

SERGIO BENJAMIM ROCHA FILHO

Engenharia Elétrica e a Modelagem Matemática: Célula Fotovoltaica e Painéis Solares

Sergio Benjamim Rocha Filho

Engenharia Elétrica e a Modelagem Matemática: Célula Fotovoltaica e Painéis Solares

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso da Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Fernando Luiz de C. Carvalho

Guaratinguetá
2017

R672e	<p>Rocha Filho, Sergio Benjamim</p> <p>Engenharia elétrica e a modelagem matemática / Sergio Benjamin Rocha Filho – Guaratinguetá, 2017.</p> <p>64 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 56</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz de C. Carvalho</p> <p>1. Células fotoelétricas. 2. Modelos matemáticos. 3. Energia – fontes alternativas. I. Título</p> <p>CDU 621.383.5</p>
-------	---

SERGIO BENJAMIM ROCHA FILHO

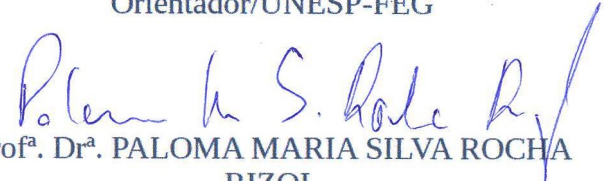
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

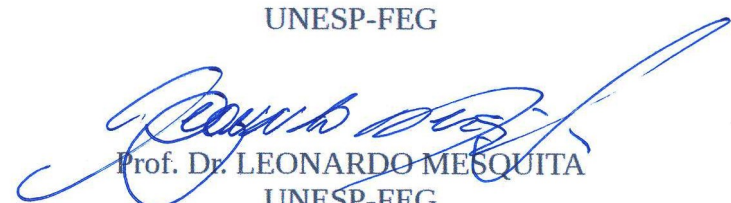
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. FERNANDO LUIZ DE C. CARVALHO
Orientador/UNESP-FEG


Prof.ª. Dr.ª. PALOMA MARIA SILVA ROCHA
RIZOL
UNESP-FEG


Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
UNESP-FEG

Julho de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio e suporte dado à realização do curso de Engenharia Elétrica desde o início em Guaratinguetá. Agradeço ao Profº Fernando Luiz de C. Carvalho pelo tempo, disposição e paciência na orientação da iniciação científica que tive oportunidade de realizar no segundo ano do curso de Engenharia Elétrica e o suporte ao aproveitamento do trabalho desenvolvido na iniciação como trabalho de graduação.

RESUMO

Tendo como justificativa a importância do estudo de fontes renováveis de energia com baixo impacto ambiental, neste trabalho de graduação estudamos a viabilidade do uso de um modelo matemático e elétrico de uma célula fotovoltaica para representá-la em diferentes situações por meio da comparação entre dados experimentais de células fotovoltaicas (SFH 120, CHINA-923 e Spectrolab) e a curva teórica obtida através de softwares matemáticos e de simulação eletrônica, utilizando-se os parâmetros obtidos à partir da caracterização da célula, como a corrente gerada pela luz I_L , a corrente de saturação I_0 , o fator de perfeição n e as resistências parasitas R_s e R_{sh} (resistência série e *shunt*, respectivamente). O modelo descrito por WENHAM mostrou-se válido; os resultados teóricos ficaram mais próximos dos dados experimentais do que o determinado por LLAMAZARES no caso da célula SFH 120.

PALAVRAS-CHAVE: Célula fotovoltaica. Modelagem matemática. Circuito equivalente.

ABSTRACT

Having as justification the importance of the study of renewable energy sources with low environmental impact, we study in this graduation work the feasibility on the use of a mathematical and electric model of a photovoltaic cell to represent it in different situations through the comparison between experimental data of photovoltaic cells (SFH 120, CHINA-923 and Spectrolab) and the theoretical curve obtained through mathematical softwares and electronic simulation, using the parameters obtained from the characterization of the cell, such as the current generated by the light I_L , the saturation current I_0 , the perfection factor n and the parasite resistors R_s e R_{SH} (series and shunt resistance, respectively). The model described by WENHAM was valid; the theoretical results were closer to the experimental data than that determined by LLAMAZARES in the case of SFH 120 cell.

KEYWORDS: Photovoltaic cell. Mathematical modeling. Equivalent circuit.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
2	DESENVOLVIMENTO	8
2.1	TEORIA DAS BANDAS PARA OS SÓLIDOS	8
2.2	SEMICONdutoRES EXTRÍNSECOS	11
2.3	JUNÇÕES	13
2.4	DISPOSITIVOS SEMICONdutoRES: DIODO DE JUNÇÃO E DIODO ZENER	14
2.5	UMA INTRODUÇÃO À DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DA LUZ	17
2.6	RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO E O INÍCIO DA FÍSICA QUÂNTICA	18
2.7	EFEITO FOTOELÉTRICO	23
2.8	EFEITO FOTOVOLTAICO	27
2.9	MATERIAIS UTILIZADOS EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	29
2.10	CÉLULA FOTOVOLTAICA	30
3	METODOLOGIA	38
3.1	MATERIAIS E FERRAMENTAS	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA CÉLULA SIEMENS SFH 120	42
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA CÉLULA CHINA-923	47
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA CÉLULA SPECTROLAB	52
5	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS	56
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	57
	APÊNDICE A – Curvas I-V Para Três Níveis De Radiação Incidente Sobre A Célula Solar SFH 120	58
	APÊNDICE B – Curva I-V Média Da Célula Solar Padrão De Referência CHINA-923	59
	APÊNDICE C – Curva I-V Média Da Célula Solar Espacial Spectrolab	60
	APÊNDICE D – Scripts Para O GNU Octave	61
	APÊNDICE E – Comparação Entre Os Dados Experimentais E Curva Teórica Determinada Por Llamazares	64

1 INTRODUÇÃO

O estudo e investimento em energias renováveis e sustentáveis é estrategicamente importante para países dependentes de fontes energéticas não renováveis, como o petróleo e o carvão. O estudo da modelagem matemática de células solares se justifica ao considerarmos o grande potencial do uso desse tipo de energia no país, considerando a alta incidência de radiação solar e a grande extensão de território, além do baixo impacto ambiental na implementação desta tecnologia. Para grandes projetos como usinas solares é necessário levar em consideração a eficiência e perdas nos painéis fotovoltaicos, e o conhecimento do modelo matemático de uma célula pode auxiliar na compreensão e determinação dessas perdas.

O objetivo do trabalho é o estudo, avaliação e validação de modelos matemáticos que caracterizam o comportamento de uma célula fotovoltaica, comparando os dados experimentais obtidos em banco de dados especializados na área com as curvas teóricas dos modelos adotados de acordo com os parâmetros extraídos na caracterização da célula.

No capítulo 2.1 estudou-se a teoria das bandas para os sólidos, onde foi possível entender as diferenças de condutividade elétrica entre materiais isolantes, condutores e semicondutores; no capítulo 2.2 estudou-se a dopagem de semicondutores intrínsecos para formação de semicondutores extrínsecos do tipo n e p e sua associação (junções) no capítulo 2.3; no capítulo 2.4 foi abordado dispositivos semicondutores como o diodo de junção e o diodo zener; nos capítulos 2.5 e 2.6 a dualidade onda-partícula da luz, radiação de corpo negro e início da física quântica, essenciais para o estudo do efeito fotoelétrico e efeito fotovoltaico abordados nos capítulos 2.7 e 2.8; e por fim nos capítulos 2.9 e 2.10 os materiais utilizados na célula fotovoltaica, sua construção típica, funcionamento, modelo matemático equivalente e grandezas utilizadas para caracterizar a célula. Utilizando esse estudo introdutório foi possível estudar a viabilidade do modelo adotado.

Para tanto foi realizada a caracterização das células de acordo com o capítulo 3, extraíndo os parâmetros necessários para a simulação do modelo e comparação da curva teórica e os dados experimentais. Os dados experimentais foram corrigidos a fim de se compensar as perdas por resistores parasitas, sendo possível constatar boa correlação entre os dados. De posse dos parâmetros da célula, foi possível simular a curva $I \times V$ de acordo com a modelagem proposta em software matemáticos como o GNU Octave e em softwares de simulação eletrônica, como o ISIS/Proteus, de acordo com o capítulo 4.

2 DESENVOLVIMENTO

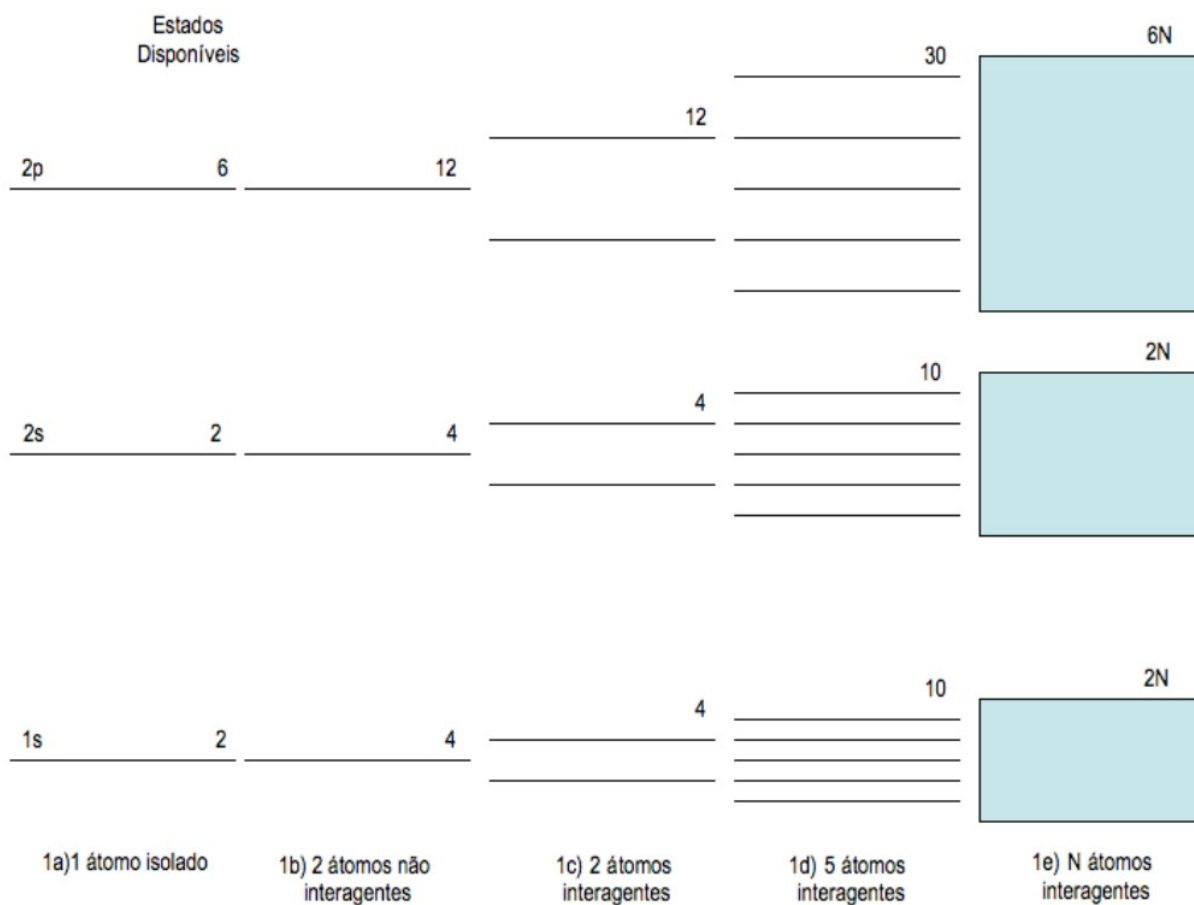
Para o estudo da célula fotovoltaica, também conhecida como célula solar, é necessário o estudo de temas básicos da física, como a estrutura de sólidos, a eletricidade e sua condução nos metais sob o ponto de vista clássico e moderno, a teoria das bandas em sólidos, semicondutores e seus dispositivos e a origem da mecânica quântica (e sua relação com a radiação solar e conversão desta em energia elétrica). Esses temas serão abordados nos tópicos a seguir.

2.1 TEORIA DAS BANDAS PARA OS SÓLIDOS

Alguns materiais podem ser condutores elétricos, ou seja, conduzem corrente elétrica quando expostos à uma diferença de potencial, como os metais. Por outro lado, existem materiais que exercem dificuldade à passagem de corrente, esse é o caso dos materiais não condutores ou isolantes, como o plástico ou o vidro. E existem materiais que permitem a passagem de corrente elétrica sob certas condições, de forma intermediária em relação aos condutores e os isolantes, como o silício e o germânio, esses são chamados de semicondutores.

O motivo de um material ser condutor ou não, ou ainda ser um semicondutor, é explicado pela teoria das bandas em sólidos. É necessário levar em conta a influência da rede de íons sobre os níveis de energia dos elétrons. Conforme se pode ver na Figura 1, para dois átomos próximos, cada nível de energia (de cada átomo) se altera devido à influência entre eles, passando a ser divididos em outros dois níveis, com energias muito próximas. Para cinco átomos, há a divisão de cada nível em cinco níveis, também muito próximos. Para N átomos, há N divisões em cada nível, e se N for muito grande, como em um sólido macroscópico, haverá a formação de uma banda de energia e seus níveis serão tão próximos que parecerá que estão distribuídos quase que continuamente.

Figura 1 – Formação de bandas de energia a partir de níveis de energia

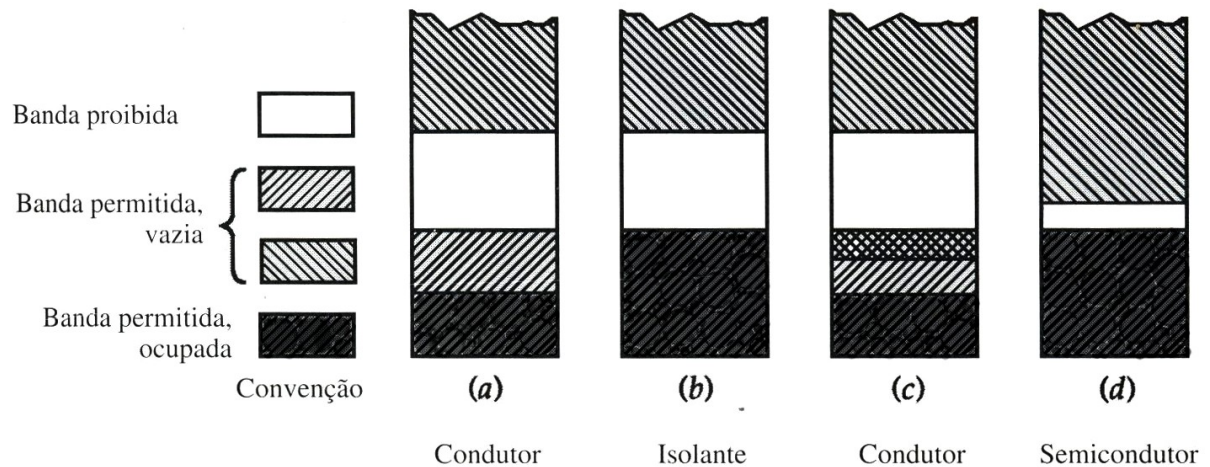


Fonte: VASCONCELLOS (2009)¹

Essas bandas podem estar mais próximas umas das outras ou mais afastadas, dependendo do tipo de átomo e suas ligações. “A banda ocupada pelos elétrons mais externos, os elétrons de valência, é a banda de valência” e “a banda [com energia] mais baixa, na qual existem estados desocupados, é a banda de condução” (TIPLER, 1995, p. 321). Em geral, nos condutores a banda de valência pode ser também a banda de condução.

¹ Disponível em: <www.cesarzen.com/FIS1057Lista16.pdf>. Acesso em: 15 jan 2011.

Figura 2 – Bandas de valência e de condução para condutores (a e c), semicondutores (d) e isolantes (b)



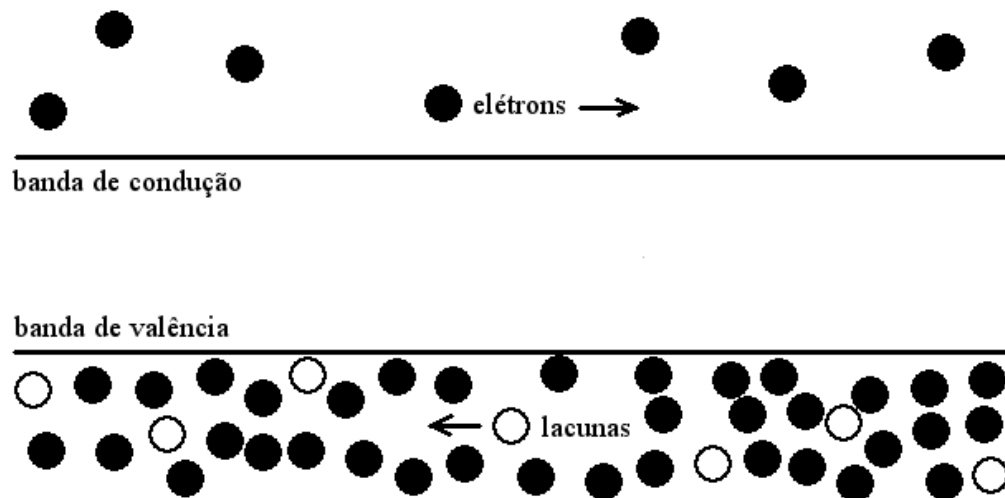
Fonte: TIPLER (1995)

Um condutor típico, como o cobre por exemplo, é apresentado na Figura 2a. Sua banda de valência (banda inferior) está semi preenchida, o que a torna uma banda de condução. Em $T > 0$, alguns elétrons podem ser excitados para a banda superior, que também é uma banda de condução por estar vazia. Na Figura 2c há a superposição de duas bandas, a de valência e de condução, é o caso do magnésio.

Em um isolante (Figura 2b) a banda de valência encontra-se totalmente ocupada, e há uma grande diferença de energia entre esta banda e a banda de condução, diferença esta chamada de banda proibida. Um elétron precisará de grande quantidade de energia para saltar para a banda de condução. Em temperatura ambiente, são poucos os elétrons que passam para a banda de condução, este é o motivo dos isolantes apresentarem alta resistência à condução de corrente.

Na Figura 2d é apresentado o modelo das bandas em um semicondutor puro (chamado também de semicondutor intrínseco), como o silício ou germânio. Semelhante a um isolante, sua banda de valência encontra-se totalmente preenchida e a banda de condução, acima, encontra-se desocupada. Mas a diferença entre elas é pequena em relação ao exemplo anterior, o que permite que os elétrons saltem para a banda de condução com menor quantidade de energia. Em $T = 0$, os elétrons permanecem todos na banda de valência, o que não permite a condução elétrica, e conforme a temperatura vai aumentando, os elétrons vão adquirindo energia e saltam para a banda de condução. Na banda de valência, por sua vez, são criados buracos (ou lacunas, como preferir) que funcionam como cargas positivas, os quais na presença de campo elétrico se movem do potencial mais alto para o mais baixo, ao contrário dos elétrons, como indicado na Figura 3.

Figura 3 – Condução de elétrons e lacunas em um semicondutor



Fonte: TIPLER (1995)

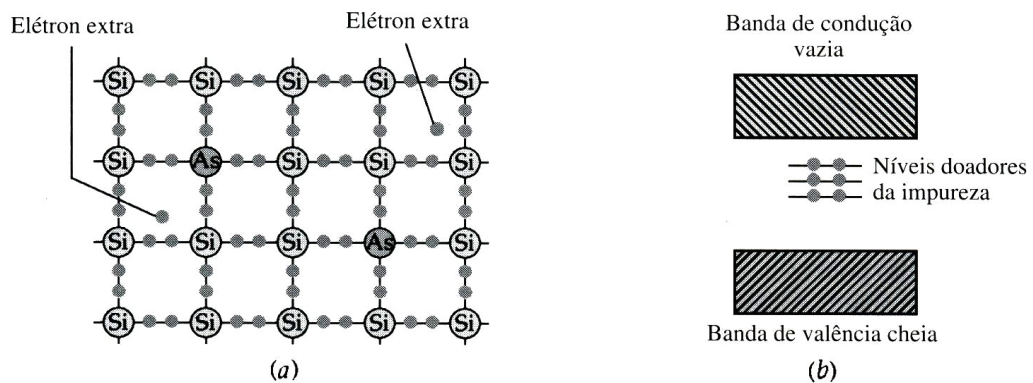
O efeito do aumento de elétrons livres na banda de condução e as lacunas criadas na banda de valência supera o efeito de espalhamento dos elétrons em razão da agitação térmica dos íons da rede e portanto, ao contrário dos condutores, o semicondutor diminui sua resistividade conforme a temperatura aumenta.

2.2 SEMICONDUTORES EXTRÍNSECOS

Pode-se modificar algumas características e aumentar a condutividade de um semicondutor através da dopagem, que é o processo de adição de impurezas no semicondutor intrínseco, tornando-o um semicondutor extrínseco. Dependendo do material utilizado no processo de dopagem, o semicondutor pode ter excesso de portadores negativos, sendo chamado de semicondutor tipo *n*, ou pode ter excesso de portadores positivos e se tornar um semicondutor do tipo *p*.

