

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE, CARACTERIZAÇÃO E
SIMULAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

André Luiz Costa de Carvalho

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Davies William de Lima Monteiro

Belo Horizonte - MG

Julho de 2014

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 830

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE, CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE
CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

André Luiz Costa de Carvalho

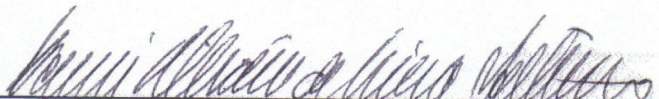
DATA DA DEFESA: 18/07/2014

André Luiz Costa de Carvalho

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 18 de julho de 2014.

Por:



Prof. Dr. Davies William de Lima Monteiro
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Wagner Nunes Rodrigues
DFIS (UFMG)

André Luiz Costa de Carvalho

***Metodologia para análise, caracterização e
simulação de células fotovoltaicas***

Belo Horizonte - MG, Brasil

18 de julho de 2014

André Luiz Costa de Carvalho

***Metodologia para análise, caracterização e
simulação de células fotovoltaicas***

Dissertação apresentada para obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Elétrica pela Univer-
sidade Federal de Minas Gerais.

Orientador:

Prof. Davies William de Lima Monteiro

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Belo Horizonte - MG, Brasil

18 de julho de 2014

Resumo

Esse trabalho teve como objetivo construir uma plataforma metodológica de análise de células e painéis fotovoltaicos, que poderá ser utilizada em ambiente de pesquisa e em aplicações práticas. Ao mesmo tempo, ela deve se apresentar com uma linguagem simples, direta e descomplicada, realizando assim uma função de guia ou manual para profissionais da área de fotovoltaicos. A metodologia se inicia com o estudo das células do ponto de vista teórico, visualizando principalmente suas características particulares e condições ambientais de operação. Após essa etapa, vamos à caracterização de uma célula real: inicialmente escolhemos uma condição padrão de funcionamento, de forma a obter uma base para a análise; em seguida, devemos obter a curva I-V dessa célula, que nos permitirá construir seu modelo analítico através da extração de seus parâmetros importantes, como pontos de máxima potência, corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto, suas resistências parasitas, dentre outros. Esses itens são importantes quando houver a necessidade de se efetuar comparações ou análises de desempenho. Além disso, podemos utilizar esses parâmetros na construção de modelos numéricos em SPICE, permitindo uma análise de funcionamento em um ambiente de simulação, e validação do modelo analítico anteriormente criado. Podemos ainda incrementar o modelo numérico obtido para representar a operação da célula em condições ambientais diferentes, através da descrição cada vez mais detalhada dos componentes da célula, expandindo assim o alcance do nosso modelo numérico de simulação. Podemos empregar essa estrutura de análise de células solares também a painéis fotovoltaicos, não só no ponto de vista de funcionamento, mas também o impacto da associação nos parâmetros apresentados pelo painel. Assim poderemos construir modelos analíticos e numéricos para painéis, e consecutivamente, para sistemas fotovoltaicos maiores.

Abstract

This work aimed to build a methodological platform for the analysis of solar cells and photovoltaic panels, that can be used both in research environment and in practical applications. At the same time, it must be presented in a straightforward fashion, thus performing a guiding function for photovoltaic professionals. The methodology begins with the study of cells from the theoretical point of view, primarily checking their characteristics and environmental conditions of operation. After this step, a real cell is considered under the standard condition of operation to obtain a reference for the analysis; then, the I-V curve of this cell is used to build its analytical model by extracting important parameters, such as the maximum-power current and voltage, short-circuit current, open-circuit voltage, parasitic resistances, among others. These items are important when it is necessary to compare the performance of different cells. Furthermore, we can use these parameters to build a numerical model on a circuit simulator, allowing an operational analysis in a simulation environment, and validation of the analytical model previously created. The numerical model can be further enhanced to represent the operation of the cell under different environmental conditions, by using a more detailed description of cell components, thus expanding the scope of this model. This analysis sequence can also be employed to evaluate solar panels, not only from the point of view of operation, but also considering the impact of cells association on the compound parameters. Therefore, analytical and numerical models can also be implemented for panels, and hence, for larger PV systems.

Dedicatória

Dedico esse trabalho aos livre-pensadores, que não acreditam que o mundo é um projeto-padrão do senso comum, mas um universo de possibilidades; aos professores, que com a sua dedicação transformam mentes, tornando-as estrelas; aos poetas, que enfrentam moinhos de vento só para sentir o doce gosto do amor; aos sonhadores, que acreditam que tudo é possível e seguem em frente, ao invés de desistir e se adaptar a realidade vigente; aos conhecedores de si-próprios, que sabem do que são feitos e não debandam nas tempestades de areia; a aqueles que acreditam no nosso país, no nosso povo; as crianças, que enxergam as cores de mundo sem nenhum filtro; ao vento, companheiro fiel e grande aconselhador; e aos homens simples, que embora nunca lembrados, são os que nos carregam em seus braços.

Agradecimentos

Inicialmente agradeço as minhas duas mães: Sônia Albano, que hoje está no céu olhando pela gente, e Conceição Poeira (minha vó, minha vó), ser tão puro e bom que vai pro céu de elevador, pra não ter chance de errar o caminho; essas duas estão em um nível que não dá nem pra comentar; portanto, vou só agradecer!!!

Meus irmãos, Ludmila e Dimitry, que sempre me deram força demais (e me encheram muito também), assim como toda a minha família (tirando Carminha, que é muito chata! – mentira!);

Aos meus poucos e preciosos amigos, estrelando Diego Obeso e Carlos Funny!! Amigo de verdade é pra poucos!!! Agradeço por me aguentarem nas melhores e piores horas!!!!

Agradeço demais ao professor Davies, que além de ser um super professor, é uma super pessoa, que sempre dá força aos seus alunos nas horas de aperto, seja qual for o motivo; sinto-me honrado em tê-lo como orientador!!!!

Agradeço a galera do grupo de fotovoltaicos! Sem eles, esse trabalho estaria empacado até hoje!!!! Valeu demais Gustavo, Mateus e Alan!!! Essa galera vai longe!!!!

Não podemos esquecer a galera do Optma, né!!! Valeu demais pelas tardes animadas, e desculpe por não deixar vocês trabalharem!!!! Espero encontrar todo mundo no Cabral pra gente tomar umas;

Por último, mas não menos importante, agradeço ao Pai Celestial: graças a tudo que Ele me deu, não é qualquer ventinho que me derruba, não!!!

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

1	Introdução	p. 13
1.1	Motivação e objetivos	p. 14
2	Revisão teórica	p. 16
2.1	Células Fotovoltaicas	p. 17
2.2	Características da célula	p. 18
2.2.1	Tipos de célula	p. 18
2.2.2	Área de exposição	p. 24
2.2.3	Coeficiente de absorção	p. 24
2.2.4	Coeficiente de reflexão	p. 26
2.2.5	Eficiência quântica e responsividade	p. 26
2.3	Curva I-V de uma célula solar	p. 27
2.4	Características do ambiente de trabalho da célula	p. 29
2.4.1	Distribuição espectral e massa de ar	p. 30
2.4.2	Irradiância	p. 31
2.4.3	Temperatura	p. 33
2.4.4	Condições de teste padrão - STC	p. 34
2.5	Parâmetros de uma célula	p. 34
2.6	Modelagem	p. 37

2.7	Associação de células	p. 39
2.7.1	Associação série	p. 39
2.7.2	Associação paralela	p. 40
2.7.3	Sombreamento	p. 41
2.7.4	Efeitos da associação nos parâmetros do painel	p. 42
3	Caracterização	p. 48
3.1	Metodologia de testes experimentais	p. 49
3.2	Obtenção da curva I-V de uma célula	p. 49
3.3	Modelagem analítica	p. 51
3.4	Extração de parâmetros da célula	p. 52
3.5	Comparação entre células e análise de desempenho	p. 55
3.6	Caso de exemplo: Caracterização	p. 56
3.6.1	Caracterização e obtenção do modelo analítico	p. 58
3.6.2	Extração de parâmetros	p. 61
4	Simulação	p. 62
4.1	Metodologia de Simulação	p. 63
4.2	Modelagem da célula em SPICE utilizando os parâmetros extraídos	p. 63
4.3	Obtenção da curva I-V em ambiente simulado	p. 64
4.4	Comparação das curvas I-V experimental e simulada	p. 66
4.5	Caso de exemplo: Simulação	p. 67
4.6	Construção de um modelo de célula mais detalhado	p. 71
5	Análise de painéis solares fotovoltaicos	p. 76
5.1	Caracterização e parametrização de painéis fotovoltaicos	p. 77
5.2	Modelagem e simulação de um módulo fotovoltaico	p. 78
5.3	Metodologia de análise de paineis	p. 80

5.4	Caso de exemplo: Modelagem e simulação de um painel	p. 81
5.4.1	Determinação do arranjo de células	p. 81
5.4.2	Determinação dos parâmetros do painel	p. 82
5.4.3	Levantamento da curva I-V utilizando modelo analítico	p. 82
5.4.4	Simulação do painel: Modelo simplificado	p. 84
5.4.5	Simulação do painel: Modelo Detalhado	p. 86
5.4.6	Comparação dos resultados obtidos	p. 89
5.5	Comparação entre painéis e análise de desempenho	p. 92
6	Conclusões e trabalhos futuros	p. 94
	Referências Bibliográficas	p. 97

Lista de Figuras

2.1	Exemplos de células fotovoltaicas baseadas em Si	p. 17
2.2	Ilustração do efeito fotovoltaico	p. 17
2.3	Células cristalinas de silício	p. 18
2.4	Diagrama das camadas de uma célula CIGS	p. 19
2.5	Diagrama das camadas de uma célula multi-junção	p. 21
2.6	Célula solar orgânica flexível e seu diagrama de camadas	p. 22
2.7	Comparativo de eficiência de células de acordo com a tecnologia de fabricação	p. 23
2.8	Coeficiente de absorção e comprimento de penetração por comprimento de onda	p. 25
2.9	Curva I-V de uma célula solar	p. 27
2.10	Distribuição espectral da radiação solar para diferentes condições atmosféricas	p. 30
2.11	<i>Air Mass</i> de acordo com o ângulo do feixe	p. 31
2.12	Curvas I-V para diferentes irradiâncias	p. 32
2.13	Curvas I-V para diferentes temperaturas	p. 33
2.14	Efeitos das resistências parasitas na curva I-V	p. 35
2.15	Curva I-V para diferentes valores de resistência série (superior) e paralela (inferior)	p. 36
2.16	Curvas de cada diodo traçadas separadamente: Difusão (verde) e deriva (azul)	p. 37
2.17	Curvas $\ln(I)$ de cada diodo: Difusão (verde) e deriva (azul)	p. 38
2.18	Modelo de célula solar ideal (linhas preenchidas) e não-ideal (linhas ponti- lhadas)	p. 39
2.19	Associação série de células – circuito equivalente e curva I-V	p. 40

2.20	Associação paralela de células – circuito equivalente e curva I-V	p. 41
2.21	Associação série – efeito de sombreamento e utilização do diodo de desvio	p. 42
2.22	Símbolo e modelo de circuito utilizado no método de Alonso-Garcia	p. 43
2.23	Associação série de células solares	p. 44
2.24	Associação paralela de células solares	p. 45
2.25	Associação mista de células solares	p. 46
3.1	Exemplo de circuito simulador de resistência variável (Orcad® Schematics)	p. 50
3.2	SCS 4200 e SMU 2450, da Keithley®, e B1505A da Agilent®	p. 51
3.3	Exemplo de ajuste de curvas (uma e duas exponenciais) utilizando Matlab®	p. 52
3.4	Reta obtida da linearização	p. 54
3.5	Curva I-V da célula de exemplo	p. 56
3.6	Célula de silício policristalino de 1,8W	p. 58
3.7	Modelagem obtida no <i>cftool</i> do Matlab®	p. 59
4.1	Diagrama esquemático de uma célula no SPICE (Orcad® PSPICE Schematics)	p. 64
4.2	Curvas I-V (círculos) e P-V (triângulos) obtida no SPICE (Orcad® PSPICE A/D)	p. 65
4.3	Circuito desenhado no SPICE (Orcad® PSPICE Schematics)	p. 67
4.4	Curva I-V obtida no SPICE (Orcad® PSPICE A/D)	p. 68
4.5	Comparação das curvas I-V obtidas (acima) e resíduos (abaixo)	p. 69
4.6	Comparação das curvas P-V obtidas (acima) e resíduos (abaixo)	p. 70
4.7	Diagrama esquemático de I_{ph} (Orcad® PSPICE Schematics)	p. 71
4.8	Gráfico do espectro AM1.5 (Orcad® PSPICE A/D)	p. 72
4.9	Corrente fotogerada obtida (Orcad® PSPICE A/D)	p. 74
5.1	Exemplo de painel solar fotovoltaico	p. 77
5.2	Exemplo de modelo detalhado de painel em SPICE (Orcad® PSPICE Schematics)	p. 79
5.3	Organograma da metodologia de análise de painéis	p. 80

5.4	Diagrama da associação escolhida para o exemplo	p. 81
5.5	Curva I-V do painel de exemplo (modelo analítico)	p. 83
5.6	Circuito equivalente do painel (modelo simplificado)	p. 84
5.7	Curva I-V do painel simulado (modelo simplificado)	p. 85
5.8	Circuito equivalente do painel (modelo detalhado)	p. 87
5.9	Curva I-V do painel simulado (modelo detalhado)	p. 88
5.10	Comparação entre as curvas I-V de cada modelo (superior) e resíduos (inferior)	p. 89
5.11	Comparação entre as curvas P-V de cada modelo (superior) e resíduos (inferior)	p. 91

