branca

A fração da luz é determinada da seguinte maneira:

Inicialmente é determinado o intervalo de observação do espectro, compreendido entre os valores máximo e mínimo do comprimento de onda incidente informados pelo usuário. Esse intervalo é segmentado de forma a se obter para cada comprimento de onda uma fração do espectro solar. Como o espectro não é linear, como pode ser constatado pela observação dos gráficos das figuras 3.2 e 3.3 respectivamente, é necessário fazer a ponderação da influência que uma determinada fração da luz incidente vai ter. Assim tomando a fração com a influência que a mesma possui na formação do espectro solar total, determina-se o valor real da fração da luz para um dado comprimento de onda. Essa Equação é expressa pela Equação (3.5)

Uma vez calculada a fração da intensidade da luz é possível encontrar a quantidade de fótons para cada comprimento de onda da luz incidente na célula fotovoltaica.

$$Fr = \left( \frac{IL}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \right) \cdot P \quad (3.5)$$

onde:

$Fr$  : Fração da luz incidente para um comprimento de onda

$IL$  : Intensidade da luz incidente

$\lambda_{\max}$  : Comprimento da onda incidente máximo

$\lambda_{\min}$  : Comprimento da onda incidente mínimo

$P$  : Peso ou fator de ponderação da fração da luz incidente

Assim a sexta equação utilizada para a realização da modelagem computacional diz respeito à quantidade de fótons presentes em cada onda portadora compreendida entre os limites do espectro de observação. Ou seja, para divisão do comprimento de onda da luz, o número de fótons correspondente à fração da intensidade luminosa da mesma, será dado pela Equação (3.6).

Como cada comprimento de onda é absorvido de uma forma distinta pelo material devido a constante de absorção e do coeficiente de extinção que serão apresentadas mais adiante, é necessário saber quantos fótons chegam na superfície alvo por segundo em cada comprimento de onda da luz incidente, como é relatado na Equação. (3.6) e apresentada no trabalho de TIPPLER (1991). A quantidade de fótons presentes é diretamente proporcional a intensidade luminosa, e inversamente proporcional à energia do fóton, como fundamentado pela teoria desenvolvida por EINSTEIN (1905).

A intensidade da luz incidente utilizada neste cálculo como a fração corresponde ao comprimento de onda da luz incidente. Uma vez que a energia de um fóton já foi calculada para cada comprimento de onda pela Equação. (3.3), obtém-se o número de fótons para cada comprimento de onda.

$$Nf = \frac{Fr}{E_{\lambda}.q} \quad (3.6)$$

Onde:

$Nf$  : Número de fótons incidentes

$Fr$  : Fração da intensidade luminosa

$E_{\lambda}$  : Energia do fóton para cada comprimento de onda

$q$  : Carga do elétron

O programa produzido nesse trabalho vai calcular a quantidade de fótons partindo da radiação total e de todos os comprimentos de onda pertinentes à análise, assim para cada comprimento de onda, uma fração da luz incidente será analisada obtendo o total de fótons contribuinte de cada comprimento de onda. A carga do elétron é um valor constante que

vale  $1,602177 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

O algoritmo da Figura 3.4 apresenta a solução computacional para encontrar o resultado do número de fótons que cada comprimento de onda bombardeia o material baseado na fração da luz resultante.

*Algoritmo 3.4*  
*inicio*  
 $q = 1.602177 \times 10^{-19}$ ;  
 para  $i$  de 0 até  $(\lambda_{max} - \lambda_{min})$  passo 1 faça  
 inicio  
 $Nf[i] = (Fr/(E[i].q))$ ;  
 fim\_para;  
 fim\_algoritmo;

Figura 3.4: Algoritmo para a determinação do número de fótons incidentes para cada comprimento de onda

A sétima equação diz respeito ao coeficiente de absorção do material, de acordo com o comprimento de onda da luz incidente, como indicada pela Equação (3.7) e descrita em MESSENGER (2000) e em PANKOVE (1975).

O coeficiente de absorção é diretamente proporcional a constante de extinção que é uma propriedade inerente de cada material e dependente do comprimento da onda incidente, como descrito em HUMMEL (2001).

Na modelagem computacional, os valores para o coeficiente de extinção  $k$  foram obtidos do trabalho de E. F. Schubert (s.d.).

$$\alpha = \frac{4 \cdot \pi \cdot k}{\lambda} \quad (3.7)$$

Onde:

- $\alpha$ : Constante de absorção
- $k$ : Coeficiente de Extinção
- $\lambda$ : Comprimento de onda

O algoritmo da Figura 3.5 mostra a obtenção do valor do coeficiente de absorção ( $k$ ),



pois como mencionado anteriormente, o valor de  $k$  foi baseado no trabalho de E. F. Shubert (s.d.), na qual apenas uma amostragem dos possíveis valores é contemplada. Assim para que se possa cobrir todo o espectro de análise, é necessário se obter os demais valores dos comprimentos de onda correspondente.

Para isso são utilizadas duas matrizes bidimensionais denominadas  $c\_onda\_k$  e  $c\_onda\_k\_calc$ . A primeira armazena os valores correspondentes a amostragem do trabalho de E. F Shubert (s.d.).

A segunda matriz possui os valores calculados pelo algoritmo da Figura 3.5.

A primeira dimensão de ambas as matrizes armazena o comprimento de onda incidente e a segunda dimensão armazena o valor do coeficiente de extinção ( $k$ ) correspondente aquele comprimento de onda.

*Algoritmo 3.5*

*inicio*

*j=0;*

*para num\_p de  $\lambda_{min}$  até  $\lambda_{max}$  passo 1 faça*

*inicio*

*i=0;*

*enquanto (c\_onda\_k [ i,0] <= num\_p) faça*

*inicio*

*I=I+1;*

*fim\_enquanto;*

*L\_XI = c\_onda\_k [ ( i -1), 0 ];*

*L\_XS = c\_onda\_k [ i, 0 ];*

*L\_YI = c\_onda\_k [ ( i -1), 1];*

*L\_YS = c\_onda\_k [ i, 1];*

*Aux\_X = (L\_XI + L\_XS)/2;*

*Aux\_Y = (L\_YI + L\_YS)/2;*

*enquanto ( |Aux\_x - num\_p| >  $1 \times 10^{-14}$  ) faça*

*inicio*

*se (Aux\_X >= num\_p) então*

*inicio*

*L\_XS = Aux\_X;*

*L\_YS = Aux\_Y;*

*fim\_se;*

*se (Aux\_X <= num\_p) então*

*inicio*

*L\_XI = Aux\_X;*

*L\_YI = Aux\_Y;*

*fim\_se;*

*Aux\_X = (L\_XI + L\_XS)/2;*

*Aux\_Y = (L\_YI + L\_YS)/2;*

*fim\_enquanto;*

*c\_onda\_k\_calc [ j, 0] = Aux\_X;*

*c\_onda\_k\_calc [ j, 1] = Aux\_Y;*

*j=j+1;*

*fim\_para;*

*fim\_Algoritmo;*

Figura 3.5: Algoritmo para o cálculo do valor do coeficiente de extinção para todos comprimentos de onda da análise.

Da mesma forma, o algoritmo da Figura 3.6 apresenta a solução computacional para o cálculo da constante de absorção ( $\alpha$ ), uma vez que o valor dessa constante é dependente do valor do coeficiente de extinção.

*Algoritmo 3.6*

*inicio*

*para i de  $\lambda_{min}$  até  $\lambda_{max}$  passo 1 faça*

*inicio*

*Alpha [( i -  $\lambda_{min}$ )] = ((4.  $\Pi$  . c\_onda\_k\_calc [ ( i -  $\lambda_{min}$ ), 1] ) / i);*

*fim\_para;*

*fim\_Algoritmo;*

Figura 3.6: Algoritmo para o Cálculo da constante de absorção  $\alpha$

A oitava equação diz respeito à intensidade da luz após percorrer uma determinada profundidade no material constituinte da célula fotovoltaica. Esse resultado é expresso pela Equação (3.8), como descrito nos trabalhos de PANKOVE (1975) e MESSENGER (2000).

Essa equação permite observar e inferir a quantidade de fótons disponíveis a certa profundidade no material.

Como mencionado no Capítulo II, para que possa ocorrer o efeito fotovoltaico, é necessário se conhecer a quantidade de fótons nessa região, pois a geração de par elétron lacuna deve ocorrer na região da camada de depleção ou próxima dela.

$$IL = IL_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad (3.8)$$

Onde:

$IL$ : Intensidade Luminosa Restante

$IL_0$ : Intensidade Luminosa Incidente

$\alpha$ : Constante de Absorção

$x$ : Distância percorrida pelo material

Assim com o resultado da Equação. (3.8) é possível observar que a luz vai diminuindo sua intensidade exponencialmente à medida que a mesma penetra no material.

A Equação. (3.8) é representada no programa através do algoritmo presente na Figura 3.7.

*Algoritmo 3.7*  
*inicio*  
*para i de  $\lambda_{min}$  até  $\lambda_{max}$  passo 1 faça*  
*inicio*  
 $I_f [ ( i - \lambda_{min} ) ] = I_0 . e ^ { - \alpha [ ( i - \lambda_{min} ) ] . x } ;$   
*fim\_para;*  
*fim\_Algoritmo;*

Figura 3.7: Algoritmo para a determinação da intensidade luminosa para cada comprimento de onda

A Equação (3.9) trata do número de onda associada à onda portadora. Esse número vai determinar a quantidade de ondas para um mesmo comprimento de onda, o que é conhecido como pacote de ondas. Isso é apresentado pela Equação. (3.9) e está presente no trabalho de TIPPLER (1991).

$$k_n = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad (3.9)$$

Onde:

$k_n$  : Número de onda

$\lambda$  : Comprimento de onda

O algoritmo da Figura 3.8 mostra a implementação dessa equação.

*Algoritmo 3.8*  
*inicio*  
*para i de  $\lambda_{min}$  até  $\lambda_{max}$  passo 1 faça*  
*inicio*  
 $Num\_onda\_K [ ( i - \lambda_{min} ) ] = ( ( 2 \cdot \Pi ) / i ) ;$   
*fim\_para;*  
*fim\_algoritmo;*

Figura 3.8: Algoritmo para o cálculo do valor do número de onda

O momento do fóton incidente é determinado de acordo com a Equação. (3.10) como está descrito em TIPPLER (1991).

Uma vez calculado o número de onda, é possível determinar o momento do fóton. Essa

é uma informação importante, pois como mencionado no capítulo II, existem dois tipos de semicondutores. Os que possuem *Gap* direto e indireto. Os semicondutores com *Gap* indireto necessitam da mudança do momento do elétron para que possa ocorrer o efeito fotovoltaico.

A interação com o fóton somente não implica na mudança do momento do elétron, sendo necessário à interação com um fônon.

$$P_m = \left( \frac{h}{2.\pi} \right) . k_n \quad (3.10)$$

Onde:

$P_m$  : Momento do fóton incidente

$h$  : Constante de Planck

$k_n$  : Número de onda associado ao fóton incidente

O algoritmo presente na Figura 3.9 mostra como é obtido o valor do momento dos fótons incidentes.

*Algoritmo 3.9*

*inicio*

$h=4.135669 \times 10^{-15};$

*para i de  $\lambda_{min}$  até  $\lambda_{max}$  passo 1 faça*

*inicio*

$Momento [ ( i - \lambda_{min} ) ] = ( ( h / 2 . \Pi ) . Num\_onda\_K [ ( i - \lambda_{min} ) ] );$

*fim\_para;*

*fim\_Algoritmo;*

Figura 3.9: Algoritmo para a determinação do momento do fóton para cada comprimento de onda

Na Equação.3.11 e definida a energia do elétron para cada nível de energia quântica, baseada nos números quânticos  $n_x$ ,  $n_y$  e  $n_z$  como descrito em PANKOVE (1975). Esses níveis de energia determinam estados energéticos que podem ou não estar ocupados por elétrons.

As camadas eletrônicas indicadas pelos números quânticos principais só podem assumir valores positivos não nulos até um máximo de sete, pois são sete camadas eletrônicas como indicado por PAULI (1900-1958).

$$E = \frac{\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 \pi^2}{2m} \cdot (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) \quad (3.11)$$

Onde:

$E$ : Energia quantizada do correspondente nível

$h$ : Constante de Planck

$m$ : Massa do elétron

$n_\alpha$ : Número quântico

onde  $\alpha = x, y$  ou  $z$ .

O algoritmo da Figura 3.10 apresenta a implementação da fórmula expressa na Equação (3.11) de forma a se encontrar a energia de um determinado nível.

*Algoritmo 3.10*

*início*

$h=4.135669 \times 10^{-15};$

$m=9.109390 \times 10^{-31};$

*para i de 1 até 7 passo 1 faça*

*início*

*para j de 1 até 7 passo 1 faça*

*início*

*para k de 1 até 7 passo 1 faça*

*início*

$E=(((h/2 \cdot \Pi)^2 \cdot \Pi^2)/(2 \cdot m)) \cdot (i^2 + j^2 + k^2));$

*fim\_para;*

*fim\_para;*

*fim\_para;*

*fim\_Algoritmo;*

Figura 3.10: Algoritmo para a determinação da energia para cada nível quântico

A Equação (3.12) calcula a distância percorrida pelos portadores minoritários tipo N e a Equação (3.13) calcula a distância percorrida pelos portadores minoritários tipo P como mencionado no trabalho de PANKOVE (1975).

Essa distância é de fundamental importância para a modelagem computacional, pois se um fóton atingir um átomo, provocando a geração de um par elétron-lacuna, sendo no semiconductor tipo N ou tipo P, vai gerar um portador majoritário elétron no semiconductor e

um portador minoritário lacuna no semiconductor tipo N. Já no semiconductor tipo P o portador majoritário será a lacuna e o minoritário será o elétron. Assim se o portador minoritário no semiconductor tipo P conseguir percorrer a distância  $L$  sem sofrer recombinação e chegar na camada de depleção, este será lançado para o semiconductor tipo N, assim aumentando a concentração de elétrons no semiconductor tipo N e de lacunas no semiconductor tipo P, favorecendo a fotocorrente.

Da mesma forma se o portador minoritário no semiconductor tipo N conseguir percorrer a distância  $L$  sem sofrer recombinação e chegar na camada de depleção, este será lançado para o semiconductor tipo P, assim aumentando a concentração de lacunas no semiconductor tipo P e de elétrons no semiconductor tipo N, favorecendo a fotocorrente.

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} \quad (3.12)$$

Onde:

$L_n$  : Comprimento percorrido pelo portador elétron no semiconductor tipo P

$D_n$  : Constante de Difusão

$\tau_n$  : Tempo de vida dos portadores minoritários

Tanto a constante de difusão dos portadores minoritários quanto o tempo de vida dos mesmos é dependente do material.

Assim como a Equação (3.12), a Equação (3.13) demonstra a distância percorrida pelos portadores minoritários tipo N também presente no trabalho de PANKOVE (1975)

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} \quad (3.13)$$

Onde:

$L_p$  : Distância percorrida pelo portador lacuna no semiconductor tipo N

$D_p$  : Constante de difusão

$\tau_p$  : Tempo de vida dos portadores minoritários

A Equação (3.14) Diz respeito à concentração de portadores no semiconductor tipo N, que segundo SWART (s.d.) é utilizada para determinar a concentração de portadores majoritários e minoritários no semiconductor, como mencionado no Capítulo III, a concentração intrínseca do semiconductor é dependente do material constituinte do mesmo.

$$n \approx N_d \quad \text{E} \quad p \approx \frac{n_i^2}{N_d} \quad (3.14)$$

Onde:

$n$ : Concentração de portadores majoritários elétrons no semiconductor tipo N

$N_d$ : Concentração de impurezas doadoras adicionadas no semiconductor

$p$ : Concentração de portadores minoritários lacunas no semiconductor tipo N

$n_i$ : Concentração intrínseca do semiconductor

De forma análoga, a Equação (3.15) diz respeito à concentração de portadores no semiconductor tipo P, que segundo SWART (s.d.) é utilizada para determinar a concentração de portadores majoritários e minoritários no semiconductor, como mencionado no capítulo III, a concentração intrínseca do semiconductor é dependente do material constituinte do mesmo.

$$p \approx N_a \quad \text{E} \quad n \approx \frac{n_i^2}{N_a} \quad (3.15)$$

Onde:

$p$ : Concentração de portadores majoritários lacunas no semiconductor tipo P

$N_a$ : Concentração de impurezas aceitadoras adicionadas no semiconductor

$n$ : Concentração de portadores minoritários elétrons no semiconductor tipo N

$n_i$ : Concentração intrínseca do semiconductor

A Equação (3.16) apresenta o valor da barreira potencial ou potencial interno da junção  $pn$  como descrito em MARTINO (2003). Esse é o valor formado na junção  $pn$  e se contrapõe a transferência de elétrons e lacunas de um semiconductor para outro.

$$V_{bi} = \left( \frac{k.T}{q} \right) \cdot \ln \left( \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2} \right) \quad (3.16)$$

onde:

$V_{bi}$ : Barreira potencial da junção  $pn$

$k$ : Constante de Boltzmann

$T$ : Temperatura em Kelvin



- $q$ : Carga do elétron  
 $N_a$ : Concentração de impurezas aceitadoras no material tipo P  
 $N_d$ : Concentração de impurezas doadoras no material tipo N  
 $n_i$ : Concentração intrínseca do material semiconductor

A Equação (3.17) informa o comprimento da camada de depleção no material tipo N baseado na concentração de impurezas e do potencial interno como descrito em MESSENGER (2000). Quanto maior essa camada, maior é a probabilidade de uma lacuna gerada pela formação de um par elétron-lacuna a partir da colisão de um átomo com um fóton, chegar a camada de depleção e ser lançada para o semiconductor tipo P.

$$W_n = \left[ \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot N_a}{q \cdot N_a \cdot (N_a + N_d)} \right]^{1/2} \cdot (v_{bi} - v)^{1/2} \quad (3.17)$$

Onde:

- $W_n$ : Comprimento da camada de depleção sobre o semiconductor tipo N  
 $\varepsilon$ : Permissividade do material  
 $q$ : Carga do elétron  
 $N_a$ : Concentração de impurezas aceitadoras  
 $N_d$ : Concentração de impurezas doadoras  
 $v_{bi}$ : Barreira potencial  
 $v$ : Tensão da carga aplicada

Assim como a Equação (3.17), a Equação (3.18) informa o comprimento da camada de depleção no material tipo P baseado na concentração de impurezas e do potencial interno como descrito em MESSENGER (2000). Quanto maior essa camada, maior é a probabilidade de um elétron gerado pela formação de um par elétron-lacuna a partir da colisão de um átomo com um fóton, chegar a camada de depleção e ser lançada para o semiconductor tipo N.

$$W_p = \left[ \frac{2 \cdot \epsilon \cdot N_d}{q \cdot N_a \cdot (N_a + N_d)} \right]^{1/2} \cdot (v_{bi} - v)^{1/2} \quad (3.18)$$

Onde:

$W_p$  : Comprimento da camada de depleção sobre o semiconductor tipo P

$\epsilon$  : Permissividade

$q$  : Carga do elétron

$N_a$  : Concentração de impurezas aceitadoras

$N_d$  : Concentração de impurezas doadoras

$v_{bi}$  : Barreira Potencial

$v$  : Tensão da carga aplicada

A Equação (3.19) fornece o valor da corrente intrínseca  $I_0$  segundo está descrito em MESSENGER (2000).

O valor da corrente intrínseca ou corrente reversa de saturação deve ser o menor possível, pois ela se opõe a fotocorrente, diminuindo a eficiência da célula.