Um semicondutor tipo *n*, ilustrado na Figura 4, é obtido pela dopagem do silício por arsênio, que possui cinco elétrons em sua camada de valência, e resulta em elétrons extras no material, que não participam de ligação na rede. Há o surgimento dos níveis doadores da impureza, os quais estão situados entre a banda de valência e de condução, abrigando os elétrons extras do arsênio e podendo cedê-los à banda de condução, sem formar buracos na banda de valência. Portanto, os portadores de carga principais de um semicondutor do tipo *n* são os elétrons.

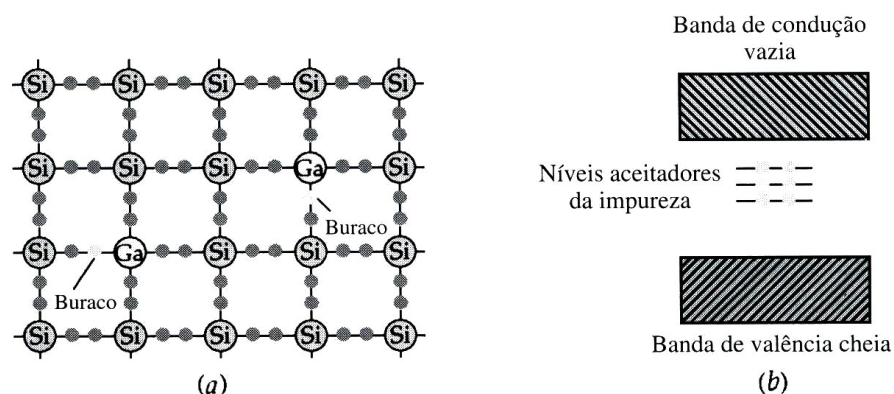
Figura 4 – Semicondutor do tipo n (a) e níveis doadores entre a banda de condução e a banda de valência (b)



Fonte: TIPLER (1995)

Na dopagem do silício por gálio, ilustrado no modelo da Figura 5, há o surgimento de buracos entre as ligações, em razão do gálio apresentar três elétrons em sua camada de valência. Os átomos de gálio produzem níveis aceitadores entre a banda de valência e a de condução, que podem receber os elétrons da banda de valência, criando buracos, mas sem disponibilizar estes elétrons à banda de condução. Logo, os portadores de cargas majoritários no semicondutor tipo p são os buracos positivos presentes na banda de valência.

Figura 5 – Semicondutor do tipo p (a) e níveis aceitadores entre a banda de condução e a banda de valência (b)



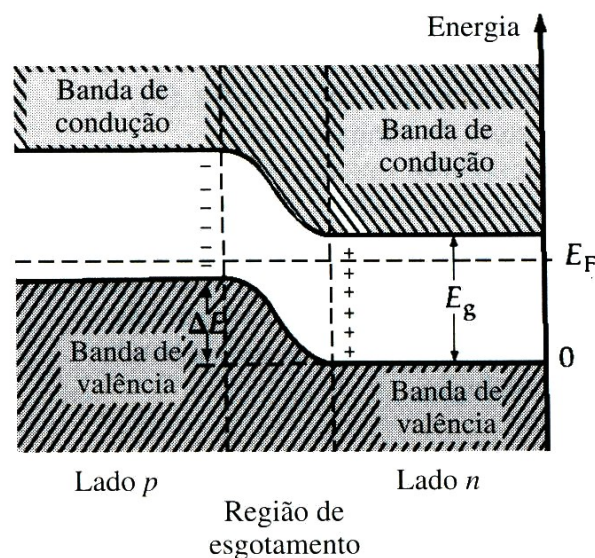
Fonte: TIPLER (1995)

2.3 JUNÇÕES

A partir da associação dos semicondutores tipo *p* e tipo *n* e do controle da quantidade de impureza presente no material, são construídos vários tipos de dispositivos semicondutores, como os diodos e transistores.

Quando houver a junção do semicondutor tipo *n* com o do tipo *p*, é criada uma região especial entre os dois, chamada de região de esgotamento, onde “[...] as concentrações inicialmente desiguais dos elétrons e dos buracos provoca a difusão de elétrons através da junção, do lado *n* para o lado *p*, e de buracos do lado *p* para o lado *n*, até que se estabeleça o equilíbrio” e “diferentemente do que ocorre quando dois metais diferentes estão em contato, os elétrons não podem se afastar muito da região da junção, pois o semicondutor não é um condutor especialmente bom” (TIPLER, 1995, p. 324). Essa limitação na difusão de elétrons e buracos cria uma camada de carga elétrica de cada lado da junção, e como “o resultado desta difusão é o transporte líquido de carga positiva do lado *p* para o lado *n*” (TIPLER, 1995, p. 324) surge uma diferença de potencial entre os dois lados, com cargas positivas do lado *n* e cargas negativas do lado *p*, e faz a região de esgotamento ficar parecendo um capacitor. Essa região apresenta uma resistividade elevada devido ao esgotamento de portadores de carga (daí o seu nome). Os níveis de energia de uma junção *pn* é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Níveis de energia em uma junção *pn*

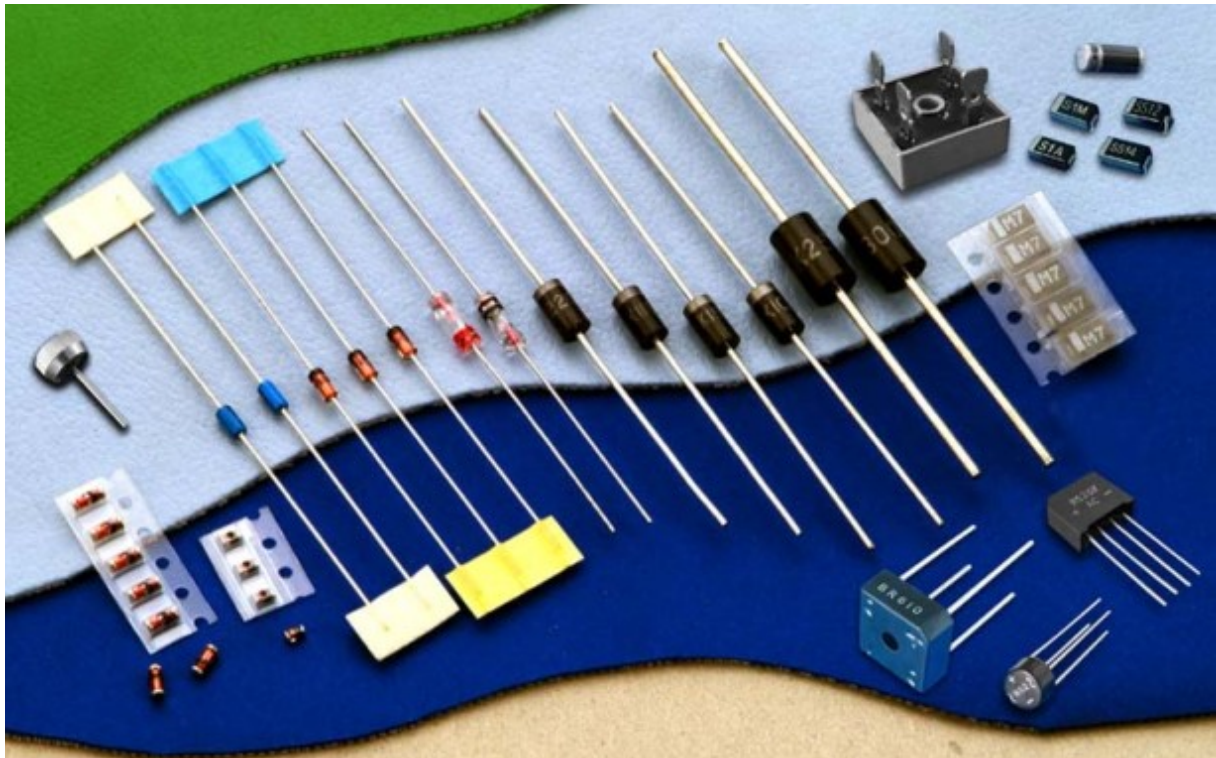


Fonte: TIPLER (1995)

2.4 DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES: DIODO DE JUNÇÃO E DIODO ZENER

O dispositivo semicondutor mais simples é o diodo, formado a partir de um semicondutor com junção *pn*. Alguns exemplos deste dispositivo podem ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Exemplos de diodos usados em circuitos eletrônicos



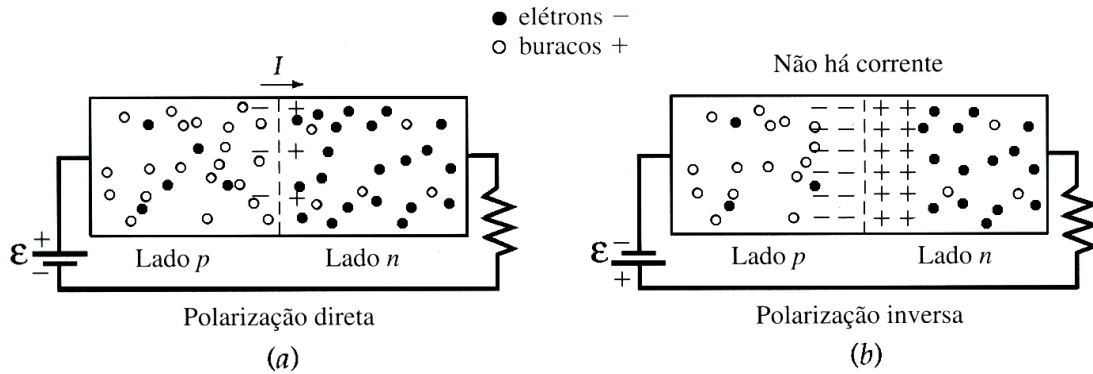
Fonte: Eletrônica Didática (2011)²

Um diodo em um circuito elétrico pode ser polarizado diretamente ou inversamente. Na polarização direta, conforme Figura 8a, o lado *p* é ligado ao terminal positivo de uma fonte e o lado *n* ligado ao terminal negativo. Esse tipo de polarização diminui a diferença de potencial presente na região de esgotamento, pois as cargas elétricas majoritárias presentes no lado *n*, os elétrons, são repelidos pelo potencial negativo da fonte e as lacunas, as cargas elétricas de maior proporção do lado *p*, são repelidas pelo potencial positivo da fonte, pois agem como cargas positivas, como discutido anteriormente. Para se restabelecer o equilíbrio há o aumento de difusão de elétrons e lacunas na junção, o que proporciona a passagem de corrente pelo diodo, pois o potencial positivo da fonte atrai os elétrons dessa difusão e o potencial negativo atrai as lacunas. Geralmente é usado um resistor ligado em série ao diodo para limitar a

² Disponível em: <<http://www.eletronicadidatica.com.br/componentes/diodo/diodo.htm>>. Acesso em: 24 jan 2011.

corrente do circuito, e pode ser ligado em qualquer um dos lados, no caso da Figura 8 está ligado no lado n .

Figura 8 – Polarização direta (a) e inversa (b) em um diodo de junção



Fonte: TIPLER (1995)

Sem considerar resistências parasitas no diodo, a corrente I encontrada na polarização direta pode ser expressa pela equação de *Shockley* (ou lei do diodo ideal):

$$I = I_0(e^{V/nV_T} - 1) \quad (1)$$

onde I_0 é a corrente de saturação na ausência de luminosidade, V a tensão aplicada sobre o diodo, n é o fator de perfeição que aumenta conforme o decréscimo da corrente e seus valores típicos estão entre 1 e 2, e V_T é a tensão térmica, que é dada por

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2)$$

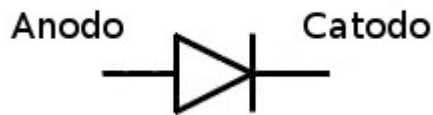
onde q é a carga elementar, k a constante de *Boltzmann* e T a temperatura em Kelvin. A tensão térmica a 300 K é igual a 25,85 mV.

Na polarização inversa, conforme Figura 8b, o lado p é ligado no outro terminal da fonte, o negativo, e o lado n ligado no positivo. Os elétrons do lado n são atraídos pelo terminal positivo, e as lacunas do lado p são atraídas pelo terminal negativo. A diferença de potencial presente na junção aumenta, o que inibe a difusão de elétrons e lacunas na região e por consequência não há passagem de corrente pelo diodo.

Por receber as cargas negativas da difusão na polarização direta, o lado p é também chamado de anodo (ou ânodo) e o lado n , por receber as cargas positivas é chamado de catodo

(ou cátodo). A simbologia de um diodo de junção pode ser vista na Figura 9.

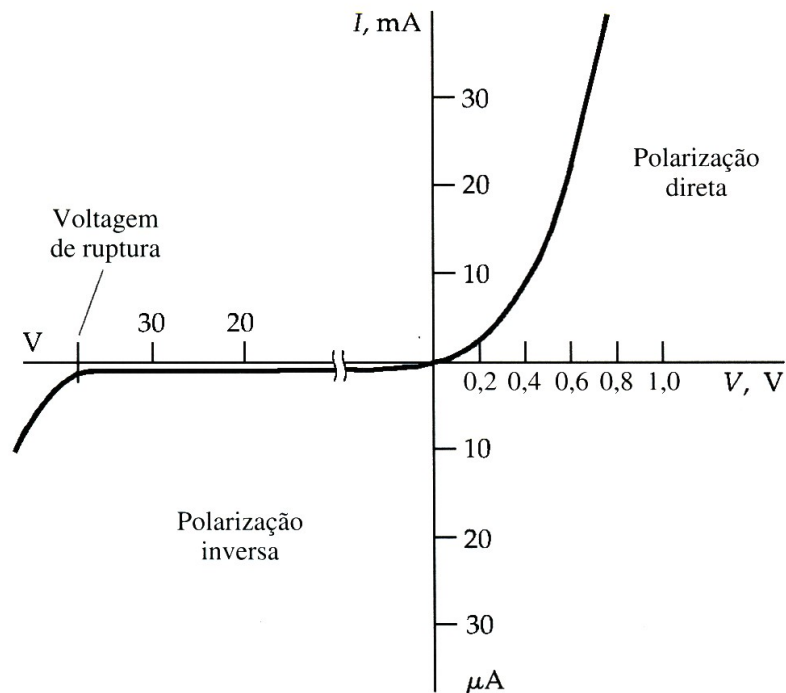
Figura 9 – Simbologia de um diodo de junção



Fonte: TIPLER (1995)

O gráfico de corrente versus tensão em um diodo de junção é apresentado na Figura 10. A princípio o diodo conduz somente na polarização direta, com uma corrente proporcional à tensão aplicada após 0,6 V (esse valor varia dependendo do tipo de diodo). Na polarização inversa há uma pequena corrente circulando pelo diodo (corrente de fuga), praticamente desprezível, e permanece aproximadamente constante até a tensão de ruptura, tensão na qual é verificado o aumento brusco da corrente. A tensão inversa está tão elevada nesta situação que o campo elétrico presente na região de esgotamento é capaz de acelerar elétrons livres da junção para o lado n (efeito Zener, de Clarence Zener), e esses elétrons passam a ter tanta energia que rompem as ligações covalentes da rede cristalina por meio de colisões (efeito avalanche ou avalanche de ruptura), o que proporciona maior quantidade de elétrons livres. Em diodos comuns esse efeito não é desejável porque a passagem de corrente é muito alta e por efeito Joule o componente aquece e é danificado. Com maior dopagem no material semiconductor, o diodo Zener é empregado em circuitos reguladores de tensão pois sua tensão de ruptura é utilizada como um valor de referência.

Figura 10 – Gráfico de corrente em função da tensão em um diodo de junção



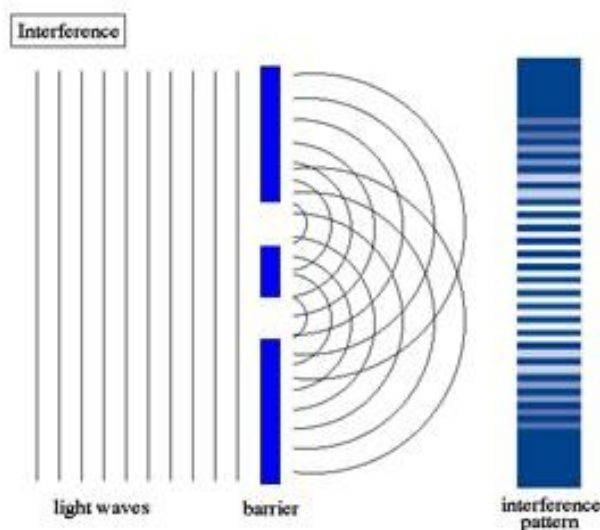
Fonte: TIPLER (1995)

Alguns dispositivos semicondutores com junção *pn* podem converter energia elétrica em energia luminosa, como os LED's – *light emitter diode* ou diodo emissor de luz, e outros realizam a tarefa oposta, como as células fotovoltaicas. Para o estudo desses dispositivos, em especial a célula fotovoltaica, é necessário a abordagem de conceitos de mecânica quântica como a dualidade onda-partícula da luz, a radiação de corpo negro e o efeito fotoelétrico.

2.5 UMA INTRODUÇÃO À DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DA LUZ

A luz era considerada como pequenas partículas desde meados de 1600 por Newton, mas no começo do século XIX o experimento de Thomas Young mostrou o efeito de interferência da luz por meio da utilização de duas fendas e um anteparo (Figura 11), o que indicava ser a luz constituída por ondas. Se a luz fosse constituída de partículas não haveria o padrão de interferência constatado no anteparo da experiência.

Figura 11 – Padrão de interferência da luz no experimento da dupla fenda de Young



Fonte: IES de Ames (2015)³

Em 1887 Hertz descobriu o efeito fotoelétrico quando constatou por meio de seus experimentos que a corrente elétrica entre duas placas metálicas com potenciais diferentes poderia aumentar se houvesse a incidência de luz (TIPLER, 1995). Em 1905, Einstein utilizou o trabalho de Planck sobre a quantização da energia radiante de um corpo negro para poder explicar o efeito fotoelétrico (TIPLER, 1995), sugerindo que a luz fosse constituída de partículas discretas, ideia um tanto estranha para os físicos da época (até mesmo por Planck, pois considerava sua teoria baseada em um artifício matemático para adequar a teoria com a prática, não considerava a quantização da energia real) por acreditarem ser a luz propagada de forma contínua, como previa as equações de Maxwell. Para a propagação da luz a teoria clássica de Maxwell se aplica, mas quando ela interage com a matéria há a necessidade de interpretá-la como partículas discretas ou quanta de energia.

2.6 RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO E O INÍCIO DA FÍSICA QUÂNTICA

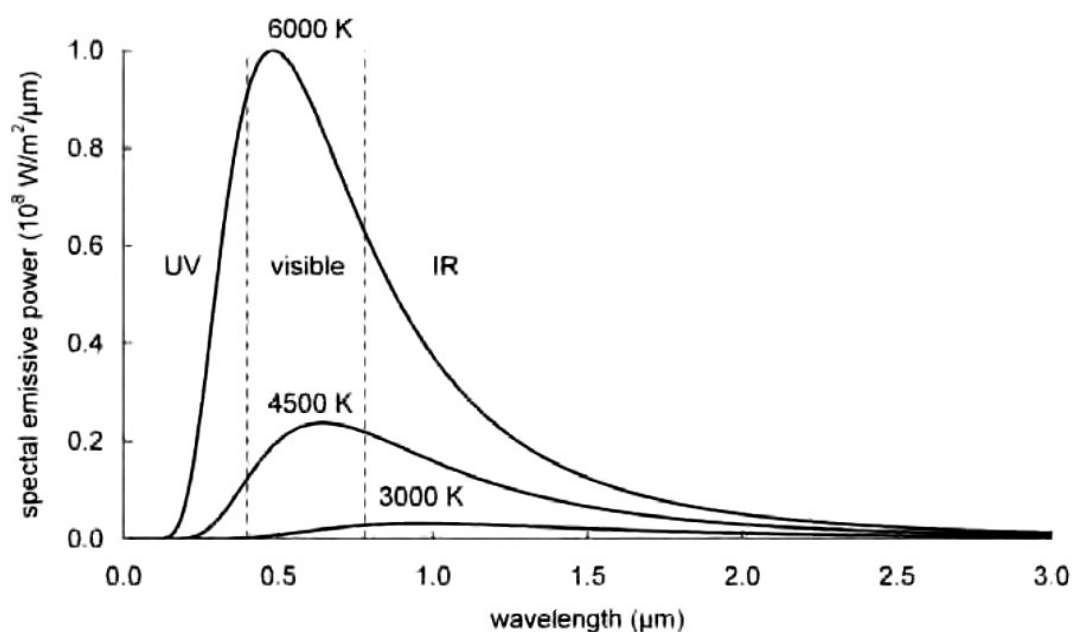
O estudo da radiação de corpo negro é importante tanto para o bom entendimento de teorias relacionadas à célula solar, assim como para a compreensão da luz emitida pelo Sol e sua interação com a Terra e sua atmosfera.

Um corpo negro ideal tem como característica a absorção e emissão total de qualquer radiação eletromagnética que incida sobre sua superfície do interior para o exterior e vice-versa, sem nenhuma reflexão. Um corpo negro também pode transformar a energia térmica

³ Disponível em: <http://centros.edu.xunta.es/iesames/webantiga/webfq/EUSECTSUSO/chem_phys_bac/Physics_2/Light.htm>. Acesso em: 13 jan 2017.

contida em seus átomos constituintes em radiação eletromagnética, por meio de emissão da radiação em um espectro de comprimento de onda. Para cada temperatura do corpo há uma distribuição característica de intensidade de radiação emitida, conforme o exemplo da Figura 12.