Lista de Tabelas

3.1	Dados da célula solar de exemplo	p. 57
3.2	Dados da célula solar real	p. 57
3.3	Constantes obtidas no ajuste do modelo analítico	p. 60
3.4	Dados da qualidade do ajuste	p. 60
3.5	Parâmetros obtidos e calculados	p. 61
4.1	Parâmetros obtidos da simulação	p. 67
5.1	Dados obtidos na estimação de parâmetros:	p. 82
5.2	Parâmetros extraídos da curva I-V (modelo analítico)	p. 84
5.3	Parâmetros extraídos da curva I-V do painel (modelo simplificado)	p. 86
5.4	Parâmetros extraídos da curva I-V do painel (modelo detalhado)	p. 86
5.5	Comparação entre os parâmetros obtidos na simulação do painel de exemplo	p. 90

1 Introdução

*“Fui para os bosques viver de livre vontade
...e sugar a essência da vida!
Para aniquilar tudo que não era vida
E para, quando morrer, não descobrir que não vivi.”*

Henry David Thoreau - Walden ou a vida nos bosques (fragmento)

1.1 Motivação e objetivos

A demanda energética aumenta consideravelmente com o passar do tempo. Essa conjectura nos obriga a buscar novas formas de obter energia, considerando não só seu preço de produção, mas também seu impacto no meio ambiente. A energia solar é, sem dúvida, uma das opções mais práticas e viáveis de geração de eletricidade, em um momento em que a humanidade se confronta com as consequências de um modelo energético caro e ineficiente, cada dia menos confiável. Nos últimos anos observamos um crescimento significativo da utilização da energia com base fotovoltaica no mundo, principalmente na Europa. Novas políticas públicas ambientais foram desenvolvidas para impulsionar essa tecnologia. No Brasil, alguns experimentos com baixa potência de geração já foram realizados. O país, com sua alta insolação anual e suas grandes reservas de quartzo e sílica (que dão origem ao principal insumo necessário para a fabricação de células solares, o silício), desponta como grande promessa dessa área, bastando incentivos para desenvolvimento de tecnologia própria. Contudo, observamos uma tímida exploração desse potencial – destoando do grande desenvolvimento obtido pelos países europeus, com tamanhos geográficos menores e condições solarimétricas menos favoráveis – demonstrando que o Brasil pode sim se inserir nesse mercado de forma competitiva e eficiente, tornando-se uma referência internacional na área. Geradores fotovoltaicos conectados às redes elétricas convencionais são os mais comumente encontrados no mercado, podendo compor aplicações residenciais, comerciais ou grandes usinas. Nas aplicações de pequeno porte, essa conexão com as redes já existentes permite a venda do excesso de energia gerado e não consumido para a concessionária de energia elétrica. Outro aspecto importante a ser discutido é a fabricação das células fotovoltaicas: embora a energia solar propriamente dita seja uma fonte limpa de energia, a produção das células possui etapas que geram resíduos extremamente poluentes e consomem muita energia elétrica. Estudos para melhoria desse processo também devem ser abordados, para redução do impacto ambiental. O objetivo deste trabalho é a estruturação de uma metodologia para caracterização e validação de células e painéis fotovoltaicos em geral. Para tanto é preciso identificar modelos, parâmetros e ferramentas de software necessários para a sua sequência. A metodologia passará pelo estudo das células fotovoltaicas em laboratório, para levantamento de sua curva I-V (corrente-tensão), e a partir desses dados, realizar a modelagem analítica desses dispositivos, que nos permitirá a obtenção da equação de funcionamento desses dispositivos, e a extração de seus parâmetros mais importantes, e através disso, verificar o seu desempenho. Após essa etapa, torna-se possível o uso de ferramentas de simulação, para analisarmos essas células em diversas condições de funcionamento. Com a análise das células individuais finalizada, podemos estender esse estudo para os painéis fotovoltaicos, seguindo os mesmos passos. Essa análise nos permitirá determinar o melhor conjunto de células e painéis

para cada aplicação, seja uma aplicação de menor demanda de energia (fornecer energia a um dispositivo portátil, por exemplo), a projetos de geração de energia com interligação com a rede elétrica vigente (usinas fotovoltaicas). Portanto, com a importância da energia fotovoltaica nos dias de hoje, esse estudo mostra-se relevante tanto para aspectos acadêmicos, quanto para o âmbito prático, servindo de guia prático para desenvolvedores dessa área.

2 *Revisão teórica*

*“Ó eu! Ó vida!... das questões que sempre reaparecem;
Das legiões sem conta dos que não tem fé
Das cidades, repletas de tolos;
De mim próprio a me censurar
(pois quem seria mais tolo que eu e quem teria menos fé?);
Dos olhos que inutilmente anseiam pela luz;
Das coisas ordinárias;
Do esforço sempre renovado;
Dos medíocres resultados de tudo;
Das multidões trôpegas e sórdidas que vejo no meu entorno;
Dos anos vazios e inúteis de todo o resto, eu integrado nesse resto,
Vem a questão (eu!) tão triste, recorrente:
O que há de bom no meio de tudo isso, ó eu, ó vida?”*

Resposta:

*Você está aqui - a vida existe, e existe a identidade;
A poderosa peça continua, e você pode contribuir com um verso.”*

Walt Whitman - Folhas da Relva (1892)

2.1 Células Fotovoltaicas

Células fotovoltaicas são uma classe de dispositivos (em sua maioria produzidos a partir de materiais semicondutores) que produzem energia a partir da luz solar. Basicamente são dispositivos baseados em junções P-N (em sua grande maioria), mas com alguns detalhes diferenciados de fabricação, além de outras camadas de outros materiais que possuem funções específicas.

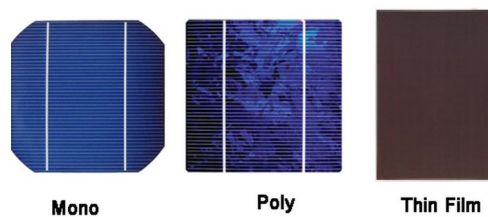


Figura 2.1: Exemplos de células fotovoltaicas baseadas em Si

Fonte: [1]

Sua característica de geração de energia nasce de um fenômeno denominado efeito fotovoltaico, que consiste na geração de pares elétron-buraco utilizando luz. Ao se incidir radiação luminosa no material, os elétrons na banda de valência absorvem os fótons dessa radiação; caso a energia dos fótons for igual ou maior que a energia da banda proibida (ou *bandgap*), as ligações covalentes serão quebradas e esse elétron irá para a banda de condução.

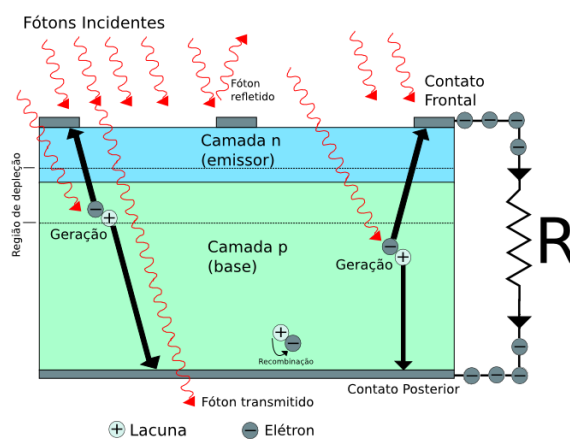


Figura 2.2: Ilustração do efeito fotovoltaico

Esse fenômeno produz uma corrente elétrica (comumente chamada de corrente fotogerada ou fotocorrente) a partir da radiação luminosa, que pode ser medida, e utilizada para alimentar uma carga resistiva. [2–4]

2.2 Características da célula

As células solares possuem diversas características que são oriundas do material semicondutor utilizado na sua confecção, a técnica de fabricação empregada, propriedades geométricas e estruturais, dentre outras, que interferem consideravelmente no seu funcionamento.

2.2.1 Tipos de célula

As células fotovoltaicas são classificadas em gerações, de acordo com sua tecnologia de fabricação. Cada conjunto apresenta características distintas. Vamos aos tipos mais importantes:

- **Células de primeira geração ou cristalinas:** São células solares fabricadas a partir de *wafers* de um semicondutor, como o silício (Si) ou arseneto de gálio (GaAs), podendo ser monocristalinos ou policristalinos. As células de silício são as mais utilizadas e comercializadas, dominando cerca de 85% do mercado (dados de 2011). Seu processo de fabricação já é muito bem conhecido e dominado (já que é o mesmo utilizado na fabricação de dispositivos eletrônicos). As células monocristalinas de silício (m-Si) alcançam uma eficiência de até 25%, enquanto que as células policristalinas (p-Si) apresentam eficiência em torno de 15% (as células monocristalinas apresentam uma densidade menor de defeitos, exibindo assim uma maior eficiência). Contudo, as células policristalinas são mais baratas, por exigir um processo de fabricação menos rigoroso. Já as células monocristalinas baseadas em arseneto de gálio (GaAs) apresentam uma eficiência mais alta (em torno de 30%), mas são extremamente caras (característica que confere um nicho bem reduzido de utilização, como por exemplo, em satélites artificiais).

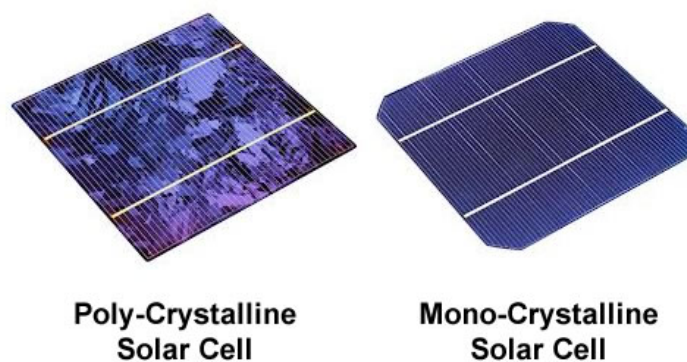


Figura 2.3: Células cristalinas de silício

Fonte: [5]

Observando a figura 2.3, podemos perceber regiões de tonalidades diferentes na célula policristalina; essas diferenças revelam as regiões com orientações cristalográficas diferentes. [3, 6, 7]

- **Células de segunda geração ou filmes finos:** São células fabricadas a partir do crescimento de filmes finos (*thin-films*) de materiais semicondutores. Sua principal vantagem é o seu custo de fabricação, que não depende de técnicas sofisticadas de produção de materiais ultra-puros, além do baixo consumo de material semicondutor (em células de primeira geração, 50% de seu custo está no processo de fabricação do *wafer*). Contudo, as células baseadas nessa técnica apresentam uma eficiência menor que a das células anteriormente citadas, ficando em torno de 10%, além da sua baixa vida-útil. Como exemplo, temos as células de silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), e selenetos de cobre-índio-gálio (CIGS). [3, 6, 7]

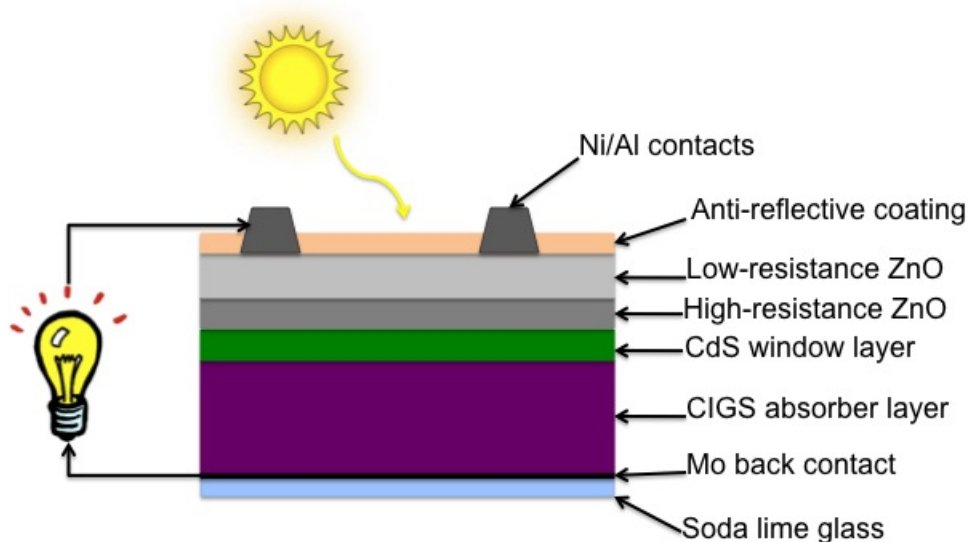


Figura 2.4: Diagrama das camadas de uma célula CIGS

Fonte: [8]

As células de CIGS, como a apresentada na figura 2.4, podem ser depositadas sobre diversos substratos, como vidro ou polímeros (podendo ser incorporadas em superfícies das casas, por exemplo). O contato inferior é de molibdênio (além de ser bom condutor, tem boa aderência ao substrato). A camada de absorção (constituída do próprio CIGS) tem como função absorver os fótons e gerar os pares elétron-lacuna, que vão para os contatos mais próximos; a grande vantagem desse material é, que quando dopado com uma impureza do tipo p, ele apresenta uma alta capacidade de absorção de fótons, mesmo com uma espessura muito fina – daí a necessidade de apenas uma pequena quantidade de ma-

terial. A camada de CdS (também chamada camada neutra) constitui um dos materiais da camada n da célula. Essa camada é responsável por proteger a camada de absorção das reações químicas causadas pela deposição de ZnO (em particular a difusão atômica), contribuindo muito pouco na geração de corrente (embora seu $E_g = 2,4eV$ esteja na região do visível), pois sua espessura é muito pequena (e pouca luz é absorvida nela). As camadas de ZnO também contribuem como camada n da célula, e ao mesmo tempo serve como condutoras para os elétrons gerados. Além disso, o ZnO possui um $E_g = 3,3eV$, sendo transparente aos fótons do espectro visível; A camada superior de ZnO é dopada com Al para aumentar sua condutividade. Finalmente temos a camada anti-reflexiva: constituída de MgF_2 , essa camada tem como função diminuir o número de fótons refletidos pela superfície da célula. [7,9]