Ela depende de diversos fatores como a concentração intrínseca do semiconductor, área da seção transversal da célula, tipo de material, tempo de vida dos portadores minoritários e comprimento da camada de depleção tanto para semiconductor tipo N como para o tipo P.

$$I_0 = q \cdot A \cdot n_i^2 \cdot \left( \frac{1}{N_a} \cdot \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \cdot \coth\left(\frac{W_p}{L_n}\right) + \frac{1}{N_d} \cdot \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \cdot \coth\left(\frac{W_n}{L_p}\right) \right) \quad (3.19)$$

Onde:

$I_0$  : Corrente reversa de Saturação

$q$  : Carga do elétron

$A$  : Área da célula Fotovoltaica

$n_i$  : Concentração intrínseca do material

$N_a$  : Concentração das impurezas aceitadoras

$N_d$  : Concentração das impurezas doadoras

$D_n$  : Coeficiente de difusão dos elétrons

$D_p$  : Coeficiente de difusão das lacunas

$L_n$  : Distância percorrida pelo elétron antes da recombinação no semiconductor tipo P

$L_p$  : Distância percorrida pela lacuna antes da recombinação no semiconductor tipo N

$\tau_n$  : Tempo de vida dos elétrons no semiconductor tipo P

$\tau_p$  : Tempo de vida das lacunas no semiconductor tipo N

$W_n$  : Comprimento da camada de depleção dentro do semiconductor tipo N

$W_p$  : Comprimento da camada de depleção do semiconductor tipo P

A Equação (3.20) determina o valor da energia cinética média dos elétrons que será utilizado em no cálculo da velocidade térmica, como apresentado no trabalho de SWART (s.d).

$$E_c = \left(\frac{3}{2}\right).k.T \quad (3.20)$$

Onde:

$E_c$  : Energia cinética média dos elétrons

$k$  : Constante de Boltzmann

$T$  : Temperatura em Kelvin

A Equação (3.21) calcula o valor da velocidade Térmica no semiconductor tipo N. Essa é a velocidade de geração do par elétron-lacuna devido ao fator agitação térmica. Num semiconductor em equilíbrio térmico, a velocidade de geração do par elétron-lacuna é igual à velocidade de recombinação dos mesmos, assim existe um equilíbrio constante na concentração dos portadores.

$$V_m = \sqrt{\left(\frac{2.E_c}{m_{ee}}\right)} \quad (3.21)$$

Onde:

$V_m$  : Velocidade térmica no semiconductor tipo N

$E_c$  : Energia cinética média dos elétrons

$m_{ee}$  : Massa efetiva do elétron

Assim como na Equação 3.21, a Equação 3.22 calcula o valor da velocidade Térmica no semicondutor tipo P.

$$V_{tp} = \sqrt{\left(\frac{2.E_c}{m_{el}}\right)} \quad (3.22)$$

Onde:

$V_{tp}$  : Velocidade térmica no semicondutor tipo P

$E_c$  : Energia cinética média dos elétrons

$m_{el}$  : Massa efetiva da lacuna

As Equações (3.23) e (3.24) descrevem respectivamente a área em que pode ocorrer a captura de uma lacuna por uma armadilha no semicondutor tipo N e da captura de um elétron por uma armadilha no semicondutor tipo P, ou seja, o par elétron-lacuna é criado pela agitação térmica e devido a colisões entre átomos e fótons. Assim um portador minoritário no semicondutor tipo N pode ser atraído por um elétron formado em outro par elétron-lacuna, assim como um portador minoritário no semicondutor tipo P pode ser atraído por uma lacuna formado em outro par elétron-lacuna ou que esteja em excesso no material. Isso geralmente acontece após o portador minoritário ter percorrido uma distância superior a  $L_n$  no semicondutor tipo N e após de transcorrido um tempo  $\tau_n$ . Já no semicondutor tipo P a distância é dada por  $L_p$  e o tempo por  $\tau_p$ .

$$a_{cn} = A - (\pi.L_n) \quad (3.23)$$

Onde:

$a_{cn}$  : Área de captura no semicondutor tipo N

$A$  : Área da célula fotovoltaica

$L_n$  : Comprimento percorrido pela lacuna antes da recombinação

$$a_{cp} = A - (\pi.L_p) \quad (3.24)$$

Onde:

$a_{cp}$  : Área de captura no semicondutor tipo P

$A$  : Área da célula fotovoltaica

$L_p$  : Comprimento percorrido pelo elétron antes da recombinação

No semiconductor tipo N, a recombinação dos portadores minoritários se dá de forma diferenciada na superfície do mesmo. A velocidade em que isso ocorre é denominada velocidade de recombinação superficial expressa pela Equação (3.25).

O resultado dessa equação será utilizado na componente da fotocorrente.

$$S_n = a_{cn} \cdot V_m \cdot DEE_{cc} \quad (3.25)$$

Onde:

$S_n$  : Velocidade de Recombinação Superficial no semiconductor tipo N

$a_{cn}$  : Área de captura no semiconductor tipo N

$V_m$  : Velocidade térmica no semiconductor tipo N

$DEE_{cc}$  : Densidade efetiva de estados na camada de condução

Da mesma forma no semiconductor tipo P, a recombinação dos portadores minoritários se dá de forma diferenciada na superfície do mesmo. A velocidade em que isso ocorre é denominada velocidade de recombinação superficial expressa pela Equação (3.26).

O resultado dessa equação será utilizado na componente da fotocorrente.

$$S_p = a_{cp} \cdot V_{tp} \cdot DEE_{cv} \quad (3.26)$$

Onde:

$S_p$  : Velocidade de recombinação superficial no semiconductor tipo P

$a_{cp}$  : Área de captura no semiconductor tipo P

$V_{tp}$  : Velocidade térmica no semiconductor tipo P

$DEE_{cv}$  : Densidade efetiva de estados na camada de valência

Finalmente a Equação. (3.27) traz a expressão para a fotocorrente que ocorre no semiconductor tipo N de acordo com o que está descrito em MESSENGER (2000).

Essa expressão informa a corrente elétrica gerada pela exposição do material ao sol no semiconductor tipo N, e depende da quantidade de fótons na região da camada de depleção e do espectro da luz incidente. Materiais diferentes possuem um melhor aproveitamento em

diferentes faixas do espectro solar.

A fotocorrente no material tipo N também depende da velocidade de recombinação superficial, assim como também do comprimento da camada de depleção no semiconductor tipo P e da distância que o portador minoritário pode percorrer no semiconductor tipo N sem antes sofrer uma recombinação.

$$I_{t_n} = \frac{q \cdot A \cdot F_{ph} \cdot \alpha \cdot L_n}{\alpha^2 \cdot L_n^2 - 1} \cdot \left[ \frac{S_n \cdot \cosh\left(\frac{W_p}{L_n}\right) + \frac{D_n}{L_n} \cdot \sinh\left(\frac{W_p}{L_n}\right) + (\alpha \cdot D_n - S_n) \cdot e^{-\alpha \cdot W_p}}{S_n \cdot \sinh\left(\frac{W_p}{L_n}\right) + \frac{D_n}{L_n} \cdot \cosh\left(\frac{W_p}{L_n}\right)} \right] - \alpha \cdot L_n \quad (3.27)$$

Onde:

$I_{t_n}$  : Fotocorrente gerada no semiconductor tipo N

$q$  : Carga do elétron

$A$  : Área da célula fotovoltaica

$F_{ph}$  : Número de fótons incidentes próximos da camada de depleção para cada

comprimento de onda

$\alpha$  : Constante de absorção

$L_n$  : Comprimento de difusão dos elétrons

$S_n$  : Velocidade de recombinação superficial no semiconductor tipo N

$W_p$  : Comprimento da camada de depleção no semiconductor tipo P

$D_n$  : Coeficiente de difusão do elétron

Para poder implementar a expressão da Equação (3.27), é necessário quebrá-la em partes de forma a facilitar a implementação da mesma.

Assim os algoritmos apresentados a seguir serão utilizados para solucionar os seguintes trechos da Equação (3.27) representados pela Equação (3.27-a), Equação (3.27-b), Equação (3.27-c) e Equação (3.27-d) onde:

$$I_{t_n} = \frac{A_n}{B_n} \cdot \Gamma_n \quad (3.27-a)$$

onde:

$$A_n = q \cdot A \cdot F_{ph} \cdot L_n \quad (3.27-b)$$

$$B_n = \alpha^2 \cdot L_n^2 - 1 \quad (3.27-c)$$

$$\Gamma_n = \left[ \frac{S_n \cdot \cosh\left(\frac{W_p}{L_n}\right) + \frac{D_n}{L_n} \cdot \sinh\left(\frac{W_p}{L_n}\right) + (\alpha \cdot L_n - S_n) \cdot e^{-\alpha \cdot W_p}}{S_n \cdot \sinh\left(\frac{W_p}{L_n}\right) + \frac{D_n}{L_n} \cdot \cosh\left(\frac{W_p}{L_n}\right)} \right] - \alpha \cdot L_n \quad (3.27-d)$$

O algoritmo da Figura 3.11 representa a solução da Equação (3.27-b).

*Algoritmo 3.11*

*início*

$q = 1.602177 \times 10^{-19};$

*para i de  $\lambda_{\min}$  até  $\lambda_{\max}$  passo 1 faça*

*início*

$Beta\_n[i] = q \cdot A \cdot Num\_fotons[i] \cdot Alpha[i] \cdot L_n;$

*fim\_para;*

*fim\_Algoritmo;*

Figura 3.11: Algoritmo para a determinação do vetor Beta\_n para a Resolução da fotocorrente

O algoritmo da Figura 3.12 representa a solução da Equação (3.27-c).

*Algoritmo 3.12*

*início*

*para i de  $\lambda_{\min}$  até  $\lambda_{\max}$  passo 1 faça*

*início*

$Gama\_n[i] = (alpha[i])^2 \cdot L_n^2 - 1;$

*fim\_para;*

*fim\_Algoritmo;*

Figura 3.12: Algoritmo para a determinação do vetor Gama\_n para a Resolução da fotocorrente

O algoritmo da Figura 3.13 representa a solução da Equação (3.27-d)

*Algoritmo 3.13**início*

$$P1 = S_n \cdot (\cosh(W_p / (L_n)));$$

$$P2 = (D_n / (L_n)) \cdot (\sinh(W_p / (L_n)));$$

$$P4 = S_n \cdot (\sinh(W_p / (L_n)));$$

$$P5 = (D_n / (L_n)) \cdot (\cosh(W_p / (L_n)));$$

para  $i$  de  $\lambda_{\min}$  até  $\lambda_{\max}$  passo 1 faça

*início*

$$P3 = (D_n \cdot \alpha [i] - S_n) \cdot e^{(-\alpha [i] \cdot W_p)};$$

$$\text{Lambda\_n}[i] = (((P1 + P2 + P3) / (P4 + P5)) - (\alpha [i] \cdot L_n));$$

*fim\_para;**fim\_Algoritmo;*

Figura 3.13: Algoritmo para a determinação do Vetor Lambda\_n para a solução da fotocorrente

O algoritmo da Figura 3.14 representa a solução da Equação (3.27-a)

*Algoritmo 3.14**início*

$$Ftn1 = 0;$$

$$Ftn2 = 0;$$

$$Ftn3 = 0;$$

para  $i$  de  $\lambda_{\min}$  até  $\lambda_{\max}$  passo 1 faça

*início*

$$Ftn1 = Ftn1 + \text{Beta\_n}[i];$$

$$Ftn2 = Ftn2 + \text{Gama\_n}[i];$$

$$Ftn3 = Ftn3 + \text{Lambda\_n}[i];$$

*fim\_para;*

$$\text{fotocorrente\_n} = ((Ftn1 / Ftn2) \cdot Ftn3);$$

*fim\_Algoritmo;*

Figura 3.14: Algoritmo que demonstra o resultado final da fotocorrente no semiconductor tipo N

Da mesma forma a Equação. (3.28) traz a expressão para a fotocorrente que ocorre no semiconductor tipo P que foi deduzida da Equação (3.27).

Assim como ocorreu no semiconductor tipo N, a fotocorrente no material tipo P também depende da velocidade de recombinação superficial, assim como também do comprimento da camada de depleção no semiconductor tipo N e da distância que o portador



minoritário pode percorrer no semicondutor tipo P sem antes sofrer uma recombinação, como descrito no trabalho de MESSENGER (2000).

$$I_{t_p} = \frac{q.A.F_{ph}.\alpha.L_p}{\alpha^2.L_p^2 - 1} \cdot \left[ \frac{S_p \cdot \cosh\left(\frac{W_n}{L_p}\right) + \frac{D_p}{L_p} \cdot \sinh\left(\frac{W_n}{L_p}\right) + (\alpha.L_p - S_p) \cdot e^{-\alpha.W_n}}{S_p \cdot \sinh\left(\frac{W_n}{L_p}\right) + \frac{D_p}{L_p} \cdot \cosh\left(\frac{W_n}{L_p}\right)} \right] - \alpha.L_p \quad (3.28)$$

Onde:

$I_{t_p}$  : Fotocorrente gerada no semicondutor tipo P

$q$  : Carga do elétron

$A$  : Área da célula Fotovoltaica

$F_{ph}$  : Número de fótons próximo da camada de depleção no semicondutor tipo P para

cada comprimento de onda

$\alpha$  : Constante de absorção

$L_p$  : Comprimento de difusão da lacuna

$S_p$  : Velocidade de Recombinação Superficial no semicondutor tipo P

$W_n$  : Comprimento da camada de depleção no semicondutor tipo N

$D_p$  : Coeficiente de difusão da lacuna

Para poder implementar a expressão da Equação. (3.28), é necessário dividi-la em partes de forma a facilitar a implementação da mesma.

Assim os algoritmos apresentados a seguir serão utilizados para solucionar os seguintes trechos da Equação. (3.28) representados pela Equação (3.28-a), Equação (3.28-b), Equação (3.28-c) e Equação (3.28-d) onde:

$$I_{t_p} = \frac{A_p}{B_p} \cdot \Gamma_p \quad (3.28-a)$$

onde:

$$A_p = q.A.F_{ph}.\alpha.L_p \quad (3.28-b)$$

$$B_p = \alpha^2.L_p^2 - 1 \quad (3.28-c)$$

$$\Gamma_p = \left[ \frac{S_p \cdot \cosh\left(\frac{W_n}{L_p}\right) + \frac{D_p}{L_p} \cdot \sinh\left(\frac{W_n}{L_p}\right) + (\alpha \cdot L_p - S_p) e^{-\alpha \cdot W_p}}{S_p \cdot \sinh\left(\frac{W_n}{L_p}\right) + \frac{D_p}{L_p} \cdot \cosh\left(\frac{W_n}{L_p}\right)} \right] - \alpha \cdot L_p \quad (3.28-d)$$

O algoritmo da Figura 3.15 representa a solução da Equação. (3.28-b).

*Algoritmo 3.15*

*início*

$q = 1.602177 \times 10^{-19};$

*para i de  $\lambda_{\min}$  até  $\lambda_{\max}$  passo 1 faça*

*início*

$Beta\_p[i] = q \cdot A \cdot Num\_fotons[i] \cdot Alpha[i] \cdot L_p;$

*fim\_para;*

*fim\_Algoritmo;*

Figura 3.15: Algoritmo para a determinação do vetor Beta\_p para a Resolução da fotocorrente

O algoritmo da Figura 3.16 representa a solução da Equação. (3.28-c).

*Algoritmo 3.16*

*início*

*para i de  $\lambda_{\min}$  até  $\lambda_{\max}$  passo 1 faça*

*início*

$Gama\_p[i] = (alpha[i])^2 \cdot L_p^2 - 1;$

*fim\_para;*

*fim\_Algoritmo;*

Figura 3.16: Algoritmo para a determinação do vetor Gama\_p para a Resolução da fotocorrente

O algoritmo da Figura 3.17 representa a solução da Equação. (3.28-d)

*Algoritmo 3.17**início* $P1 = Sp \cdot (\cosh(Wn/(Lp)));$  $P2 = (Dp/(Lp)) \cdot (\sinh(Wn/(Lp)));$  $P4 = Sp \cdot (\sinh(Wn/(Lp)));$  $P5 = (Dp/(Lp)) \cdot (\cosh(Wn/(Lp)));$ *para i de  $\lambda_{\min}$  até  $\lambda_{\max}$  passo 1 faça**início* $P3 = (Dp \cdot \alpha[i] - Sp) \cdot e^{(-\alpha[i] \cdot Wn)};$  $Lambda\_p[i] = (((P1 + P2 + P3)/(P4 + P5)) - (\alpha[i] \cdot Lp));$ *fim\_para;**fim\_Algoritmo;*

Figura 3.17: Algoritmo para a determinação do Vetor Lambda\_p para a solução da fotocorrente

O algoritmo da Figura 3.18 representa a solução da Equação. (3.28-a)

*Algoritmo 3.18**início* $Ftp1 = 0;$  $Ftp2 = 0;$  $Ftp3 = 0;$ *para i de  $\lambda_{\min}$  até  $\lambda_{\max}$  passo 1 faça**início* $Ftp1 = Ftp1 + Beta\_p[i];$  $Ftp2 = Ftp2 + Gama\_p[i];$  $Ftp3 = Ftp3 + Lambda\_p[i];$ *fim\_para;* $fotocorrente\_n = ((Ftm1/Ftm2) \cdot Ftm3);$ *fim\_Algoritmo;*

Figura 3.18: Algoritmo que representa o Resultado final da fotocorrente no semiconductor tipo P

Uma vez determinado a fotocorrente nos semicondutores tipo N e P, é possível encontrar a fotocorrente total da célula solar pela soma das duas fotocorrentes, como descrito na Equação (3.29)

$$I_t = I_{n} + I_{p} \quad (3.29)$$

Onde:

$I_t$ : Fotocorrente total

$I_n$ : Fotocorrente no semiconductor tipo N

$I_p$ : Fotocorrente no semiconductor tipo P

Com a fotocorrente determinada, é possível encontrar a tensão em circuito aberto da célula solar, que é um dos principais parâmetros para determinação de suas características físicas e comportamentais.

Esse valor é dado na expressão da Equação (3.30) como descrito no trabalho de MESSENGER (2000).

$$V_{oc} = \left( \frac{k.T}{q} \right) \cdot \ln \left( \frac{I_t}{I_0} \right) \quad (3.30)$$

onde :

$V_{oc}$ : Tensão em circuito aberto

$k$ : Constante de Boltzmann

$T$ : Temperatura em Kelvin

$q$ : Carga do elétron

$I_t$ : Fotocorrente Total

$I_0$ : Corrente reversa de saturação

Com o valor de  $V_{oc}$  determinado, é possível encontrar a corrente de curto circuito da célula solar, que é dependente tanto da fotocorrente como da corrente reversa de saturação e da tensão aplicada.

Isso pode ser observado na Equação (3.31), como descrito no trabalho de MESSENGER (2000).

$$I_{sc} = I_t - I_0 \cdot \left( e^{\frac{q.V_{oc}}{k.T}} - 1 \right) \quad (3.31)$$

Onde:

$I_{sc}$ : Corrente de curto-circuito

- $I_l$ : Fotocorrente total gerada  
 $I_0$ : Corrente reversa de saturação  
 $q$ : Carga do elétron  
 $V_{oc}$ : Tensão em circuito aberto  
 $k$ : Constante de Boltzmann  
 $T$ : Temperatura em Kelvin

Para se determinar a curva característica da célula solar através das grandezas tensão e corrente é utilizado o algoritmo presente na Figura 3.19, onde se faz a tensão variar de zero a  $V_{oc}$  (Tensão em circuito aberto) onde é determinado o gráfico da Figura 3.20.

*Algoritmo 3.19*

*início*

$k=0$ ;

para  $v$  de 0 até  $V_{oc}$  passo  $1 \times 10^{-5}$  faça

*início*

$I[k] = (I_l - I_0 \cdot (e^{(-q \cdot v)/(K \cdot T)} - 1))$ ;

Gráfico( $v, I[k]$ );

$k=k+1$ ;

*fim\_para*;

*fim\_Algoritmo*;

Figura 3.19: Algoritmo do gráfico da característica tensão versus corrente da célula fotovoltaica

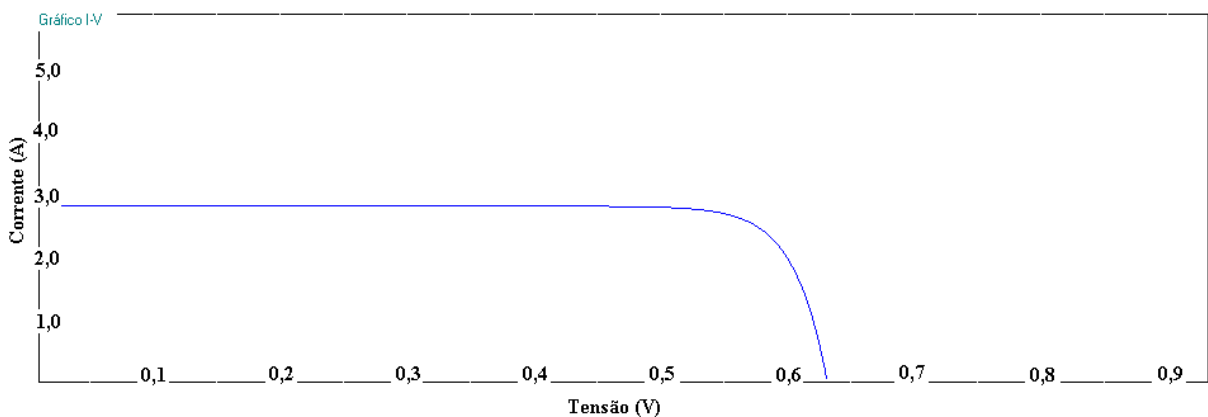


Figura 3.20: Gráfico característico da tensão pela corrente de uma célula fotovoltaica

Da mesma forma para se encontrar o ponto de máxima potência e desenhar o gráfico da potência em função da tensão é utilizado o Algoritmo presente na Figura 3.21. Assim das coordenadas que indicam o ponto de máxima potência são encontrados.