Figura 12 – Distribuição da taxa de energia por unidade de área em função do comprimento de onda para três temperaturas diferentes, observado na superfície de corpos negros ideais



Fonte: WENHAM (2007)

“Um exemplo comum [de corpo negro] é dado quando um metal é aquecido. Quanto mais quente ele fica, menor o comprimento de onda emitido e um brilho inicialmente vermelho se torna branco” (WENHAM, 2007, p. 4).

Um corpo negro pode ser simulado por meio de uma cavidade na qual suas paredes internas são revestidas por um material refratário (espelho), havendo apenas um único e pequeno orifício que comunica o interior com o meio externo. A radiação, quando entra por meio do orifício, é refletida (a maior parte) pelas paredes e fica contida dentro da cavidade. Uma pequena porção da radiação é emitida pelo orifício, e é similar à emissão da superfície de um corpo negro.

Desde o século XIX já era conhecida a distribuição da radiação emitida, mas não havia um modelo matemático adequado para relacioná-la com comprimentos de onda específicos (ou frequências). Os principais modelos utilizados na tentativa de explicar essa relação eram a lei de Rayleigh-Jeans e a lei de Wien. Sabia-se por meio empírico que a radiação total emitida

por um corpo negro era proporcional à quarta potência da temperatura e era dada pela equação de Stefan-Boltzmann, conforme a seguir:

$$j^* = \sigma T^4 \quad (3)$$

onde j^* é a intensidade de radiação emitida (ou taxa de energia emitida por unidade de área), dada em W/m^2 , σ é a constante de Stefan-Boltzmann, com o valor de $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ e T a temperatura em Kelvin. Atualmente sabe-se que essa equação não é um bom modelo para temperaturas muito altas.

Segundo a lei do deslocamento de Wien, o comprimento de onda no qual há o máximo de radiação emitida se desloca em função da temperatura, e a relação se dá por:

$$\lambda \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K} \quad (4)$$

onde λ é o comprimento de onda (em metros) no qual há o ponto estacionário da curva de distribuição e T a temperatura do corpo em Kelvin.

Conforme a lei de Rayleigh-Jeans, a intensidade específica monocromática, ou radiância espectral $I(\lambda, T)$, é dada por:

$$I(\lambda, T) = \frac{2 c k T}{\lambda^4} \quad (5)$$

onde I é dado em $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{m}^{-1}$, c é a constante da luz, k a constante de Boltzmann, T a temperatura e λ o comprimento de onda. A lei de Rayleigh-Jeans em termos de densidade de energia espectral $u(\lambda, T)$ é dada por:

$$u(\lambda, T) = \frac{8 \pi k T}{\lambda^4} \quad (6)$$

onde u é dado em $\text{J.m}^{-3}.\text{m}^{-1}$, k é a constante de Boltzmann, λ é o comprimento de onda e T a temperatura. Essas equações são calculadas a partir da termodinâmica clássica, e é um bom modelo apenas para regiões com grandes comprimentos de ondas. Em pequenos comprimentos de ondas a irradiação do corpo tenderia ao infinito, pois o comprimento de onda λ está elevado à quarta potência. Isso levaria à chamada catástrofe do ultravioleta, que

experimentalmente não foi observado.

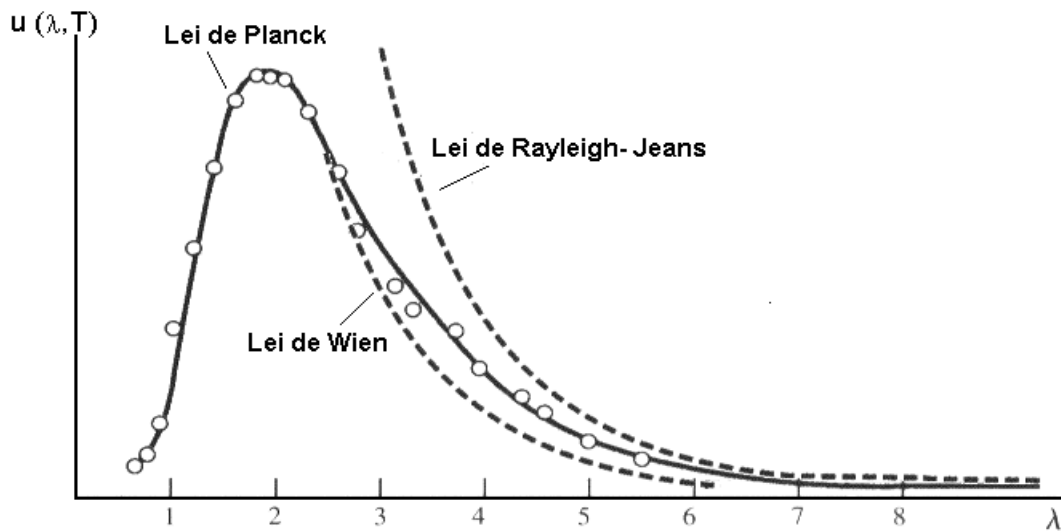
Em 1905 Planck descreveu a curva de distribuição por meio de uma equação e ao justificá-la utilizou um modelo mecânico de osciladores para explicar a interação entre a matéria e a radiação, mas com uma modificação inusitada à época. Esse modelo, já usado naquela época, consistia na aproximação das partículas da parede interna da cavidade (ou da superfície de um corpo negro) como pequenos osciladores harmônicos (sistema massa-mola, por exemplo) que vibram em uma determinada frequência. Planck imaginou que esses osciladores poderiam receber e emitir energia de radiação somente em valores específicos, de forma discreta sob a forma de pacotes ou quanta de energia, sendo essa energia proporcional à um múltiplo da frequência de trabalho desses osciladores. A relação entre frequência e a energia seria dada por:

$$E = n h f = \frac{n h c}{\lambda} \quad (7)$$

onde a radiação eletromagnética, de frequência f ou comprimento de onda λ , vêm em pacotes discretos, chamados fótons, de energia E , onde n é um número inteiro, h é a constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s), determinada pelo ajuste da sua função aos dados experimentais, e c é a velocidade da luz ($3,00 \cdot 10^8$ m/s) (WENHAM, 2007, p. 3).

As leis de Rayleigh-Jeans e de Wien não são totalmente desconsideradas, conforme pode ser visto na Figura 13, podendo se observar que para determinados comprimentos de ondas essas leis são válidas, o que as tornam casos particulares da lei de Planck.

Figura 13 – Comparação entre as leis de Rayleigh-Jeans e de Wien com a lei de Planck e os dados experimentais (os pequenos círculos)



Fonte: EaD: Laboratório Virtual Prof. Kleber Mundim (2009)⁴

A equação desenvolvida por Planck, em termos de radiância espectral, é dada por:

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (8)$$

onde I é dado em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (potência por unidade de área por unidade de ângulo sólido por unidade de comprimento de onda), h é a constante de Planck, c a velocidade da luz, k a constante de Boltzmann, T a temperatura e λ o comprimento de onda. A radiância espectral pode ser escrita em função da frequência conforme a seguir:

$$I(f, T) = \frac{2hf^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \quad (9)$$

onde I é dado em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ (potência por unidade de área por unidade de ângulo sólido por unidade de frequência) e f é a frequência dada em Hz. Pode-se também escrever a lei de Planck em termos de densidade de energia espectral $u(\lambda, T)$:

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (10)$$

⁴ Disponível em: <<http://www.ensinoadistancia.pro.br/EaD/Fisica-4/Aulas/Aula-18/aula-18.html>>. Acesso em: 13 jan 2017.

onde u é dado em $\text{J.m}^{-3}.\text{m}^{-1}$ (energia por unidade de volume por unidade de comprimento de onda). Outra forma de escrevê-la, em função da frequência:

$$u(f, T) = \frac{8\pi h f^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{hf/kT} - 1} \quad (11)$$

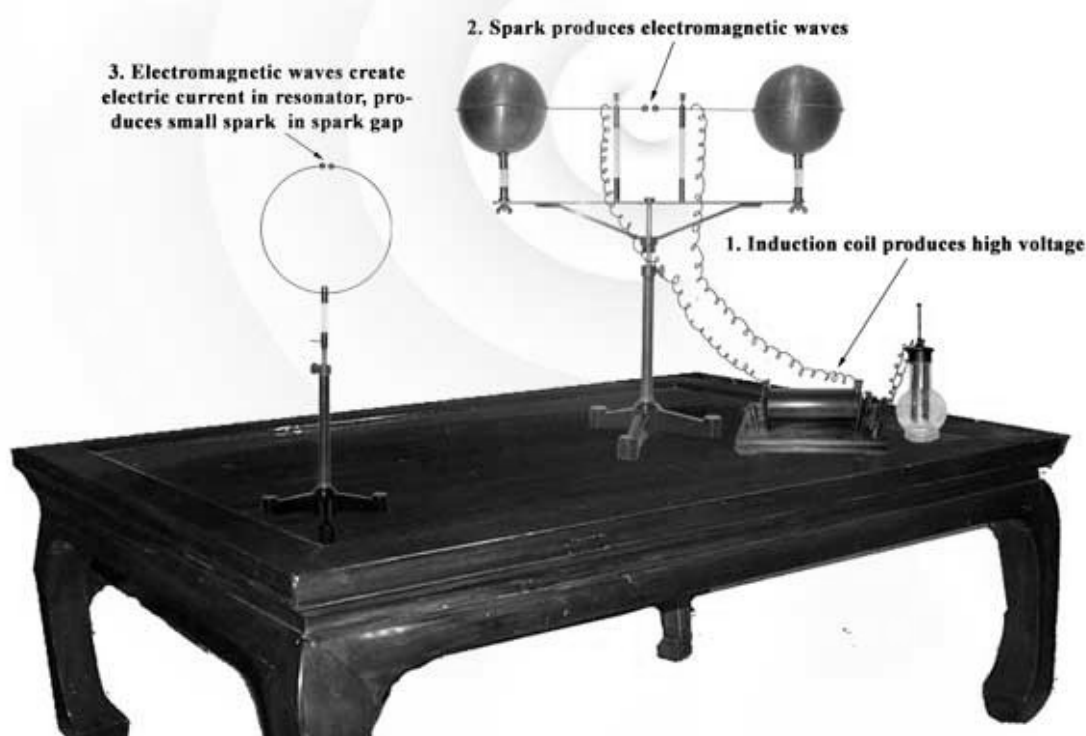
onde u é dado em $\text{J.m}^{-3}.\text{Hz}^{-1}$ (energia por unidade de volume por unidade de frequência).

2.7 EFEITO FOTOELÉTRICO

Apesar da equação de Planck descrever com propriedade a curva de distribuição de radiação, ainda era preciso provar a teoria de quantização da energia. Einstein, utilizou em 1905, a teoria desenvolvida por Planck para poder explicar o efeito fotoelétrico, com a hipótese de que a radiação eletromagnética tivesse de fato a propriedade de quantização de energia.

Hertz descobriu por acidente o efeito fotoelétrico quando realizava experiências para provar a existência de ondas eletromagnéticas, previstas na teoria de Maxwell. Uma de suas experiências consistia em um transmissor construído com duas hastes metálicas, nas quais haviam duas esferas metálicas de tamanhos diferentes para cada extremidade, com um pequeno espaço entre as esferas menores, como pode ser visto na Figura 14. Ao transmissor era ligado um indutor que fornecia altas tensões. O aparelho funcionava como um circuito LC cuja frequência de ressonância ficava próxima das ondas de rádio (100MHz), e quando ligado era possível observar faíscas saltando entre as duas pequenas esferas. A confirmação da transmissão consistia na observação de fagulhas elétricas entre outras duas esferas conectadas à um arco metálico (vide Figura 14, à esquerda), sendo esse receptor ajustado previamente à mesma frequência de ressonância.

Figura 14 - Transmissor e receptor criado por Hertz para o estudo da radiação eletromagnética



Fonte: SPARK MUSEUM (2002)⁵

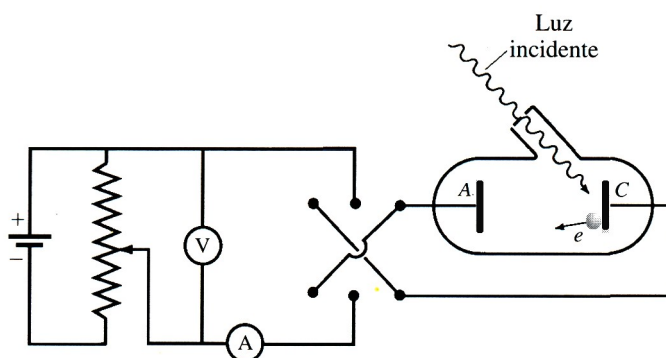
Hertz chegou à conclusão por meio de vários experimentos de que as ondas produzidas e a luz tinham a mesma natureza, pois compartilhavam da mesma velocidade e das mesmas propriedades, diferenciando-se apenas pelo comprimento de onda. Conforme a teoria de Maxwell, cargas elétricas em movimento acelerado são fontes de ondas eletromagnéticas, e a experiência de Hertz prova exatamente isso, pois a corrente elétrica presente nas hastes do transmissor nada mais é do que o movimento ordenado e acelerado dessas cargas em função da alta tensão oscilante aplicada.

Com o intuito de observar melhor as faíscas elétricas, Hertz isolou o sistema da luminosidade ambiente e constatou inusitadamente a redução do centelhamento. Utilizando um anteparo de vidro, material conhecido por filtrar radiação ultravioleta, Hertz notou também a redução das faíscas e chegou a conclusão de que a radiação ultravioleta facilitava a condução de corrente entre as esferas metálicas. O que ocorre é que os raios ultravioleta têm energia suficientemente para arrancar os elétrons da superfície de um metal, e a troca de energia se dá por meio da colisão de um fóton com um elétron, que passa a ser chamado de fotoelétron. Essa emissão é responsável pelo aumento de corrente verificado na experiência de Hertz quando iluminado.

⁵ Disponível em: <http://www.sparkmuseum.com/BOOK_HERTZ.HTM>. Acesso em: 05 mar 2011.

O efeito fotoelétrico foi estudado posteriormente por Lenard em 1900, mostrando ser os fotoelétrons de mesma natureza que os raios catódicos (estudados por Crookes e outros cientistas da época). Através de seus experimentos com tubos de raios catódicos, conforme o esquema da Figura 15, descobriu que a energia cinética do fotoelétron é independente da intensidade da radiação e que a emissão a partir da incidência da luz é instantânea, fatos que contradiziam a teoria clássica de eletromagnetismo.

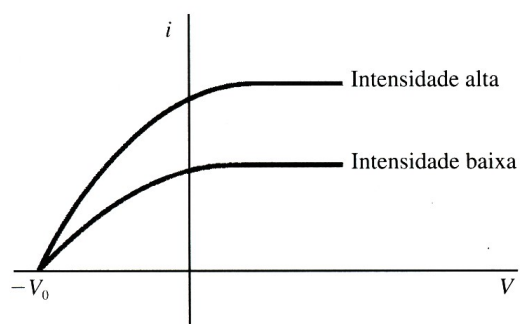
Figura 15 – Esquema da aparelhagem usada para o estudo do efeito fotoelétrico



Fonte: TIPLER (1995)

Conforme o experimento, sendo V a diferença de potencial entre o anodo e o catodo ($V = V_A - V_C$), o anodo pode atrair os fotoelétrons emitidos do catodo quando V positivo e repeli-los quando V negativo. Conforme a Figura 16, há um valor de V positivo para o qual não há aumento de corrente pois todos fotoelétrons emitidos já estão sendo atraídos, e outro valor conhecido como potencial frenador onde $V = -V_0$ onde não há passagem de corrente.

Figura 16 – Corrente fotoelétrica i em função da diferença de potencial V para duas intensidades de luz diferente



Fonte: TIPLER (1995)

A energia cinética máxima de um elétron emitido da superfície do catodo se relaciona com o potencial frenador V_0 e a frequência f do fóton por

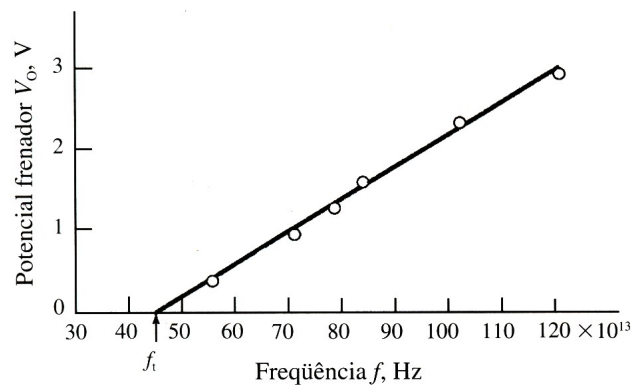
$$\left(\frac{1}{2} m v^2\right)_{max} = e V_0 = h f - \phi \quad (12)$$

onde m é a massa do elétron, v a sua velocidade, e a carga do elétron, h a constante de Planck e Φ a função trabalho, que é a energia necessária para remover um elétron da superfície, esse valor é característico do metal utilizado. O lado direito da equação foi introduzido por Einstein, entendendo ser a luz constituída de fótons que possuem energia igual a hf , conforme a teoria de Planck. Um elétron pode ser expelido do metal somente se um fóton possuir energia maior que a função trabalho, e portanto abaixo de uma determinada frequência não há emissão de fotoelétrons. Essa frequência é chamada de limiar fotoelétrico e se relaciona com a função trabalho por:

$$\phi = h f_t = \frac{hc}{\lambda_t} \quad (13)$$

A verificação experimental da teoria proposta por Einstein veio somente por meio de Millikan, que publicou seu trabalho em 1914. Contrariado com a proposta de Einstein sobre a natureza da luz e sua interação com os elétrons, ele obteve por meio de seus experimentos o potencial frenador para várias frequências. Ironicamente seus dados experimentais provaram que a teoria de Einstein estava certa, e ainda poderiam ser usados para se determinar a constante de Planck a partir do coeficiente angular da reta formada em um gráfico de V_0 em função da frequência, conforme a Figura 17.

Figura 17 – Potencial frenador em função da frequência, segundo Millikan



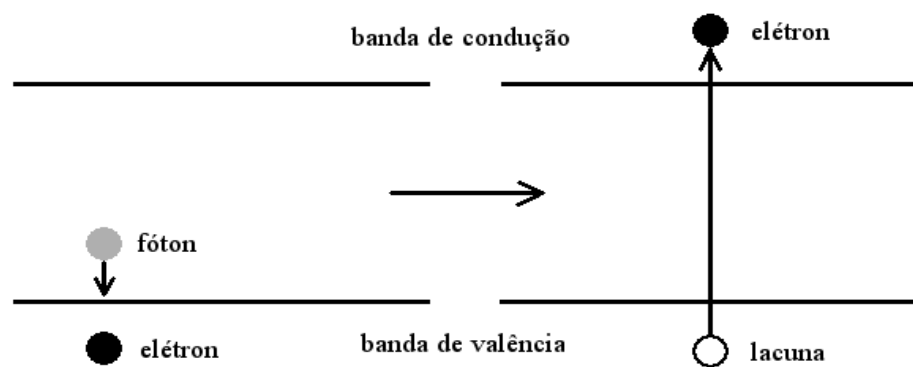
Fonte: TIPLER (1995)

2.8 EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico, assim como o efeito fotoelétrico, consiste na interação de fótons e elétrons e a transferência de energia envolvida no processo e portanto seu estudo está intimamente ligado a teoria quântica. Descoberto por Becquerel em 1839, esse efeito está relacionado à produção de corrente elétrica em certos materiais quando expostos à luz. Entretanto não há emissão de elétrons da superfície do material como o que ocorre com o efeito fotoelétrico. A conversão de energia luminosa em energia elétrica nas células fotovoltaicas (também chamadas de células solares) têm sua base teórica no efeito fotovoltaico.

Em semicondutores, um fóton com energia superior à banda proibida (1,1 eV no silício) pode interagir com o elétron da ligação covalente do material e produzir um par elétron-lacuna, pois sua energia é suficiente para excitar um elétron da banda de valência para a banda de condução, como na Figura 18. Essa transferência de elétrons entre bandas é a característica principal que diferencia o efeito fotoelétrico do efeito fotovoltaico.

Figura 18 – Produção de um par elétron-lacuna no semicondutor por meio de um fóton



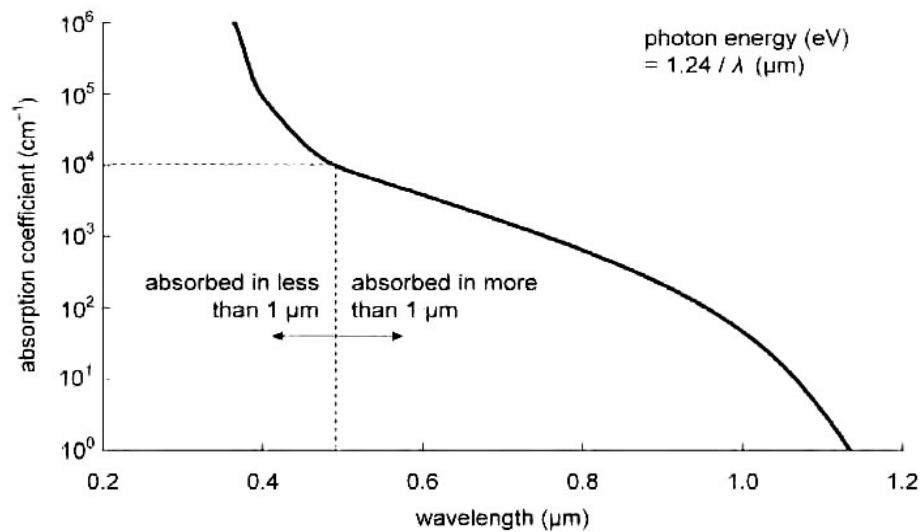
Fonte: TIPLER (1995)

A taxa de geração de pares elétron-lacuna por unidade de volume pode ser dado por:

$$G = \alpha N e^{-\alpha x} \quad (14)$$

onde N é o fluxo de fótons ou fótons por unidade de área por unidade por segundo, α é coeficiente de absorção, que depende do comprimento de onda da luz como o mostrado na Figura 19, e x é a distância até a superfície ($x = 0$ na superfície).