- **Células de terceira geração ou multi-junção:** São células solares com múltiplas junções P-N feitas de diferentes materiais semicondutores. Cada junção produzirá uma corrente elétrica em resposta a diferentes comprimentos de onda da luz, aumentando a eficiência de conversão. As camadas semicondutoras são depositadas uma por uma, em uma ordem que maximize a coleta de portadores de acordo com o comprimento de onda (fótons com comprimentos de onda diferentes tem capacidades de penetração diferentes; assim, materiais com E_g elevados ficam na parte superior da célula, enquanto os materiais com baixo E_g ficam na porção inferior). Essas células alcançam altas eficiências, que ficam em torno de 30%. Essa tecnologia também é empregada na fabricação de células fotovoltaicas para concentração de luz (CPV - *Concentrated Photovoltaics*), onde células multi-junção (ou filmes finos) de pequenas áreas são utilizadas com equipamentos concentradores de luz, como lentes e espelhos (que apresentam um custo menor que a fabricação de células de grandes áreas), que aumentam a irradiância. Essa tecnologia se mostra ideal para construção de módulos solares de alta eficiência e produção de energia, mas seu custo de fabricação a nível comercial ainda é proibitivo. [3, 6, 7]

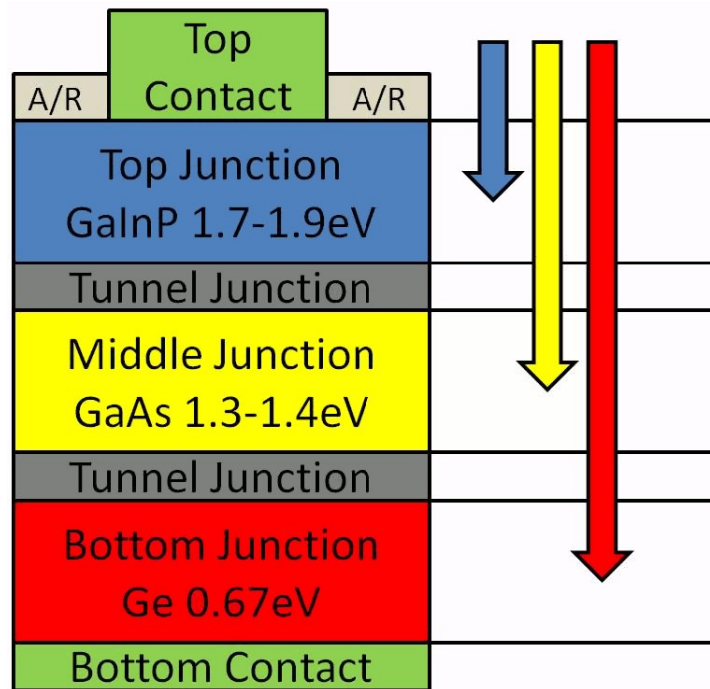


Figura 2.5: Diagrama das camadas de uma célula multi-junção

Fonte: [10]

A célula apresentada na figura 2.5 é constituída de três junções – cada uma delas respondendo a comprimentos de onda distintos. A junção superior é formada de GaInP, que possui um E_g entre 1,7 e 1,9 eV (pico na cor azul, ou seja baixos comprimentos de onda). Já a junção central é formada de GaAs, com E_g entre 1,3 e 1,4 eV (pico no amarelo – faixa central do espectro visível). Já a camada inferior é formada de Ge, que possui $E_g = 0,64\text{eV}$ (maior eficiência para grandes comprimentos de onda, com pico no vermelho). Entre cada uma das junções é colocada uma junção túnel, ou seja, um canal de baixa resistência elétrica para facilitar o transporte de cargas. Os contatos superior e inferior são constituídos tipicamente de Al. Já sua camada anti-reflexiva (A/R) é geralmente constituída de duas camadas de dielétricos empilhadas, como TiO_2/Al_2O_3 , Ta_2O_5/SiO_2 ou ZnS/MgF_2 . [11–16]

- **Tecnologias emergentes:** Além das tecnologias de fabricação citadas anteriormente, temos ainda diversas técnicas alternativas, onde os cientistas buscam menores custos de produção aliados a maiores eficiências de conversão de energia. Como exemplos temos células orgânicas e poliméricas, células fotoeletroquímicas sensibilizadas por corante (DSSC), células de ponto quântico (QDSC), dentre outras.

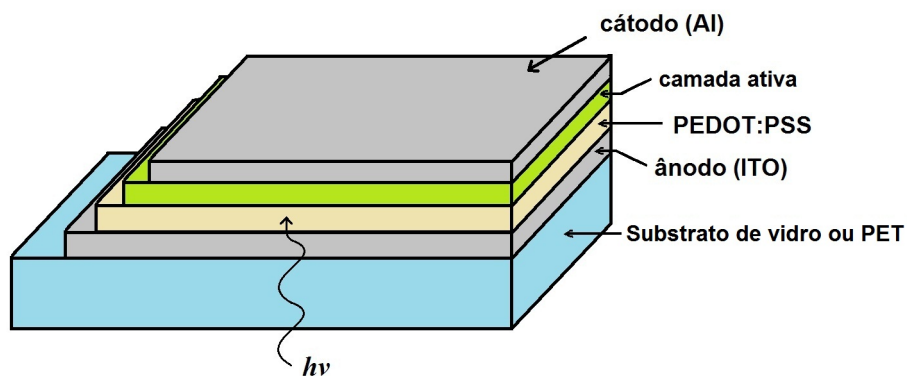
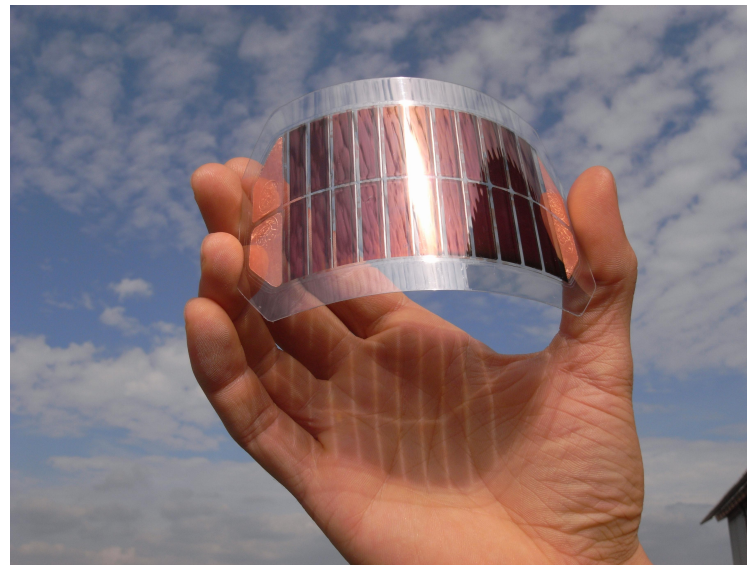


Figura 2.6: Célula solar orgânica flexível e seu diagrama de camadas

Fonte: [17,18]

A célula mostrada na figura 2.6 é do tipo heterojunção planar, que consiste em um anodo (uma camada transparente, que na maioria dos casos é de óxido de estanho e índio ou ITO) depositada sobre um substrato de vidro ou polímero (geralmente PET); sobre o anodo é depositada uma camada injetora de lacunas de poli(3,4-etilenodioxitiofeno) dopado com poli(4-sulfonato de estireno) (ou PEDOT:PSS); em seguida é depositada uma camada ativa (geralmente de fulereno ou algum polímero) e por fim é colocado o cátodo (geralmente de alumínio). A eficiência da heterojunção planar é limitada devido ao comprimento de difusão dos portadores de carga fotogerados ser pequeno. Deste modo a espessura da célula deve ser pequena, o que reduz a absorção de luz e diminui sua eficiência. [19–22]

A figura 2.7 apresenta uma comparação de eficiências de conversão (seção 2.3) entre as diversas tecnologias de fabricação de células, fabricantes e ano de fabricação:

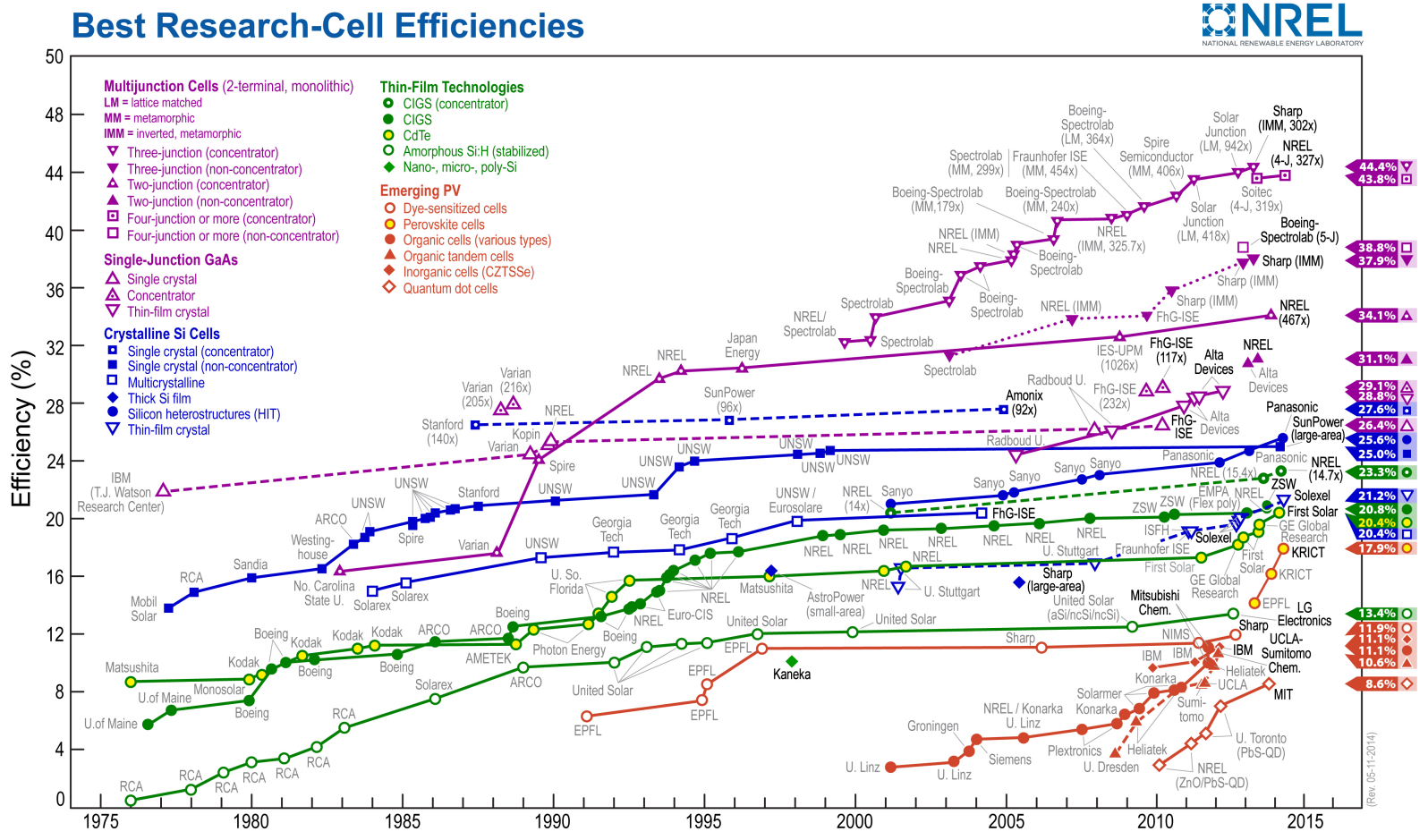


Figura 2.7: Comparativo de eficiência de células de acordo com a tecnologia de fabricação

The chart "Best Research-Cell Efficiencies" is reprinted with permission by the National Renewable Energy Laboratory,

http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg, Accessed June 3, 2014.

Como podemos observar, as células multi-junção dominam a área no quesito eficiência (com as melhores alcançando quase 45%, com uso de concentradores), ganhando das melhores tecnologias de fabricação de células de silício cristalino existentes hoje (onde as melhores estão em torno de 25%). Entre as células de filmes finos, a que mais se destaca é a CIGS (que alcança 23,3% com o uso de concentradores). Por último, observamos as células de tecnologias emergentes, que ainda não alcançam altas eficiências, sendo promessas para o futuro.

2.2.2 Área de exposição

É a região da célula solar que recebe a incidência dos raios luminosos, e também determina quanta energia a célula receberá (em uma determinada condição ambiental). Quanto maior a área, maior a energia captada por ela. Contudo, células de área muito extensa são difíceis de fabricar, possuem eficiência de conversão menor, além de não apresentar grande robustez mecânica. Uma alternativa para esse caso é utilizar concentradores de luz, utilizando lentes e espelhos (que apresentam um custo menor) para concentrar a luz incidente; com isso, é possível utilizar células com áreas bem menores, e com uma produção de energia satisfatória.

2.2.3 Coeficiente de absorção

O coeficiente de absorção (α) é uma propriedade do material que indica o quão longe um fóton de comprimento de onda λ consegue penetrá-lo até ser absorvido. Se esse material apresentar um baixo α , o fóton conseguirá penetrar consideravelmente, podendo até atravessar toda a sua extensão, caso sua espessura seja muito pequena. Em contrapartida, fótons que apresentam um comprimento de onda próximo a 400 nm (espectro visível) encontram um elevado α e são absorvidos na superfície. Sua unidade de medida é o cm^{-1} .