O gráfico da Tensão pela potência é mostrado no gráfico da Figura 3.22

*Algoritmo 3.21*

*início*

*k=0;*

*Max=0;*

*para v de 0 até Voc passo  $1 \times 10^{-5}$  faça*

*início*

*P= I [k].v;*

*se (P > Max) então*

*início*

*Max= P;*

*fim\_se;*

*Gráfico (P,v);*

*fim\_para;*

*fim\_Algoritmo;*

Figura 3.21: Algoritmo para a determinação do ponto de máxima potência e desenho do gráfico potência versus tensão

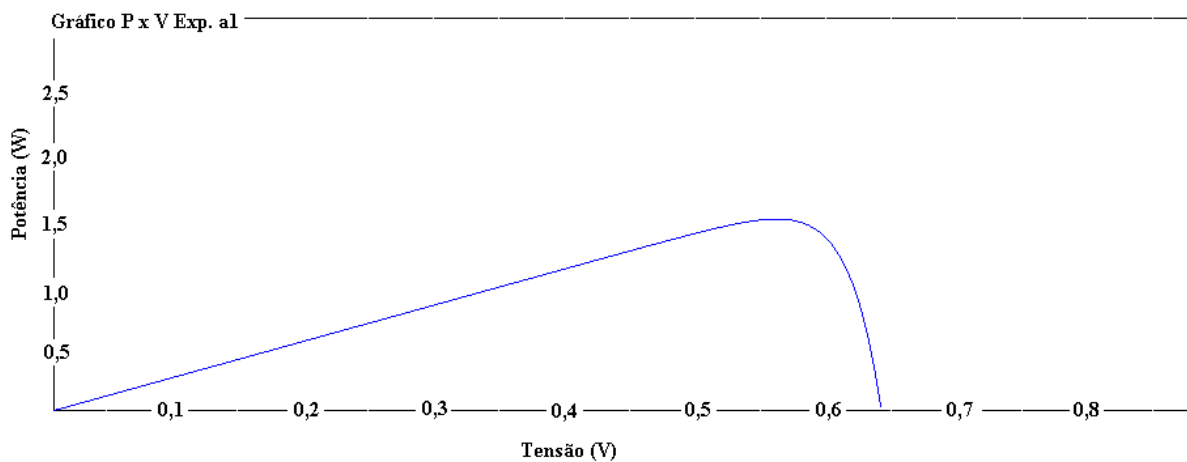


Figura 3.22: Gráfico característico da potência pela tensão de uma célula fotovoltaica

A Equação (3.32) é utilizada para determinar o *Fill Factor* (fator de forma) da célula solar. Esta é uma relação entre a potência máxima gerada pela célula e a potência que seria obtida caso fosse possível utilizar a tensão em circuito aberto e a corrente em curto-circuito.

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (3.32)$$

Onde:

$FF$  : Fator de forma

$P_{\max}$  : Potência máxima

$I_{sc}$  : Corrente de curto-circuito

$V_{oc}$  : Tensão em circuito aberto

Quanto maior o *Fill Factor* da célula, maior é seu rendimento.

A Equação (3.33) apresenta o cálculo referente à resistência interna da célula fotovoltaica, baseado na tensão e na corrente produzida pela mesma.

$$R_i = \frac{V_m}{I_m} \quad (3.33)$$

Onde:

$R_i$  : Resistência interna da célula fotovoltaica

$V_m$  : Tensão no ponto de potência máxima

$I_m$  : Corrente no ponto de potência máxima

A Equação (3.34) já se refere à resistência imposta pelos contatos do painel, que influenciam diretamente no comportamento do mesmo.

Para tanto, é necessário se conhecer algumas das características dos elementos utilizados para conectar as células fotovoltaicas, como a resistência e a resistividade, além da forma de montagem do painel solar, assim como também dos materiais utilizados para a sua construção das células e sua configuração de ligação.

Os materiais mais comuns utilizados são: Alumínio (Al), Bronze, Cobre (Cu), Ouro (Au), Platina (Pt) e Prata (Ag), pois por possuírem baixa resistividade, podem ser utilizados

para diferentes tipos de aplicação. A resistividade do material utilizado para interconectar as células é mostrada na Tabela 3.1

$$R_c = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (3.34)$$

Onde:

$R_c$  : Resistência do Contato

$\rho$  : Resistividade

$l$  : Comprimento do contato

$A$  : Área da seção transversal do condutor

*Tabela 3.1: Resistividade dos materiais de conexão das células*

<b>Elemento</b>	<b>Resistividade</b>
Alumínio (Al)	0,028 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
Bronze	0,0246 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
Cobre (Cu)	0,017 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
Ouro (Au)	0,023 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
Platina (Pt)	0,106 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
Prata (Ag)	0,016 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$

A Resistência das células fotovoltaicas ligas em série é dada pela soma da resistência de contato com as resistências internas indicada pela Equação (3.35).

$$R_s = (N_{cont} \cdot R_c) + (NC_{serie} \cdot R_i) \quad (3.35)$$

Onde:

$R$  : Resistência em série

$N_{cont}$  : Número de contatos entre as células

$R_c$  : Resistência do contato

$NC_{serie}$  : Número de células ligadas em série

$R_i$  : Resistência interna da célula fotovoltaica

As células solares ligadas em série permitem o controle da tensão desejada para o painel, alterando-se o número de células ligadas em série, a corrente, porém permanece



constante. Para que se possa variar a corrente, é necessário se determinar uma associação série paralela adequada, pois as células ligadas em paralelo possuem a tensão constante enquanto a corrente pode ser controlada.

Assim a Equação (3.36) é utilizada para mostrar essa associação de células em série e paralelo obtendo a resistência em paralelo.

$$R_p = \frac{R_s}{N_{pal}} \quad (3.36)$$

Onde:

$R_p$  : Resistência em Paralelo

$R_s$  : Resistência em série

$N_{pal}$  : Número de ligações em paralelo

A Equação (3.37) mostra como é obtida a tensão do módulo a partir da associação em série-paralela das células fotovoltaicas que o constituem.

$$V_m = NC_{série} \cdot F_{em} - ((N_{cont} \cdot R_c + NC_{série} \cdot R_i) \cdot I) \quad (3.37)$$

Onde:

$V_m$  : Tensão do módulo

$NC_{série}$  : Número de células ligadas em série

$F_{em}$  : Força eletromotriz

$N_{cont}$  : Número de contatos entre as células fotovoltaicas

$R_c$  : Resistência dos contatos

$R_i$  : Resistência Interna

$I_{cel}$  : Corrente da célula fotovoltaica

Na Equação (3.38) é mostrada como é obtida a corrente do módulo fotovoltaico.

$$I_{mod} = \frac{((NC_{série} \cdot F_{em} - V_{mod}) \cdot N_{paralelo})}{(NC_{série} \cdot R_i + N_{cont} \cdot R_c)} \quad (3.38)$$

Onde:

- $I_{\text{mod}}$  : Corrente do módulo fotovoltaico
- $NC_{\text{série}}$  : Número de células em série
- $F_{em}$  : Força eletromotriz da célula fotovoltaica
- $V_{\text{mod}}$  : Tensão no módulo fotovoltaico
- $N_{\text{paralelo}}$  : Número de associações em paralelo
- $R_i$  : Resistência interna da célula fotovoltaica
- $N_{\text{cont}}$  : Número de contatos das células fotovoltaicas
- $R_c$  : Resistência dos contatos da célula fotovoltaica

Baseado na Equação (3.38), é obtida a carga diária que o módulo pode produzir trabalhando em potência máxima de acordo com o número de horas de insolação da região na qual se encontra o painel solar. Essa relação é apresentada na Equação (3.39).

$$I_{\text{dia}} = I_{\text{mod}} \cdot H_{\text{solar}} \quad (3.39)$$

Onde:

- $I_{\text{dia}}$  : Corrente máxima fornecida por dia
- $I_{\text{mod}}$  : Corrente do módulo fotovoltaico
- $H_{\text{solar}}$  : Horas de insolação diária

Assim neste capítulo foram apresentadas as equações que norteiam o desenvolvimento do projeto e são a base para a implementação do programa que modela computacionalmente o comportamento das células solares a partir de suas características físicas e baseada também nos mais diferentes cenários de atuação.

No próximo capítulo será apresentada a metodologia utilizada para a confecção do programa, assim como também uma breve descrição do mesmo.

## CAPÍTULO IV

### O Programa de Modelagem Computacional de Células Fotovoltaicas

#### 4.1 A linguagem de programação utilizada.

Para a elaboração e implementação de um software complexo, como é caso do software produzido por esse trabalho, diversas escolhas devem ser cuidadosamente observadas, como por exemplo, a linguagem de programação utilizada. Fatores como o foco de aplicação, usabilidade, legibilidade e conhecimento prévio da linguagem são alguns dos diversos dilemas que se devem enfrentar para tomar tal decisão.

A linguagem escolhida para a elaboração do aplicativo que irá realizar os cálculos do comportamento das células fotovoltaicas é o *C SHARP* (C#).

O C# é uma linguagem derivada do C e do C++ que implementa as mais modernas tecnologias presentes no universo computacional, dando suporte a diversos paradigmas como a orientação a objetos e tendo como principal característica ser multiplataforma. Outro fator preponderante que determinou a escolha dessa linguagem é o fato que a mesma ser de domínio público, e as ferramentas de desenvolvimento utilizadas nesse projeto serem *Freeware* (de uso livre), como foi o caso do compilador *SharpDevelop*.

A seguir são apresentados alguns conceitos que envolvem essa plataforma de desenvolvimento.

#### 4.2 A Plataforma .Net Framework

A linguagem C# é uma linguagem recente criada com os mais modernos conceitos da computação moderna e voltada para uma grande gama de solução de problemas da informática e da Tecnologia da Informação (TI).

Para a utilização da linguagem *C#*, é necessário à utilização de um biblioteca de definição de variáveis e procedimentos chamado *.Net Framework*. O *.Net Framework* é uma biblioteca criada pela Microsoft que permite a aplicativos serem altamente portáteis, tanto no que diz respeito ao sistema operacional utilizado, modalidade do aplicativo criado e dispositivo de processamento, como descrito em WATSON et al (2002).

Assim, o produto de software produzido por esse trabalho poderia ser facilmente utilizado em diversos sistemas operacionais como *Windows*, *Linux*, *FreeBsd*, *Mac-OS*, entre outros. E com pequenas modificações seria possível transformar o aplicativo *Windows Form*, que é a modalidade do aplicativo desenvolvido por esse trabalho e própria para executar em computadores tipo *PC Desktop* (Computadores Pessoais de mesa) e *workstation* (Estações de trabalho), para uma modalidade voltada para a internet (*Web Services*) ou para dispositivos móveis, como celulares e *palmtops* (*Mobile Services*). Para tanto é necessário que a biblioteca *framework* esteja instalada para dar suporte a aplicação nos sistemas operacionais citados ou nos dispositivos mencionados.

A Biblioteca *.Net Framework* contem o CTS (*Common Type System* – Sistema de Tipos Comuns), que permite o uso de diversas linguagens baseadas na tecnologia *dotnet*. A estrutura da Biblioteca também inclui o *.Net CLR* (*Common Language Runtime* – Linguagem Comum em Tempo de Execução). Tanto o CTS como o CLR são de fundamental importância para o correto funcionamento dos aplicativos baseados na tecnologia *.net*. Uma das funções do CLR é o gerenciamento da memória utilizada pelos aplicativos em tempo de execução, evitando-se assim erros inesperados por alguma falha no equipamento ou programação.

O código objeto da linguagem *C#* é o MSIL (*Microsoft Intermediate Language* – Linguagem Intermediária da Microsoft), que não é o código nativo de qualquer sistema operacional ou de qualquer plataforma, e sim do compilador JIT (*Just-In-Time* – Momento Exato). O JIT está presente na biblioteca *Framework*, sendo por tanto necessário que a mesma esteja instalada no local onde será executada a aplicação.

### 4.3 O programa desenvolvido

O aplicativo desenvolvido como produto desse trabalho permite aos pesquisadores ou interessados no funcionamento de células fotovoltaicas a rápida verificação de resultados a partir de um conjunto de dados de entrada pré-determinados ou a escolha do operador do sistema. O aplicativo leva em consideração para determinação de seus resultados as equações estudadas durante todo o projeto e descritas no Capítulo III desta dissertação. O programa

também possui um pequeno Banco de Dados interno que permite o rápido armazenamento e recuperação de dados.

Para facilitar a interface com o usuário, o aplicativo está dividido em diversas seções descritas a seguir:

- **Entrada de Dados:** Consiste na seção de definição das características básicas para a simulação. A partir desses dados, é possível usar todas as demais funções do programa.
- **Fótons:** Esta seção está destinada a apresentar os resultados referentes aos fótons incidentes na célula solar. Com estas informações, o pesquisador possui parâmetros de iluminação dos painéis solares.
- **Absorção:** Nesta seção estará relacionados qual o comportamento da célula solar na absorção dos fótons incidentes e seu comportamento após a penetração no material.
- **Gráfico Alpha:** Seção que apresenta os gráficos referentes a conste de absorção  $\alpha$  e o valor do coeficiente de extinção  $K$  para cada comprimento de onda compreendido entre os limites estabelecidos na seção de entrada de dados.
- **Espectro:** Mostra o gráfico da irradiação direta pelo comprimento de onda para cada comprimento de onda.
- **Corrente Intrínseca:** Esta seção envolve os dados relativos ao cálculo da corrente intrínseca da célula fotovoltaica, barreira de potencial, comprimento da camada de depleção, assim como também a velocidade térmica dos semicondutores tanto do tipo P quanto do tipo N e o cálculo da velocidade de recombinação superficial.
- **Componentes da Fotocorrente:** Esta seção fornece os elementos necessários para o cálculo da fotocorrente, tensão em circuito aberto e potência máxima da célula fotovoltaica.
- **Gráfico Si/Ge:** Apresenta os gráficos característicos da corrente pela tensão e da potência pela tensão para as células solares a base nos semicondutores silício e germânio.
- **Gráfico GaAs:** Apresenta os gráficos característicos da corrente pela tensão e da potência pela tensão para as células solares a base no semicondutor de Arsenieto de Gálio.
- **Resultados Célula:** Apresentam de forma textual os valores encontrados pelo programa a partir dos dados de entrada
- **Módulo Fotovoltaico:** Apresenta as características de um painel fotovoltaico construído com as células utilizadas na modelagem e a partir de características definidas pelo usuário.

Todas as seções contem grupamentos de informação que permite ao operador do sistema a rápida e fácil visualização da informação.

A seguir serão descritos os grupamentos de cada seção.

### 4.3.1 Entrada de Dados

A Entrada de Dados é a primeira seção do programa. Onde o operador do sistema irá entrar com as informações necessárias para a realização dos cálculos.

A Entrada de Dados está dividida em três grandes grupamentos denominados **Propriedades Químicas, Dopantes e Parâmetros de Análise**.

No grupamento Propriedades Químicas estão contidas as informações referentes ao elemento químico base constituinte da célula solar. Essas informações estão presentes num pequeno sistema de banco de dados, que apresenta as opções padrão para cada campo pertencente ao grupamento de acordo com a encontrada na literatura durante a confecção deste trabalho.

Os campos que compõe a o grupamento Propriedades Químicas estão descritos abaixo:

- **Elemento Químico:** Refere-se ao elemento químico escolhido como constituinte da célula solar. Como elementos padrão utilizados durante a pesquisa estão o Silício (Si), Germânio (Ge) e o Arsenieto de Gálio (GaAs).
- **Número Atômico:** Este campo contém o valor do número atômico do elemento escolhido para a análise.
- **Grupo:** Informa ao operador do sistema qual grupo pertence o elemento.
- **Eletronegatividade:** Informa o valor da eletronegatividade do elemento.
- **Energia Gap:** Este campo trata do valor da energia de separação entre a camada de valência e a camada de condução, sendo esta a energia mínima (*função trabalho*) que o elétron deve sobrepor para sair de uma banda para outra, desconsiderando o efeito da dopagem do material.
- **Concentração ni:** Representa o valor da concentração intrínseca do material constituinte, Número médio de elétrons e lacunas livres.
- **Densidade Atômica:** Esse campo apresenta a quantidade de átomos por  $\text{cm}^2$  presente no material.
- **Massa Efetiva do Elétron:** Esse dado traz o valor da massa efetiva do elétron que tem grande influência na forma de condução de corrente elétrica pelo material.
- **Massa Efetiva da Lacuna:** Apresenta o valor da massa efetiva da lacuna no material, e assim como a massa efetiva do elétron, esta também influencia no comportamento elétrico do material.
- **Constante Dielétrica:** Apresenta a Constante dielétrica do material
- **Energia Cinética Média:** Apresenta a energia cinética média dos átomos no material.

- **Momento do Elétron:** Este campo mostra o valor do momento do elétron
- **Constante de Geração:** Este campo está relacionado com a geração do par elétron-lacuna
- **Estrutura do Cristal:** Apresenta a forma do cristal que é formado a partir do material utilizado na confecção da célula fotovoltaica.
- **Tipo de Gap:** Este campo apresenta o tipo de *Gap* que o material apresenta. Pode ser direto ou indireto. Materiais de *Gap* direto possuem fácil transposição de elétrons da camada de valência para a camada de condução. Já *Gap* indireto necessitam da mudança do momento do elétron através da interação com o fônon da rede cristalina.
- **Constante da Rede (*Lattice*):** Representa o valor da constante da rede cristalina do material.
- **Densidade Efetiva de Estados na camada de Valência:** Este valor representa o valor médio de elétrons presentes na camada de valência que podem sair para a camada de condução, de acordo com o elemento.
- **Densidade Efetiva de Estados na Camada de Condução:** Este valor representa o valor médio de lacunas presentes na camada de condução que podem ser ocupadas por elétrons provenientes da camada de valência.
- **Mobilidade dos Elétrons:** Representa a facilidade que os elétrons podem se locomover no material escolhido.
- **Mobilidade das Lacunas:** Representa a facilidade que as lacunas podem se mover no material escolhido.
- **Tempo de Vida dos Portadores Minoritários:** Representa o tempo médio de vida dos portadores minoritários, ou seja, o tempo que uma lacuna livre existe no semiconductor tipo N antes de recombinar com um elétron e o tempo que um elétron livre existe no semiconductor tipo P antes de recombinar com uma lacuna.
- **Índice de Refração:** É o valor do índice de fótons refratados pelo material.
- **Constante de Difusão dos Elétrons:** É o valor característico do material que representa a difusão dos elétrons, como portadores minoritários no semiconductor tipo P.
- **Constante de Difusão das lacunas:** É o valor característico do material que representa a difusão das lacunas, como portadores minoritários no semiconductor tipo N.
- **Permissividade:** Este campo mostra o valor da permissividade do material utilizado.

No grupamento dopantes estão algumas informações relativas aos elementos usados para a dopagem dos semicondutores de forma a obter uma melhor nível de conversão de energia luminosa em energia elétrica.

O primeiro item refere-se ao elemento usado para dopagem do material tipo N. Esse elemento depende inicialmente do elemento escolhido como o constituinte da célula fotovoltaica na seção elemento químico.

O segundo campo refere-se ao nível de energia introduzido com o elemento da impureza escolhida, ou seja, o valor que será diminuído da Energia *Gap* entre a camada de valência e condução.

O terceiro campo refere-se ao valor da concentração de dopante tipo N introduzidos no material.

O quarto item se refere ao elemento usado para dopagem do material tipo P. Esse elemento depende inicialmente do elemento escolhido como o constituinte da célula fotovoltaica na seção elemento químico.

O quinto campo refere-se ao nível de energia introduzido com o elemento da impureza escolhida, ou seja, o valor que será diminuído da Energia *Gap* entre a camada de valência e condução.

O sexto campo refere-se ao valor da concentração de dopante tipo P introduzidos no material.

O último grupamento da seção entrada de dados refere-se aos parâmetros de análise utilizados pelo sistema para os cálculos necessários.