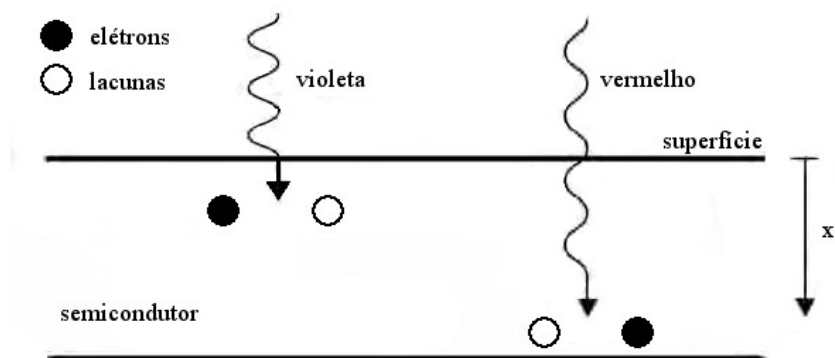
Figura 19 – Coeficiente de absorção α do silício em função do comprimento de onda da luz, sob a temperatura de 300K



Fonte: WENHAM (2007)

Conforme a equação anterior, quanto menor a distância entre um determinado ponto no material e a superfície maior a geração de pares elétron-lacuna, ou seja, a maior parte da geração de pares se dá próximo à superfície do material. Quanto menor o comprimento de onda da luz maior é a quantidade de fótons absorvidos próximos à superfície, devido a dependência do coeficiente de absorção com o comprimento de onda. Fótons de comprimento de ondas maiores, como a luz vermelha, penetram mais o material antes de serem absorvidos. A Figura 20 exemplifica o processo com um fóton da luz violeta (alta energia, baixo comprimento de onda) e um da luz vermelha (baixa energia, alto comprimento de onda).

Figura 20 – Dependência da distância de formação do par elétron-lacuna em função do comprimento de onda



Fonte: WENHAM (2007)

Se não houver um campo elétrico exterior que oriente os pares formados ocorrerá a recombinação dos elétrons com as lacunas, ou em outras palavras, o elétron retornará à banda de valência. A recombinação também se dá por meio da ausência de luz e pelos defeitos ou impurezas no material.

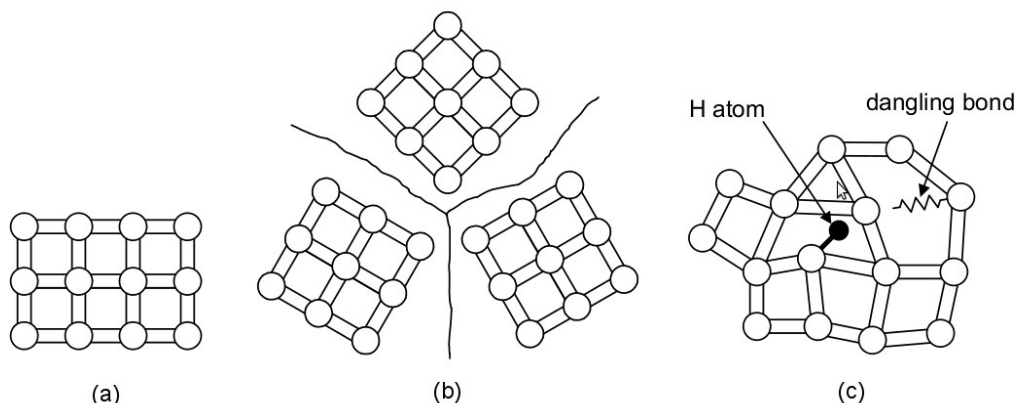
Há duas propriedades relacionadas à recombinação e que indicam a qualidade do material e a viabilidade de utilizá-lo em células solares. O tempo de vida útil de um portador de carga (*carrier lifetime*) gerado pela luz é definido como o tempo médio para a recombinação ocorrer após a formação do par elétron-lacuna (no silício o tempo é de 1 μ s). A distância de difusão do portador (*carrier diffusion length*) é a distância média que uma carga se move até sua recombinação (no silício essa distância é de 100 μ m à 300 μ m) (WENHAM, 2007, p. 38).

2.9 MATERIAIS UTILIZADOS EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Há uma grande variedade de materiais utilizados na confecção de células solares, podendo ser materiais do tipo sólido (cristalinos, policristalinos ou amorfos) ou líquido (eletrólitos) e ainda ser materiais orgânicos ou inorgânicos. Se tratando de sólidos, os materiais utilizados podem ser metais, semicondutores, isolantes e eletrólitos sólidos (FONASH, 2010, p. 10).

O elemento mais utilizado em células fotovoltaicas é o silício. O silício cristalino (c-Si), por ter uma estrutura regular, apresenta o melhor desempenho, mas em contrapartida apresenta o maior custo de produção devido ao maior cuidado e tempo gasto no processo de fabricação. O silício policristalino (poly-Si) apresenta uma eficiência menor em comparação ao silício cristalino, mas seu custo é reduzido, tendo maior viabilidade comercial. Conforme pode ser visto na aproximação feita na Figura 21, o silício policristalino é formado por grãos (pequenos cristais) de silício cristalino orientados em diferentes direções.

Figura 21 – Estruturas: cristalina (a), policristalina (b) e amorfa (c) do silício



Fonte: WENHAM (2007)

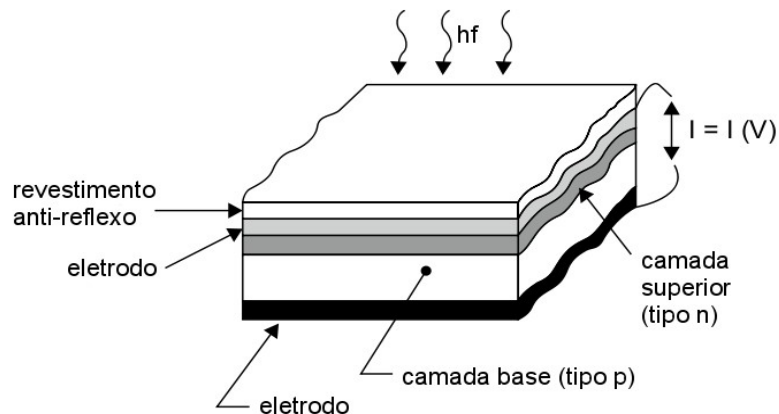
Utilizado principalmente em dispositivos pequenos e de baixo consumo, como relógios e calculadoras, o silício amorfo (a-Si:H) tem como característica o baixo rendimento (cerca de 7%) e o reduzido custo de fabricação. A presença de átomos de silício com apenas três ligações covalentes e de átomos de hidrogênio no material faz com que a banda proibida aumente de 1,1 eV (silício cristalino) para 1,7 eV. Dessa maneira o silício amorfo absorve somente fótons de energia acima dos 1,7 eV, o que leva a absorver menor quantidade em relação ao silício cristalino ou policristalino. Isso, aliado à baixa condutividade de materiais amorfos explica o baixo rendimento. O custo reduzido se dá pela facilidade em se produzir um sólido amorfo e pela espessura do material, pois é fabricado sob a forma de filmes finos que empregam menor quantidade de obra-prima.

Existem outras células solares fabricadas com tecnologia de filme fino além do silício amorfo, como as células de filme fino de seleneto de cobre índio e gálio (CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe), com eficiência máxima medida em laboratório de 20,2% e 16,5% respectivamente.

2.10 CÉLULA FOTOVOLTAICA

A célula fotovoltaica, ou célula solar, é um dispositivo semicondutor que utiliza o efeito fotovoltaico para transformar energia solar em energia elétrica. Sua estrutura consiste basicamente de um semicondutor do tipo *p* em contato com um do tipo *n*, assim como um diodo de junção. A seção transversal de uma célula fotovoltaica é apresentada na Figura 22.

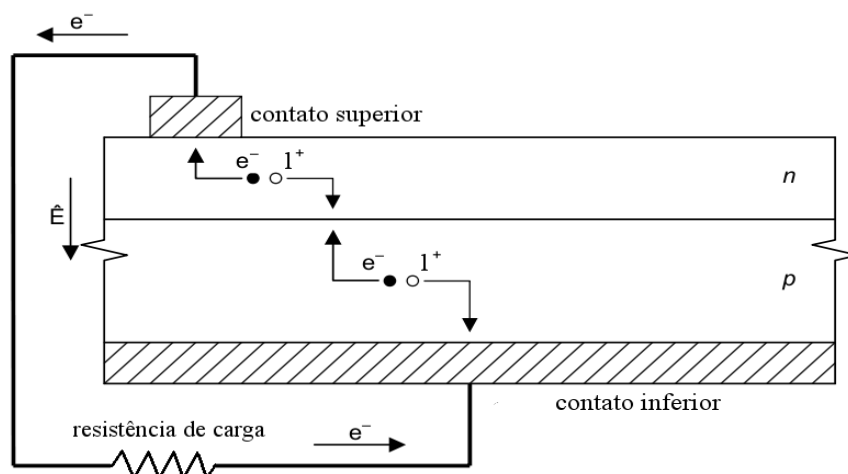
Figura 22 – Seção Típica de uma célula fotovoltaica



Fonte: FONASH (2010)

O campo elétrico presente na junção atrai os elétrons para o lado n e as lacunas para o lado p , conforme a Figura 23. Com uma ligação externa entre os terminais da célula fotovoltaica há formação de corrente elétrica pois o lado n se encontra com excesso de elétrons e o lado p com excesso de lacunas devido a formação e orientação dos pares. No terminal do lado p , chamado também de anodo, os elétrons oriundos do lado n , ou catodo, se combinam com as lacunas, retornando ao estado fundamental e completando o circuito.

Figura 23 – Fluxo ideal dos elétrons e lacunas em um célula fotovoltaica

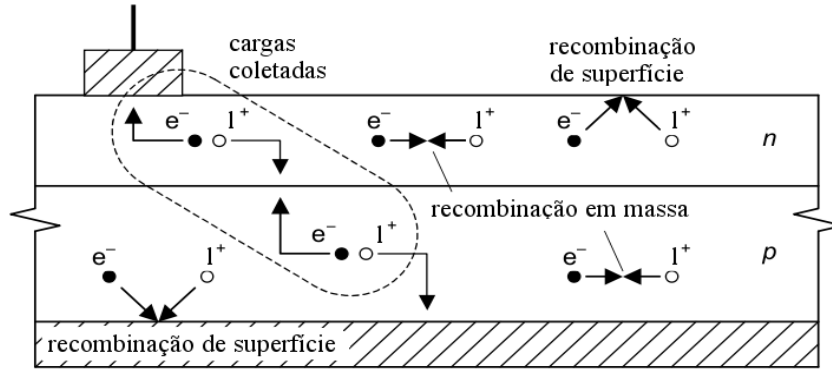


Fonte: WENHAM (2007)

Nem toda radiação incidente em uma célula fotovoltaica é convertida em corrente elétrica. Parte da luminosidade é refletida pelos contatos superior e inferior da célula ou pela superfície do material semiconductor. Uma fração dos pares de cargas gerados são

recombinados novamente antes de atravessarem a junção e formarem a corrente, conforme a Figura 24. Portanto, cargas geradas próximo à junção, principalmente dentro da distância média de difusão do portador, terão maior chance de serem coletadas e formarem corrente.

Figura 24 – Tipos de recombinação de elétrons e lacunas



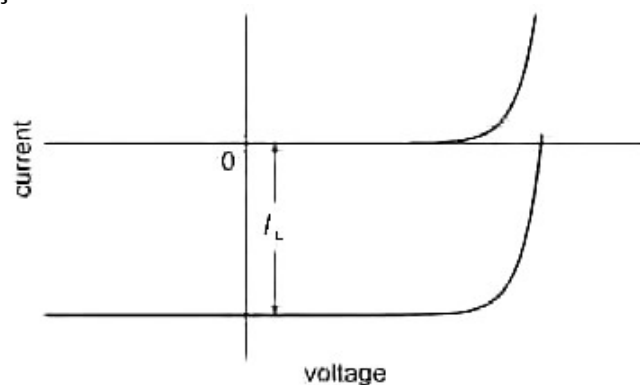
Fonte: WENHAM (2007)

A relação entre a corrente elétrica e a luminosidade incidente em uma célula fotovoltaica ideal pode ser entendida através da equação da corrente de polarização direta de um diodo de junção:

$$I = I_D - I_L = I_0(e^{qV/nkT} - 1) - I_L \quad (15)$$

onde o primeiro termo I_D é a corrente de polarização direta (vista anteriormente) e o segundo termo I_L é a corrente gerada pela luz, com sentido oposto à corrente I_D . A corrente I_L move a curva característica do diodo para baixo na direção do quarto quadrante, sendo possível extrair energia do componente (WENHAM, 2007, p. 44), como exposto na Figura 25.

Figura 25 – Comparação entre a curva I-V de um diodo e uma célula solar



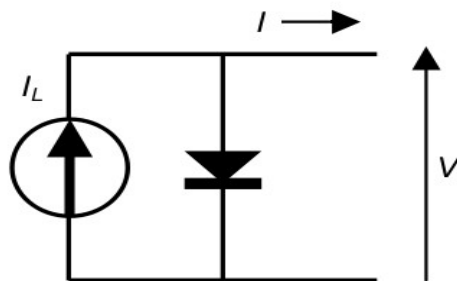
Fonte: WENHAM (2007)

Em células fotovoltaicas ideais a equação é modificada convenientemente para que I seja maior que zero:

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0(e^{qV/nkT} - 1) \quad (16)$$

O circuito equivalente à uma célula fotovoltaica ideal pode ser visto na Figura 26, consistindo de uma fonte de corrente ideal em paralelo à um diodo de junção ideal.

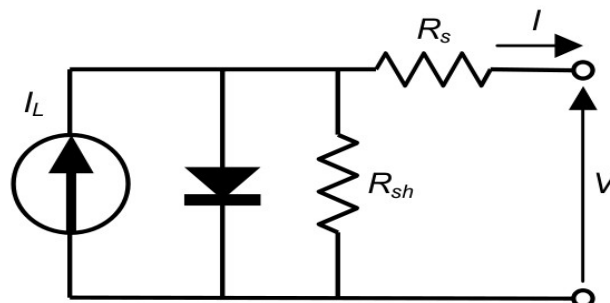
Figura 26 – Circuito ideal equivalente à uma célula fotovoltaica



Fonte: WENHAM (2007)

Para uma abordagem mais realista é preciso considerar as resistências presentes em uma célula solar (WENHAM, 2007), que pode ser representada como uma fonte de corrente em paralelo à um diodo ideal e um resistor R_{SH} (de desvio) R_{SH} , estando os três componentes em série à um resistor R_s conforme pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Circuito equivalente de uma célula solar

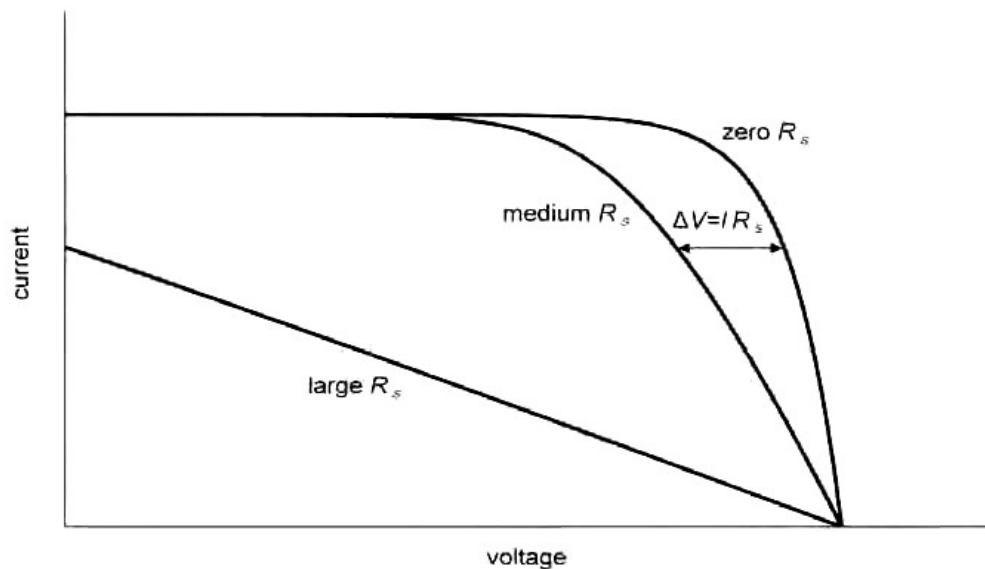


Fonte: WENHAM (2007)

O resistor R_{SH} corresponde à junção pn não ideal e impurezas próximas à junção, o que causa um curto circuito parcial, principalmente próximo às bordas da célula. O

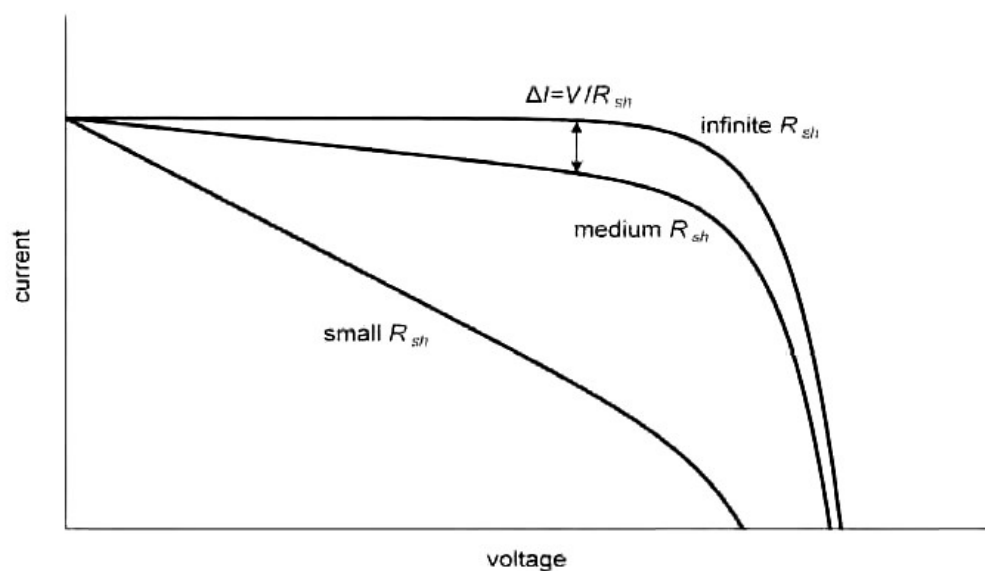
resistor R_s corresponde principalmente à resistividade do material semicondutor, aos contatos metálicos e interconexões e o contato entre o semicondutor e os contatos metálicos (WENHAM, 2007, p.51-52). Os efeitos das resistências R_s e R_{SH} na curva I - V da célula fotovoltaica podem ser vistos nas figuras 28 e 29, respectivamente.

Figura 28 – Efeito da resistência R_s na curva I - V da célula fotovoltaica



Fonte: WENHAM (2007)

Figura 29 – Efeito da resistência R_{SH} na curva I - V da célula fotovoltaica



Fonte: WENHAM (2007)

A corrente I gerada na célula fotovoltaica considerando os efeitos das resistências parasitas é dada por:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I R_S}{n \cdot V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_S}{R_{SH}} \quad \text{onde } V_T = \frac{kT}{q} \quad (17)$$

onde o primeiro termo I_L é a corrente gerada pela luz, o segundo termo corresponde à corrente de um diodo polarizado diretamente, sendo I_0 sua corrente de saturação na ausência de luz, n o fator de perfeição (valores típicos entre 1 e 2), V_T a tensão térmica conforme descrito na equação (2), e o terceiro e último termo corresponde à corrente desviada pelo resistor R_{SH} . O termo $I R_S$ corresponde à queda de tensão presente no resistor R_S .