A relação entre o coeficiente de absorção e a profundidade de penetração pode ser observada na gráfico 2.8:

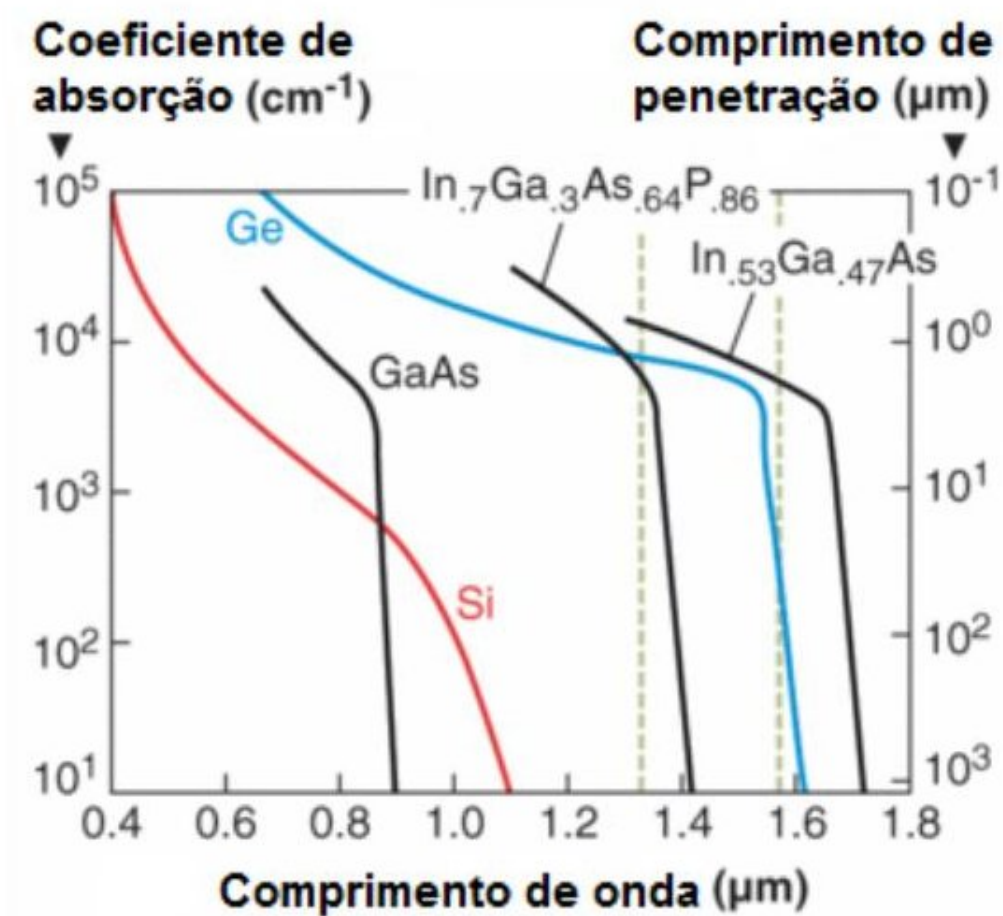


Figura 2.8: Coeficiente de absorção e comprimento de penetração por comprimento de onda

Fonte: [23]

A absorção de fótons no material pode ser modelada pela Lei de Lambert-Beer:

$$\phi(x) = \phi(0)e^{-\alpha x} \quad (2.1)$$

onde $\phi(x)$ é a intensidade de luz na profundidade x , $\phi(0)$ é a intensidade de luz na superfície do material e o $e^{-\alpha x}$ é o fator de absorção.

No caso do silício, o coeficiente de absorção é praticamente 0 para fótons com $\lambda > 1,1\mu m$, pois fótons com energia menor que o *bandgap* do silício cristalino (1,12eV a 300K) não são absorvidos por ele, ou seja, o silício é transparente para esses fótons. [3, 23]

2.2.4 Coeficiente de reflexão

O coeficiente de reflexão ou reflectância (R) é uma grandeza que indica qual porcentagem da luz incidente é refletida pela superfície do material. Ela depende do índice de refração do material e da rugosidade de sua superfície. Quanto maior o coeficiente de reflexão, menor a eficiência de conversão na geração de energia.

A reflexão é dada pela expressão:

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2.2)$$

onde n é a parte real e k é a parte imaginária do índice de refração do material. O termo k também pode ser encontrado como coeficiente de extinção, possuindo uma relação com o coeficiente da absorção:

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi n} \quad (2.3)$$

Como o índice de refração varia com λ , o coeficiente de reflexão também varia, possuindo valores distintos para cada comprimento de onda.

Para reduzir a reflectância pode se utilizar uma camada anti-reflexiva na superfície da célula. Essa camada também recebe o nome de janela. Para que o menor valor de reflectância seja alcançado, o índice de refração da camada anti-reflexo deve ser a média geométrica entre os valores dos índices de refração do material e do ar. [3, 23, 24]

2.2.5 Eficiência quântica e responsividade

A eficiência quântica (QE) de uma célula solar é definida pela razão entre o número de portadores coletados no circuito externo e os fótons incidentes com um dado comprimento de onda. Essa grandeza pode ser definida de duas formas: como eficiência quântica externa e interna, denotados por $EQE(\lambda)$ e $IQE(\lambda)$ respectivamente. Elas diferem no tratamento dos fótons refletidos pela célula: todos os fótons incidentes na superfície da célula são considerados no valor da EQE, mas somente os fótons não refletidos são considerados no valor da IQE.

Se a eficiência quântica interna for conhecida, a corrente fotogerada total será dada por (é uma aproximação, sem considerar os efeitos do material na geração de portadores):

$$I_{ph} = qA \int_{(\lambda)} \phi(\lambda)(1 - R(\lambda))IQE(\lambda)d\lambda \quad (2.4)$$

onde $\phi(\lambda)$ é o fluxo incidente de fótons de comprimento de onda λ (unidade de medida: [fótons/cm²μm·s]), A é a área da célula, $R(\lambda)$ é o coeficiente de reflexão na superfície superior. A integral é calculada sob todo o espectro da luz absorvida pela célula solar. O fluxo possui uma conexão com a distribuição espectral (I_λ), sendo dado por:

$$\phi(\lambda) = \frac{I_\lambda(\lambda)\lambda}{hc} \quad (2.5)$$

A resposta ou responsividade espectral (denotada por $SR(\lambda)$), é uma unidade similar de medida, mas com uma unidade diferente (ela é medida em [A/W]). Ela também é função do comprimento de onda. As duas grandezas estão conectadas pela relação matemática:

$$SR(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc}QE(\lambda) \quad (2.6)$$

onde q é a carga elementar, h é a constante de Planck e c é a velocidade da luz. [3, 24]

2.3 Curva I-V de uma célula solar

A curva I-V exibe o comportamento corrente-tensão de uma célula para diversas cargas resistivas de valores variáveis conectadas em seus terminais. Cada uma determina um ponto de operação, que pode ser relacionado com uma tensão e corrente específicas. O produto dessas duas grandezas é a potência que a célula entrega a essa carga. Na figura 13 abaixo, temos um exemplo de uma curva I-V:

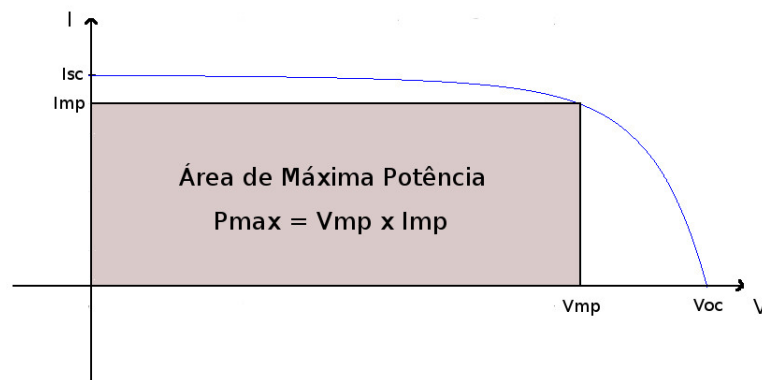


Figura 2.9: Curva I-V de uma célula solar

A curva I-V de uma célula solar apresenta-se no quarto quadrante (corrente negativa e tensão positiva - geradora de energia). Para fins de apresentação, essa curva é sempre invertida, considerando-se a corrente como positiva (como observado na figura 2.9). Ao se levantar a curva I-V de uma célula ou painel, podemos obter diversas grandezas importantes:

- Corrente de curto-circuito (I_{SC}): corrente apresentada quando os terminais da célula estiverem fechados (ou seja, uma resistência de carga nula) – é o ponto de interseção entre a curva e o eixo das correntes. Na condição de curto-circuito, a corrente I_{SC} é praticamente igual a I_{ph} , permitindo a utilização da equação 2.4 para avaliá-la. A corrente de curto-circuito é oriunda de uma outra grandeza, a densidade de corrente de curto-circuito (relacionam-se através da área A da junção):

$$I_{SC} = A \cdot J_{SC} \quad (2.7)$$

Os valores de J_{SC} variam de acordo com o material e tecnologia empregada: No silício cristalino (c-Si), $38\text{mA}/\text{cm}^2$; CdTe, $26,95\text{mA}/\text{cm}^2$; a-Si, $16,75\text{mA}/\text{cm}^2$; GaAs, $23\text{mA}/\text{cm}^2$; CIGS, $33,7\text{mA}/\text{cm}^2$; DSSC, $22,47\text{mA}/\text{cm}^2$; GaInP/GaAs/AlGaAs (multi-junção) $14,57\text{mA}/\text{cm}^2$. [3, 6, 25]

- Tensão de circuito aberto (V_{OC}): tensão apresentada quando os terminais da célula estiverem abertos (pressupondo uma carga resistiva de resistência infinitamente alta conectada em seus terminais) – é o ponto de interseção entre a curva e o eixo das tensões. Podemos calculá-la através da expressão:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{I_{SC}}{I_0} \right) \quad (2.8)$$

onde I_{SC} é a corrente de curto-circuito, I_0 é a corrente de escuro (seção 2.5), k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura (Kelvin). Como no caso da corrente I_{SC} , o valor de V_{OC} também depende do material e da técnica de fabricação utilizada. Por exemplo, nas células de silício cristalino (c-Si), V_{OC} está entre 0,5-0,7V. Em células de c-GaAs, 0,994V; CdTe, 0,857V; a-Si, 0,886V; Células de DSSC, 0,744; GaInP/GaAs/AlGaAs (multi-junção), 3,014V. [3, 6, 25]

- Ponto de máxima potência (M_{PP} ou P_{MAX}): é o ponto da curva onde o produto entre a tensão e a corrente é máximo; esse ponto de operação exhibe o máximo de potência que essa célula pode fornecer; nesse ponto, os valores de tensão e corrente são denominados tensão (V_{MP}) e corrente de máxima potência (I_{MP}).

- Fator de preenchimento: Com esse gráfico também podemos obter uma figura determinada de fator de preenchimento (*fill factor* ou FF), que é mais um parâmetro de avaliação de desempenho da célula, através da seguinte relação:

$$FF = \frac{P_{MAX}}{V_{OC}I_{SC}} = \frac{V_{MP}I_{MP}}{V_{OC}I_{SC}} \quad (2.9)$$

Células de alta qualidade possuem um fator maior que 0,7 (Grade A), enquanto que células de segunda linha (grade B) possuem um fator entre 0,4 e 0,7. É uma grandeza que também depende do material e da técnica de fabricação: c-Si, entre 0,80 e 0,82; CdTe, 0,77; a-Si, 0,68, DSSC 0,71; c-GaAs, 0,8; InGaP/GaAs/InGaAs, 0,86. [3, 6, 25]

- Eficiência de conversão ou rendimento: Também podemos calcular o rendimento η^1 de uma célula, que é a relação entre a potência que chega à célula (através dos fótons que incidem na superfície da célula) e a potência gerada por ela. Equacionando, temos:

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{I_{rr} \times A} \quad (2.10)$$

onde I_{rr} é a irradiância, e A é a área de célula. A unidade de potência utilizada em fotovoltaicos é o *Watt-pico* ou W_p , que é associada à condição de teste padrão ou STC (subseção 2.4.4) Eficiências típicas: c-Si: 20-25%; a-Si: 9,5%; GaAs (filme fino): 26,1%; c-InP: 22,1%; CIGS: 19,4%; CdTe: 16,7%; GaInP/GaAs/Ge (multi-junção): 32%; GaInP/GaAs (multi-junção): 30,3%. [3, 6, 25]

As células, como junções P-N, também podem ser polarizadas inversamente (a partir da aplicação de tensão negativa em seus terminais), apresentando mais uma região da curva I-V (terceiro quadrante). Embora o comportamento nessa região não influencie no funcionamento nominal da célula, ela é importante na extração dos parâmetros dessa célula. Por isso é interessante também levantar essa região na etapa de obtenção da curva I-V. [2–4, 6, 25–27]

2.4 Características do ambiente de trabalho da célula

As células fotovoltaicas podem ter seu desempenho de funcionamento alterado de acordo com as condições climáticas vigentes, impactando na sua capacidade de geração de energia.

¹Note que a eficiência de conversão é diferente da eficiência quântica – enquanto a primeira relaciona o número de elétrons coletados em função do número de fótons incidentes, a última mostra a relação entre a potência luminosa incidente e a potência elétrica de saída gerada pela célula. Quanto utilizarmos a expressão eficiência da célula, é a eficiência de conversão que está em questão.

Essas grandezas estão diretamente ligadas com a localização geográfica do ambiente de funcionamento, assim como outras características locais como nebulosidade, altitude, etc.