Os campos presentes nesse grupamento são:

- **Comprimento da onda mínimo incidente em nm:** É o valor mínimo que será considerado para a onda de luz incidente na célula fotovoltaica. O valor típico desse campo é 400 nm.
- **Comprimento da onda máximo incidente em nm:** É o valor máximo que será considerado para a onda de luz incidente na célula fotovoltaica. O Valor típico desse campo é 700 nm. Assim com esses dois valores é possível cobrir todo o espectro de luz branca incidente.
- **Intensidade luminosa em watts por m<sup>2</sup>:** Esse campo representa o valor mínimo de intensidade luminosa que atinge a célula solar. O valor típico 0 a 1000 W/m<sup>2</sup>
- **Temperatura do Sistema :** É a temperatura de análise do comportamento da célula solar. Assim é possível medir seu comportamento para diversos níveis de temperatura em °C.
- **Espessura do semicondutor tipo N:** Representa a espessura da parte superior da célula solar constituída por um semicondutor tipo N.
- **Espessura do semicondutor tipo P:** Representa a espessura da parte inferior da célula solar constituída por um semicondutor tipo P.



- **Área da célula fotovoltaica:** Representa a valor da área da célula a ser utilizada na análise do problema.

A Figura 4.1 mostra a seção de entrada de dados do programa.

The screenshot shows the 'Modelagem Comportamental de Células Solares' software interface. The 'Entrada de Dados' (Data Entry) section is active, displaying three main columns of input fields:

- Propriedades Químicas (Chemical Properties):** Includes a dropdown for 'Escolha o Elemento' (Set Element) with 'Silício (Si)' selected, and an 'Ok' button. Below are fields for 'Número Atômico', 'Grupo:', 'EletroNegatividade', 'Energia Gap', 'Concentração ni', 'Densidade Atômica', 'Mass. efet. Elétron', 'Mass. efet. Lacuna', 'Cte. Dielétrica', 'E. Cinética Média', 'Momento do Eletro', and 'Cte. Geração'.
- Dopantes (Dopants):** Includes a dropdown for 'Escolha o Elemento (dopante N)', an 'Ok' button, and a 'Nível de Energia introduzido Ec - Ed' field. Below are 'Concentração' fields and a dropdown for 'Escolha o Elemento (dopante P)', followed by another 'Ok' button and a 'Nível de Energia introduzido Ea - Ev' field with a 'Concentração' field.
- Parâmetros de Análise (Analysis Parameters):** Includes a dropdown for 'Comprimento de onda incidente em nm', 'Mínimo' and 'Máximo' input fields, 'Intensidade Luminosa em Joules', 'J.S /Cm2', 'Temperatura do sistema em °C' (with a '°C' label), 'Espessura do semicondutor tipo N em nm', 'Espessura do semicondutor tipo P em nm', and 'Raio da Célula em Cm'.

A large 'Usar' (Use) button is located at the bottom right of the interface.

Figura 4.1: Seção de Entrada de Dados do Sistema

### 4.3.2 Fótons

A seção fótons apresenta quatro grupamentos que representam os dados relativos aos fótons incidentes no material. Cada grupamento exibe informações relativas ao comprimento de onda escolhido na seção de entrada de dados, sendo assim uma possível a existência de um número elevado de valores exibidos.

Os grupamentos desta seção são :

- **Frequência da Onda Incidentes:** Realiza a conversão do valor de entrada, que é o comprimento de onda em nm para a frequência em Hz. Esse cálculo é realizado pela Equação. (3.1).
- **Energia do Fóton:** Calcula a energia dos fótons incidentes de acordo com o comprimento de onda indicado na seção de entrada de dados. Esse cálculo é realizado pela Equação. (3.3).

- **Número de Fótons incidentes:** Calcula a quantidade de fótons por  $\text{cm}^2$  baseada na fração de luz compreendida para cada comprimento de onda. Esse cálculo é realizado pela Equação. (3.6).
- **Número de Onda K e Momento do Fóton:** Esse grupamento realiza dois cálculos. O primeiro determina o valor da onda K incidente (pacote de onda) e o segundo diz respeito ao valor do momento dos fótons com comprimento de onda determinado na seção de entrada de dados. Esses cálculos são realizados respectivamente pela Equação. (3.9) e Equação. (3.10).

A Figura 4.2 mostra a tela do programa referente à seção de fótons e seus respectivos cálculos

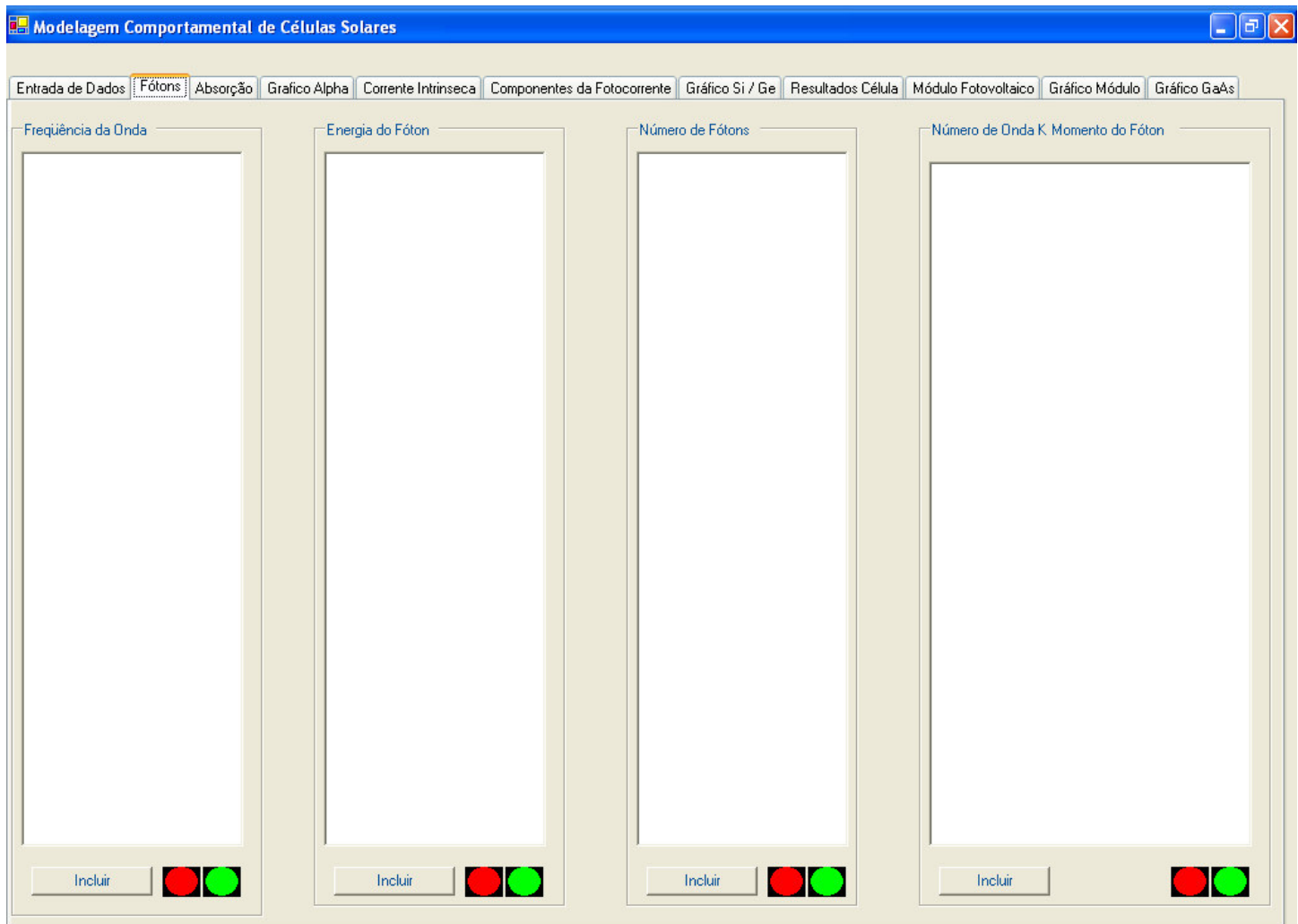


Figura 4.2: Seção de Fótons do programa de modelagem computacional

### 4.3.3 Absorção

Na seção absorção existe três grupamentos que descrevem os valores de dados a respeito da absorção do espectro da luz pelo material (Célula Fotovoltaica), fornecendo assim ao pesquisador importantes informações sobre o seu comportamento nas diferentes incidências de iluminação e nos diferentes comprimentos de ondas.

Os grupamentos da seção absorção são as seguintes:

- **Valor da Coeficiente de Extinção K:** Esse coeficiente descreve o comportamento da luz ao entrar em contato com o meio material e a forma de como ocorre a extinção da mesma à medida que esta penetra na célula. O coeficiente de extinção é um valor que depende do material utilizado e do comprimento de onda da luz incidente. Neste caso foram utilizado os valores descritos em SHUBERT (s.d.) como base de cálculo para os demais valores obtidos na entrada de dados do sistema.

O trabalho de SHUBERT (s.d) apresenta apenas alguns valores da constante de extinção K, sendo necessário calcular os demais resultados para se poder obter resultados consistentes neste trabalho. Para tanto foi utilizado um algoritmo de Interpolação Lagrangiana descrito em GRIFFITHS (1991). O comportamento dos resultados obtidos está de acordo com o observado na literatura, principalmente em MESSENGER (2000) e outros trabalhos relacionados.

- **Valor da Constante de Absorção Alpha:** A constante de absorção Alpha é de grande importância para se determinar o comportamento da célula fotovoltaica a partir da iluminação presente, da quantidade de fótons penetrantes no material e da fotocorrente gerada pela mesma. O valor de Alpha é determinado pelo o uso da Equação. (3.7), e como pode ser observado, é dependente do comprimento de onda da luz incidente e do valor da constante de extinção.

- **Intensidade da Luz a uma profundidade:** Usando-se a Equação. (3.8) é possível calcular a quantidade de fótons incidentes no material analisado a profundidade determinada. Essa informação é de vital importância para o cálculo da fotocorrente, pois a geração da mesma se dará principalmente quando os fótons incidentes promoverem a formação de par elétron-lacuna na região de junção dos semicondutores tipo N e P.

A Figura 4.3 apresenta a tela da seção absorção.

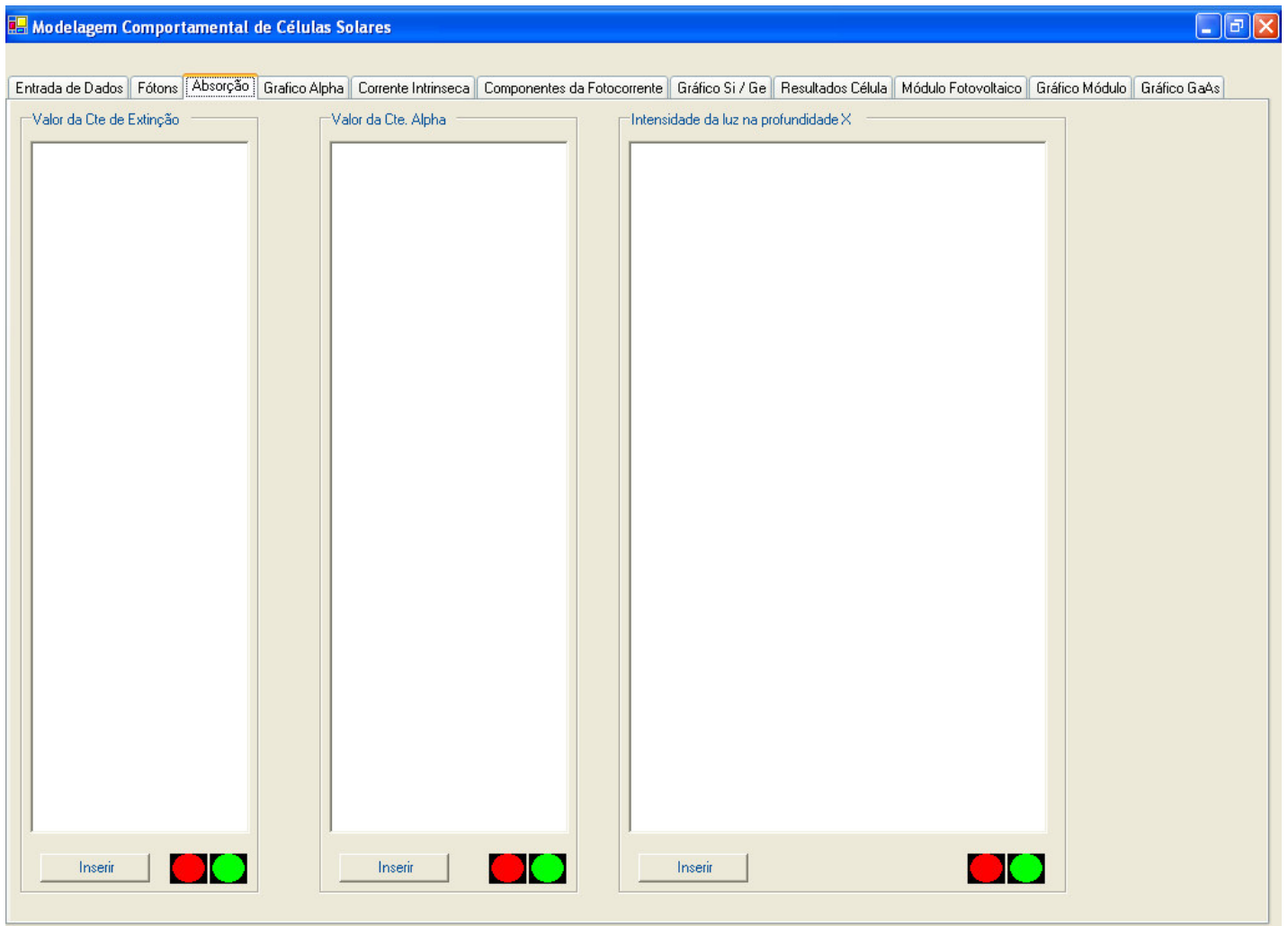


Figura 4.3: Seção absorção do programa de modelagem computacional

#### 4.3.4 Gráfico Alpha

Nessa seção são apresentados os gráficos do coeficiente de extinção  $K$  e da constante de absorção  $\alpha$ .

A Figura 4.4 apresenta o gráfico gerado pelo programa de modelagem computacional.

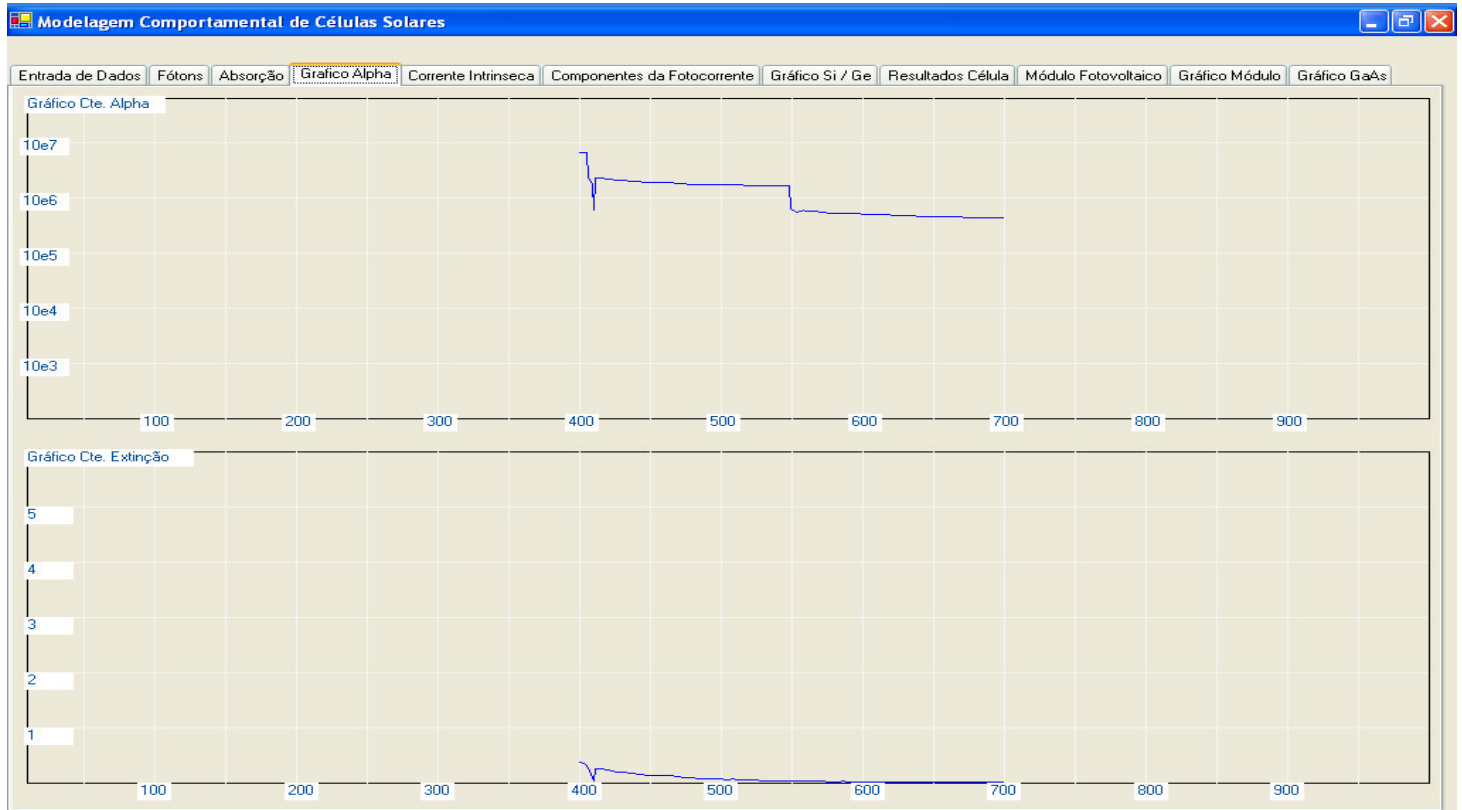


Figura 4.4: Tela do gráfico alfa gerado pelo programa de modelagem computacional mostrando os gráficos da constante alfa e do coeficiente de extinção

#### 4.3.5 Corrente Intrínseca

A seção Corrente Intrínseca possui diversos grupamentos utilizados para o cálculo da corrente intrínseca do material e da componente velocidade de recombinação superficial que será utilizada no cálculo da fotocorrente.

Os grupamentos desta seção estão descritos abaixo.

- **Cálculo dos Portadores Minoritários:** Este grupamento destina-se a apresentar o valor dos portadores minoritários presentes nos semicondutores de tipo N e P. Para tanto este é dividido em outros dois grupamentos descritos a seguir:
- **Semicondutor tipo N e tipo P:** Neste grupamento será apresentado o valor da concentração de impurezas doadoras adicionadas ao semicondutor tipo N e o valor da concentração de impurezas aceitadoras adicionadas ao semicondutor tipo P na seção Entrada de Dados, que segundo PANKOVE (1975) representa o valor dos portadores majoritários, e a quantidade de portadores minoritários baseada na resolução da Equação. (3.14). Também é

apresentado nesse grupamento o valor da constante de difusão de lacunas e elétrons e o tempo médio de vida dos portadores minoritários antes de ocorrer à recombinação. Assim é possível calcular o comprimento médio que estas podem percorrer no semiconductor tipo N ou P antes da recombinação. Para que ocorra a geração de fotocorrente, esse valor de comprimento indica a distância máxima que a lacuna ou elétron pode estar da região de Junção pn. Esse valor é indicado pela Equação. (3.12).

- **Barreira Potencial da Junção pn:** Esse grupamento destina-se a apresentar os dados do cálculo do valor da barreira potencial da junção pn. Este grupamento faz uso da Equação. (3.16).
- **Comprimento da Camada de Depleção:** O comprimento da camada de depleção é exposto neste grupamento. Assim é possível observar o comportamento da mesma de acordo com a variação de temperatura e da variação de dopagem dos semicondutores. Esse grupamento está dividido em duas partes. A primeira é responsável pelo cálculo do comprimento no lado do semiconductor tipo N e é regido pela Equação (3.17). A segunda é responsável pelo cálculo do comprimento no lado semiconductor tipo P e é regido pela Equação (3.18).
- **Corrente Intrínseca ou Corrente Reversa de Saturação:** Baseado nos dados calculados nos demais grupamentos e na resolução da Equação (3.19), é obtido o valor da corrente Intrínseca do semiconductor, também conhecida como corrente reversa de saturação. Essa corrente se contrapõe ao fluxo de elétrons e logicamente exerce uma perda de eficiência no comportamento da célula fotovoltaica.
- **Cálculo da Energia Cinética:** Baseado na temperatura do sistema é possível calcular a energia cinética do mesmo. Esse grupamento é de grande importância para o cálculo da velocidade de recombinação superficial que será utilizada para calcular o valor da fotocorrente. Esse valor é obtido pelo uso da Equação (3.20).
- **Velocidade Térmica:** Este grupamento traz os dados referentes ao cálculo da velocidade térmica dos portadores, e seu comportamento nos semicondutores tipo N e tipo P. O cálculo dessa velocidade é dado pelo uso da Equação (3.21) no caso do semiconductor tipo N e da Equação (3.22) no caso do semiconductor tipo P.
- **Área da Seção de Captura:** Essa seção faz o cálculo da área da célula onde pode ocorrer a recombinação dos par elétron-lacuna Esses dados, que são de fundamental importância para o cálculo do valor da velocidade de recombinação superficial, são calculados para os semicondutores de tipo N e tipo P, e são regidos respectivamente pela Equação (3.23) e pela Equação (3.24).