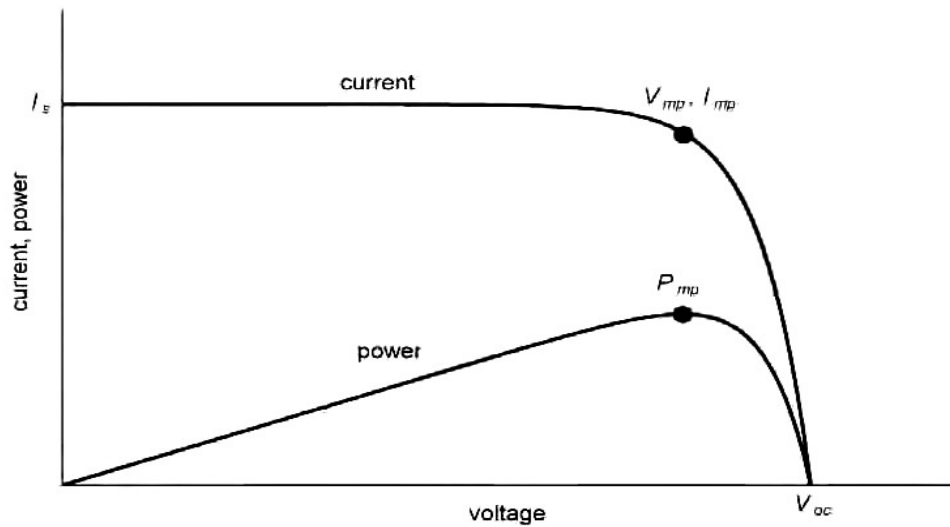
Uma célula fotovoltaica pode ser caracterizada por dois parâmetros limitantes: a corrente de curto circuito I_{SC} onde $V = 0$ e $I_{SC} = I_L$ (aproximadamente), sendo diretamente proporcional à intensidade da luz; e a tensão de circuito aberto V_{OC} que aumenta logaritmicamente com o aumento da luminosidade.

A potência máxima de uma célula fotovoltaica também é usada para caracterizá-la, e corresponde ao ponto estacionário da curva da potência em função da tensão, como visto na figura 30, com as coordenadas em V_{mp} e I_{mp} . A tensão da potência máxima V_{mp} será a solução de $d(I \cdot V)/dV = 0$:

$$V_{mp} = V_{oc} - \frac{n k T}{q} \ln \left[\frac{V_{mp}}{(n k T / q)} + 1 \right] \quad (18)$$

Essa equação não leva em consideração as resistências parasitas da célula fotovoltaica.

Figura 30 – Corrente e potência em função da tensão em uma célula solar



Fonte: WENHAM (2007)

Outra grandeza utilizada para caracterizar uma célula fotovoltaica é o fator de preenchimento ou fator de forma (*fill factor*), que mede a qualidade de uma célula solar e é calculado a partir da potência teórica (obtida por I_{sc} e V_{oc}) e a potência real máxima:

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (19)$$

O fator de preenchimento está diretamente relacionado às resistências parasitas: quanto menor a resistência em série e maior a resistência *shunt*, maior é a qualidade da célula, com o fator de preenchimento se aproximando mais do valor unitário. O fator de preenchimento também está relacionado ao fator de perfeição, quanto mais próximo este se encontra do valor unitário, maior o fator de preenchimento. Finalmente, o fator de preenchimento também está relacionado à temperatura, quanto menor a temperatura, maior o fator de preenchimento. (WENHAM, 2007). Consequentemente o fator de preenchimento pode ser calculado em função desses outros parâmetros, através de expressões empíricas. Desconsiderando-se os efeitos das resistências parasitas, têm-se que:

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1} \quad \text{com} \quad v_{oc} = \frac{V_{oc}}{nkT/q} \quad (20)$$

onde v_{oc} é a tensão de circuito aberto normalizada, que normalmente se encontra na faixa de 10 a 50 V. Esta equação é válida para $v_{oc} > 10$ e possui uma precisão de um dígito na quarta casa decimal (GREEN, 1982).

A expressão para o cálculo do fator de preenchimento considerando-se a resistência em série é dada por

$$FF_s = FF_0 \left(1 - 1,1 r_s \right) + \frac{r_s^2}{5,4} \quad \text{com} \quad r_s = \frac{R_s}{V_{oc} / I_{sc}}, \quad v_{oc} > 10 \quad \text{e} \quad r_s < 0,4 \quad (21)$$

e possui uma precisão de quatro dígitos na terceira casa decimal (GREEN, 1982).

Desconsiderando a resistência em série e levando-se em conta a resistência *shunt*, a expressão é dada por

$$FF_{SH} = FF_0 \left(1 - \frac{v_{OC} + 0,7}{v_{OC}} \cdot \frac{FF_0}{r_{SH}} \right) \quad \text{com } r_{SH} = \frac{R_{SH}}{V_{OC} / I_{SC}} , v_{OC} > 10 \text{ e } r_{SH} > 2,5 \quad (22)$$

e possui uma precisão de um dígito na terceira casa decimal (GREEN, 1982).

Levando-se em conta ambas resistências, pode-se substituir FF_0 por FF_s na expressão de FF_{SH} , o que resulta em uma expressão com precisão de alguns poucos dígitos na segunda casa decimal (GREEN, 1982):

$$FF = FF_s \left(1 - \frac{v_{OC} + 0,7}{v_{OC}} \cdot \frac{FF_s}{r_{SH}} \right) \quad \text{com } v_{OC} > 10 \text{ e } r_s + \frac{1}{r_{SH}} < 0,4 \quad (23)$$

3 METODOLOGIA

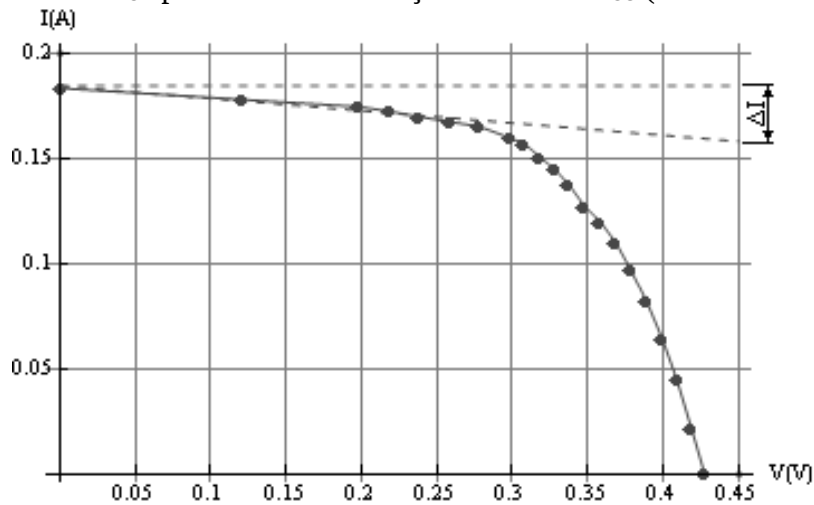
O modelo adotado para descrever o comportamento de uma célula solar se baseia no circuito equivalente conforme Figura 27 e equação (17).

A resistência *shunt* (R_{SH}) pôde ser obtida pela inclinação da reta que passa pelo ponto de corrente de curto circuito (I_{SC} , onde $V = 0$) (WENHAN, 2007). Segundo Beloto (1983) a resistência *shunt* R_{SH} afeta a característica da célula para baixas densidades de correntes, portanto pode-se estimar um valor para R_{SH} a partir da inclinação da reta que passa pelo ponto de corrente de curto circuito I_{SC} ($V = 0$), conforme o tracejado da Figura 31. O resistor R_{SH} pode ser determinado pela equação (24):

$$R_{SH} = \frac{V}{\Delta I} \quad (24)$$

onde V é a tensão correspondente ao local da medição de ΔI , indicado no gráfico da Figura 31.

Figura 31 – Cálculo de R_{SH} por meio da inclinação da reta em I_{SC} (intensidade de 414 W/m²)



Fonte: Autor, com dados experimentais de LLAMAZARES (2010)

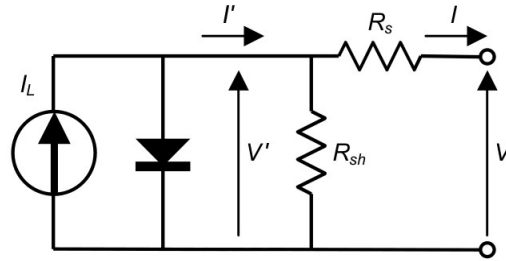
Para medições mais precisas da resistência *shunt*, pode-se calculá-la a partir do coeficiente angular da reta, por meio de regressão linear, conforme equação (25):

$$R_{SH} = \frac{1}{|B|} \text{ com } I = A + B \cdot V \quad (25)$$

O ideal é que a avaliação da resistência *shunt* seja realizada no intervalo de tensões de 0 a 0,1 V (BELOTO, 1983), onde não há a curva exponencial produzida pelo diodo do modelo.

Os outros dados de caracterização, como a resistência série (R_s), a corrente gerada pela luz (I_L), a corrente de saturação (I_0) e o fator de perfeição (n) foram determinados por método iterativo, variando-se R_s até que o coeficiente de correlação r da regressão logarítmica dos dados experimentais corrigidos pela queda de tensão de R_s e da corrente de fuga em R_{SH} (BELOTO, 1983) fosse o mais próximo possível de 1. As equações utilizadas para a correção dos dados experimentais se encontram em (26) e (27), com V' e I' indicados na Figura 32. A regressão logarítmica dos dados experimentais corrigidos foi realizada com base na equação (28), que é derivada da equação (29) (modelo ideal de célula fotovoltaica).

Figura 32 – Circuito equivalente de uma célula solar



Fonte: WENHAM (2007) com modificações do autor

$$V' = V + I \cdot R_s \quad (26)$$

$$I' = I + \frac{V'}{R_{SH}} \quad (27)$$

$$\ln(I_L - I') = \ln I_0 + \frac{V'}{n V_T}, \text{ com } \exp\left(\frac{V'}{n V_T}\right) \gg 1 \quad (28)$$

$$I' = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V'}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (29)$$

A regressão logarítmica não foi realizada na região de baixa injeção do diodo (região próxima à I_{SC}) pois nessa região não há o efeito da exponencial produzida pelo diodo. Foi considerado temperatura ambiente na obtenção dos dados (27 °C), logo $V_T = 25,85$ mV.

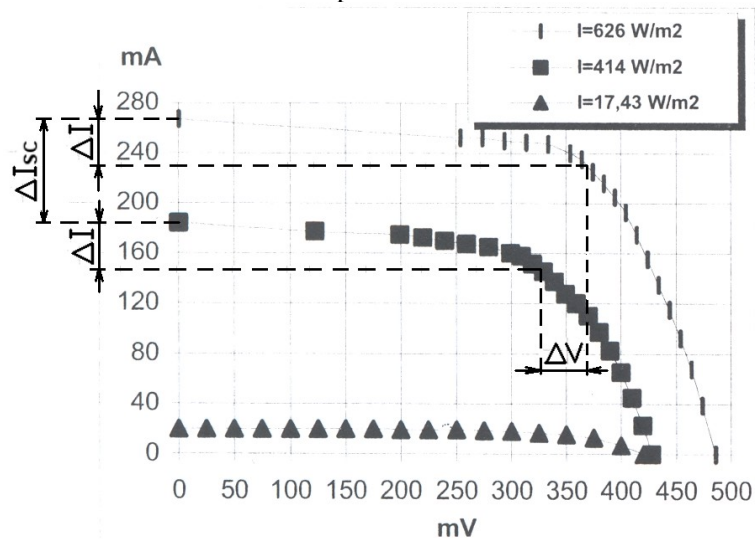
A resistência em série R_s pode ser estimada inicialmente pelo método de Wolf e Rauschenbach (LLAMAZARES et al, 2000. WOLF e RAUSCHENBACH, 1961), ilustrado na Figura 33. O método consiste na utilização de duas curvas $V \times I$ obtidas por intensidades luminosas diferentes (não é necessário saber os valores das intensidades). Escolhe-se um ΔI arbitrário a partir da corrente de curto circuito I_{SC} de uma curva e traça-se uma reta paralela ao eixo das abscissas e o cruzamento com a curva determinará um ponto. É realizado o mesmo procedimento para a outra curva, utilizando-se o mesmo ΔI . Segundo Wolf e Rauschenbach é

conveniente escolher ΔI de tal forma que se obtenha pontos próximos ao “joelho” da curva, pois é essa região que mais sofre o efeito de R_s . A resistência R_s poderá ser determinada conforme equação (30):

$$R_s = \frac{\Delta V}{\Delta I_{SC}} \quad (30)$$

onde ΔV é a diferença de tensão entre dos dois pontos determinados e ΔI_{SC} é a diferença de corrente de curto circuito das duas curvas. Essa equação é baseada na translação de curvas $V \times I$: duas curvas $V \times I$ de intensidades diferentes podem “se encaixar” se houver translação de $\Delta I_{SC} \times R_s$ (ou seja, ΔV) nos eixos da abscissas e de ΔI_{SC} nos eixos das ordenadas. No método de Wolf o efeito da resistência *shunt* não é considerado na translação das curvas.

Figura 33 – Cálculo da resistência em série pelo método de Wolf e Rauschenbach



Fonte: LLAMAZARES (2000) com modificações do autor

Comparou-se também o valor do fator de preenchimento experimental, equação (19), com o obtido por equações empíricas (GREEN, 1982) que dependem da tensão de circuito aberto V_{OC} e dos valores de resistências parasitas, conforme equações (20) à (23). Pode ser visto essa comparação na equação (31):

$$\Delta FF (\%) = \frac{FF_{equação(23)} - FF_{equação(19)}}{FF_{equação(23)}} \times 100 \quad (31)$$

3.1 MATERIAIS E FERRAMENTAS

Os materiais e ferramentas utilizados no desenvolvimento do projeto foram:

- Estudo das características físicas de uma célula fotovoltaica;
- Dados experimentais de uma célula fotovoltaica de silício cristalino SFH 120 fabricada pela Siemens (LLAMAZARES, 2010), conforme APÊNDICE A;
- Dados experimentais de uma célula fotovoltaica padrão de referência CHINA-923 (PAES, 2012), conforme APÊNDICE B;
- Dados experimentais da célula espacial Spectrolab (PAES, 2012), conforme APÊNDICE C;
- Planilha eletrônica Calc do LibreOffice 3.5.4;
- Software Mathematica;
- Software GNU Octave 3.6.1;
- Software de captura esquemática e simulação eletrônica ISIS/Proteus.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA CÉLULA SIEMENS SFH 120

Para a caracterização da célula SIEMENS SFH 120 (LLAMAZARES), primeiro calculou-se a resistência *shunt* conforme equação (25), ou seja, de acordo com a obtenção do coeficiente angular da reta que passa pelo ponto de corrente de curto circuito I_{SC} ($V = 0$) conforme Figura 31. Encontra-se na Tabela 1 os valores obtidos.

Tabela 1 – Valores de R_{SH} calculados a partir de regressão linear, para duas intensidades de luz

Quantidade de pontos utilizados	R_{SH} (Ω) à 414 W/m ²	Coeficiente de correlação r	R_{SH} (Ω) à 626 W/m ²	Coeficiente de correlação r
2	22,1	-1,00000	17,4	-1,00000
3	22,3	-0,99997	17,7	0,99970
4	20,7	-0,99466	17,3	0,99904
5	18,8	-0,98255	17,1	0,99870

Fonte: autor

A resistência R_S foi estimada inicialmente pelo método de Wolf e Rauschenbach, conforme discutido na metodologia (equação (30) e Figura 33), e os valores encontrados podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Estimativa inicial de R_S utilizando-se as curvas de 414 e 626 W/m², onde $\Delta I_{SC} = 83$ mA

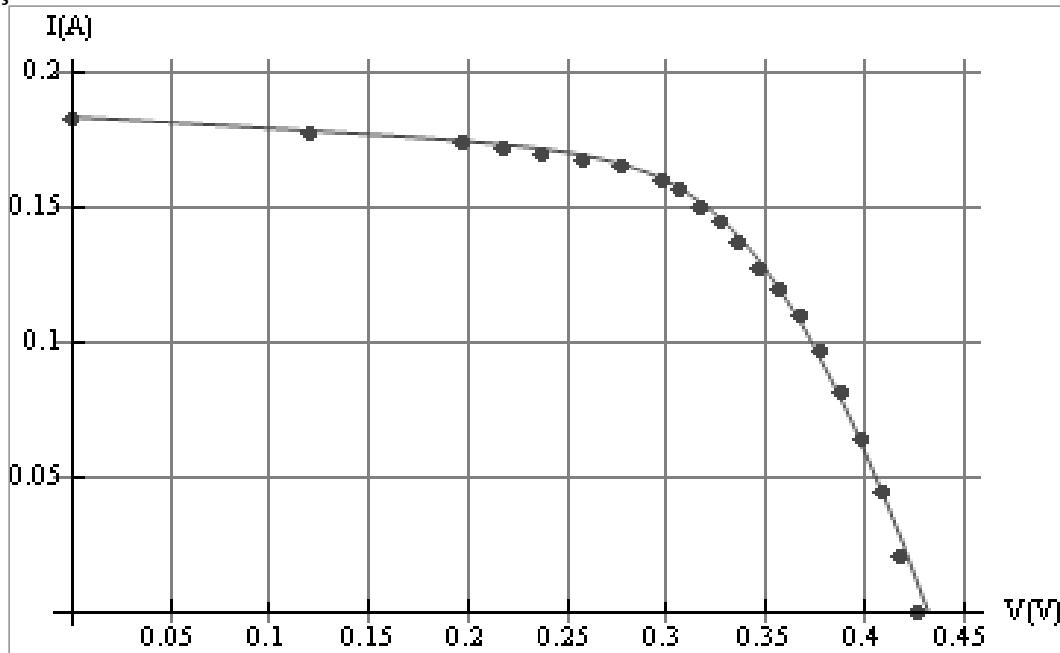
ΔI (mA)	ΔV (mV)	R_S (Ω)
38	42	0,51
110	27	0,33
185	30	0,36

Fonte: autor

Adotando-se $R_S = 0,33 \Omega$ e $R_{SH} = 22,3 \Omega$ (valor encontrado para radiação de 414 W/m²) foram obtidos os valores de $n = 1,13$, $I_0 = 6,22 \cdot 10^{-8}$ A e $I_L = 186$ mA, com um coeficiente de correlação de 0,995, para uma temperatura de 27 °C (300 K), conforme equação (28).

O gráfico da Figura 34 foi feito através do Mathematica, com a substituição dos parâmetros encontrados na equação (17), conforme o modelo adotado.

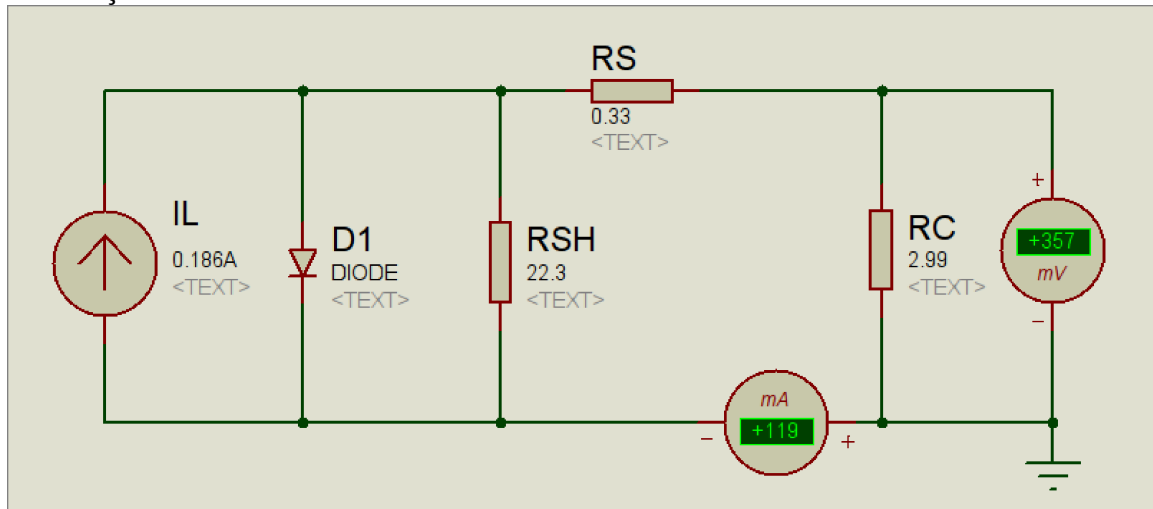
Figura 34 – Comparação da curva $I \times V$ teórica com os dados experimentais (pontos), para radiação de 414 W/m^2 em uma célula fotovoltaica SFH 120



Fonte: autor

O circuito equivalente da célula fotovoltaica foi montado no ISIS/Proteus e pode ser visto na Figura 35. As propriedades “Saturation Current”, “Ohmic Resistance” e “Emission Coefficient” do diodo D1 foram alteradas de (Default) para, $6,22 \cdot 10^{-8}$, 0 e 1.13 (exatamente como se apresenta, padrão do programa), de acordo com os parâmetros obtidos anteriormente. A opção “Ohmic Resistance” é referente à resistência série do diodo D1, o que justifica a alteração do valor de (Default) para 0, por se tratar de um diodo ideal sem resistências, conforme o modelo. Não há opções para a resistência *shunt*, o que indica que ela não é considerada na simulação do diodo. Foi adicionado um resistor de carga RC ao circuito, calculado a partir da tensão dos dados experimentais e da corrente encontrada através da equação de corrente, conforme pode ser visto na Tabela 3.