2.4.1 Distribuição espectral e massa de ar

A atmosfera altera a distribuição espectral da luz que a atravessa, atenuando a intensidade dos seus componentes. O espectro também tem impacto direto sobre a corrente fotogerada, de acordo com a resposta espectral da célula (que depende da resposta do material semiconductor do qual ela é feita). O silício, por exemplo, tem seu pico de resposta na região do infravermelho próximo (900 nm), alcançando o vermelho (740 nm) na região do visível. A distribuição espectral também pode ser encontrada como irradiância espectral (I_λ).

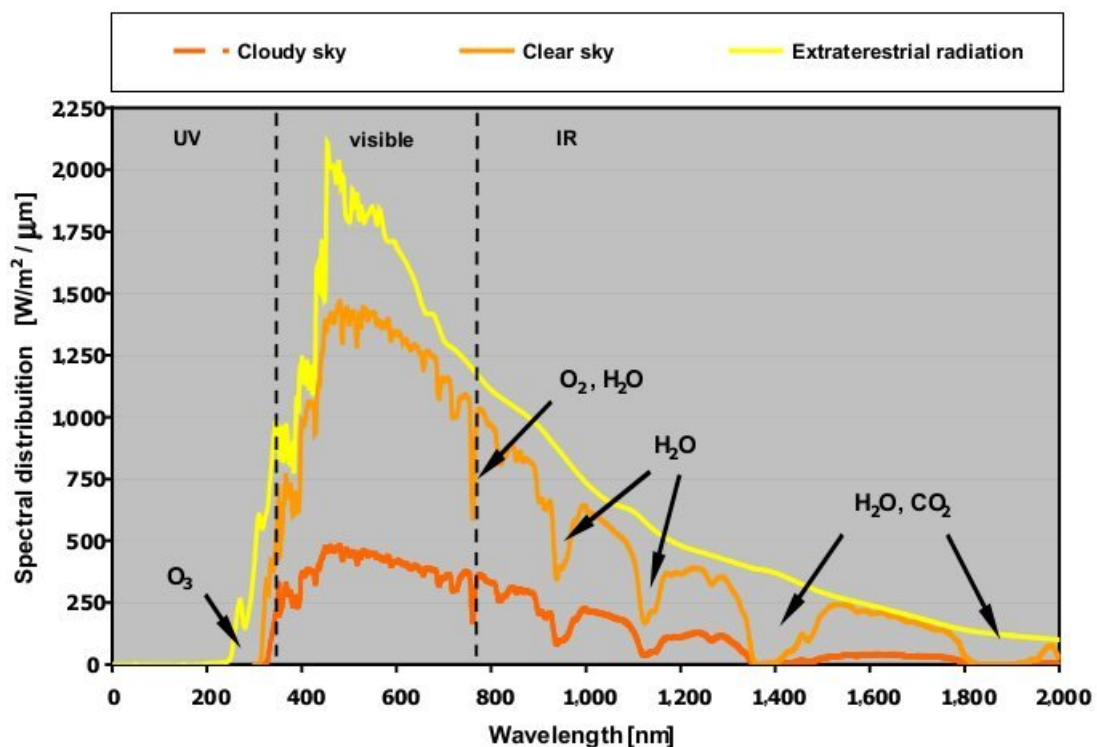


Figura 2.10: Distribuição espectral da radiação solar para diferentes condições atmosféricas

Fonte: [28]

O parâmetro AM (massa de ar ou *air mass*) é associado ao ângulo apresentado pelo feixe de luz ao atravessar um plano normal à superfície do planeta Terra. A AM 0 é a altitude máxima, localizada acima da atmosfera (espaço livre); já para medidas maiores que zero, estaremos na superfície do planeta (ao nível do mar) (considera-se AM 1.5 a medida em regiões tropicais – no Equador é utilizado a AM 1.0, enquanto que o AM 2 e AM 3 são utilizados em regiões de altas latitudes).

Podemos definir essa grandeza com a seguinte equação:

$$AM = \frac{L}{L_o} \approx \frac{1}{\cos(z)} \quad (2.11)$$

sendo L o comprimento do caminho através da atmosfera, L_o é o comprimento do caminho no ângulo de zênite (normal a superfície terrestre) e z o ângulo de zênite (em graus). A figura 2.11 ilustra os valores de *Air Mass* de acordo com a angulação do feixe luminoso em relação ao zênite (e a posição de entrada na atmosfera terrestre). [3, 28, 29]

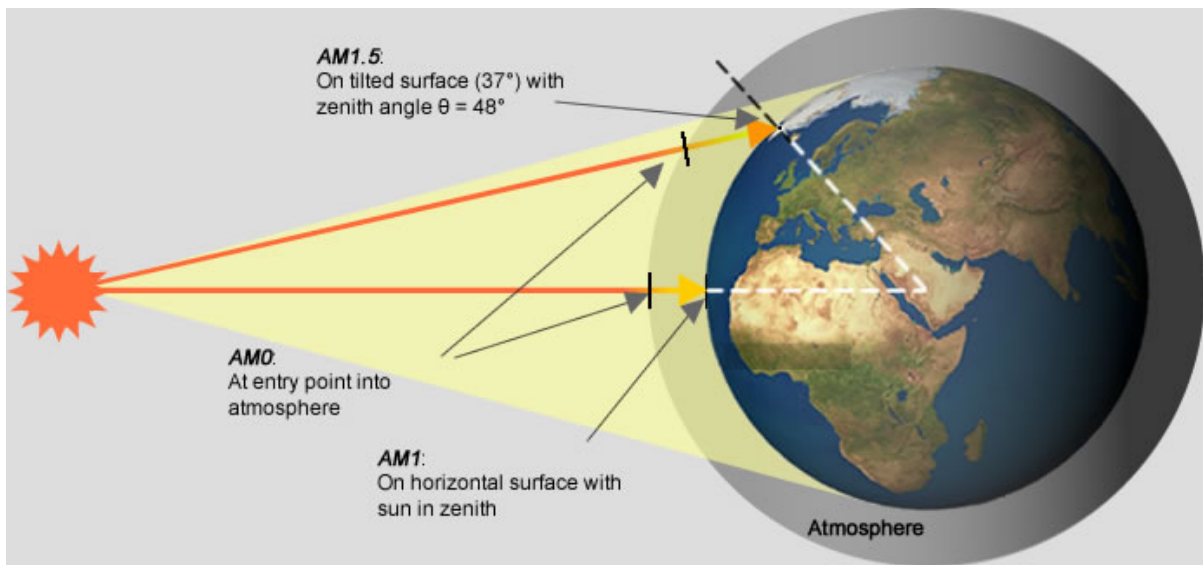


Figura 2.11: *Air Mass* de acordo com o ângulo do feixe

Fonte: [30]

2.4.2 Irradiância

É uma unidade de magnitude utilizada para descrever a potência incidente por unidade de área de superfície, sendo a integral da distribuição espectral (em λ). Como referência, temos a constante solar (I_{rr_o}), irradiância medida fora da atmosfera (imaginando uma superfície plana horizontal e perpendicular aos raios solares, orientada para o zênite, a uma distância média Terra-Sol), cujo o valor é igual a 1367 W/m^2 . De acordo com a região do planeta, temos diversos valores de irradiância diferentes (temos o valores mais altos nas regiões equatoriais e mais baixos nos polos). A irradiância (I_{rr}) se relaciona com a I_{SC} de uma célula pela relação aproximada:

$$I_{SC} = I_{SC}(STC) \cdot \frac{I_{rr}}{I_{rr}(STC)} \quad (2.12)$$

Onde $I_{SC}(STC)$ é a corrente de curto-circuito e $I_{rr}(STC)$ é a irradiância na condição STC ($I_{rr}(STC) = 1000\text{W}/\text{m}^2$). A partir de um certo valor, incrementos de irradiância não promovem o crescimento da corrente fotogerada; esse valor limite é denominado corrente máxima ou corrente de saturação da célula.

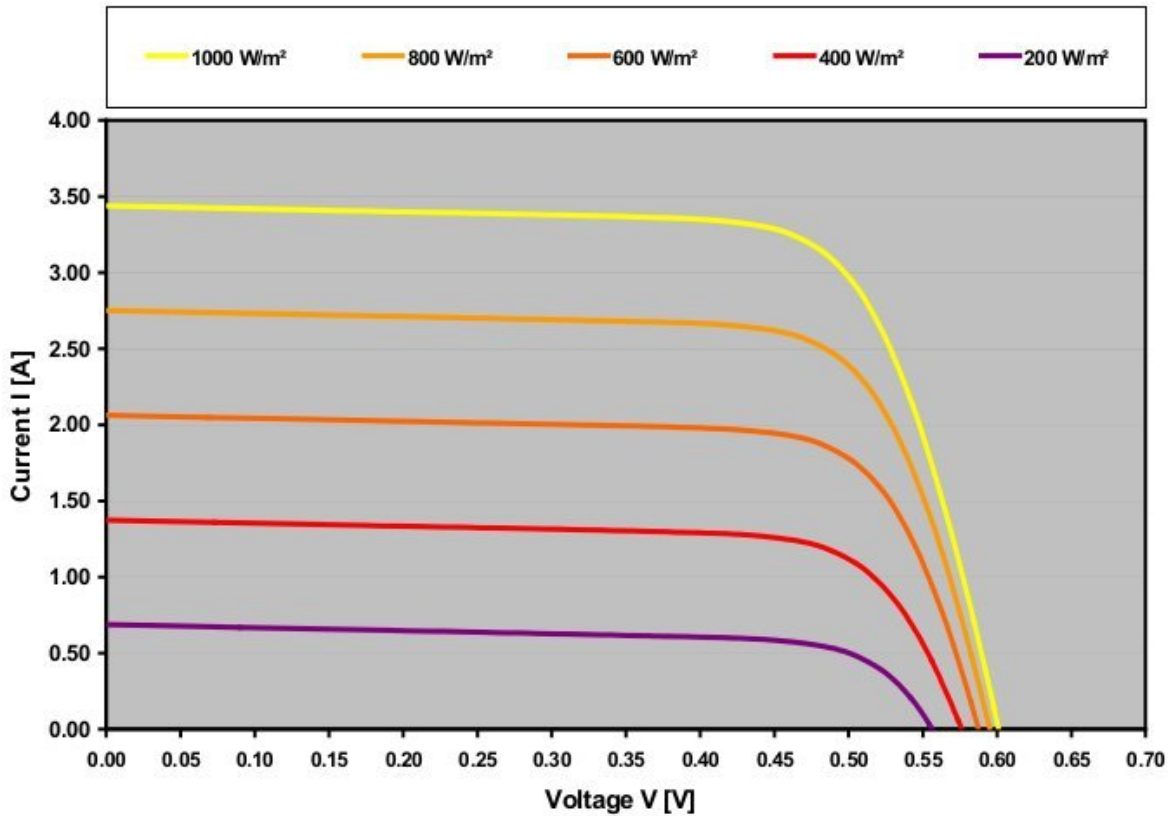


Figura 2.12: Curvas I-V para diferentes irradiâncias

Fonte: [28]

Podemos relacionar a massa de ar com a irradiância com a relação aproximada (baseada nas observações de Laue):

$$I_{rr}(z) = I_{rr_o} \times e^{(-c)(\sec(z))^s} = I_{rr_o} \times e^{(-c)(AM)^s} \quad (2.13)$$

onde I_{rr_o} é a irradiância fora da atmosfera, z é a distância do zênite. As constantes c e s são empíricas e valem, respectivamente, 0,357 e 0,678. [3, 6, 27–29]

2.4.3 Temperatura

A temperatura também é um fator importante no funcionamento da célula: aumentos dessa grandeza causam incrementos na corrente fotogerada (devido a maior geração de portadores de carga). Entretanto, ocorre o efeito contrário na tensão de saída: ela diminui com a temperatura, ocasionando uma redução significativa na geração de potência da célula (o efeito na tensão é mais proeminente que na corrente: enquanto uma elevação de temperatura aumenta a corrente na taxa de $0,05\%/^{\circ}\text{C}$, o efeito da tensão é de $-2,3\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ – considerando uma célula de silício monocristalino). O aumento da irradiância incidente na célula provoca um aumento de temperatura, reduzindo assim sua eficiência, além de impactar nos valores das resistências parasitas (seção 2.5), de uma forma não-linear. [3, 4, 6, 28]

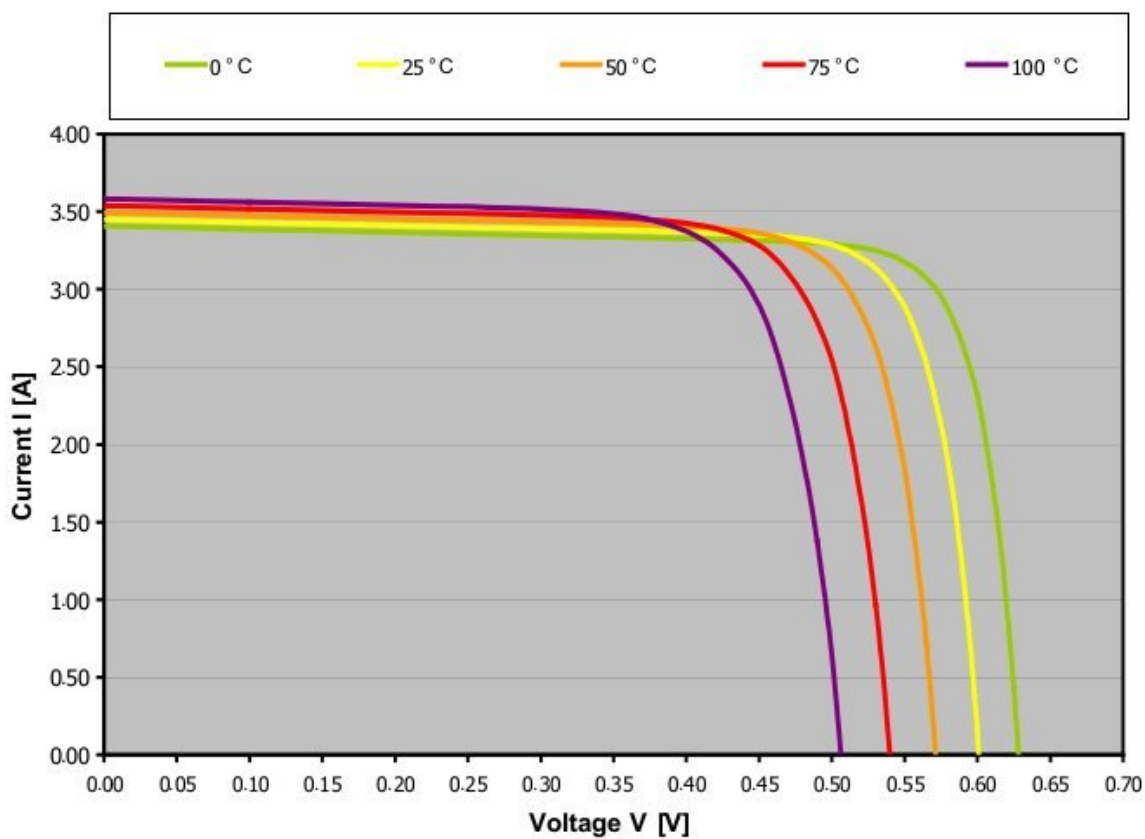


Figura 2.13: Curvas I-V para diferentes temperaturas

Fonte: [28]