- **Velocidade de Recombinação Superficial:** Esse campo determina a velocidade da qual ocorre a recombinação do par elétron-lacuna na superfície dos semicondutores tipo N e tipo P. Portanto esse grupamento está dividido em duas partes. Uma para o cálculo da velocidade de recombinação no lado do semicondutor tipo N, que é determinado pela Equação (3.25) e a outra para o cálculo da velocidade de recombinação no lado do semicondutor tipo P, que é regido pela Equação (3.26).

A Figura 4.5 apresenta a tela da seção Corrente Intrínseca do programa de modelagem computacional e seus respectivos grupamento de dados.

Figura 4.5: Seção Corrente Intrínseca do programa de modelagem de dados.

### 4.3.6 Componentes da Fotocorrente

Devido à complexidade e dos diferentes termos utilizados para o cálculo da

fotocorrente, esta seção apresenta as componentes necessárias para o cálculo da mesma, de acordo com as Equação (3.27) e Equação (3.28)

- **Tensão VOC:** Realiza o cálculo da tensão em circuito aberto da célula fotovoltaica.
- **Característica I x V da célula solar:** Apresenta os resultados numéricos que serão utilizados para a geração do gráfico da tensão pela corrente da célula fotovoltaica.
- **Potência da célula:** Calcula o valor da potência da célula solar para cada valor de tensão e corrente para a construção do gráfico da tensão pela potência e determina o valor do ponto de potência máxima da célula solar.

A Figura 4.6 apresenta a tela do programa referente a essa seção.

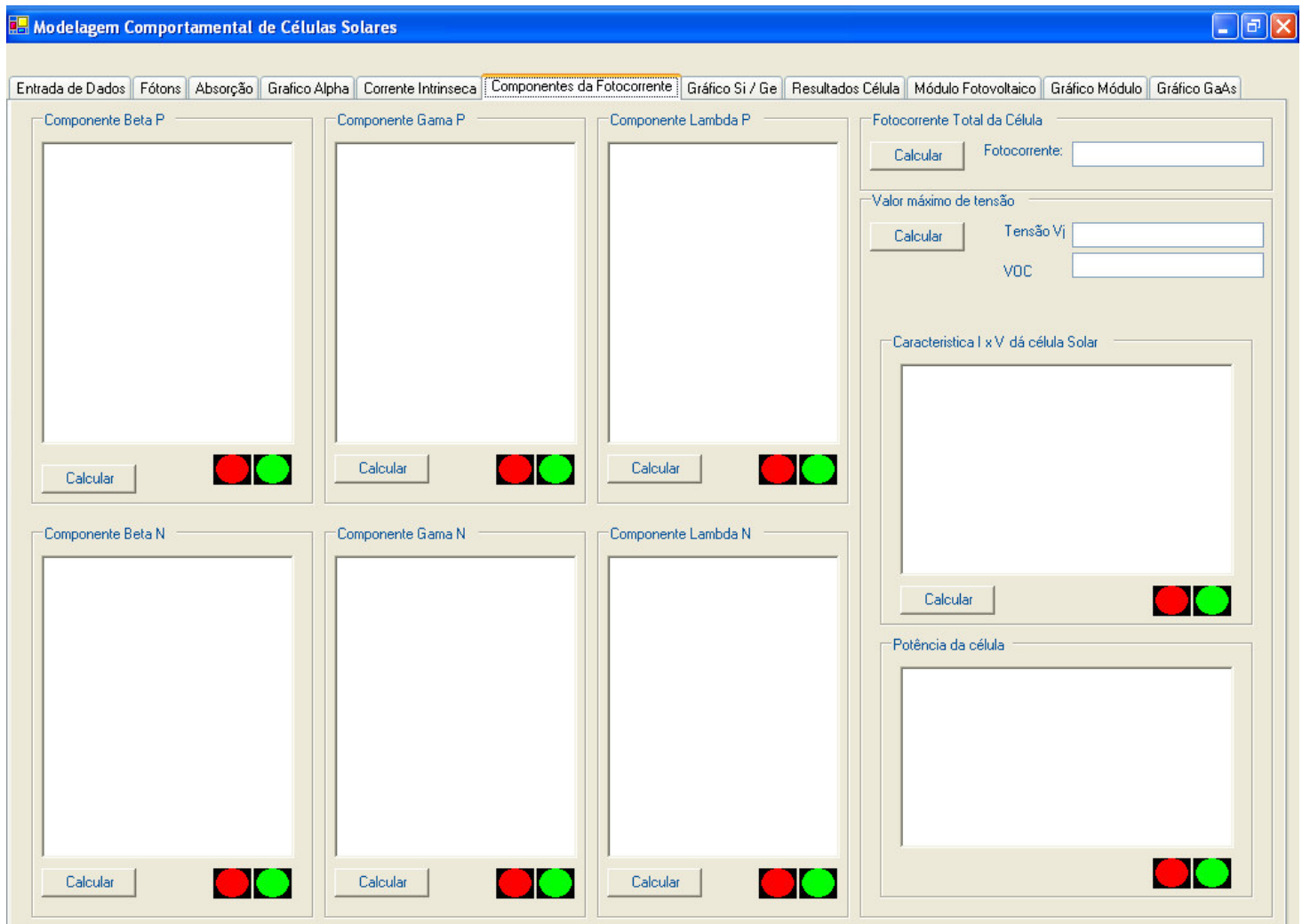


Figura 4.6: Imagem da tela referente aos componentes da fotocorrente



### 4.3.7 Gráfico Si/Ge e Gráfico GaAs

Apresenta os gráficos baseados no semiconductor padrão para as curvas características das células solares baseada na tensão pela corrente e na potência pela corrente.

A Figura 4.7 apresenta a imagem dessa tela.

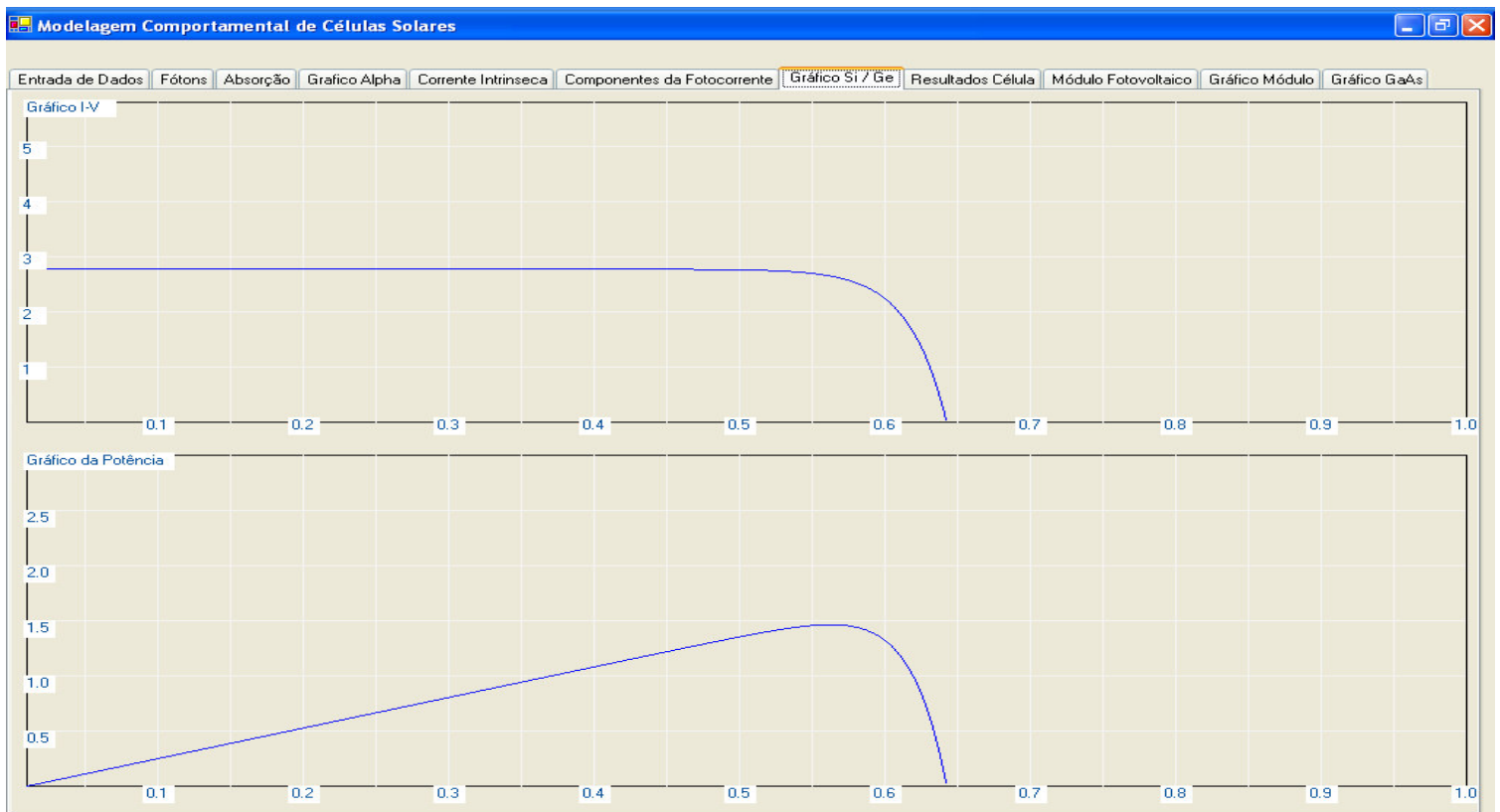


Figura 4.7: Imagem da tela de exibição dos gráficos da corrente pela tensão e da potência pela tensão

### 4.3.8 Resultados da célula

Essa seção apresenta os resultados finais dos cálculos realizados durante a simulação, além de apresentar um resumo dos principais dados de entrada que influenciam diretamente no comportamento da análise realizada.

O resumo da modelagem é composto por:

- **Elemento:** Apresenta o elemento base da célula fotovoltaica.
- **Dopante N:** Elemento utilizado como dopante para a confecção do semiconductor tipo N.

- **Dopante P:** Elemento utilizado como dopante para a confecção do semicondutor tipo P.
- **Concentração:** Concentração do dopante utilizada durante a análise, tanto para o tipo N quanto para o tipo P.
- **Intensidade Luminosa:** Informa a intensidade luminosa utilizada como parâmetro da simulação.
- **Temperatura:** Temperatura na qual foi realizada a simulação.
- **Comprimento Mínimo:** Valor do menor comprimento de onda utilizado como parâmetros para os cálculos.
- **Comprimento Máximo:** Valor do maior comprimento de onda utilizado como parâmetros para os cálculos.

Os resultados obtidos permitem ao usuário do sistema a rápida verificação dos valores fornecidos pela simulação. São eles:

- **Corrente Máxima:** Valor da corrente gerada pela célula fotovoltaica no ponto de potência máxima.
- **Tensão Máxima:** Valor da tensão gerada pela célula fotovoltaica no ponto de potência máxima.
- **Potência Máxima:** Valor na qual a célula solar consegue a sua maior potência.
- **Tensão VOC:** Tensão em circuito aberto da célula fotovoltaica.
- **Corrente em Curto-Circuito:** Valor da corrente em curto-circuito e/ou da fotocorrente gerada pela célula fotovoltaica.
- **Corrente Intrínseca:** Valor da corrente reversa de saturação que é gerada pela célula fotovoltaica.
- **Fill Factor – Fator de Forma:** Representa o fator de rendimento da célula fotovoltaica.
- **Resistência Interna:** Apresenta o valor da resistência interna da célula fotovoltaica.
- **FEM – Força Eletromotriz:** Mostra o valor da força eletromotriz produzido pela célula fotovoltaica.
- **Histórico de Simulações:** Quadro onde é possível armazenar um conjunto de simulações para comparação dos resultados.

A Figura 4.8 apresenta a imagem dessa tela do programa

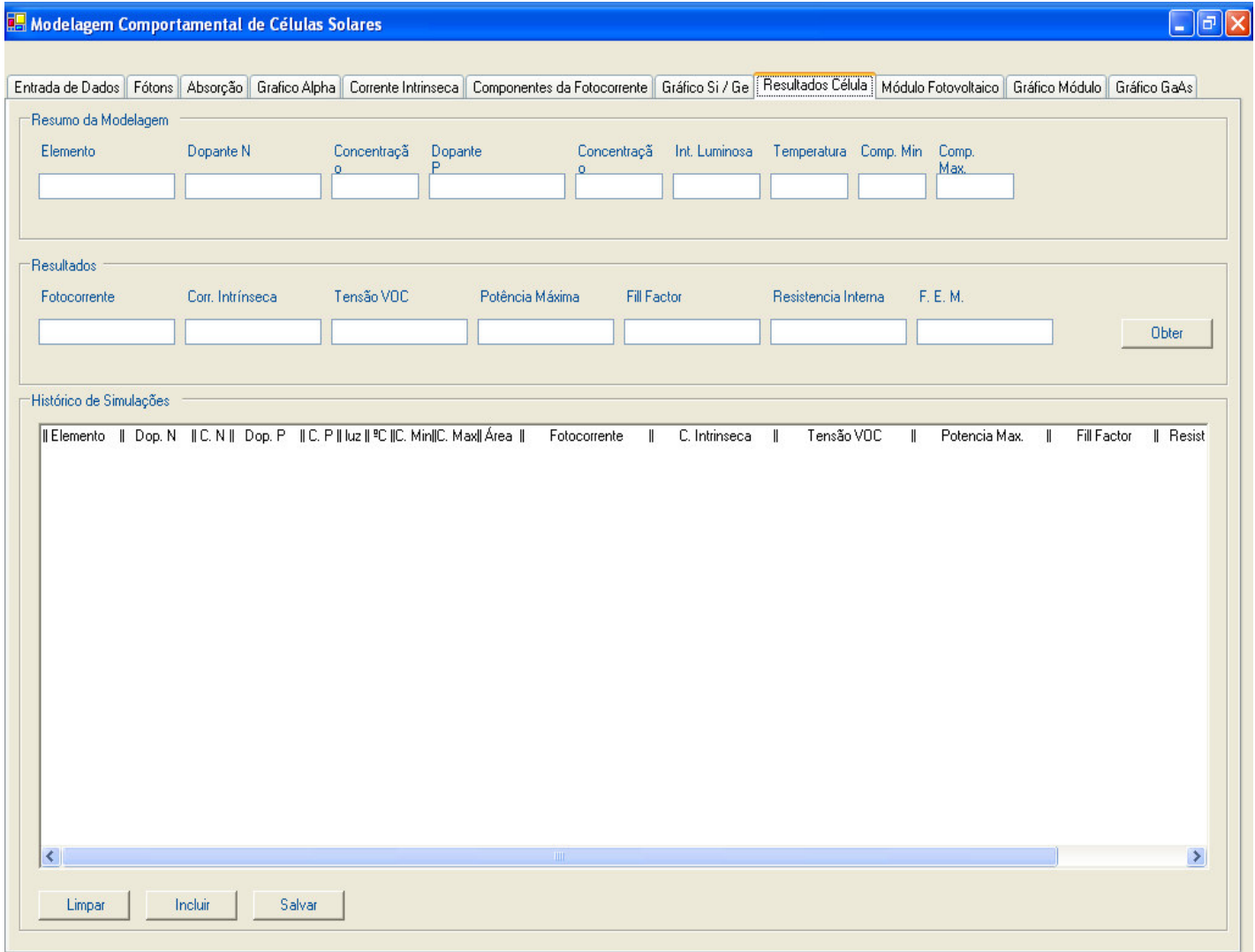


Figura 4.8: Imagem da tela de resultados da célula fotovoltaica

### 4.3.9 Módulo Fotovoltaico

Essa seção apresenta a confecção de um módulo solar a partir dos resultados obtidos pelo programa da configuração das células solares, sendo possível determinar o tipo de material utilizado para interligar as células fotovoltaicas e obter os resultados esperados para o módulo.

Essa seção apresenta os seguintes campos:

- **Número de células em série:** Permite ao usuário colocar um número arbitrário de células em série permitindo obter diversos tipos de configurações para o painel solar.
- **Número de ligações em paralelo:** Permite ao usuário organizar as células ligadas em

série em conjuntos trabalhando paralelamente para se obter as configurações possíveis para painéis solares.

- **Horas de Insolação diária:** O usuário informa ao sistema a quantidade de horas de insolação média apresentada para uma determinada região, de forma que as células solares constituintes do painel solar trabalhem no ponto de potência máxima.
- **Tipo de material de conexão:** Permite ao usuário escolher alguns dos materiais mais utilizados para interconectar as células solares no painel fotovoltaico de forma que se possa obter diversas configurações possíveis.
- **Espessura do Condutor:** Da mesma forma é possível se determinar a espessura do condutor que liga as células fotovoltaicas.
- **Comprimento do Condutor:** Da mesma forma é possível se determinar o comprimento condutor que liga as células fotovoltaicas.
- **Tensão Máxima Calculada:** É fornecida ao usuário a tensão máxima que o painel solar pode produzir.
- **Corrente Máxima Calculada:** Também é obtida a corrente máxima que o painel fotovoltaico pode produzir.
- **Potência Máxima:** Assim é possível se determinar a potência do módulo baseado nas características das células fotovoltaicas e da configuração do painel.
- **Corrente Ah/Dia:** É calculada a corrente diária produzida pelo painel fotovoltaico.

A Figura 4.9 apresenta a imagem de seção do programa

The image shows a software window titled "Modelagem Comportamental de Células Solares". The "Módulo Fotovoltaico" tab is active. The interface is divided into two main sections: "Dados de Configuração do Painel" and "Resultados do Painel".

**Dados de Configuração do Painel:**

- Número de células em Série:
- Horas de Insolação Diária:
- Comprimento do Condutor em m:
- Número de Conexões em Paralelo:
- Tipo de Material de Conexão:
- Espessura do Condutor em mm<sup>2</sup>:

A "Calcular" button is located to the right of the input fields.

**Resultados do Painel:**

- Tensão M:
- Potência M:
- Corrente M:
- Corrente Ah/Dia:

Figura 4.9: Imagem da seção do módulo fotovoltaico

A Figura 4.10 apresenta o espectro da luz solar, e demonstra que cada comprimento de onda incidente contribui de numa proporção diferente, pois o mesmo não é linear.