Figura 35 – Circuito equivalente da célula fotovoltaica SFH 120 com resistor de carga RC para variação da corrente e tensão



Fonte: autor

Tabela 3 – Resultados encontrados pela equação matemática e pelo circuito simulado no ISIS/Proteus

Dados experimentais ¹		Modelo matemático		Circuito equivalente simulado no ISIS/PROTEUS		
V(V)	I(A)	V(V)	I(A)	RC(Ω)	V(V)	I(A)
0,238	0,170	0,238	0,171	1,39	0,238	0,171
0,359	0,120	0,359	0,117	3,07	0,359	0,117
0,389	0,082	0,389	0,077	5,05	0,389	0,077
0,419	0,022	0,419	0,026	16,2	0,419	0,026

Fonte: LLAMAZARES (2000) e autor

Conforme esperado, os resultados da simulação no ISIS/Proteus foram iguais ao calculados no modelo matemático, conforme equação (17).

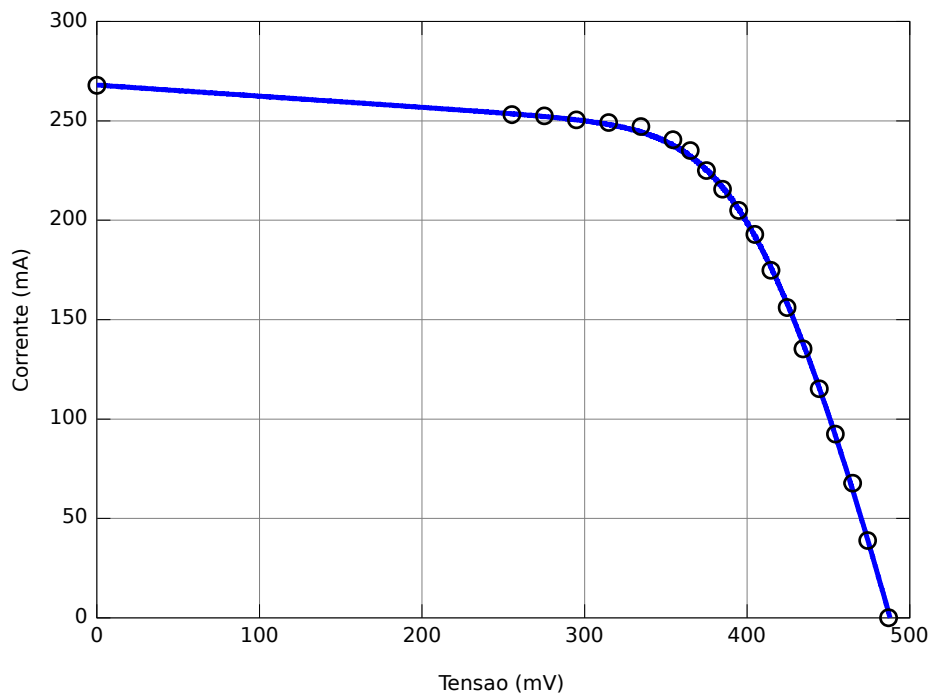
Nota-se na Figura 34 um pequeno desvio na curva teórica próximo ao ponto de tensão de circuito aberto V_{OC} , portanto na intenção de se obter uma melhor curva utilizou-se o método iterativo, ou seja, ajustou-se R_s até a obtenção de um melhor coeficiente de correlação.

Adotando-se $R_s = 0,33 \, \Omega$ inicialmente e $R_{SH} = 17,7 \, \Omega$ (valor encontrado para radiação de $626 \, \text{W/m}^2$), através do método iterativo obteve-se $R_s = 0,244 \, \Omega$, $n = 0,932$, $I_0 = 3,909 \cdot 10^{-10} \, \text{A}$ e $I_L = 271,6 \, \text{mA}$, com um coeficiente de correlação de 0,99919. Para a regressão

logarítmica utilizou-se os pontos onde $V' \geq 430$ mV, onde foi possível se observar uma forte correlação conforme Figura 38.

Pode ser observado na Figura 36 a comparação entre os dados experimentais e a curva teórica obtida a partir desta segunda caracterização realizada na célula SFH 120 da Siemens. Nota-se que a curva teórica se aproximou bastante dos dados experimentais, confirmando-se que pode-se ajustar R_s até se encontrar uma forte correlação ($r = 0,99919$) entre os dados. Utilizou-se um *script* no GNU Octave para se obter o gráfico (APÊNDICE D).

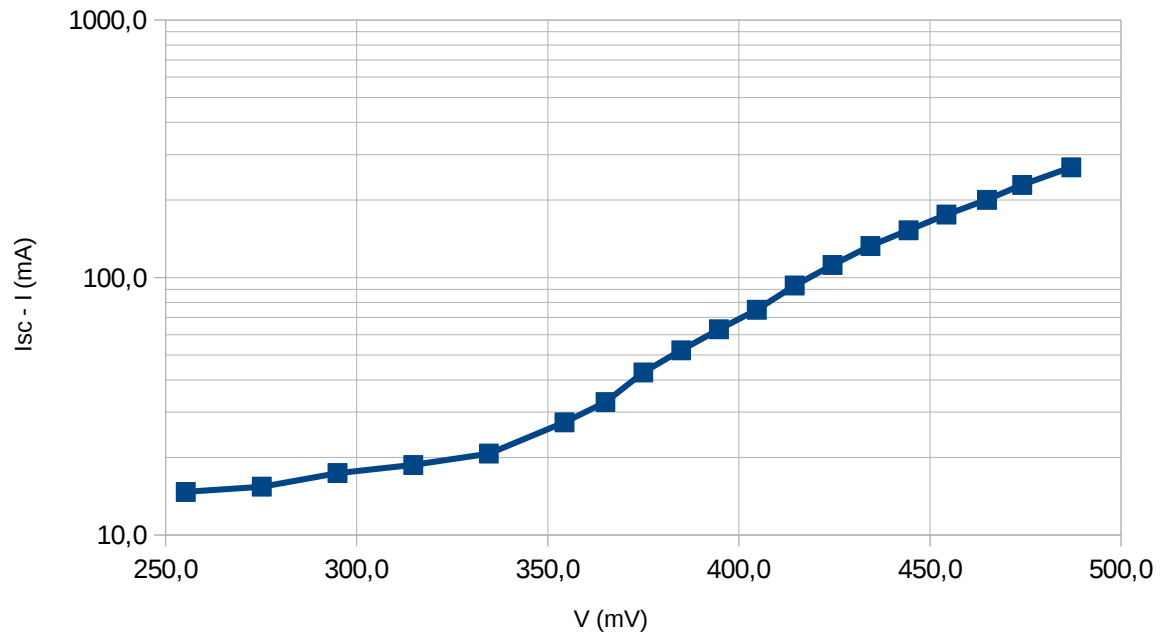
Figura 36 – Comparação da curva $I \times V$ teórica com os dados experimentais (pontos), para radiação de 626 W/m^2 em uma célula fotovoltaica SFH 120 da Siemens, $R_s = 0,244 \Omega$ e $R_{sh} = 17,7 \Omega$



Fonte: Autor

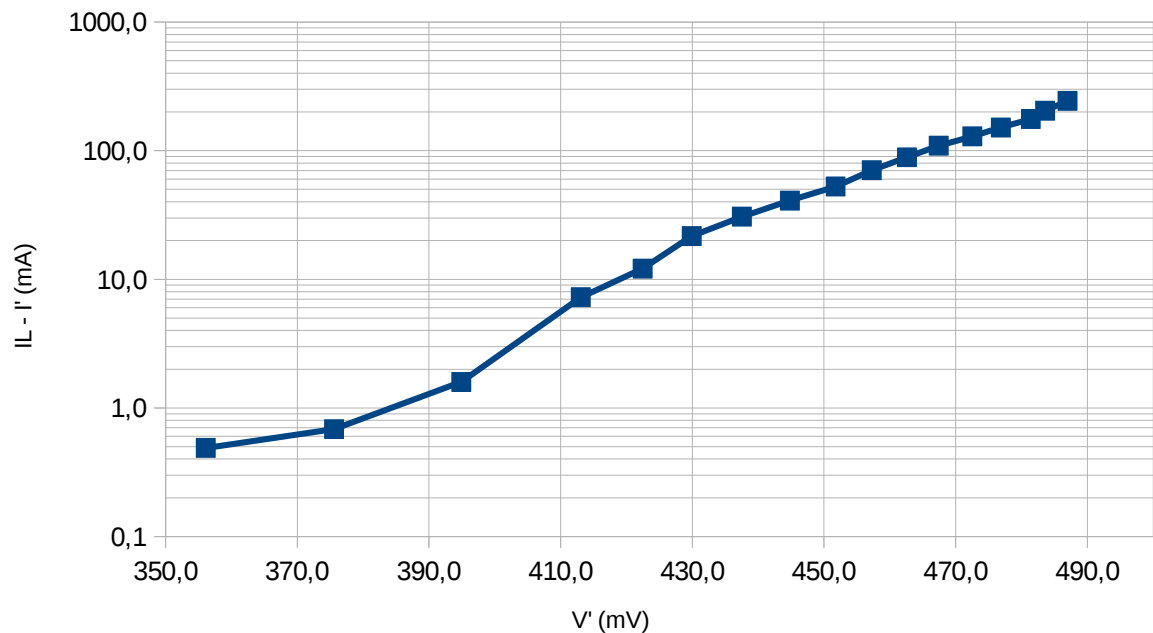
Utilizando-se escala logarítmica, observa-se a linearização tanto nos dados experimentais como nos dados experimentais corrigidos pelas perdas dos resistores parasitas conforme equações (26) e (27) nas Figuras 37 e 38 respectivamente, justificando a regressão logarítmica com base na equação (28), utilizando-se de preferência os pontos de alta injeção no diodo do modelo (pontos próximos à tensão de circuito aberto V_{OC} , onde é observado uma linearização maior). Notar que a ordenada do gráfico da Figura 37 é $I_{SC} - I$, artifício usado para se poder comparar com a Figura 38, cuja ordenada é $I_L - I'$, conforme equação (28).

Figura 37 – Linearização dos dados experimentais da célula fotovoltaica SFH 120 da Siemens, radiação de 626 W/m^2



Fonte: Autor

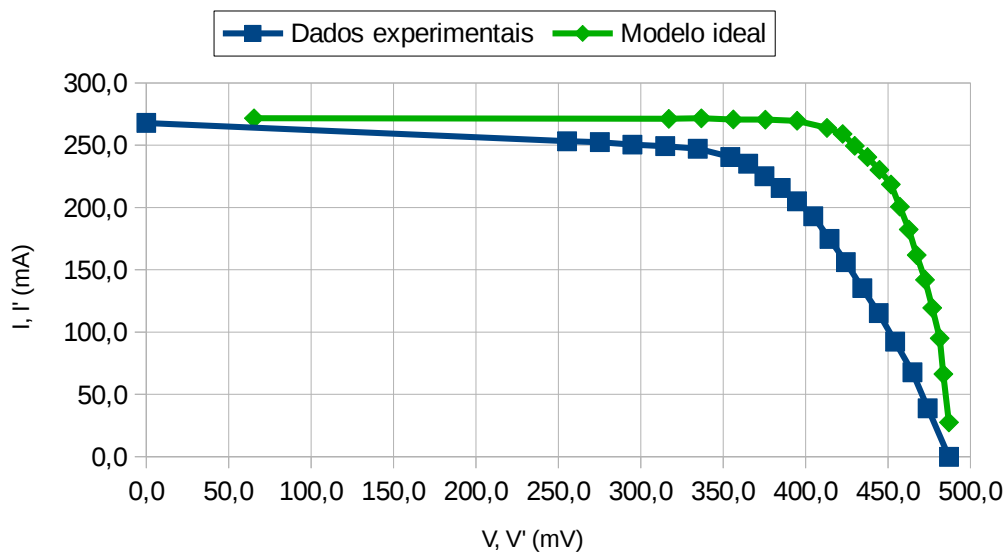
Figura 38 – Linearização dos dados experimentais corrigidos pelas perdas dos resistores parasitas da célula fotovoltaica SFH 120 da Siemens, radiação de 626 W/m^2 , $R_s = 0,244 \Omega$ e $R_{SH} = 17,7 \Omega$



Fonte: Autor

A comparação entre os dados experimentais e os dados experimentais corrigidos pelas equações (26) e (27) pode ser observada na Figura 39, nota-se que os efeitos das resistências parasitas se assemelham ao discutido na seção 2.10 (vide Figuras 28 e 29).

Figura 39 – Comparação entre os dados experimentais e os dados experimentais corrigidos pelas perdas dos resistores parasitas (tensão e corrente no modelo ideal) da célula SFH 120 da Siemens, radiação de 626 W/m^2 , $R_s = 0,244 \Omega$ e $R_{SH} = 17,7 \Omega$



Fonte: Autor

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA CÉLULA CHINA-923

Através da metodologia empregada para caracterização da célula, obteve-se para a célula CHINA-923 (PAES) a caracterização expressa nas Tabelas 4 e 5. Observa-se que ajustou-se R_s tanto pela diferença dos fatores de forma (experimental e teórico), de forma a se obter a menor diferença, como pelo coeficiente de correlação r , de forma a se obter o maior coeficiente possível, como discutido anteriormente na metodologia. Observa-se também nas Tabelas 4 e 5 a utilização de diferentes pontos para compor a caracterização, sendo sempre utilizado os pontos de alta injeção no diodo do modelo (pontos próximos à tensão de circuito aberto, V_{oc}).

Tabela 4 – Caracterização da célula solar CHINA-923 para uma temperatura de 27 °C (300 K), ajuste pelo fator de preenchimento ΔFF (%), R_{SH} ausente e $I_L = I_{SC}$ para todas as situações

Nº pontos	R_s (Ω)	I_0 (A)	n	r	ΔFF (%)
13	0	2,009E-06	1,927	0,99799	-0,1437
12	0	2,218E-06	1,944	0,99695	-0,3648
11	0,083	1,544E-07	1,582	0,99960	-0,1307
10	0,076	1,832E-07	1,601	0,99913	0,0012
9	0,083	1,405E-07	1,572	0,99893	0,0148

Fonte: Autor

Tabela 5 – Caracterização da célula solar CHINA-923 para uma temperatura de 27 °C (300 K), ajuste pelo coeficiente de correlação r , R_{SH} ausente e $I_L = I_{SC}$ para todas as situações

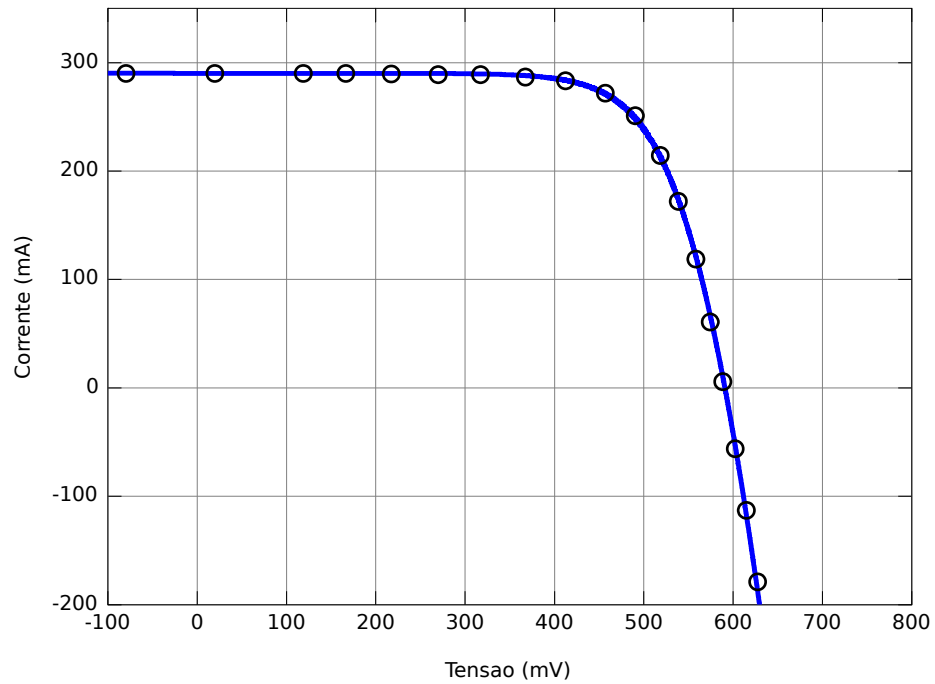
Nº pontos	R_s (Ω)	I_0 (A)	n	r	ΔFF (%)
13	0,049	8,028E-07	1,790	0,99896	-1,0373
12	0,058	5,734E-07	1,743	0,99851	-0,9142
11	0,088	1,281E-07	1,562	0,99962	-0,1314
10	0,102	4,822E-08	1,463	0,99977	0,4504
9	0,115	1,443E-08	1,357	0,99994	1,2023

Fonte: Autor

Escolheu-se os dados mais adequados para as simulações e teste do modelo adotado, de forma que conciliassem a maior correlação possível e o menor valor possível para ΔFF . Desta forma, os dados da caracterização escolhida foram: $R_s = 0,088 \Omega$, $I_0 = 1,281 \cdot 10^{-7}$ A, e $n = 1,562$ (com $r = 0,99962$ e $\Delta FF = -0,1314$ %). Notou-se que na célula utilizada o resistor *shunt* era ausente ou muito alto, e portanto $I_L = I_{SC}$ (igual à corrente de curto circuito). Pode ser observado no gráfico da Figura 40 a comparação entre os dados experimentais e a curva teórica obtida por meio da caracterização realizada. Utilizou-se um *script* no GNU Octave para se obter o gráfico (APÊNDICE D).

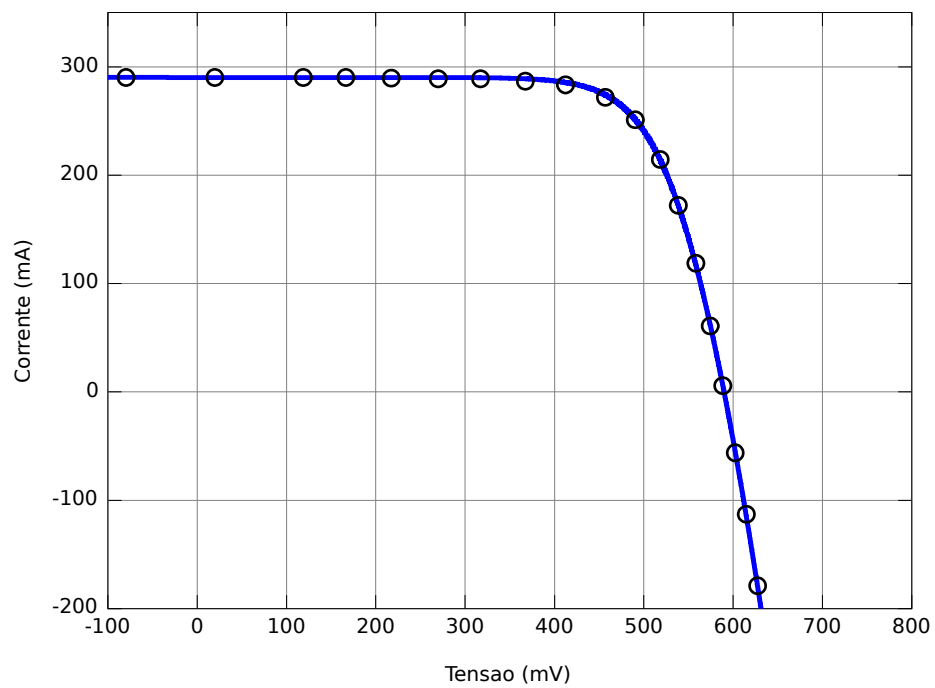
Observou-se na Tabela 5 uma correlação muito forte entre os dados, com $r = 0,99994$, porém com $\Delta FF = 1,2023$, ou seja, maior que a seleção de dados anterior. Utilizando-se os dados caracterizados dessa situação ($R_s = 0,115 \Omega$, $I_0 = 1,443 \cdot 10^{-8}$ A, e $n = 1,357$), obteve-se o gráfico da Figura 41.

Figura 40 – Comparação da curva $I \times V$ teórica com os dados experimentais (pontos), para radiação de 1353 W/m^2 (AM0) em uma célula fotovoltaica CHINA-923, $R_s = 0,088 \Omega$



Fonte: Autor

Figura 41 – Comparação da curva $I \times V$ teórica com os dados experimentais (pontos), para radiação de 1353 W/m^2 (AM0) em uma célula fotovoltaica CHINA-923, $R_s = 0,115 \Omega$



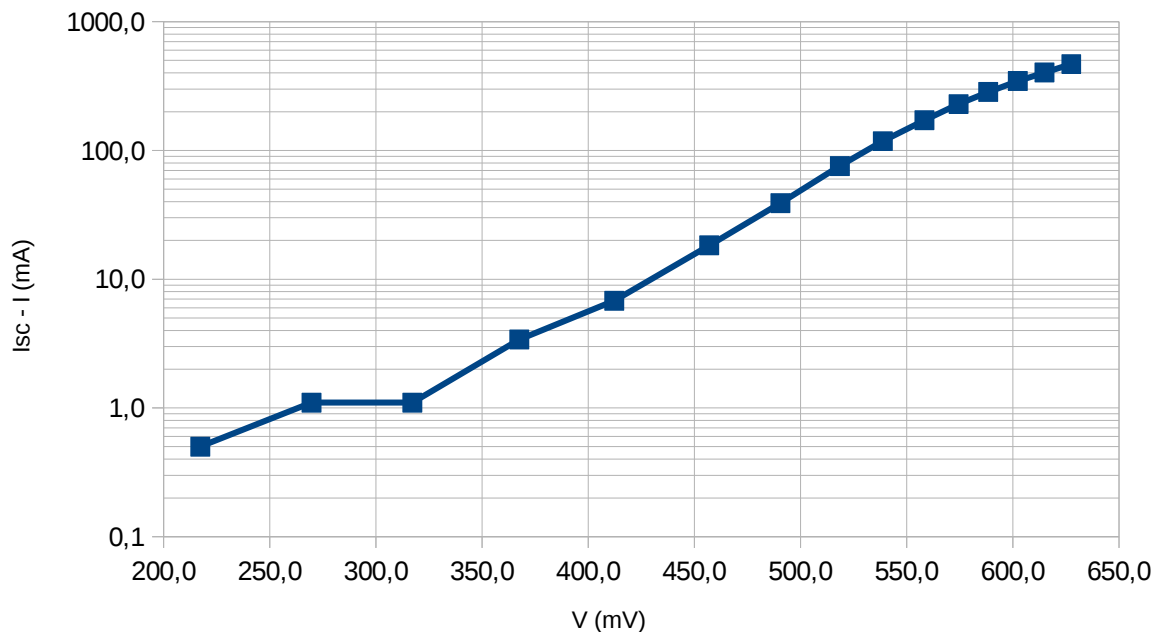
Fonte: Autor

Observa-se na Figura 41 que a curva teórica se aproxima mais dos dados experimentais na região próxima à V_{OC} (alta injeção no diodo do modelo), ou seja, na região em que R_s tem maior influência, indicando que o uso do coeficiente de correlação r é mais relevante do que o uso da diferença do fator de preenchimento experimental e teórico (ΔFF).