2.4.4 Condições de teste padrão - STC

Para uma análise de funcionamento das células, devemos utilizar parâmetros ambientais bem definidos (principalmente na comparação de células e painéis solares). Um dos padrões utilizados em fotovoltaicos é a condição de teste padrão (STC - *Standard Test Conditions*), onde os valores para cada grandeza são: irradiância igual a 1000 W/m^2 (também denominada "um sol", ou sol pleno – SP), AM 1.5 e temperatura de 25 graus. [3, 28, 29]

2.5 Parâmetros de uma célula

As células fotovoltaicas possuem diversos parâmetros importantes:

- Corrente de escuro I_0 : é a corrente que atravessa a junção da célula quando ela está eletricamente polarizada, mas não iluminada. No caso de células fotovoltaicas, não é utilizado potencial externo para a polarização da mesma, entretanto, é importante conhecer este parâmetro, também conhecido como corrente de saturação reversa no escuro, para que se possa descrever a equação do comportamento da célula para vários valores de corrente e tensão nos seus terminais. Há também uma flutuação de sinal, ao redor do zero, mesmo quando a célula encontra-se no escuro. Essa variação é proporcional à raiz quadrada da magnitude da corrente no escuro. Este parâmetro apresenta forte dependência com a temperatura;
- Resistência série R_S : originada das resistências do próprio material semicondutor, entre os limites da região de depleção, e dos contatos metálicos (junção ôhmica metal-semicondutor entre o material e o terminal externo). No caso ideal, seu valor é nulo; o acréscimo do valor dessa resistência diminui o valor de V_{OC} (pois há uma queda de tensão nessa resistência) e do *fill factor*, até uma condição limite onde a curva I-V fica reduzida a uma reta com inclinação $1/R_S$. A magnitude dessa grandeza não é comumente divulgada pelos fabricantes, mas usualmente fica em torno de milésimos a dezenas de Ω ;
- Resistência paralela R_P (*shunt*): causada por correntes de fuga devido a não-idealidades e impurezas próximas à junção P-N, além de imperfeições na estrutura, principalmente nas bordas. Idealmente, ela possui valor infinito; entretanto, ao assumir valores mais baixos, a corrente que passa por essa resistência começa a aumentar, reduzindo a corrente de saída de forma cada vez mais drástica, até ao ponto da curva I-V se tornar uma reta com inclinação $1/R_P$. Valores típicos dessa grandeza ficam em torno de unidades a dezenas de $M\Omega$.

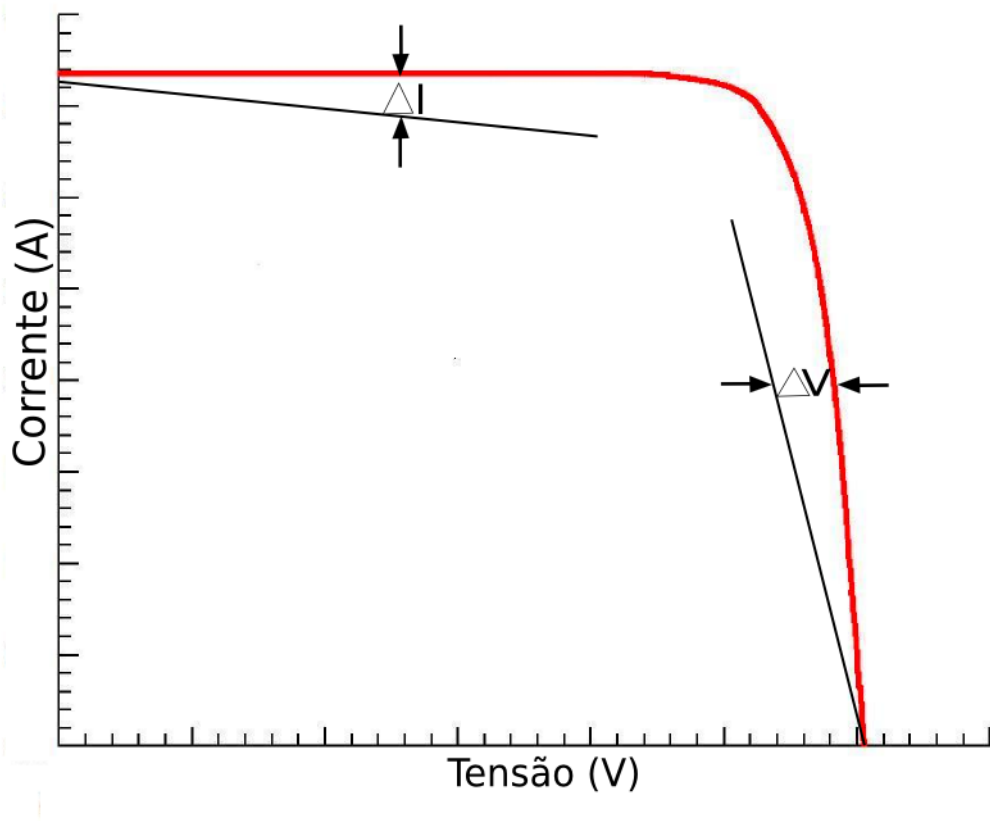


Figura 2.14: Efeitos das resistências parasitas na curva I-V

Na figura 2.14, observamos os efeitos das resistências na curva I-V, onde $\Delta I = \frac{(V + IR_S)}{R_P}$ e $\Delta V = IR_S$. As resistências internas da célula impactam na qualidade da célula (e no FF): células de alta qualidade possuem uma baixa resistência série e uma alta resistência paralela. [3, 4, 6]

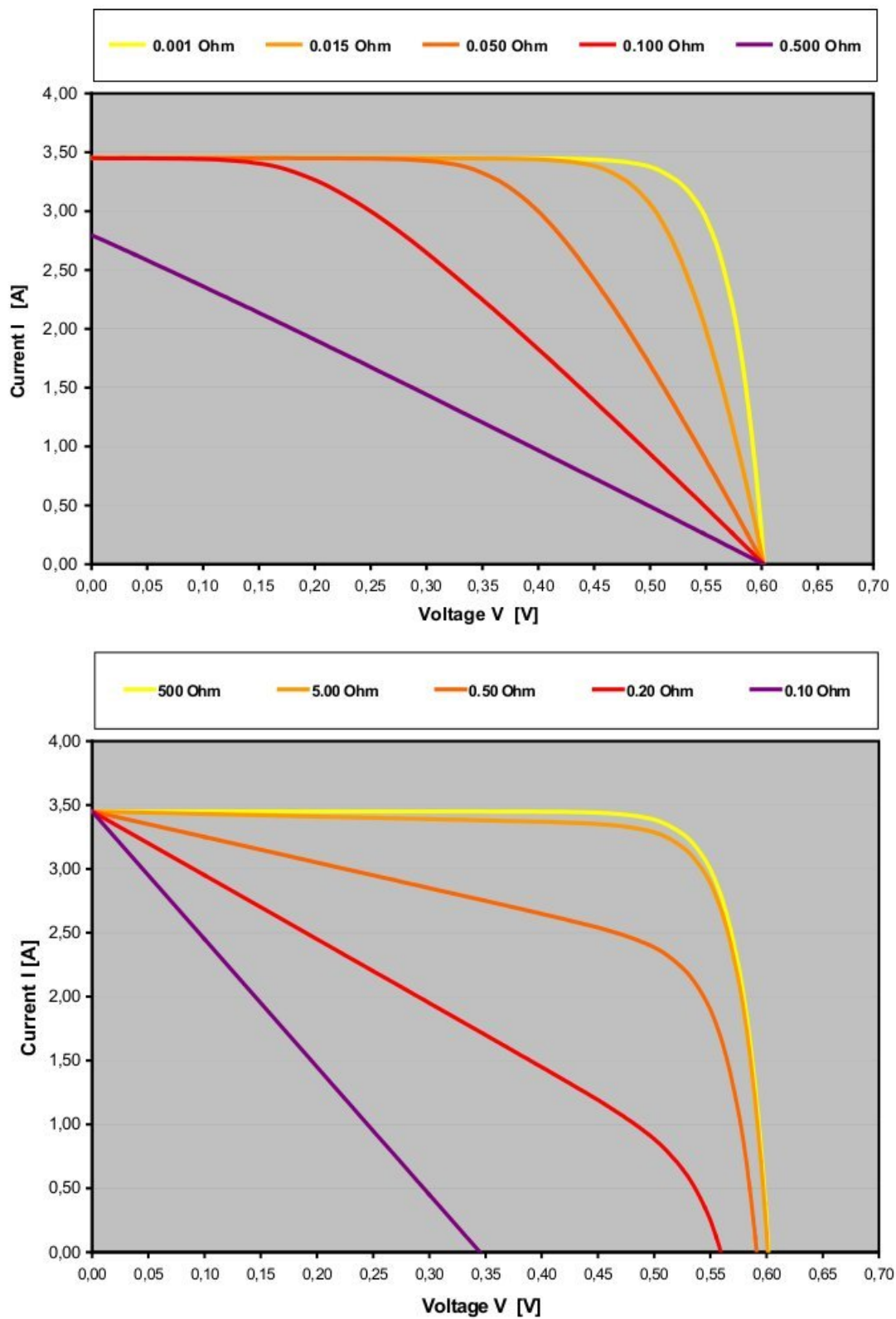


Figura 2.15: Curva I-V para diferentes valores de resistência série (superior) e paralela (inferior)

Fonte: [28]

2.6 Modelagem

Uma célula solar pode ser modelada matematicamente como uma junção P-N (modelo do diodo ideal ou modelo de Shockley), com a adição do termo da corrente fotogerada I_{ph} e do fator de idealidade m :

$$I = I_{ph} - I_0(e^{qV/mkT} - 1) \quad (2.14)$$

Esse modelo permite uma boa aproximação do comportamento de uma célula. Ele leva unicamente em consideração o efeito de difusão (efeito de condução predominante em tensões mais altas), por ser o efeito mais significativo na região de funcionamento típica da célula. Outro modelo muito utilizado é o modelo de duas exponenciais (ou dois diodos), que levam em consideração os diferentes efeitos de corrente (considera-se o efeito de deriva, que prepondera em baixas tensões, e o efeito de difusão):

$$I = I_{ph} - I_{01}(e^{qV/m_1kT} - 1) - I_{02}(e^{qV/m_2kT} - 1) \quad (2.15)$$

Traçando separadamente as exponenciais de cada diodo:

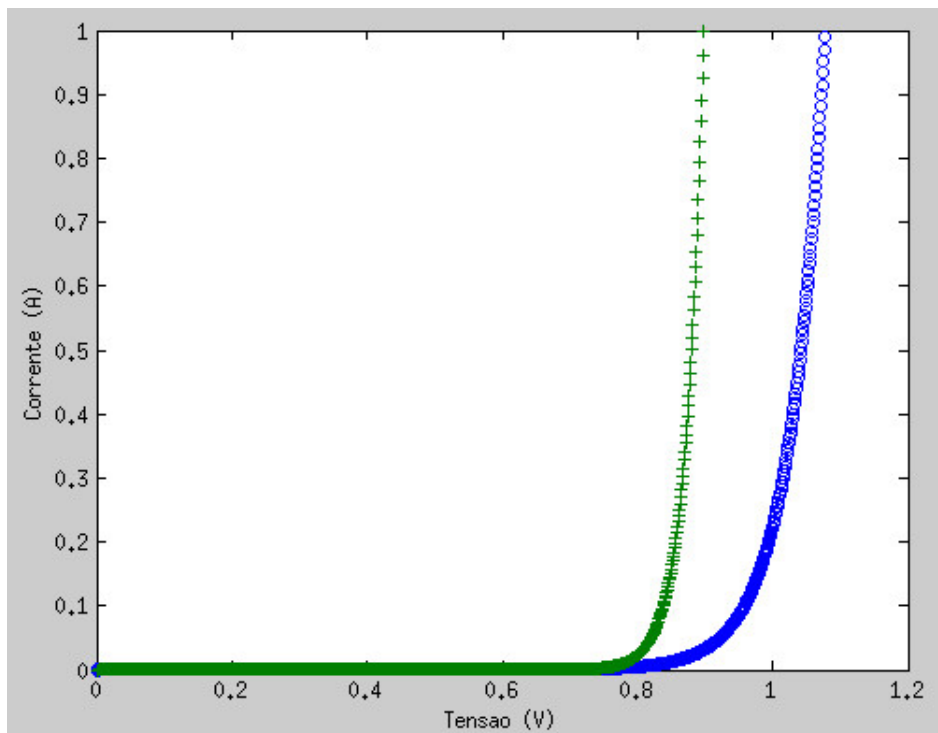


Figura 2.16: Curvas de cada diodo traçadas separadamente: Difusão (verde) e deriva (azul)