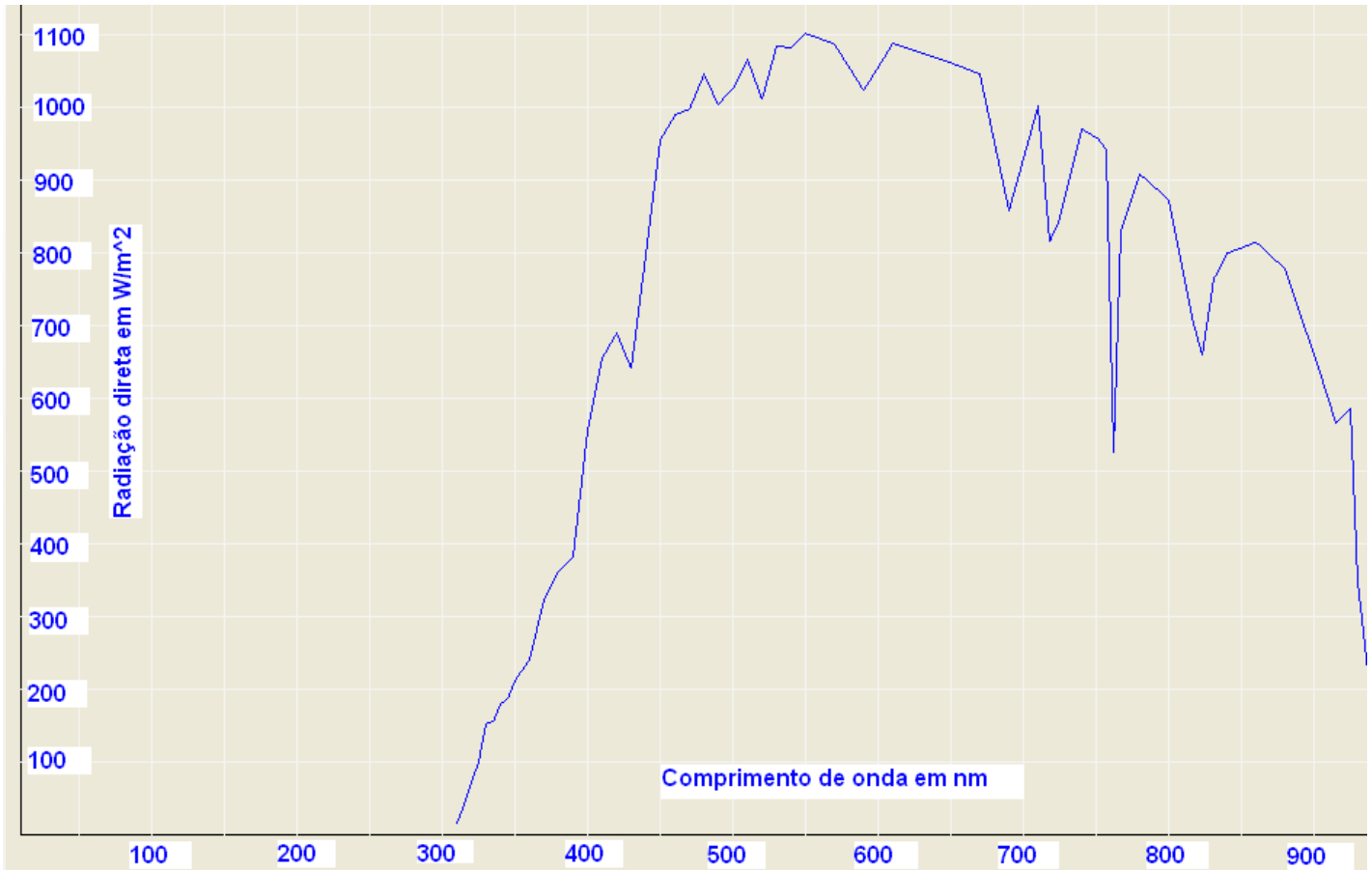


Figura 4.10: Distribuição da radiação solar de acordo com o comprimento de onda

O capítulo V irá apresentar alguns exemplos da utilização desse aplicativo.

## CAPÍTULO V

### Experimentos Realizados

#### 5.1 Introdução

O Software de modelagem computacional permite a realização de diversos experimentos a fim de medir o comportamento de células e módulos fotovoltaicos a partir dos parâmetros de fabricação e sob as condições de operações da mesma. O Software visa mostrar a facilidade de obtenção de resultados rápidos e precisos dispensando modelos reais diminuindo o tempo e o custo de produção das células fotovoltaicas, permite também o entendimento do comportamento de células fotovoltaicas numa determinada situação.

Para demonstrar isso será realizada um conjunto de quatro grupos de análises onde será observado o comportamento da célula fotovoltaica sob diversos aspectos.

O primeiro grupo de análise visa verificar como a alteração de dopantes para um mesmo elemento pode influenciar nas características de tensão e corrente da célula.

O segundo grupo de análise visa verificar como a alteração da concentração de dopantes vai influenciar no comportamento da mesma.

O terceiro grupo de análise visa mostrar a influencia da iluminação num determinado segmento de células de operação.

O quarto grupo de análise vai verificar como a temperatura influencia no desempenho do funcionamento da célula.

#### 5.2 Análise do primeiro grupo: variação dos dopantes.

Esse primeiro grupo de análise visa verificar, a uma concentração constante e a parâmetros externos constantes, quais são os melhores dopantes para os semicondutores base das células fotovoltaicas.

Nesse grupo serão analisados exemplos de dopantes para o Silício e o Germânio, conforme apresentado na Tabela 5.1

*Tabela 5.1: Variação dos dopantes de acordo com o tipo base dos semicondutores constituintes da célula solar.*

<i>Silício (Si)</i>			<i>Germânio (Ge)</i>		
<b>Doador</b>		<b>Aceitador</b>	<b>Doador</b>		<b>Aceitador</b>
<b>a1</b>	Fósforo (P)	Boro (B)	<b>b1</b>	Fósforo (P)	Boro (B)
<b>a2</b>	Arsênio (As)	Alumínio (Al)	<b>b2</b>	Arsênio (As)	Alumínio (Al)

Serão realizadas quatro experiências, divididas duas a duas de acordo com o tipo do semicondutor base que forma a célula fotovoltaica.

- As experiências a1 e a2 estarão relacionadas ao Silício.
- As experiências b1 e b2 estarão relacionadas ao Germânio.

### 5.2.1 Experiência sobre os dopantes de silício (a1 e a2)

Como mostrado na Tabela 5.1 da seção 5.2 são realizadas duas experiências comparativas com os dopantes de silício.

Os parâmetros utilizados para a realização da experiência estão destacados na Tabela 5.2 e são os seguintes:

*Tabela 5.2: Parâmetros das Experiências.*

<i>Parâmetros do Sistema</i>						
$\lambda$ inicial	$\lambda$ final	Iluminação	Temperatura	Espessura (N)	Espessura (P)	Área da célula
400 nm	700 nm	1000 W/m <sup>2</sup>	25°C	0,2 nm	300 nm	100 cm <sup>2</sup>

A Tabela 5.2 de parâmetros do sistema será utilizada para os parâmetros comuns as experiências a1 e a2, para que seja possível determinar os melhores dopantes para o Silício.

O comprimento de onda indicado por  $\lambda$  entre 400 e 700 corresponde ao espectro da luz branca.

A iluminação com o valor de 1000 W/m<sup>2</sup> indica a máxima iluminação que a superfície da Terra pode receber como está descrito em TIPLER (1991)



A temperatura de 25°C implica na temperatura média ambiente onde estão em operação as maiorias dos painéis solares no território brasileiro.

Os valores correspondentes à espessura dos semicondutores tipo N e tipo P são os valores encontrados no trabalho de KININGER (2003).

A área da célula de 100 cm<sup>2</sup> corresponde à área média das células comerciais.

Na Tabela 5.3 são mostrados os valores das concentrações utilizadas para cada tipo de dopante no silício.

*Tabela 5.3: Valor da concentração dos dopantes*

<i>Parâmetros de dopagem para o silício</i>					
<b>Experiência: a1</b>			<b>Experiência: a2</b>		
<b>Dopante</b>	<b>Concentração</b>	<b>Tipo</b>	<b>Dopante</b>	<b>Concentração</b>	<b>Tipo</b>
Fósforo (P)	5x10 <sup>14</sup> átomos/cm <sup>3</sup>	N	Arsênio (As)	5x10 <sup>14</sup> átomos/cm <sup>3</sup>	N
Boro (B)	1x10 <sup>13</sup> átomos/cm <sup>3</sup>	P	Alumínio (Al)	1x10 <sup>13</sup> átomos/cm <sup>3</sup>	P

Os valores da dopagem média estão descritos no trabalho de SWART (s.d.).

A faixa do espectro luminoso escolhido para a realização da experiência compreende o da luz branca proveniente do sol e transporta fótons com energia entre 1,77 eV a 3,1 eV

A luz se divide entre os comprimentos de onda da faixa espectral proporcionando uma amostragem de 300 comprimentos de ondas diferentes. Embora seja possível obter infinitos comprimentos de onda, por se tratar de uma grandeza física contínua e não discreta, para o cálculo do comportamento da célula, o software de modelagem computacional precisa somente dos valores amostrados do intervalo para determinar seus resultados.

Para cada comprimento de onda, uma fração do total de 1000 W/m<sup>2</sup> é atribuído a cada comprimento de onda, pois como descrito na norma da ABNT NBR 10899, a intensidade dividi-se de forma que cada componente contribui de uma determinada maneira para a formação do espectro total

Baseado no intervalo do espectro de análise, o programa determina, baseado no seu banco de dados interno, o valor de algumas constantes que serão necessários durante a análise. Um desses valores é o valor da constante de extinção  $k$ , que é utilizada para determinar o valor do coeficiente de absorção  $\alpha$ . A relação entre  $k$  e  $\alpha$  pode ser visto na Equação (3.7)

Assim é possível para o programa determinar a quantidade de fótons existentes após a luz ter percorrido certa distância no material.

Para a experiência **a1** os seguintes valores para o comportamento do potencial interno,

camada de depleção e corrente intrínseca são exibidos na Tabela 5.4.

*Tabela 5.4: Resultados iniciais da Experiência a1 (Silício dopado com Fósforo (lado N) e Boro (lado P))*

<b>Experiência a1 – Potencial Interno</b>			
Potencial Interno (V)	RDD lado N (nm)	RDD lado P (nm)	Corrente intrínseca (A)
$3,37 \times 10^{-3}$	$1,93 \times 10^{-3}$	$9,69 \times 10^{-2}$	$7,73 \times 10^{-11}$

Seguindo os mesmos parâmetros de análise, é verificado que para a experiência **a2** os seguintes valores para o comportamento do potencial interno, camada de depleção e corrente intrínseca foram encontrados e são mostrados na Tabela 5.5.

*Tabela 5.5: Resultados iniciais da Experiência a2 (Silício dopado com Arsênio (lado N) e Alumínio (lado P))*

<b>Experiência a2 – Potencial Interno</b>			
Potencial Interno (V)	RDD lado N (nm)	RDD lado P (nm)	Corrente intrínseca (A)
$3,26 \times 10^{-3}$	$1,96 \times 10^{-3}$	$9,84 \times 10^{-2}$	$2,58 \times 10^{-10}$

Como pode ser observado, a troca de ambos os dopantes resultou num aumento no valor da corrente intrínseca.

Como já fora mencionado, a corrente intrínseca prejudica a fotocorrente e o desempenho da célula solar como um todo, logo observando por esse prisma espera-se encontrar um resultado melhor no desempenho de uma célula solar construída com os elementos da experiência **a1** do que com os elementos da experiência **a2**.

Mas diversos outros aspectos devem ser analisados antes de se obter resultados conclusivos, como por exemplo, a geração de fotocorrente, o valor da tensão em circuito aberto, o valor do ponto de potência máxima e o fator de ganho e a força eletromotriz da célula.

Na Tabela 5.6 são mostrados os valores dos resultados da análise desses itens.

*Tabela 5.6: Resultados Finais da Experiência a1 (Silício dopado com Fósforo (lado N) e Boro (lado P))*

<b>Experiência a1 – Potência da célula</b>						
Potência (W)	Fotocorrente (A)	Corrente no ponto de Potência máxima (A)	Tensão em circuito aberto (V)	Tensão no ponto de Potência máxima (V)	Fator de ganho	Força Eletromotriz (V)
1,403	2,701 V	2,580	0,623	0,544	0,833	1,088

Da mesma forma, a Tabela 5.7 são mostrados os resultados encontrados para a

experiência **a2** baseada nos mesmos parâmetros da experiência **a1**.

*Tabela 5.7: Resultados Finais da Experiência a2 (Silício dopado com Arsênio (lado N) e Alumínio (lado P))*

<b>Experiência a2 – Potência da célula</b>						
Potência (W)	Fotocorrente (A)	Corrente no ponto de Potência máxima (A)	Tensão em circuito aberto (V)	Tensão no ponto de Potência máxima (V)	Fator de ganho	Força Eletromotriz (V)
1,323	2,701 V	2,570	0,529	0,515	0,826	1,030

Fazendo-se a comparação entre as Tabelas 5.6 e 5.7 pode-se observar que o Silício dopado com os elementos Fósforo (P) e Boro (B), experiência a1, possuem um melhor desempenho do que quando dopado com Arsênio (As) e Alumínio (Al), experiência a2.

Isso pode ser evidenciado ao se observar o gráfico comparativo da tensão pela corrente entre a experiência **a1** e **a2** presente na Figura 5.1.

No gráfico da Figura 5.1 é possível notar que embora a corrente gerada pela célula fotovoltaica seja a mesma, a tensão em circuito aberto é menor na experiência **a2**, o que vai proporcionar um menor ponto de potência máxima que será evidenciado no gráfico referente à potência em função da tensão presente na Figura 5.2.

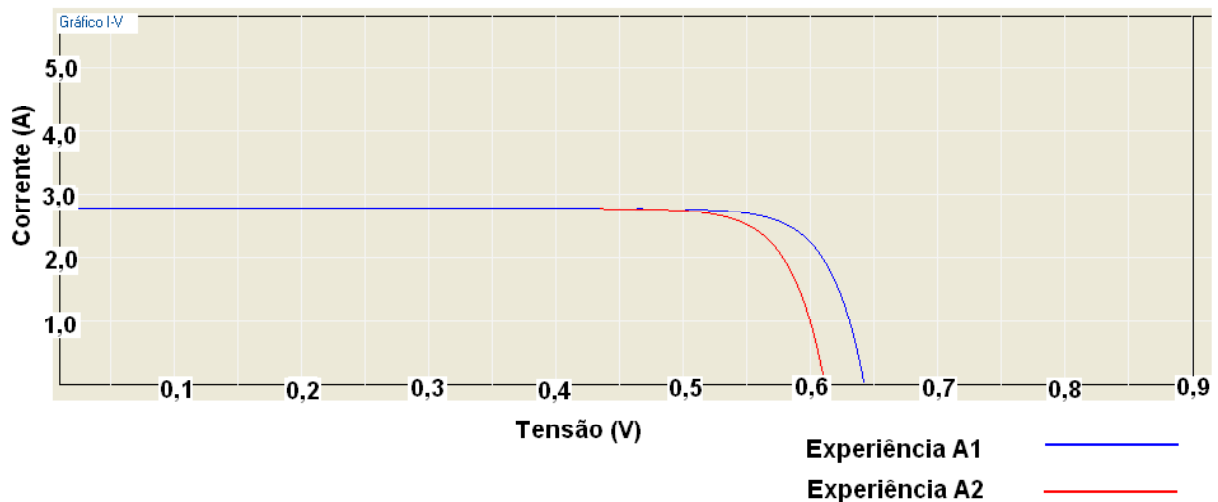


Figura 5.1: Gráfico comparativo da tensão pela corrente da Experiência a1 versus a Experiência a2

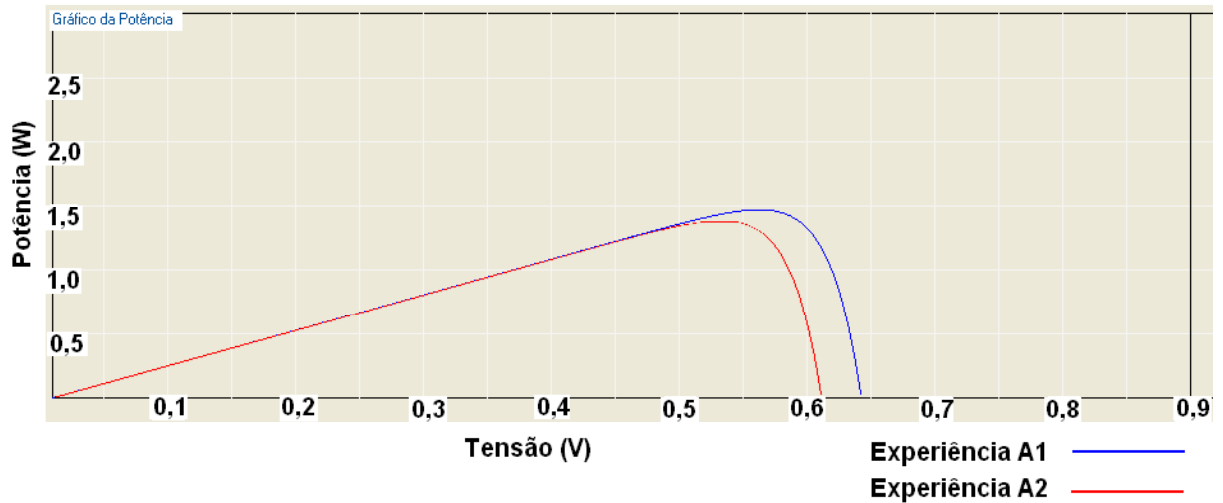


Figura 5.2: Gráfico comparativo da potência pela tensão da Experiência a1 versus a Experiência a2

Fazendo-se um comparativo entre as experiências **a1** e **a2**, pode-se observar que a experiência **a1** possui melhores resultados que a experiência **a2**, pois como indicado na Tabela 5.6 e ratificado pelos gráficos apresentados nas figuras 5.1 e 5.2, possui respectivamente os maiores pontos de potência, corrente na potência máxima, tensão em potência máxima e menor corrente reversa de saturação.

A Tabela 5.8 são mostradas as configurações do painel solar. Essa configuração será utilizada para verificar o comportamento do mesmo quando confeccionado com células fotovoltaicas da Experiência **a1** e **a2**.

Tabela 5.8: Configuração do Painel Solar

<i>Parâmetros do Painel</i>					
Células em série	Ligações em paralelo	Horas de insolação diária	Conector das células	Comprimento do condutor	Espessura do condutor
36	2	5	Alumínio (Al)	0,01 m	1,5 mm

Um painel solar construído sob a configuração da Tabela 5.8 e constituído com células da Experiência **a1** geraria os resultados presentes na Tabela 5.9.

*Tabela 5.9: Resultado do painel solar construído com células fotovoltaicas utilizadas na Experiência a1*

<b>Experiência a1 - Painel Solar</b>			
Tensão Máxima (V)	Corrente Máxima (A)	Potência Máxima (W)	Corrente Ah/Dia (A)
19,566	5,160	100,964	25,800

Um painel solar construído sob a configuração da Tabela 5.8 e constituído com células da Experiência **a2** geraria os resultados presentes na Tabela 5.10.

*Tabela 5.10: Resultado do painel solar construído com células fotovoltaicas utilizadas na Experiência a2*

<b>Experiência a2 – Painel Solar</b>			
Tensão Máxima (V)	Corrente Máxima (A)	Potência Máxima (W)	Corrente Ah/Dia (A)
18,522	5,140	95,216	25,703

Assim um painel solar que seja construído com o semicondutor a base de silício e dopado com elementos analisados pela experiência **a2**, teria como resultado na confecção de um painel solar uma eficiência de potência de 94,30% em relação a um painel construído com os dopantes da experiência **a1**.

Baseados nesses resultados serão utilizados nos experimentos da seção 5.3 a configuração da célula da experiência **a1**.

## 5.2.2 Experiência sobre os dopantes de Germânio (b1 e b2)

Como mostrado na Tabela 5.1 da seção 5.2 serão realizadas duas experiências comparativas com os dopantes de germânio.

Os parâmetros utilizados para a realização da experiência são os mesmos utilizados nas experiências **a1** e **a2** e estão destacados na Tabela 5.2 da seção 5.2.1. A Tabela de parâmetros do sistema também será a mesma utilizada nas experiências anteriores, assim serão utilizados os parâmetros comuns às experiências **b1** e **b2**, para que seja possível determinar os melhores dopantes para o Germânio.

Na Tabela 5.11 são mostrados os valores das concentrações utilizadas para cada tipo de dopante no Germânio.

Tabela 5.11: Parâmetros de dopagem das experiências

<i>Parâmetros de dopagem - Germânio</i>					
Experiência: b1			Experiência: b2		
Dopante	Concentração	Tipo	Dopante	Concentração	Tipo
Fósforo (P)	$5 \times 10^{14}$ átomos/cm <sup>3</sup>	N	Arsênio (As)	$5 \times 10^{14}$ átomos/cm <sup>3</sup>	N
Boro (B)	$1 \times 10^{13}$ átomos/cm <sup>3</sup>	P	Alumínio (Al)	$1 \times 10^{13}$ átomos/cm <sup>3</sup>	P

Para a Experiência **b1** os seguintes valores para o comportamento do potencial interno, camada de depleção e corrente intrínseca foram encontrados e exibidos na Tabela 5.12.

Tabela 5.12: Resultados iniciais da Experiência b1 (Germânio dopado com Fósforo (lado N) e Boro (lado P))

<i>Experiência b1 – Potencial Interno</i>			
Potencial Interno (V)	RDD lado N (nm)	RDD lado P (nm)	Corrente intrínseca (A)
$2,15 \times 10^{-3}$	$2,42 \times 10^{-3}$	0,121	$1,78 \times 10^{-4}$

Da mesma forma para a experiência **b2** os seguintes valores para o comportamento do potencial interno, camada de depleção e corrente intrínseca foram encontrados e exibidos na Tabela 5.13.