Nas Figuras de 42 e 43, utilizando-se escala logarítmica, observa-se a linearização tanto nos dados experimentais como nos dados experimentais corrigidos pelas perdas dos resistores parasitas da célula solar (neste caso, somente R_s), conforme equações (26) e (27), justificando a regressão logarítmica com base na equação (28). Nota-se que para determinados pontos do gráfico da Figura 43, a correlação entre os dados é bastante forte (os pontos se aproximam de uma reta), como já observado na correlação calculada anteriormente. Notar que a ordenada do gráfico da Figura 42 é $I_{SC} - I$, artifício usado para se poder comparar com a Figura 43, cuja ordenada é $I_L - I'$, conforme equação (28).

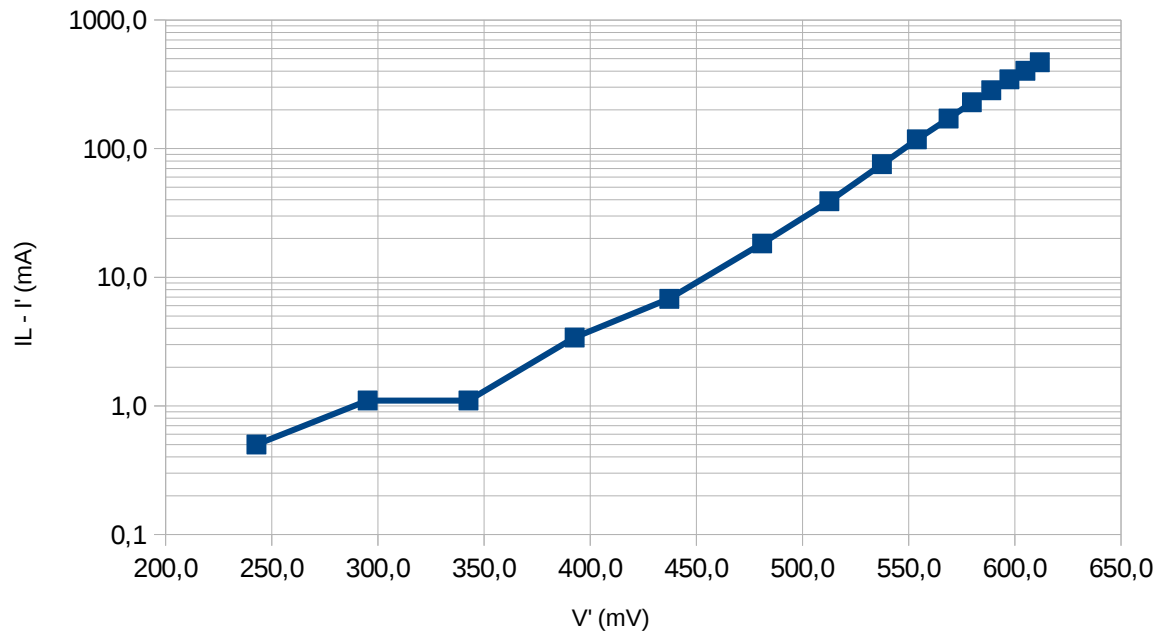
A comparação entre os dados experimentais e os dados experimentais corrigidos pelas equações (26) e (27) pode ser observada na Figura 44, nota-se que o efeito da resistência em série se assemelha ao discutido na seção 2.10 (vide Figura 28).

Figura 42 – Linearização dos dados experimentais da célula fotovoltaica CHINA-923, radiação de 1353 W/m^2 (AM0)



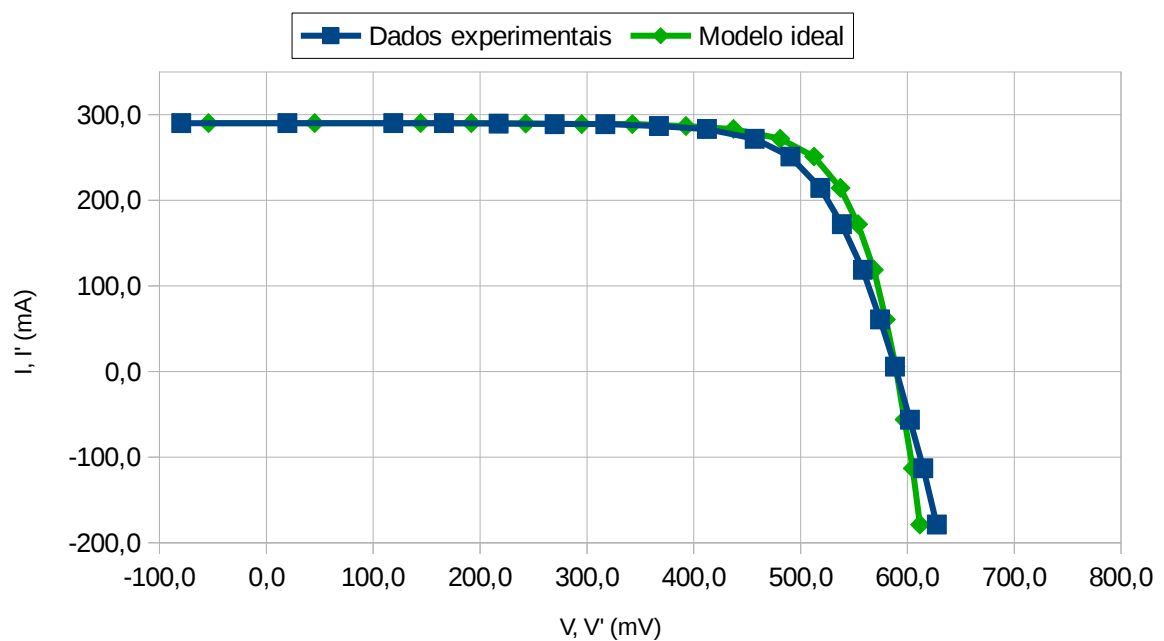
Fonte: Autor

Figura 43 – Linearização dos dados experimentais corrigidos pelas perdas dos resistores parasitas da célula fotovoltaica CHINA-923, radiação de 1353 W/m^2 (AM0), $R_s = 0,088 \Omega$



Fonte: Autor

Figura 44 – Comparação entre os dados experimentais e os dados experimentais corrigidos pelas perdas dos resistores parasitas (tensão e corrente no modelo ideal) da célula CHINA-923, radiação de 1353 W/m^2 (AM0), $R_s = 0,088 \Omega$



Fonte: Autor

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA CÉLULA SPECTROLAB

Foi utilizada outra célula fotovoltaica para continuar o teste de viabilidade do modelo de célula adotado e a metodologia utilizada neste trabalho. Escolheu-se a célula Spectrolab (PAES, 2012), e a caracterização pode ser observada nas Tabelas 6 e 7:

Tabela 6 – Caracterização da célula solar Spectrolab para uma temperatura de 27 °C (300 K), ajuste pelo fator de preenchimento ΔFF (%), R_{SH} ausente e $I_L = I_{SC}$ para todas as situações

Nº pontos	R_s (Ω)	I_0 (A)	n	r	ΔFF (%)
12	0,190	3,568E-12	0,922	0,99641	-0,0003
10	0,134	5,845E-10	1,156	0,99971	0,0048
8	0,142	3,351E-10	1,125	0,99989	-0,0058
6	0,143	3,072E-10	1,120	0,99964	0,0056

Fonte: Autor

Tabela 7 – Caracterização da célula solar Spectrolab para uma temperatura de 27 °C (300 K), ajuste pelo coeficiente de correlação r , R_{SH} ausente e $I_L = I_{SC}$ para todas as situações

Nº pontos	R_s (Ω)	I_0 (A)	n	r	ΔFF (%)
12	0,159	3,591E-11	1,014	0,99914	0,6348
10	0,145	1,895E-10	1,094	0,99997	0,2651
8	0,146	1,719E-10	1,089	0,99992	0,2807
6	0,158	6,190E-12	0,942	0,99987	1,7761

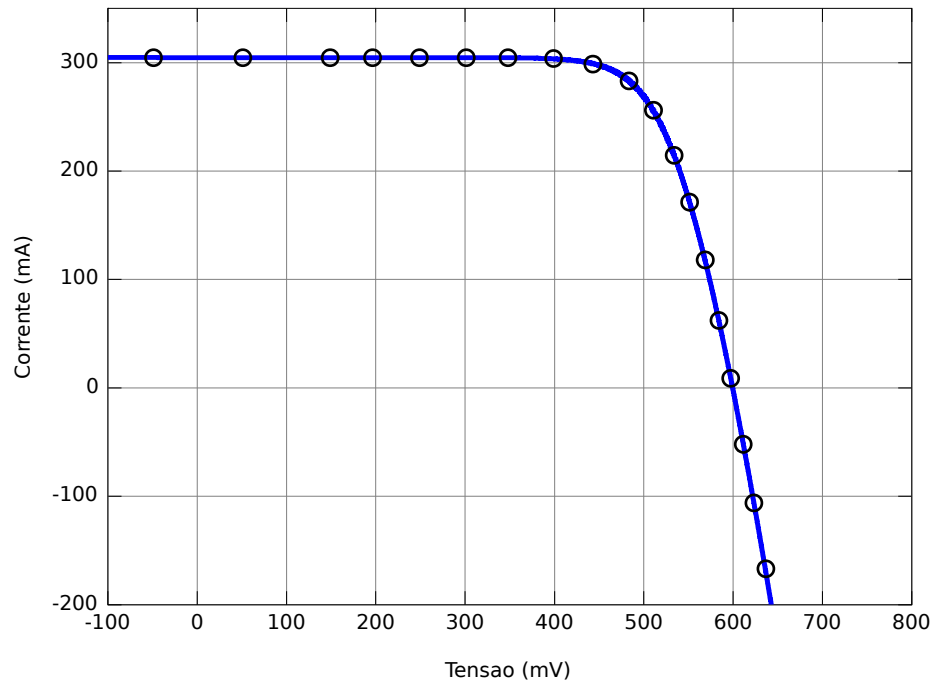
Fonte: Autor

Os dados mais adequados foram: $R_s = 0,145 \Omega$, $I_0 = 1,895 \cdot 10^{-10}$ A, e $n = 1,094$ (com $r = 0,99997$ e $\Delta FF = 0,2651$ %). R_{SH} ausente e $I_0 = I_{SC}$. A análise foi feita de modo análogo à célula anterior, e pode ser observado no gráfico da Figura 45 a comparação entre os dados experimentais e a curva teórica obtida por meio da caracterização realizada.

Na Figura 47 pode ser observado uma linearização maior nos dados experimentais corrigidos pela perda da resistência em série, comparando-se com a Figura 46, o que justifica mais uma vez a correção dos dados conforme equações (26) e (27) e a regressão logarítmica com base na equação (28). Conforme notado nas células anteriores, a correlação entre os dados é maior para a região de alta injeção no diodo.

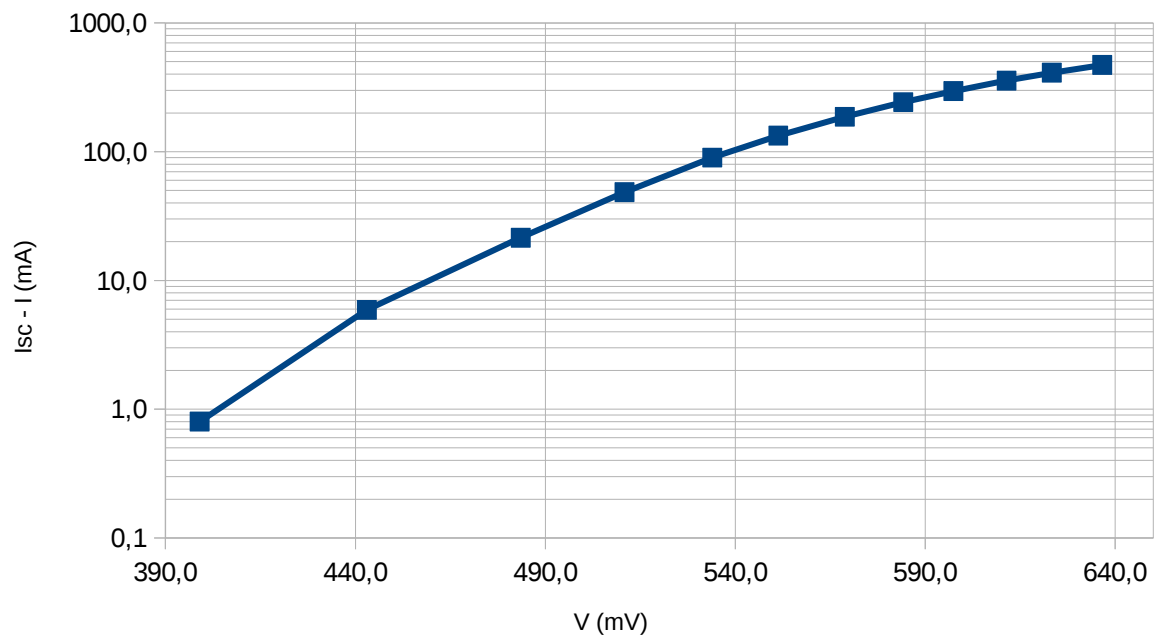
A comparação entre os dados experimentais e os dados experimentais corrigidos pelas equações (26) e (27) pode ser observada na Figura 48, nota-se novamente que o efeito da resistência em série se assemelha ao discutido na seção 2.10 (vide Figura 28).

Figura 45 – Comparação da curva $I \times V$ teórica com os dados experimentais (pontos), para radiação de 1353 W/m^2 (AM0) em uma célula fotovoltaica Spectrolab, $R_s = 0,145 \, \Omega$



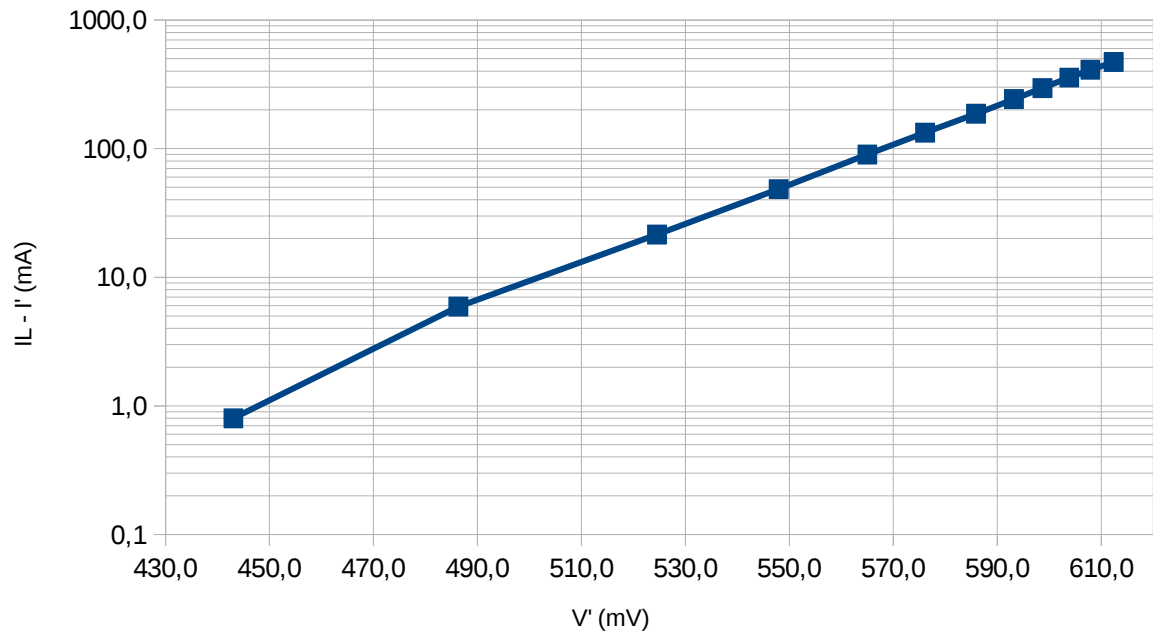
Fonte: Autor

Figura 46 – Linearização dos dados experimentais da célula fotovoltaica Spectrolab, radiação de 1353 W/m^2 (AM0)



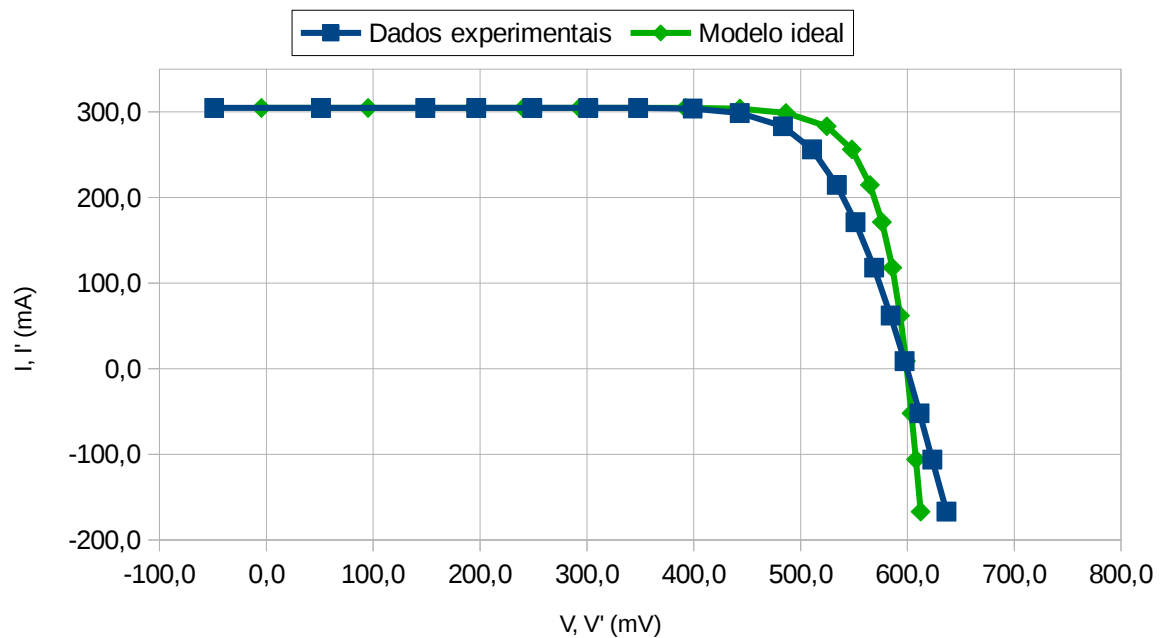
Fonte: Autor

Figura 47 – Linearização dos dados experimentais corrigidos pelas perdas dos resistores parasitas da célula fotovoltaica Spectrolab, radiação de 1353 W/m^2 (AM0), $R_s = 0,145 \Omega$



Fonte: Autor

Figura 48 – Comparação entre os dados experimentais e os dados experimentais corrigidos pelas perdas dos resistores parasitas (tensão e corrente no modelo ideal) da célula Spectrolab, radiação de 1353 W/m^2 (AM0)



Fonte: Autor

5 CONCLUSÕES

O modelo adotado para o circuito equivalente da célula fotovoltaica é coerente com os dados experimentais e se mostrou válido, conforme observado na comparação entre a curva $I \times V$ teórica obtida utilizando-se os parâmetros da caracterização da célula e a curva dos dados experimentais (APÊNDICES A, B e C). A caracterização das células foi satisfatória, visto que o coeficiente de correlação da regressão logarítmica indicou que os dados se encontram bem alinhados, o que era esperado teoricamente de um diodo semicondutor cujo comportamento é expresso por uma exponencial.

A curva teórica encontrada para a célula solar SFH 120 ficou mais próxima dos dados experimentais do que a curva obtida por Llamazares (APÊNDICE E), cujo modelo não levou em consideração a resistência *shunt* no circuito equivalente da célula solar.

Comparando a simulação feita no GNU Octave e a simulação do circuito equivalente no ISIS/Proteus pode-se dizer que ambos fornecem praticamente os mesmos resultados, o que era esperado, pois o modelo matemático se baseia no circuito equivalente, com aplicação de leis de Kirchhoff e sobreposição de tensão e corrente. Logo, utilizando-se componentes básicos encontrados na biblioteca do ISIS/Proteus é possível criar um novo dispositivo para representar uma célula solar e adicioná-lo eventualmente na biblioteca.