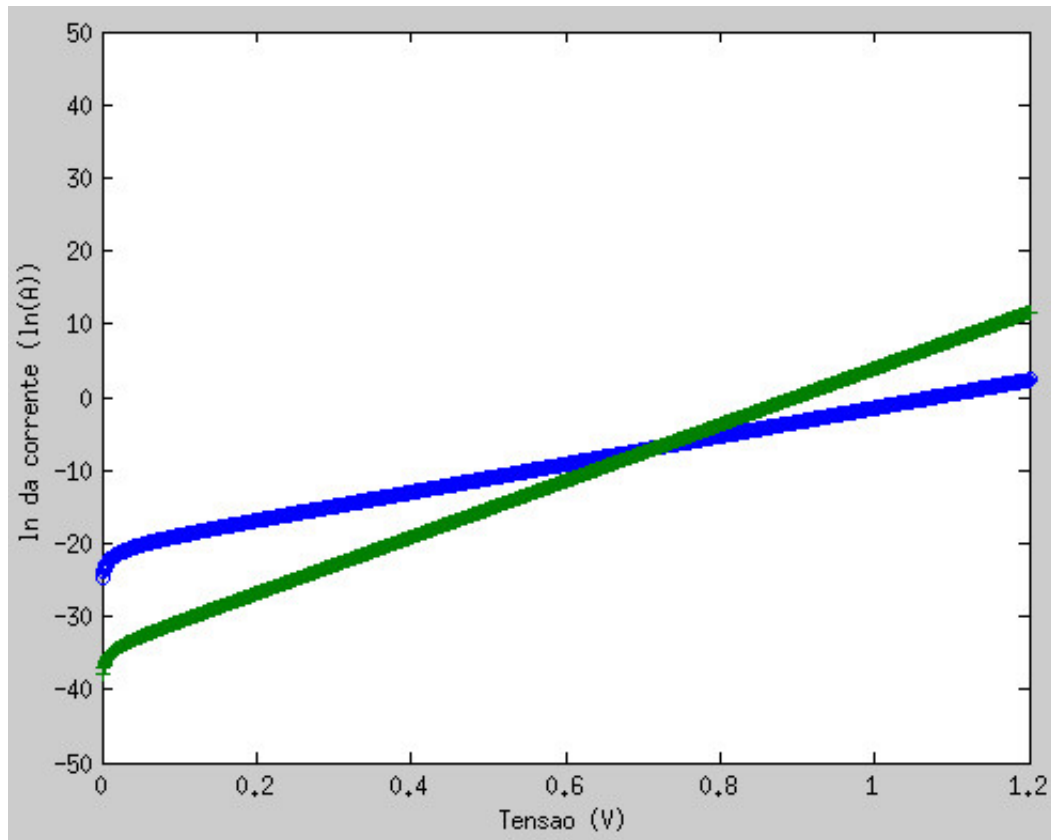


Figura 2.17: Curvas ($\ln(I)$) de cada diodo: Difusão (verde) e deriva (azul)

Nas figura 2.16 observamos o domínio da corrente de difusão sobre a corrente de deriva à partir de uma certa tensão (nesse caso, aproximadamente 0,7V). Na figura 2.17, utilizamos a compressão logarítmica da corrente para melhor visualização dos fenômenos. O ponto de interseção entre as retas e o eixo y indicam as correntes de saturação reversa (comprimidas pela escala logarítmica). Modelos mais completos de células utilizam o modelo de duas exponenciais e ainda incluem as resistências parasitas (resistências série e paralela). Em fotovoltaicos, qualquer ganho é considerável – daí a necessidade de modelos mais elaborados. Para esse caso, podemos usar a relação:

$$I = I_{ph} - I_{01}(e^{q(V+IR_S)/m_1kT} - 1) - I_{02}(e^{q(V+IR_S)/m_2kT} - 1) - \frac{(V + IR_S)}{R_P} \quad (2.16)$$

onde T é a temperatura, k é a constante de Boltzmann, I_{ph} é a corrente fotogerada, I_{01} é a corrente reversa de difusão, I_{02} é a corrente reversa de deriva (ou recombinação), R_S é a resistência-série, R_P é a resistência paralela e m_1 e m_2 os fatores de idealidade ($m_1 \approx 1$ e $m_2 \approx 2$). O modelo elétrico também é semelhante, tendo como diferença a inserção de uma fonte de corrente (que faz o papel de corrente fotogerada). [2, 3]

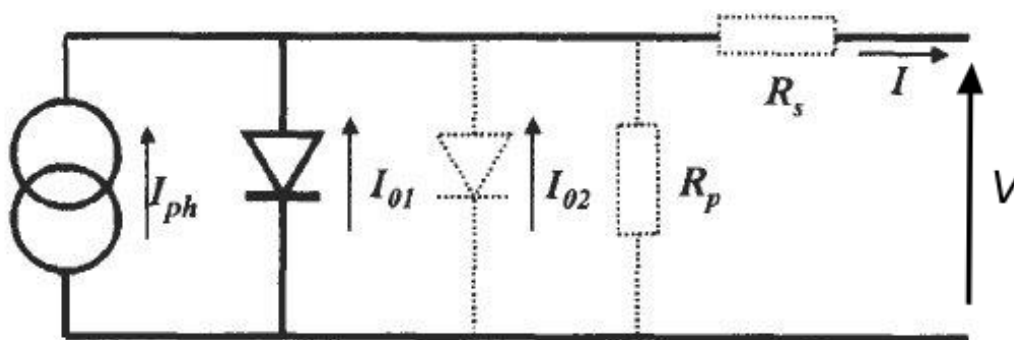


Figura 2.18: Modelo de célula solar ideal (linhas preenchidas) e não-ideal (linhas pontilhadas)

Fonte: [3]

2.7 Associação de células

Uma célula solar isolada tem capacidades muito limitadas de geração de energia. Uma célula de silício cristalino típica apresenta, em STC, uma tensão de circuito aberto em torno de 0,6 V (tensão e corrente de máxima potência de, respectivamente, 0,47 V e 1,0 A). Esse valor de tensão é muito baixo para alimentação da maioria das cargas existentes (ou ainda para a carga de um sistema de bancos de baterias), assim como esse valor de corrente pode ser insuficiente para alimentar um conjunto maior de cargas. A solução para esse impasse é utilizarmos a associação de células, através de arranjos série, paralelo ou mistos.

2.7.1 Associação série

Para obtermos tensões de saída mais altas, as células precisam ser associadas em série, sendo a tensão de saída aproximadamente igual à soma das tensões de cada célula. A corrente nesse caso, será determinada pela célula com menor capacidade de geração de corrente do arranjo (daí a necessidade de sempre se usar células similares). [28]

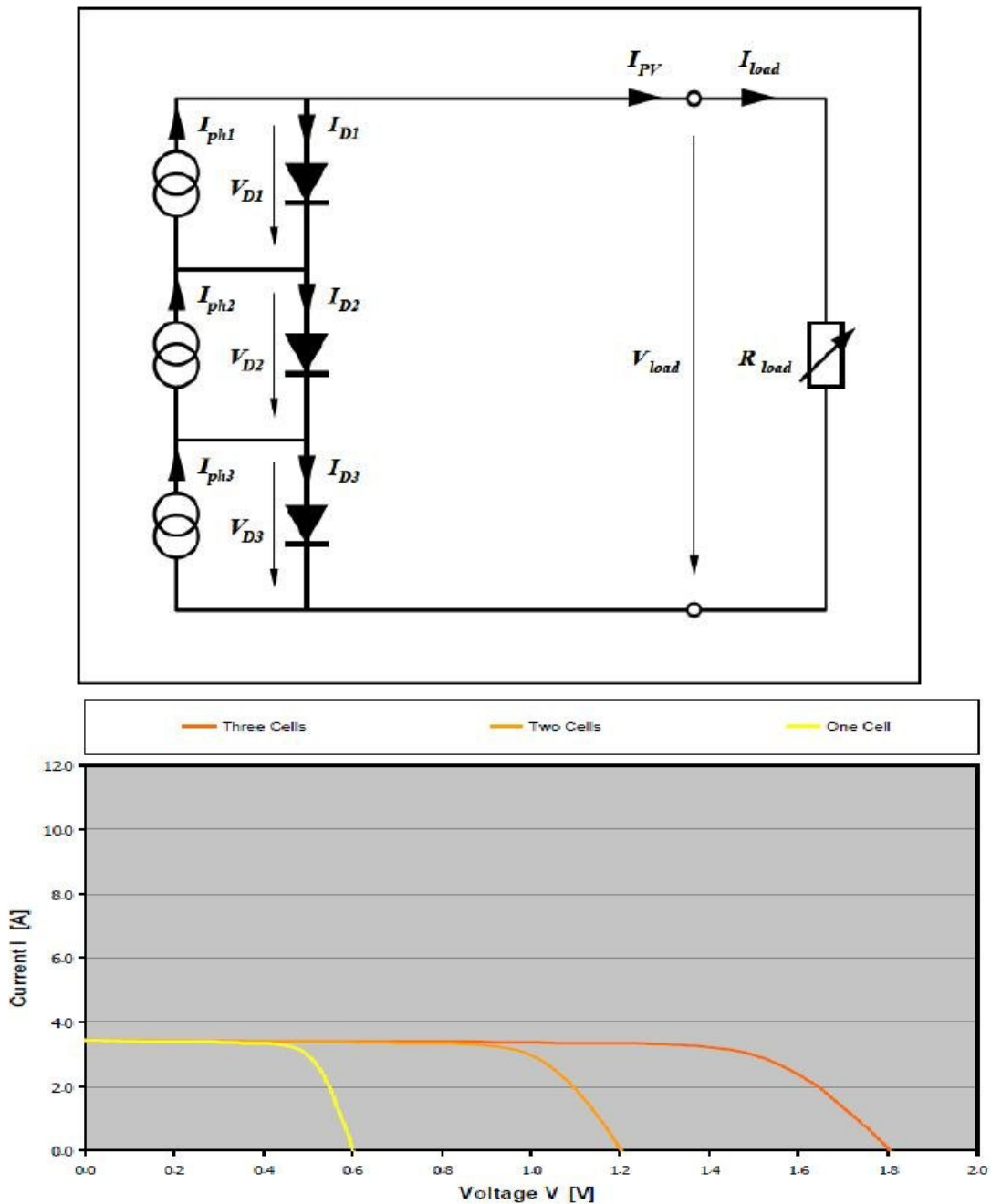


Figura 2.19: Associação série de células – circuito equivalente e curva I-V

Fonte: [28]

2.7.2 Associação paralela

Para maiores demandas de corrente, utilizamos a associação em paralelo. A tensão de saída é pouco alterada, mas a corrente será aproximadamente a somatória das correntes de cada célula do arranjo. O efeito indesejável da associação em paralelo é a redução da resistência paralela, que aumenta as perdas de corrente no dispositivo.

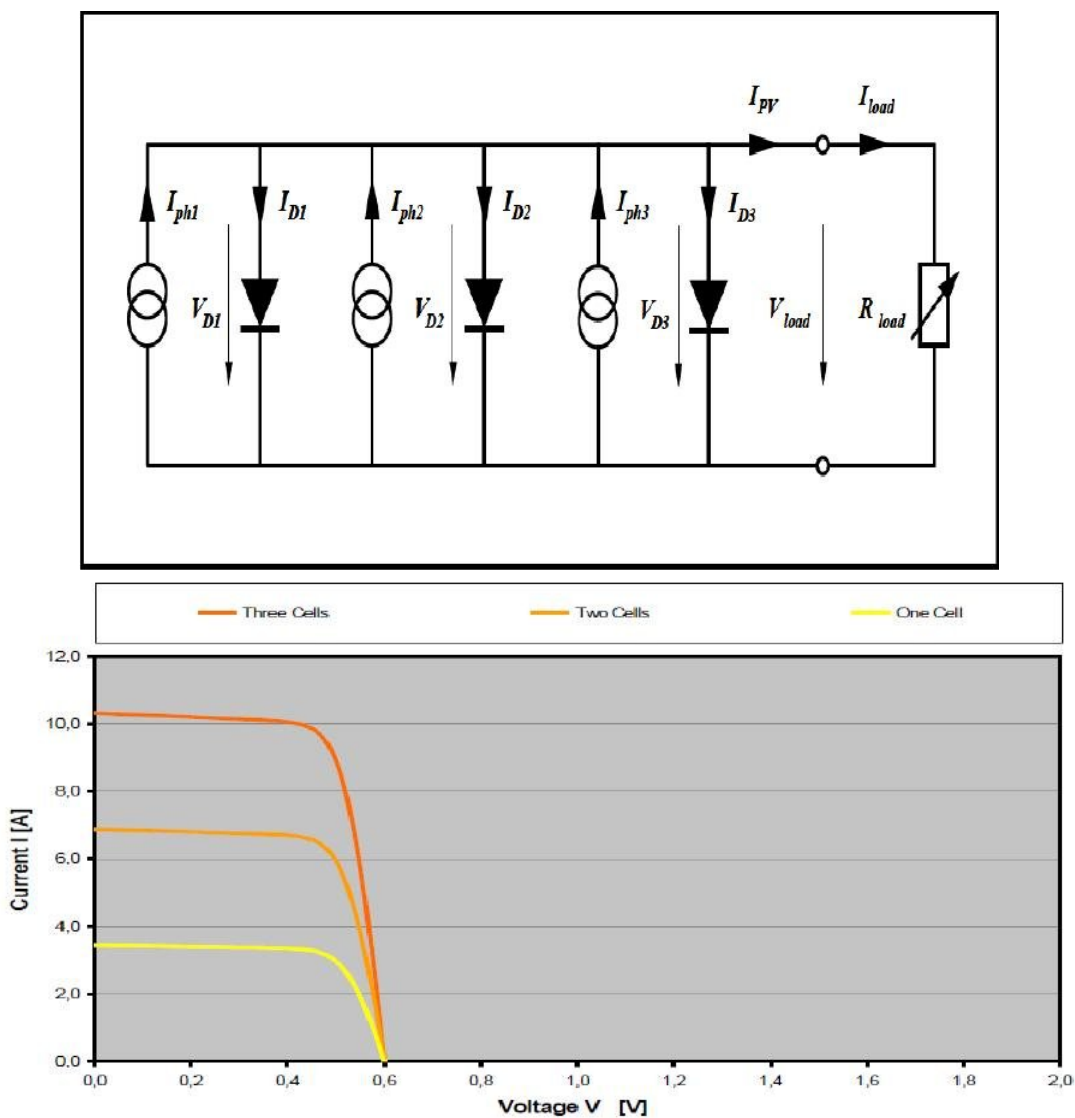


Figura 2.20: Associação paralela de células – circuito equivalente e curva I-V

Fonte: [28]