Tabela 5.13: Resultados iniciais da Experiência b2 (Germânio dopado com Arsênio (lado N) e Alumínio (lado P))

<i>Experiência b2 – Potencial Interno</i>			
Potencial Interno (V)	RDD lado N (nm)	RDD lado P (nm)	Corrente intrínseca (A)
$2,14 \times 10^{-3}$	$2,42 \times 10^{-3}$	0,121	$1,84 \times 10^{-4}$

Como pode ser observada, a troca de ambos os dopantes resultou num aumento insignificante no valor da corrente intrínseca, estando os dois casos praticamente com o mesmo valor.

Mas diversos outros aspectos devem ser analisados, como por exemplo, a geração de fotocorrente, o valor da tensão em circuito aberto, o valor do ponto de potência máxima e o fator de ganho e a força eletromotriz da célula.

Na Tabela 5.14 são mostrados os valores dos resultados da análise desses dos demais itens para a experiência **b1**

Tabela 5.14: Resultados Finais da Experiência b1(Germânio dopado com Fósforo (lado N) e Boro (lado P))

<i>Experiência b1 – Potência da célula</i>						
Potência (W)	Fotocorrente (A)	Corrente no ponto de Potência máxima (A)	Tensão em circuito aberto (V)	Tensão no ponto de Potência máxima (V)	Fator de ganho	Força Eletromotriz (V)
0,841	4,623	4,130	0,261	0,205	0,696	0,410

Da mesma forma, a Tabela 5.15 são mostrados os resultados encontrados para a Experiência **b2** baseada nos mesmo parâmetros da experiência **b1**.

Tabela 5.15: Resultados Finais da Experiência b2 (Germânio dopado com Arsênio (lado N) e Alumínio (lado P))

<i>Experiência b2 – Potência da célula</i>						
Potência (W)	Fotocorrente (A)	Corrente no ponto de Potência máxima (A)	Tensão em circuito aberto (V)	Tensão no ponto de Potência máxima (V)	Fator de ganho	Força Eletromotriz (V)
0,837	4,623	4,103	0,260	0,204	0,695	0,408

Já no caso da comparação entra as Tabelas 5.14 e 5.15 das experiências **b1** e **b2** respectivamente, pode-se observar que as experiências apresentam resultados semelhantes, ou seja, quando o germânio é utilizado como semiconductor base, trabalhando sob os parâmetros para este cenário, a troca desses dopantes praticamente não influenciam nos resultados obtidos.

Isso pode ser evidenciado ao se observar o gráfico comparativo da tensão pela corrente da Experiência **b1** versus a Experiência **b2** evidenciado na Figura 5.3.

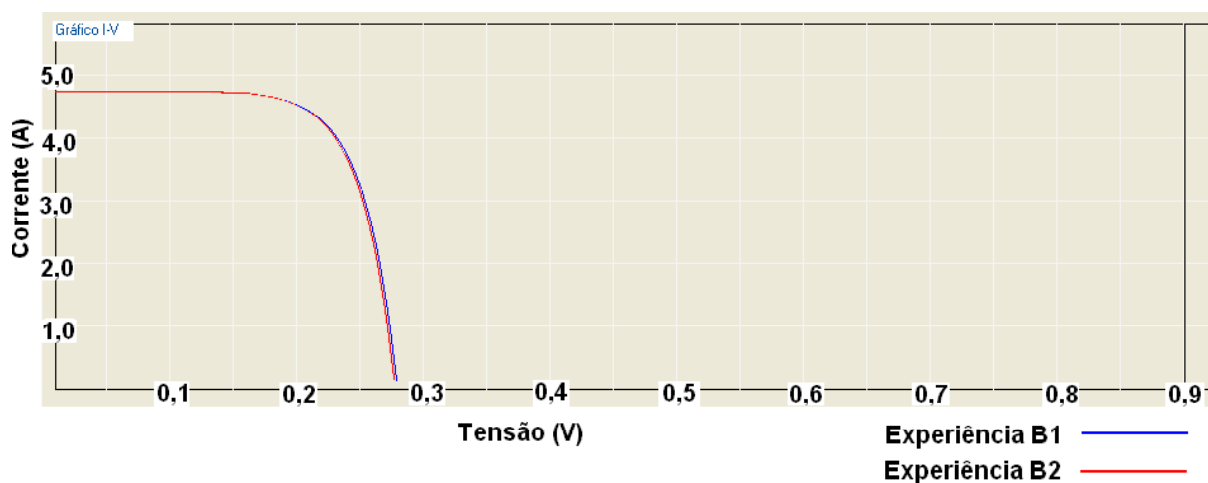


Figura 5.3: Gráfico comparativo da tensão pela corrente da Experiência b1 versus a Experiência b2

Da mesma forma, ao ser observado o gráfico que compara a potência versus a tensão das experiências **b1** e **b2**, presente na Figura 5.4, é possível observar que as curvas são praticamente idênticas, indicando comportamento semelhante de operação das células fotovoltaicas, embora sejam utilizados dopantes distintos.

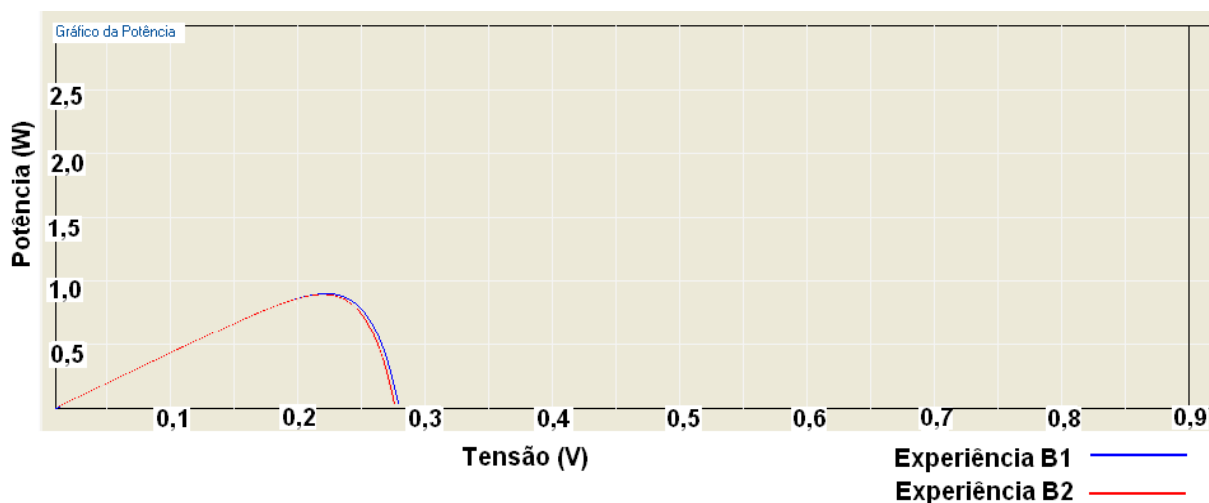


Figura 5.4: Gráfico comparativo da potência pela tensão entre as Experiências b1 e b2

Fazendo-se um comparativo entre as experiências **b1** e **b2**, pode-se observar que tanto a Experiência **b1** quanto a Experiência **b2** possuem resultados bem semelhantes.

Sob estas condições caso fosse fabricado um painel solar com as características da Tabela 5.8, utilizando as células das experiências **b1** e **b2**, submetidos a uma insolação diária de 5h e trabalhando no ponto de potência máxima, seriam obtidas as seguintes respostas.

Na Tabela 5.16 são apresentados os resultados para o painel solar constituído de células da Experiência **b1**

Tabela 5.16: Resultado do painel confeccionado com células da Experiência b1

<i>Experiência b1 – Painel Solar</i>			
Tensão Máxima (V)	Corrente Máxima (A)	Potência Máxima (W)	Corrente Ah/Dia (A)
7,351	8,206	60,331	41,032

Na Tabela 5.17 são apresentados os resultados para o painel solar constituído de células da Experiência **b2**



Tabela 5.17: Resultado do painel solar da Experiência b2

<i>Experiência b2 – Painel Solar</i>			
Tensão Máxima (V)	Corrente Máxima (A)	Potência Máxima (W)	Corrente Ah/Dia (A)
7,315	8,206	60,036	41,033

Assim um painel solar que seja construído com o semicondutor a base de germânio e dopado com elementos analisados pela Experiência **b1**, teria como resultado na confecção de um painel solar uma eficiência de potência de praticamente 99,51% em relação a um painel construído com os dopantes da Experiência **b2**.

### 5.3 Alteração da Concentração dos Dopantes

Esse tópico vai ilustrar, a partir da experiência **a1**, como a alteração da concentração dos dopantes influencia no comportamento da célula solar, principalmente suas características de tensão, potência e corrente reversa de saturação.

Para que seja demonstrada essa alteração nos resultados baseada na alteração da concentração dos dopantes, será realizado um experimento denominado **a1-a**.

Tabela 5.18: Concentração dos dopantes

<i>Concentração de Dopantes</i>		
Experiência a1-a		
	Dopantes	Concentração
Tipo P	Boro (B)	$1 \times 10^{13}$ átomos/cm <sup>2</sup>
Tipo N	Fósforo (P)	$1 \times 10^{13}$ átomos/cm <sup>2</sup>

Os parâmetros externos do sistema utilizados para a realização dos experimentos estão indicados na Tabela 5.2.

Os resultados da experiência **a1** serão utilizados também como parâmetros de comparação entre os resultados da experiência **a1-a**.

Na Tabela 5.19 serão mostrados as comparações dos resultados do potencial interno entre as experiências **a1** e **a1-a**.

Tabela 5.19: Resultados iniciais comparativos entre as experiências a1 e a1-a.

<b>Comparação a1 e a1-a – Potencial interno</b>				
Experiência	Potencial Interno (V)	RDD lado N (nm)	RDD lado P (nm)	Corrente intrínseca (A)
a1	$3,37 \times 10^{-3}$	$1,93 \times 10^{-3}$	$9,69 \times 10^{-2}$	$7,73 \times 10^{-11}$
a1-a	$3,03 \times 10^{-3}$	$7,29 \times 10^{-2}$	$7,29 \times 10^{-2}$	$1,17 \times 10^{-10}$

Como pode ser observada, a mudança na concentração dos dopantes tanto no semiconductor tipo N quanto no semiconductor tipo P, resulta na alteração do valor do potencial interno, comprimento da camada de depleção tanto do lado N quanto no lado P e também no valor da corrente intrínseca.

Os gráficos que apresentam a comparação entre as experiências **a1** e **a1-a** em termos de tensão e corrente são apresentados na Figura 5.5.

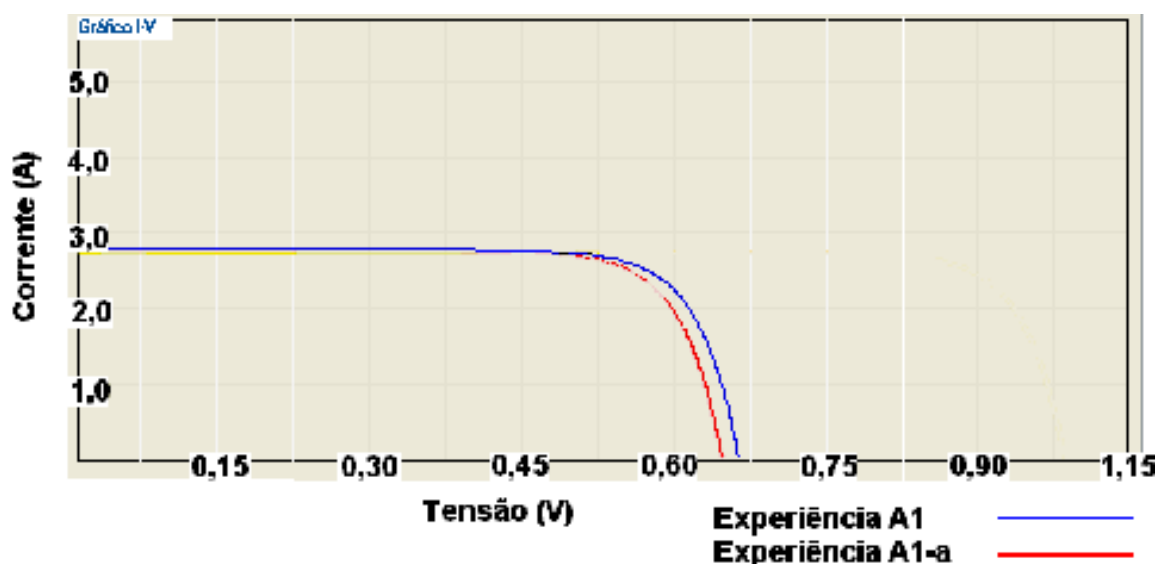


Figura 5.5: Gráfico comparativo entre as experiências a1, a1-a e a1-b em termos da tensão pela corrente.

A Tabela 5.20 permite a comparação da potência obtida pela célula entre as experiências **a1** e **a1-a**.

Tabela 5.20: Dados comparativos entre as experiências a1, a1-a e a1-b

<b>Comparação a1, a1-a e a1-b - Potência</b>							
Experiência	Potência (W)	Fotocorrente (A)	Corrente no ponto de Potência máxima (A)	Tensão em circuito aberto (V)	Tensão no ponto de Potência máxima (V)	Fator de ganho	Força Eletromotriz (V)
a1	1,403	2,701	2,580	0,623	0,544	0,833	1,088
a1-a	1,375	2,701	2,576	0,613	0,534	0,830	1,068

Da mesma forma, pode-se observar que a concentração de dopantes afeta a potência final da célula, embora a fotocorrente fique praticamente no mesmo patamar. Isso se explica pelo fato do principal item afetado pela modificação na concentração do dopante ser a tensão produzida pela célula.

Com o aumento da concentração dos portadores, há um aumento no valor do ponto de tensão em circuito aberto, o que provoca um maior ponto de tensão.

Na Figura 5.6 é apresentado o gráfico comparativo entre as curvas de potência das experiências **a1** e **a1-a**.

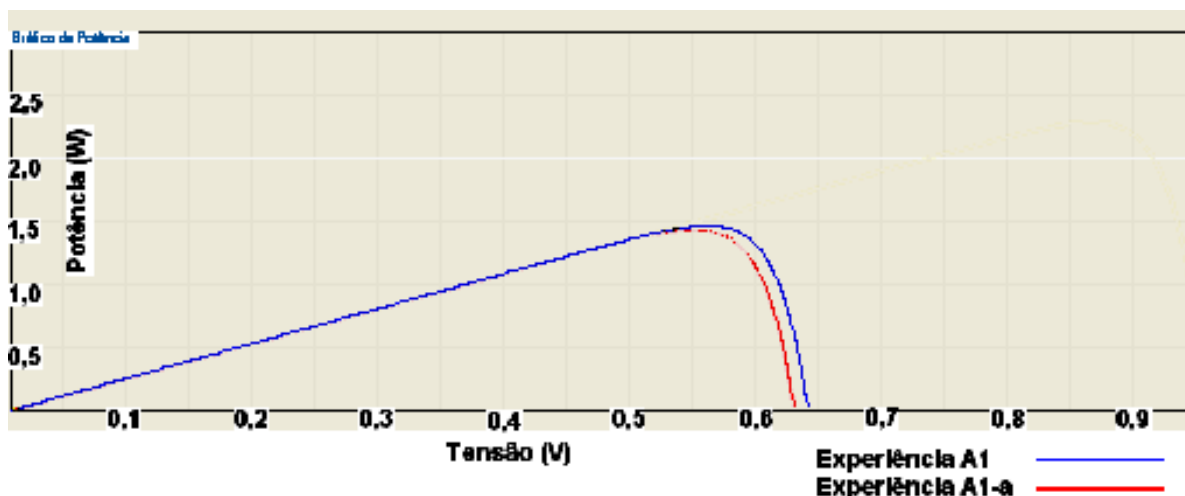


Figura 5.6: Gráfico comparativo entre as curvas de potência das Experiências a1 e a1-a.

Na Tabela 5.21 são mostrados os resultados comparativos entre painéis solares confeccionados com as células das experiências **a1** e **a1-a**.

Tabela 5.21: Tabela comparativa entre painéis solares confeccionados com células das experiências a1, a1-a.

<i>Comparação a1, a1-a e a1-b – Painel Solar</i>				
Experiência	Tensão Máxima (V)	Corrente Máxima (A)	Potência Máxima (W)	Corrente Ah/Dia
a1	19,566	5,160	100,964	25,800
a1-a	19,206	5,153	98,970	25,765

Da mesma forma, o comportamento de um painel solar construído com os materiais utilizados na realização das experiências **a1** e **a1-a**, seria aquele indicado na Tabela 5.21.

Pode ser observado nessa tabela que com o acréscimo da concentração de dopantes, a potência máxima gerada aumenta, assim como também há um aumento no valor da tensão máxima, embora que a corrente máxima e a corrente diária fornecida pelo painel estejam praticamente constantes.

## 5.4 Análise da influência da iluminação

Outro ponto de grande importância que o programa de análise computacional do comportamento de células fotovoltaicas contempla é a verificação do funcionamento da mesma sob diferentes situações de iluminação.

Para comprovar essa influência da iluminação, dois novos experimentos serão realizados de forma a ser possível fazer uma comparação dos resultados de resposta das mesmas.

Na Tabela 5.22 são mostrados os valores da intensidade luminosa simulada nas experiências.

*Tabela 5.22: Intensidade luminosa*

<b><i>Incidência Luminosa a1, a1-c e a1-d</i></b>		
a1	a1-c	a1-d
1000 W/m <sup>2</sup>	714,3 W/m <sup>2</sup>	357,2 W/m <sup>2</sup>

Observando os dados da Tabela 5.23, pode-se deduzir que a intensidade luminosa não afeta o comportamento da célula no que diz respeito ao potencial interno, largura da camada de depleção e corrente intrínseca.

Isso se deve principalmente pelo fato desses parâmetros ser afetados principalmente pela dopagem, tipo de material utilizado e temperatura da célula solar.

*Tabela 5.23: Resultados iniciais da comparação entre as experiências a1, a1-c e a1-d*

<b><i>Comparação a1, a1-c e a1-d – Potencial interno</i></b>				
Experiência	Potencial Interno (V)	RDD lado N (nm)	RDD lado P (nm)	Corrente intrínseca (A)
a1	3,37x10 <sup>-3</sup>	1,93x10 <sup>-3</sup>	9,69x10 <sup>-2</sup>	7,73x10 <sup>-11</sup>
a1-c	3,37x10 <sup>-3</sup>	1,93x10 <sup>-3</sup>	9,69x10 <sup>-2</sup>	7,73x10 <sup>-11</sup>
a1-d	3,37x10 <sup>-3</sup>	1,93x10 <sup>-3</sup>	9,69x10 <sup>-2</sup>	7,73x10 <sup>-11</sup>

Porém isso não implica que a célula vai ter o mesmo padrão de resposta independente da iluminação.

Pelo contrário, fatores como a fotocorrente e a potência são amplamente influenciados pela intensidade luminosa, enquanto que a tensão de operação da célula é pouca afetada por

esse item. Isso pode ser verificado pelos dados da Tabela 5.24.

Tabela 5.24: Resultados finais da comparação das experiências a1, a1-c e a1-d

<b>Comparação a1, a1-c e a1-d - Potência</b>							
Experiência	Potência (W)	Fotocorrente (A)	Corrente no ponto de Potência máxima (A)	Tensão em circuito aberto (V)	Tensão no ponto de Potência máxima (V)	Fator de ganho	Força Eletromotriz (V)
a1	1,403	2,701	2,580	0,623	0,544	0,833	1,088
a1-c	0,986	1,929	1,840	0,615	0,536	0,831	1,072
a1-d	0,477	0,964	0,919	0,601	0,519	0,827	1,038

O gráfico da Figura 5.7 faz uma comparação entre as características de fotocorrente e tensão da célula solar sob diferentes condições de iluminação e que estão apresentadas na Tabela 5.25.