O método utilizado para se encontrar os valores do fator de perfeição e da corrente de saturação tem o inconveniente de depender dos valores de resistências série e *shunt*. Segundo Beloto, esses dois parâmetros são independentes das resistências parasitas, dependendo do material utilizado para fabricação da célula e de sua junção.

Em um eventual projeto que inclua a utilização de painéis solares, como um veículo solar ou usinas solares, sabendo que o modelo da célula solar adotado se mostrou válido pode-se utilizar este trabalho como guia para a caracterização da célula e para estimar suas perdas decorrentes de resistências parasitas.

REFERÊNCIAS

- BELOTO, Antonio Fernando. **Estudo das características de células solares de silício monocristalino**. Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1983.
- FONASH, Stephen. **Solar Cell Device Physics**. Burlington: Elsevier, 2010.
- GREEN, Martin A.. **Accuracy of analytical expressions for solar cell fill factors**. Solar Photovoltaic Laboratory, University of New South Wales, Kensington, Australia, 1982.
- LLAMAZARES, Alberto; et al. **Generación fotovoltaica: caracterización de una celda comparando datos experimentales y simulados aplicando un modelo teórico simple**. Corrientes, Universidad Nacional del Nordeste, 2000.
- PAES, Tiago Franca. **Sistemas de caracterização de elementos sensores para radiômetros fotovoltaicos**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.
- TIPLER, Paul A. **Física para cientistas e engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1995.
- WENHAM, Stuart R. et al. **Applied photovoltaics**. Londres: Earthscan, 2007.
- WOLF, Martin; RAUSCHENBACH, Hans. **Series resistance effects on solar cell measurements**. Pacific General Meeting of the AIEE, Salt lake City, Utah, 1961.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A. **Física Moderna**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2001.

HALLIDAY, David, et al. **Fundamentos de Física**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003.

EISBERG, Robert M. **Fundamentos de física moderna**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1979

Photovoltaic Education Network, a collection of resources for the photovoltaic educator. Disponível em <<http://pvcdrom.pveducation.org/>> acesso em 15 mai. 2011.

MIASOLÉ Thin-film solar. Disponível em <www.miasole.com> acesso em 01 abr. 2011.

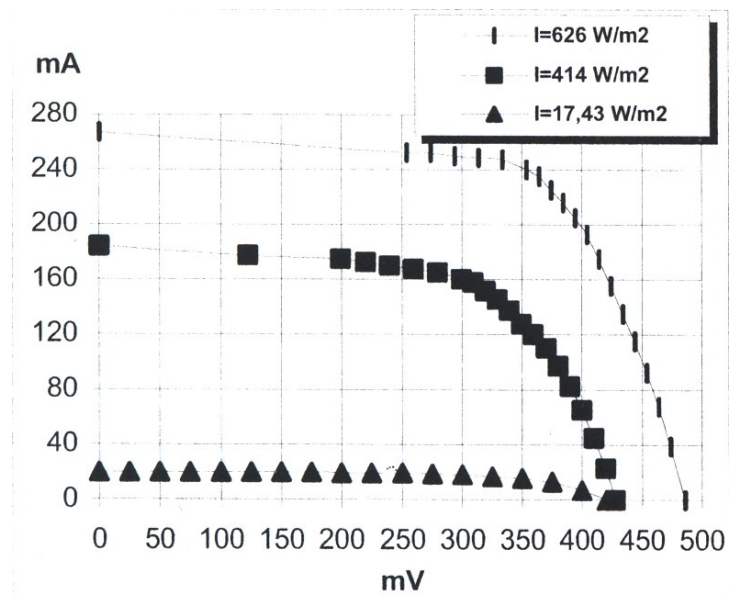
All about Circuits. Disponível em <http://www.allaboutcircuits.com/vol_3/chpt_3/14.html> acesso em 08 mai. 2011.

CASTAÑER, Luis; SILVESTRE, Santiago. **Modelling Photovoltaic Systems using Pspice**. Disponível em <<http://esf.upc.es/esf/>> acesso em 08 mai. 2011.

ROCHA FILHO, Sergio Benjamim; CARVALHO, Fernando Luiz de C. Engenharia elétrica e a modelagem matemática: célula fotovoltaica e painéis solares. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP, 23., 2011, São Pedro. **Anais eletrônicos...** São Pedro: CIC, 2011. Disponível em <https://github.com/sergiobenrocha2/sergiobenrocha2.github.io/blob/master/Solar%20Cell/RESUMO_XXIII%20CIC_2011.pdf> acesso em 01 ago. 2017.

ROCHA FILHO, Sergio Benjamim; CARVALHO, Fernando Luiz de C. Engenharia elétrica e a modelagem matemática: célula fotovoltaica e painéis solares. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP, 24., 2012, Guaratinguetá. **Anais eletrônicos...** Guaratinguetá: CIC, 2012. Disponível em <https://github.com/sergiobenrocha2/sergiobenrocha2.github.io/blob/master/Solar%20Cell/RESUMO_XXIV%20CIC_2012.pdf> acesso em 01 ago. 2017.

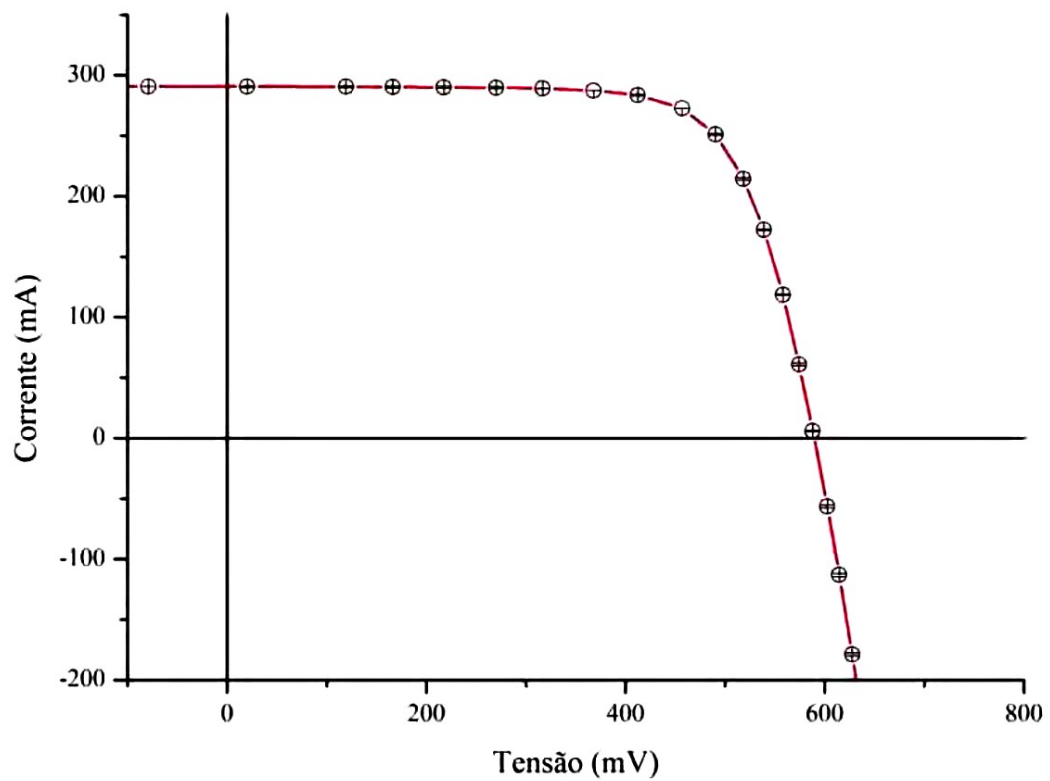
**APÊNDICE A – Curvas I-V Para Três Níveis De Radiação Incidente Sobre A Célula
Solar SFH 120**



414 W/m ²		626 W/m ²	
V(mV)	I(mA)	V(mV)	I(mA)
0,0	183,5	0,0	267,9
121,4	178,0	255,3	253,2
198,5	174,6	275,2	252,5
218,1	172,5	295,0	250,5
238,2	169,9	314,8	249,2
258,4	167,4	334,6	247,2
277,9	165,3	354,4	240,5
298,7	159,7	365,1	235,1
307,9	157,2	375,0	225,1
318,2	150,8	384,9	215,7
328,6	144,5	394,8	205,0
337,8	137,3	404,7	192,9
348,1	127,1	414,6	174,8
358,5	119,9	424,5	156,1
368,9	109,7	434,4	135,3
378,6	97,0	444,4	115,2
389,0	82,2	454,3	92,4
399,4	64,4	464,9	67,7
409,1	44,9	474,1	38,9
418,9	21,6	487,0	0,0
427,6	0,0		

Fonte: LLAMAZARES (2000)

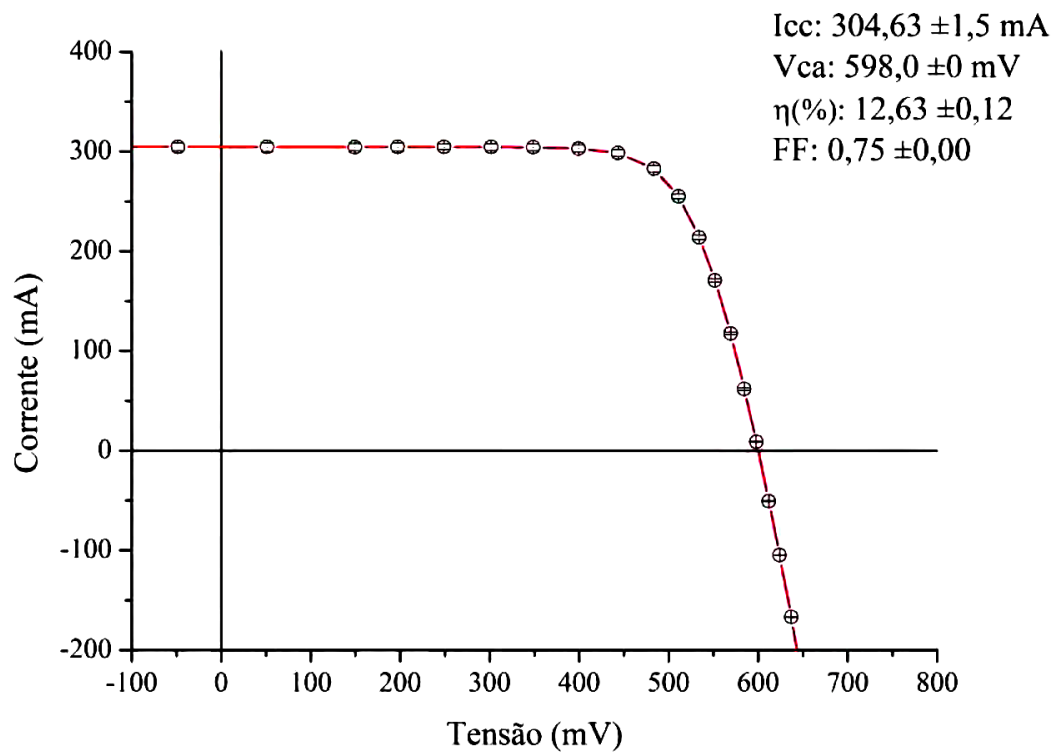
APÊNDICE B – Curva I-V Média Da Célula Solar Padrão De Referência CHINA-923



V(mV)	I(mA)
-79,7	290,1
19,6	290,1
118,8	290,1
166,3	290,1
217,3	289,6
269,7	289,0
317,2	289,0
367,5	286,7
412,3	283,3
457,0	271,8
490,5	251,1
518,5	214,4
538,7	172,0
558,3	118,7
574,4	60,8
588,4	5,7
602,3	-56,2
614,9	-113,0
627,5	-178,9

Fonte: PAES (2012)

APÊNDICE C – Curva I-V Média Da Célula Solar Espacial Spectrolab



V(mV)	I(mA)
-48,9	304,6
51,0	304,6
148,8	304,6
196,4	304,6
248,8	304,6
301,2	304,6
348,0	304,6
399,0	303,8
443,0	298,7
483,5	283,1
510,8	256,1
533,9	214,6
551,3	171,3
568,8	118,0
584,2	62,1
597,4	8,8
611,4	-52,1
623,3	-106,1
636,6	-166,9

Fonte: PAES (2012)

APÊNDICE D – Scripts Para O GNU Octave

Script utilizado no GNU Octave para produzir os gráficos das células CHINA-923 e Spectrolab:

```
function [V, I] = calcula (v, i, p, Vt, IL, Io, n, Rs)
v = v(1):p:v(2);
i = i(1):p:i(2);
for a = 1:length(v)
    for b = 1:length(i)
        z = i(b) - IL + Io*(exp((v(a) + i(b)*Rs)/(n*Vt)) - 1.0);
        if ( (z < 2*p) && (z > -2*p) )
            V(a) = v(a); % saída em V
            I(a) = i(b); % saída em A
        end % Fim do if
    end
end
end % fim da função

% CHINA-923
% Dados experimentais
Vexp = [-79.7, 19.6, 118.8, 166.3, 217.3, 269.7, 317.2, 367.5, 412.3, 457.0, 490.5, 518.5, 538.7, 558.3, 574.4,
588.4, 602.3, 614.9, 627.5];
Iexp = [290.1, 290.1, 290.1, 290.1, 289.6, 289.0, 289.0, 286.7, 283.3, 271.8, 251.1, 214.4, 172.0, 118.7, 60.8,
5.7, -56.2, -113.0, -178.9];

% Limites para a curva teórica
v = [-0.100 0.700]; % mínimo e máximo do eixo de tensão (em V)
i = [-0.200 0.300]; % mínimo e máximo do eixo de corrente (em A)
passo = 0.0001; % resolução da resposta, quanto menor melhor (mas o processamento é maior)

% Curva teórica para Rs = 0.088 ohms
% r = 0,99962
% Io = 1,281E-7
% n = 1,562
% Rs = 0,088
% IL = 290,1
[V, I] = calcula (v, i, passo, 25.85/1000, 290.1/1000, 1.281*10^-7, 1.562, 0.088);
V = V*1000;
I = I*1000;

plot (V, I, "linewidth", 3)
axis([-100,800,-200,350])
xlabel ("\nTensao (mV)")
ylabel ("Corrente (mA)\n")

hold on
plot (Vexp,Iexp,'ko',"markersize",5)
hold off
grid

print -dsvg china923_Rs0.088.svg

% Curva teórica para Rs = 0.115 ohms
```

```

% r = 0,99994
% Io = 1,443E-8
% n = 1,357
% Rs = 0,115
% IL = 290,1
[V, I] = calcula (v, i, passo, 25.85/1000, 290.1/1000, 1.443*10^-8, 1.357, 0.115);
V = V*1000;
I = I*1000;

plot (V, I, 'linewidth', 3)
axis([-100,800,-200,350])
xlabel ("\nTensao (mV)")
ylabel ("Corrente (mA)\n")

hold on
plot (Vexp,Iexp,'ko',"markersize",5)
hold off
grid

print -dsvg china923_Rs0.115.svg

% Spectrolab
% Dados experimentais
Vexp = [-48.9, 51.0, 148.8, 196.4, 248.8, 301.2, 348.0, 399.0, 443.0, 483.5, 510.8, 533.9, 551.3, 568.8, 584.2,
597.4, 611.4, 623.3, 636.6];
Iexp = [304.6, 304.6, 304.6, 304.6, 304.6, 304.6, 304.6, 303.8, 298.7, 283.1, 256.1, 214.6, 171.3, 118.0, 62.1,
8.8, -52.1, -106.1, -166.9];

% Limites para a curva teórica
v = [-0.100 0.700]; % mínimo e máximo do eixo de tensão (em V)
i = [-0.200 0.320]; % mínimo e máximo do eixo de corrente (em A)
passo = 0.0001; % resolução da resposta, quanto menor melhor (mas o processamento é maior)

% Curva teórica para Rs = 0.145 ohms
% r = 0,99997
% Io = 1,895E-10
% n = 1,094
% Rs = 0,145
% IL = 304,6
[V, I] = calcula (v, i, passo, 25.85/1000, 304.6/1000, 1.895*10^-10, 1.094, 0.145);
V = V*1000;
I = I*1000;

plot (V, I, 'linewidth', 3)
axis([-100,800,-200,350])
xlabel ("\nTensao (mV)")
ylabel ("Corrente (mA)\n")

hold on
plot (Vexp,Iexp,'ko',"markersize",5)
hold off
grid

print -dsvg Spectrolab_Rs0.145.svg

```


Script utilizado no GNU Octave para produzir o gráfico da célula SFH 120 da Siemens:

```
function [V, I] = calcula (v, i, p, Vt, IL, Io, n, Rs, Rsh)
v = v(1):p:v(2);
i = i(1):p:i(2);
for a = 1:length(v)
    for b = 1:length(i)
        z = i(b) - IL + Io*(exp((v(a) + i(b)*Rs)/(n*Vt)) - 1.0) + (v(a) + i(b)*Rs)/Rsh;
        if ( (z < 2*p) && (z > -2*p) )
            V(a) = v(a); % saída em V
            I(a) = i(b); % saída em A
        end % Fim do if
    end
end
end % fim da função

% Siemens SFH 120 - Llamazares

% Dados experimentais
Vexp = [0.0, 255.3, 275.2, 295.0, 314.8, 334.6, 354.4, 365.1, 375.0, 384.9, 394.8, 404.7, 414.6, 424.5, 434.4,
444.4, 454.3, 464.9, 474.1, 487.0];
Iexp = [267.9, 253.2, 252.5, 250.5, 249.2, 247.2, 240.5, 235.1, 225.1, 215.7, 205.0, 192.9, 174.8, 156.1, 135.3,
115.2, 92.4, 67.7, 38.9 ,0.0];

% Limites para a curva teórica
v = [-0.010 0.500]; % mínimo e máximo do eixo de tensão (em V)
i = [-0.010 0.300]; % mínimo e máximo do eixo de corrente (em A)
passo = 0.0001; % resolução da resposta, quanto menor melhor (mas o processamento é maior)

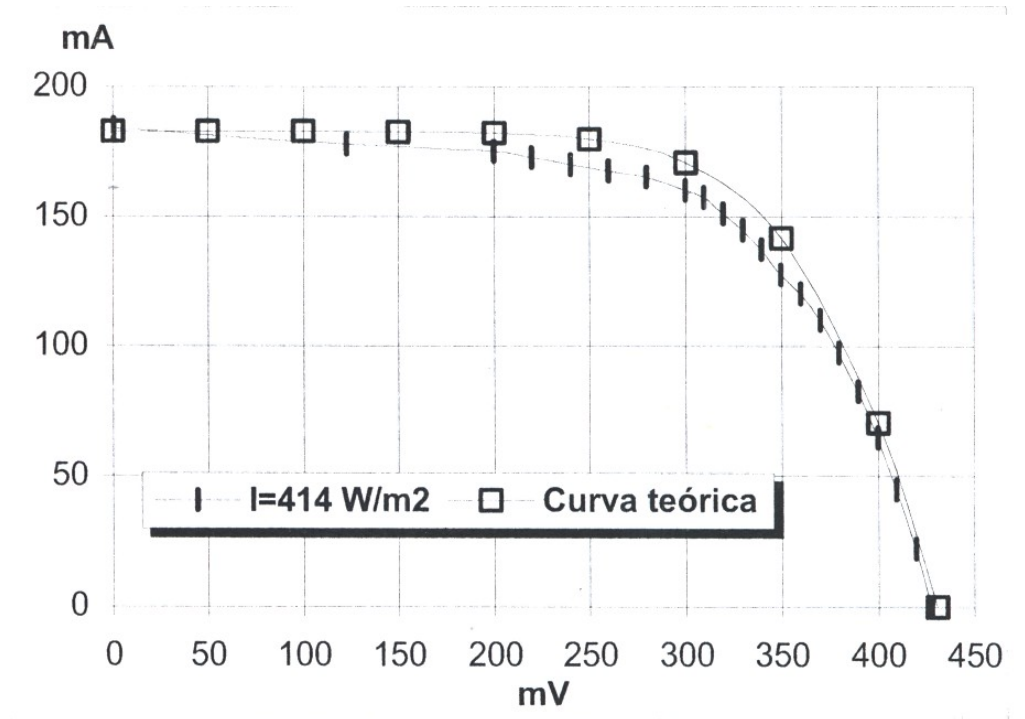
% Curva teórica para Rs = 0.244 ohms
% r = 0,9991875
% Io = 3,909E-10
% n = 0,932
% Rs = 0,244
% Rsh = 17,653
% IL = 271,6
[V, I] = calcula (v, i, passo, 25.85/1000, 271.6/1000, 3.909*10^-10, 0.932, 0.244, 17.653);
V = V*1000;
I = I*1000;

plot (V, I, "linewidth", 3)
axis([0,500,0,300])
xlabel ("\nTensao (mV)")
ylabel ("Corrente (mA)\n")

hold on
plot (Vexp,Iexp,'ko',"markersize",5)
hold off
grid

print -dsvg siemens_SF120_626Wm2_Rs0.244_Rsh17.653.svg
```

**APÊNDICE E – Comparação Entre Os Dados Experimentais E Curva Teórica
Determinada Por Llamazares**



Fonte: LLAMAZARES (2000)