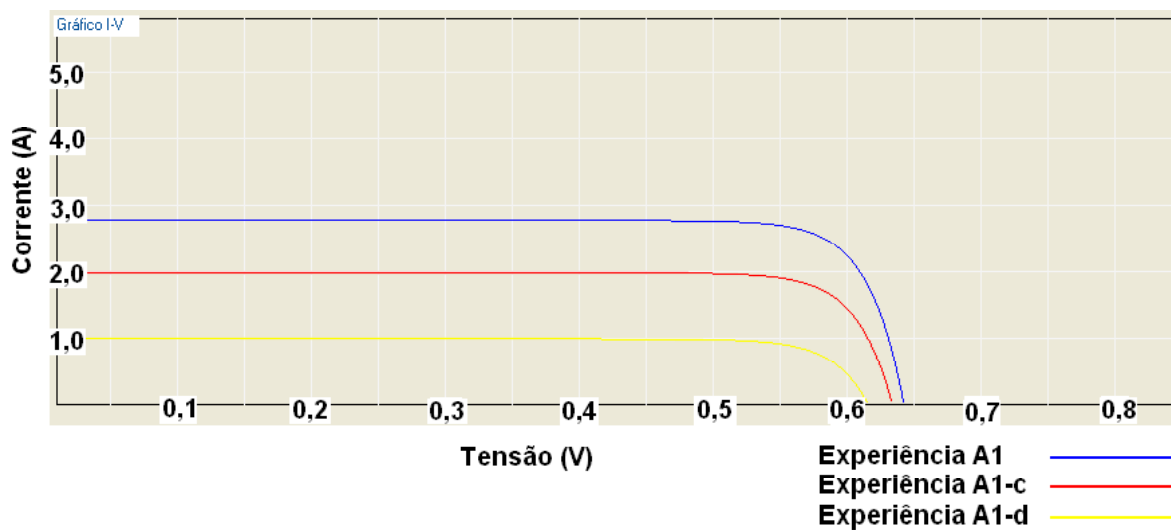


Figura 5.7: Gráfico comparativo das características de tensão e corrente das Experiências a1, a1-c e a1-d

O gráfico da Figura 5.8 apresenta as curvas características da potência na qual é feita uma comparação entre as Experiências **a1**, **a1-c** e **a1-d**.

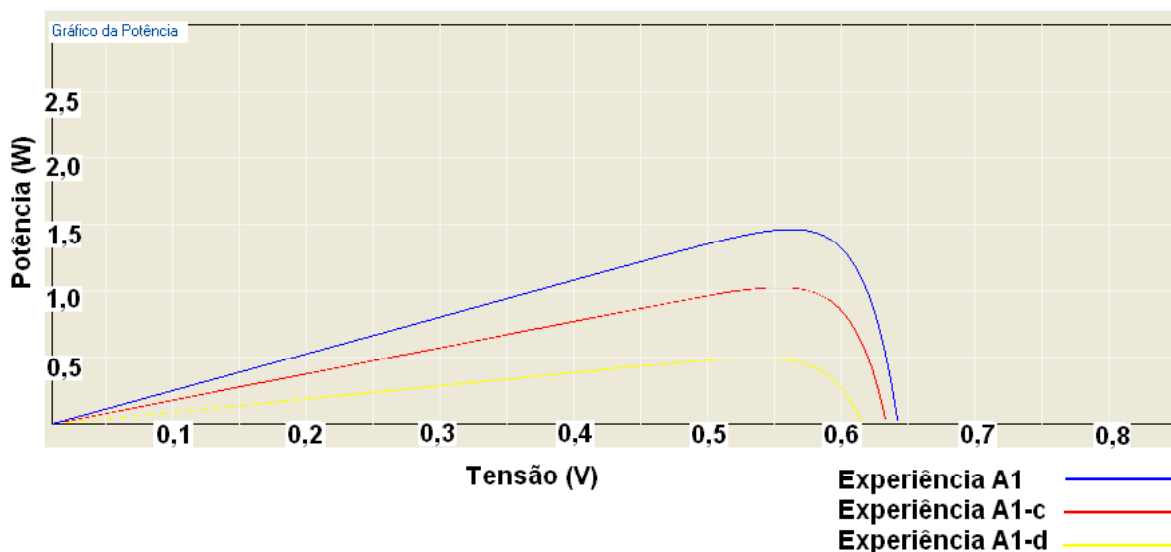


Figura 5.8: Gráfico comparativo das curvas características de potência entre as Experiências a1, a1-c e a1-d

Assim, o comportamento de um painel solar construído de acordo com os dados utilizados nas experiências **a1**, **a1-c** e **a1-d** sofre diretamente os impactos da mudança da iluminação sob suas constituintes, como é mostrado na Tabela 5.25.

Tabela 5.25: Dados dos painéis solares submetidos a diferentes situações de iluminação

<i>Comparação a1, a1-c e a1-d – Painel Solar</i>				
Experiência	Tensão Máxima (V)	Corrente Máxima (A)	Potência Máxima (W)	Corrente Ah/Dia
a1	19,566	5,160	100,964	25,800
a1-c	19,238	3,681	70,991	18,407
a1-d	18,667	1,838	34,332	9,190

Pela observação da Tabela 5.26, pode-se concluir que a intensidade luminosa influencia de maneira profunda o comportamento tanto das células fotovoltaicas quanto do painel solar confeccionado a partir das mesmas. Pode-se observar que a redução na iluminação é proporcional a diminuição da potência máxima produzida pelo painel solar.

Na experiência **a1**, a intensidade luminosa era de  $1000 \text{ W/m}^2$  e diminuiu na experiência **a1-c** para  $714,3 \text{ W/m}^2$ , ou seja, uma redução de 28,57% na luminosidade. Pelos resultados obtidos e apresentados na Tabela 5.26, a uma redução na potência máxima de 100,964 W com células da experiência **a1** para 70,991 W da experiência **a1-c**, o que significa uma redução de

29,68%.

Da mesma forma, comparando-se as experiências **a1** e **a1-d**, verifica-se uma redução na intensidade luminosa de 64,28%, pois a intensidade na experiência **a1-d** é de 357,2 W/m<sup>2</sup>. Em termos de potência, a experiência **a1-d** produz no módulo 34,332 W, o que representa uma redução de 65,99% em comparação com o cenário da experiência **a1**.

## 5.5 Influência da Temperatura no Desempenho da Célula Solar

O funcionamento das células solares, como já foi mencionado no Capítulo III, sofre uma grande variação no seu rendimento de acordo com os fatores externos a qual está submetida, ou seja, uma célula solar ou um painel fotovoltaico vai ter comportamento diferente dependendo do local de sua utilização.

Essa dependência de fatores do meio ambiente dificulta ainda mais a precisão de resultados a serem obtidos e estimados sobre o comportamento das células fotovoltaicas.

Um dos principais fatores na qual exerce uma grande influência sobre o comportamento das células fotovoltaicas é a temperatura. Quanto maior a temperatura, maior é a agitação das partículas no material, o que favorece a recombinação do par elétron-lacuna e dificulta a geração da fotocorrente, como pode ser verificado na literatura como na obra de MESSENGER (2000).

Para evidenciar esse fato foram realizadas três experiências com a mesma configuração, mas submetidas a diferentes temperaturas como pode ser observado na Tabela 5.26. Todas as experiências são baseadas na Experiência **a1**, que também vai servir de referência para os resultados encontrados.

*Tabela 5.26: Temperatura das experiências analisadas.*

<i>Temperatura a1, a1-e, a1-f e a1-g</i>			
a1	a1-e	a1-f	a1-g
25 °C	0 °C	30 °C	35 °C

Na Tabela 5.27 são mostrados os resultados iniciais obtidos pela simulação das experiências e pode ser observado que os resultados obtidos são dependentes da temperatura. Por exemplo, o Potencial Interno é inversamente proporcional a temperatura.

De forma contrária, o comprimento da camada depleção tanto para o lado N ou P é diretamente proporcional à temperatura, assim como também a Corrente Intrínseca da célula

fotovoltaica.

*Tabela 5.27: Resultados iniciais da análise da temperatura*

<b>Comparação a1, a1-e, a1-f e a1-g – Potencial interno</b>					
Experiência	Tempo. (°C)	Potencial Interno (V)	RDD lado N (nm)	RDD lado P (nm)	Corrente Intrínseca (A)
a1	25	$3,37 \times 10^{-3}$	$1,93 \times 10^{-3}$	$9,69 \times 10^{-2}$	$7,73 \times 10^{-11}$
a1-e	0	$3,71 \times 10^{-3}$	$1,76 \times 10^{-3}$	$8,84 \times 10^{-2}$	$1,52 \times 10^{-12}$
a1-f	30	$3,31 \times 10^{-3}$	$1,97 \times 10^{-3}$	$9,86 \times 10^{-2}$	$1,57 \times 10^{-10}$
a1-g	35	$3,25 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-1}$	$3,13 \times 10^{-10}$

Da mesma forma, os resultados finais da análise da variação da temperatura mostrados na Tabela 5.28 demonstram que a potência é inversamente proporcional a temperatura.

*Tabela 5.28: Resultados finais da análise da variação da temperatura*

<b>Comparação a1, a1-e, a1-f e a1-g - Potência</b>							
Exp.	Potência (W)	Fotocorrente (A)	Corrente no ponto de Potência máxima (A)	Tensão em circuito aberto (V)	Tensão no ponto de Potência máxima (V)	Fator de ganho	Força Eletromotriz (V)
a1	1,403	2,701	2,580	0,623	0,544	0,833	1,088
a1-e	1,525	2,701	2,598	0,663	0,586	0,850	1,173
a1-f	1,379	2,701	2,573	0,615	0,536	0,829	1,072
a1-g	1,354	2,701	2,571	0,607	0,527	0,825	1,054

O gráfico presente na Figura 5.9 apresenta a comparação entre as quatro experiências onde se pode observar que a experiência **a1-e** apresenta maior valor para a tensão em circuito aberto.



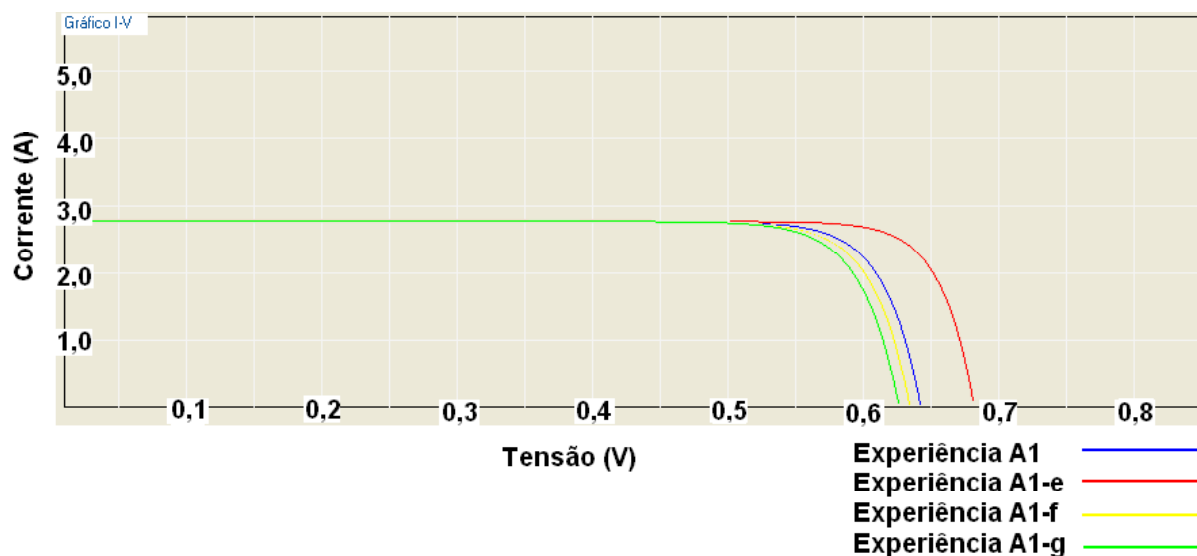


Figura 5.9: Gráfico comparativo das características de tensão e corrente entre as experiências a1, a1-e, a1-f, a1-g.

Pelo gráfico pode-se observar que a corrente não se modifica com a influência da temperatura, porém a tensão é afetada. Quanto menor for a temperatura maior será o ponto de tensão em circuito aberto.

No gráfico da Figura 5.10 é apresentado um comparativo entre as curvas de potência das células fotovoltaicas sob a influência de diferentes temperaturas como especificado na Tabela 5.26.

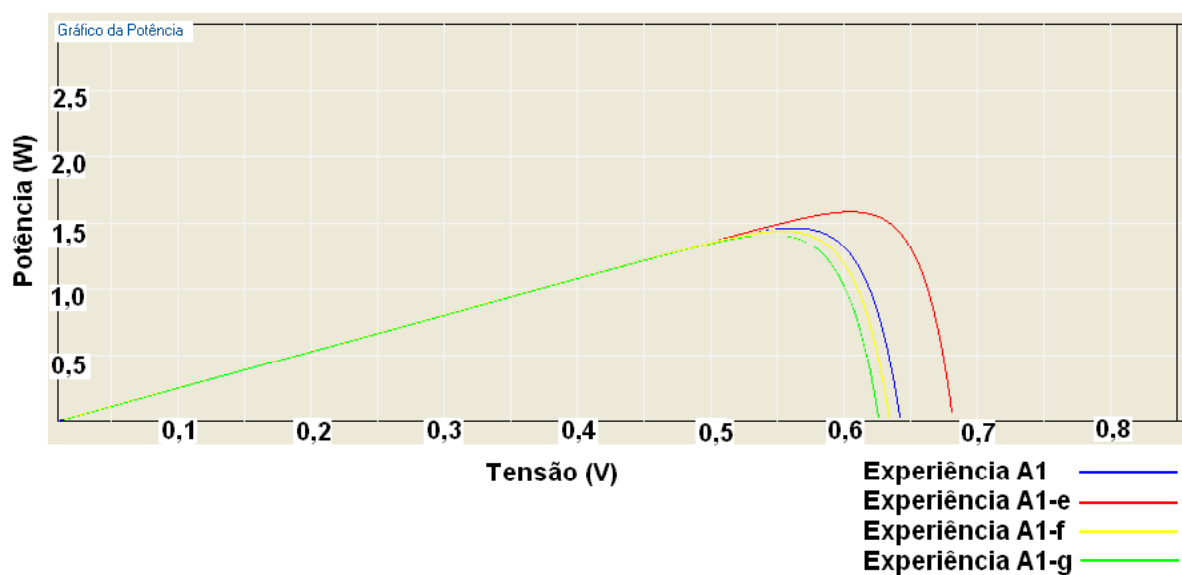


Figura 5.10: Gráfico comparativo das curvas de potência entre as experiências a1, a1-e, a1-f e a1-g

Pode-se observar pelo gráfico presente na Figura 5.10, que devido ao fato da experiência **a1-e** estar submetida a uma menor temperatura, ela possui uma maior potência.

Da mesma forma, se for simulado a construção de um painel fotovoltaico baseado nos parâmetros da Tabela 5.8, sob as temperaturas indicadas pela Tabela 5.26, os resultados obtidos seriam apresentados na tabela 5.29.

*Tabela 5.29: Resultado do painel solar obtido a partir de diversas temperaturas*

<b>Comparação a1, a1-e, a1-f e a1-g – Painel Solar</b>				
Experiência	Tensão Máxima (V)	Corrente Máxima (A)	Potência Máxima (W)	Corrente Ah/Dia
a1	19,566	5,160	100,964	25,800
a1-e	21,114	5,197	109,730	25,985
a1-f	19,278	5,146	99,213	25,731
a1-g	18,954	5,142	97,464	25,710

Pode-se observa a partir da Tabela 5.30 que a potência é maior a menores temperaturas, sendo evidenciado que o melhor desempenho se dá na temperatura de 0 °C.

Nas temperaturas superiores observa-se que o desempenho do painel cai em termos de potência máxima onde a 25° C a potência máxima é de 92,28% da potência máxima a 0° C.

A 30° C a potência máxima é de 90,67% da potência máxima a 0° C, e a temperatura de 35° C a potência máxima é de 89,12% da potência máxima a 0° C.

Aqui se evidencia a necessidade de um sistema computacional para a modelagem das características de células fotovoltaicas, pois existiria uma grande dificuldade para cientistas e pesquisadores de encontrar os valores de resposta dos painéis e células solares para uma temperatura de 0° C.

## **5.6 Verificação dos Resultados Experimentais**

Para a comprovação do perfeito funcionamento do software de modelagem computacional, assim como a verificação da veracidade dos resultados obtidos, foi necessário realizar algumas das experiências em materiais reais e comparar o comportamento do mesmo, assim como também levantar na literatura os resultados típicos para os parâmetros de análise.

Como existem diversos fatores que influenciam na modelagem computacional de células fotovoltaicas, e somente algumas podem ser controladas no uso de protótipos reais,

muitos dos resultados obtidos são baseados nos valores típicos fornecidos por fabricantes.

Inicialmente será apresentada a localização da realização dos testes de verificação dos resultados, assim como também a apresentação dos materiais utilizados e finalmente a comparação entre os resultados obtidos entre leitura do sistema e os resultados fornecidos pelo software de modelagem computacional de células fotovoltaicas baseado em suas propriedades físicas.

### 5.6.1 Localização do Equipamento

Para a verificação dos resultados obtidos pelo software de modelagem computacional será utilizado um sistema fotovoltaico presente no Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET) de Urutaí, localizado na cidade de Urutaí, Goiás.

O sistema solar é composto de três painéis solares e suas características são apresentadas na Tabela 5.30.

*Tabela 5.30: Características de cada painel solar utilizado*

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
Potência máxima nominal	40 W
Potência máxima real	40,67 w
Tensão no ponto de potência máxima	16,6 V
Corrente no ponto de potência máxima	2,45
Tensão em circuito aberto	20,5 v
Corrente de curto-circuito	2,8
Tipo de material	Silício monocristalino
Número de células	36
Área da célula	100 Cm <sup>2</sup>

Na Figura 5.11 é apresentada a foto de um dos painéis solares utilizados para a verificação dos resultados obtidos.



Figura 5.11: Foto do painel solar utilizado nos testes.

Assim como é importante se conhecer o material utilizado para conhecer os resultados obtidos e fazer a comparação com o software de modelagem, é de suma importância conhecer o cenário de atuação do mesmo, condições de insolação, localização entre outros fatores.

Esse painel solar está localizado nas seguintes coordenadas: 17° 28' 55" Sul e 48° 12' 46" Oeste, de acordo com as medidas do aparelho de GPS (Global Positioning System – Sistema de Posicionamento Global) utilizado para aferição da posição.

Outro fator de suma importância para se obter os resultados de forma precisa é conhecer as condições climáticas do local onde se apresenta todo o experimento realizado, pois os fatores externos são os que causam os maiores impactos no comportamento de resposta do sistema solar.

Assim, baseado nos dados da obra de LOBATO et. al. (2002) intitulado “*Atlas Climatológico do Estado de Goiás*”, são obtidos os dados referentes às condições climáticas da localidade em questão.

A importância do levantamento de tais dados se revela de suma importância, pois de acordo com a obra de LOBATO et. al. (2002)

*“O conhecimento da distribuição temporal e espacial dos principais elementos climáticos de uma região é de considerável relevância, pois permite uma melhor avaliação das disponibilidades climáticas para os mais variados fins a aplicações.”*

Para que os dados climáticos tenham relevância para a pesquisa científica, eles não

podem ser tomados de forma pontual, mas sim observados durante o tempo de forma a se obter um banco de dados histórico pelo período mínimo de 10 anos.

Assim o Atlas se mostra de fundamental importância, pois sua constituição se baseia nos dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que possui os valores médios diários de 30 anos relativos aos períodos de 1961 a 1990.

No Atlas São apresentados fatores como a temperatura, insolação, nebulosidade, que podem influenciar de sobremaneira os resultados da célula fotovoltaica.

### 5.6.2 Temperatura, Insolação e Nebulosidade

A temperatura é um dos fatores que mais influencia o desempenho das células fotovoltaicas, e pode-se considerar três tipos de temperatura importante para a análise: A temperatura máxima do ar, a temperatura mínima do ar e a temperatura média do ar.

Tanto a temperatura máxima, quanto temperatura mínima são obtidos de aferições diárias realizadas por aparelhos próprios para esse tipo de medidas e armazenados num banco de dados históricos.

Já a medida da temperatura média é obtida pela resolução da Equação (5.1).

$$T_m = \frac{(T_9 + 2.T_{21} + T_{\max} + T_{\min})}{5} \quad (5.1)$$

Onde:

$T_m$  : Temperatura média do ar em °C

$T_9$  : Temperatura do ar às 9 horas em °C

$T_{21}$  : Temperatura do ar às 21 horas em °C

$T_{\max}$  : Temperatura máxima do ar em °C

$T_{\min}$  : Temperatura mínima do ar em °C

Com esse valor apurado pode-se prever o comportamento da temperatura durante um período de tempo. O mapa da temperatura média anual para o estado de Goiás é mostrado no mapa da Figura 5.12.