2.7.3 Sombreamento

Um problema possível de ocorrer é o sombreamento: quando uma célula é acidentalmente coberta, ela pode interferir no funcionamento normal do painel. Se o painel tiver um arranjo em série, a corrente se anulará (não aparecerá corrente de saída apreciável) e o painel deixará de funcionar corretamente. Para evitar esse problema, utilizamos diodos em paralelo com as células (os chamados "diodos de desvio ou *bypass*"), para que quando ele acontecer, o painel continue funcionando (embora com uma ligeira queda na tensão de saída). No arranjo em paralelo, haverá um impacto na corrente máxima que o painel poderá fornecer, mas ele continuará funcionando.

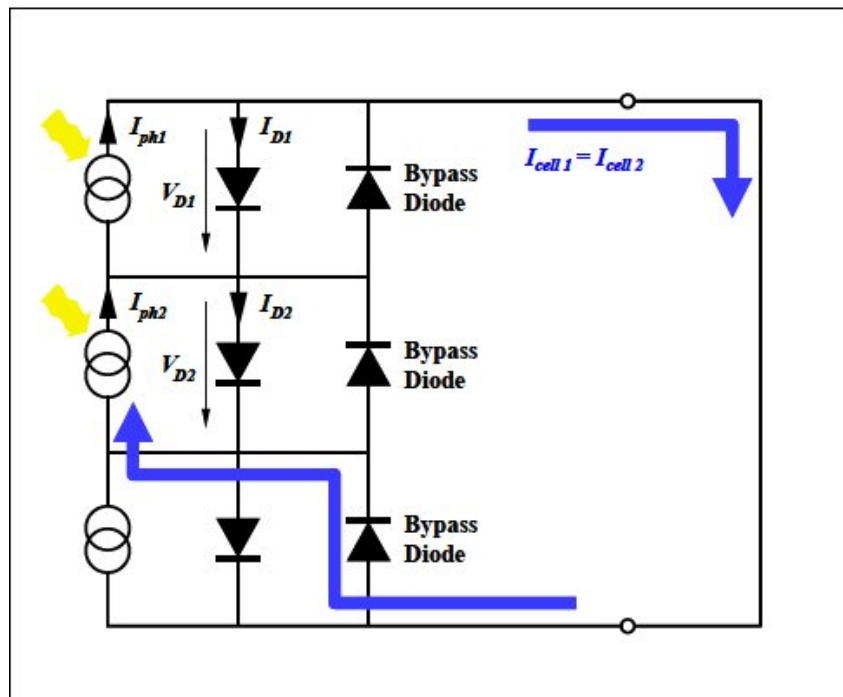


Figura 2.21: Associação série – efeito de sombreamento e utilização do diodo de desvio

Fonte: [28]

2.7.4 Efeitos da associação nos parâmetros do painel

Em condições reais de funcionamento, essas associações tem impacto nos parâmetros do painel, como suas resistências série e paralela equivalentes, e seu fator de idealidade. Contudo, essa modelagem não é trivial, exigindo que sejam feitas aproximações para o cálculo dessas grandezas. Um dos métodos que podemos utilizar para essa função é o de Alonso-Garcia [31, 32]. Contudo, esse método possui algumas considerações:

- Os parâmetros vêm da equação de células individuais quando se utiliza linearização nas regiões de curto-circuito e circuito aberto;
- Deve se considerar que a irradiância é uniforme em todo aglomerado;
- Os efeitos da temperatura são desprezados (como a variação das resistências com a temperatura);
- Válido para qualquer região da curva I-V;
- É utilizado o modelo com apenas uma exponencial (com 5 parâmetros e m variável).

Equação utilizada no método Alonso-Garcia:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V + IR_S}{mV_t}} - 1 \right) - (V + IR_S) G_P \quad (2.17)$$

onde G_P é a condutância paralela ($1/R_P$), V_t é a tensão térmica (kT/q) e m é o fator de idealidade da célula (que varia entre 1 e 2, dependendo do mecanismo dominante de transporte dos portadores fotogerados).

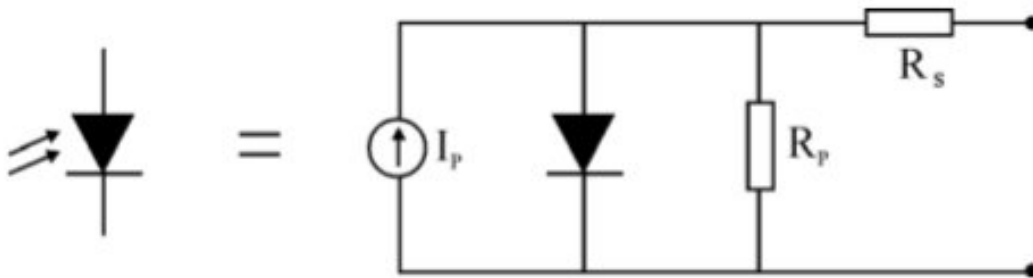


Figura 2.22: Símbolo e modelo de circuito utilizado no método de Alonso-Garcia

Fonte: [32]

Utilizando a linearização da equação 2.17 nas regiões de curto-circuito e circuito aberto, obtemos as expressões a seguir:

$$I = I_{SC} - \frac{G_P^S}{1 + G_P^S R_S} V \quad (2.18)$$

$$V = V_{OC} - \left(R_S + \frac{1}{G_P^O} \right) I \quad (2.19)$$

$$G_P^S = G_P + \frac{\frac{R_S I_{SC}}{I_0 e^{\frac{mV_t}{mV_t}}}}{mV_t} \quad (2.20)$$

$$G_P^O = G_P + \frac{\frac{V_{OC}}{I_0 e^{\frac{mV_t}{mV_t}}}}{mV_t} \quad (2.21)$$

onde os sobrescritos S e O representam, respectivamente, curto-circuito e circuito aberto.

- Associação série

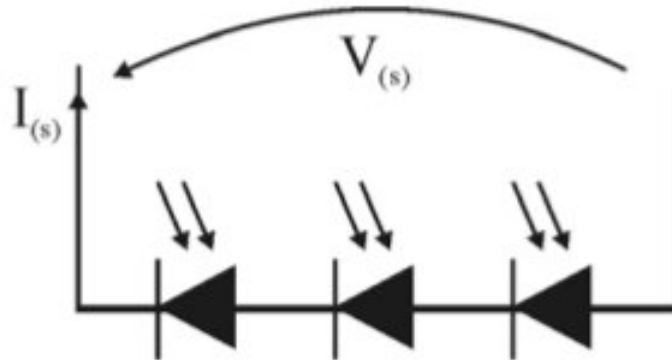


Figura 2.23: Associação série de células solares

Fonte: [32]

Na associação série, temos as seguintes expressões:

$$I_{SC(s)} = \left(\sum_i \left(\frac{1}{I_{SCi}} \right)^K \right)^{-\frac{1}{K}} \quad (2.22)$$

$$V_{OC(s)} = \sum_i V_{OCi} \quad (2.23)$$

$$R_{S(s)} = \sum_i R_{Si} \quad (2.24)$$

$$G_{P(s)} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{G_{Pi}}} \quad (2.25)$$

$$m_{(s)} = I_{SC(s)} \sum_i \frac{m_i}{I_{SCi}} \quad (2.26)$$

onde o K na expressão 2.22 é um inteiro necessário para computar as variações de corrente entre as células na associação; em teoria, quanto maior o seu valor, mais preciso será o valor de corrente obtido; contudo, valores muito altos podem ultrapassar o limite numérico do computador.

Depois de se calcular esses quatro parâmetros, podemos obter alguns parâmetros secundários, como a corrente de saturação reversa I_0 (equação 2.27) e a fotocorrente I_{ph} (equação 2.28):

$$I_{0(s)} = (I_{SC(s)} - G_{P(s)} (V_{OC} - R_{S(s)} I_{SC(s)})) \left(e^{\frac{V_{OC(s)}}{m(s)V_t}} - e^{\frac{R_{S(s)} I_{SC(s)}}{m(s)V_t}} \right)^{-1} \quad (2.27)$$

$$I_{ph(s)} = I_{SC(s)} + G_{P(s)} (R_{S(s)} I_{SC(s)}) + I_{0(s)} \left(e^{\frac{R_{S(s)} I_{SC(s)}}{m(s)V_t}} - 1 \right) \quad (2.28)$$

• Associação paralela

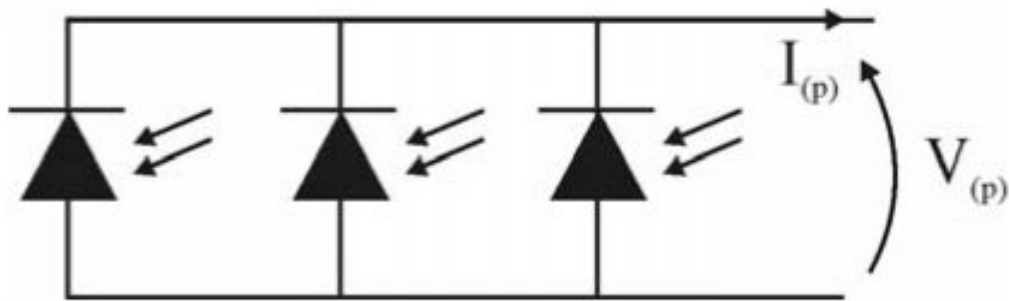


Figura 2.24: Associação paralela de células solares

Fonte: [32]

Para associações em paralelo, temos as expressões:

Corrente de curto-circuito:

$$I_{SC(p)} = \sum_j I_{SCj} \quad (2.29)$$

Tensão de circuito aberto:

$$V_{OC(p)} = \frac{1}{\sum_j \frac{1}{R_{Sj} + \frac{1}{G_{Pj}^O}}} \times \sum_j \frac{V_{OCj}}{R_{Sj} + \frac{1}{G_{Pj}^O}} \quad (2.30)$$

(Onde G_{Pj}^O é a condutância paralela em regime de circuito aberto)

Resistência série:

$$R_{S(p)} = \frac{1}{\sum_j \left(\frac{I_{SCj}}{R_{Sj} I_{SCj} + m_j V_t} \right)} - \frac{V_t}{\sum_j \frac{I_{SCj}}{m_j}} \quad (2.31)$$

Condutância paralela (inverso da resistência paralela)

$$G_{P(p)} = \sum_j G_{Pj} \quad (2.32)$$

Fator de idealidade:

$$m_p = \frac{I_{SC(p)}}{\sum_j \frac{I_{SCj}}{m_j}} \quad (2.33)$$

As correntes I_0 e I_{ph} da associação em paralelo podem ser obtidas através das equações 2.27 e 2.28.

- **Associação mista**

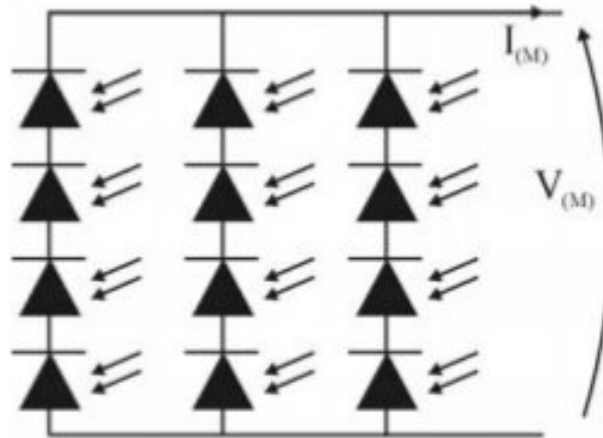


Figura 2.25: Associação mista de células solares

Fonte: [32]

Na associação mista, o modelo é obtido através do uso recursivo das equações das associações série e paralela apresentadas anteriormente. O subscrito i refere-se a células em associação série, enquanto que o j as células em associação paralela. Os parâmetros podem ser calculados com as expressões a seguir:

Corrente de curto-circuito:

$$I_{SC(M)} = \sum_j \left(\left(\sum_i \left(\frac{1}{I_{SCi}} \right)^K \right)^{-\frac{1}{K}} \right) \quad (2.34)$$

Tensão de circuito aberto:

$$V_{OC(M)} = \frac{1}{\sum_j \left(\frac{1}{R_{Sj} + \frac{1}{G_{Pj}^O}} \right)} \times \sum_j \frac{\left(\sum_i V_{OCi} \right)_j}{\left(R_{Sj} + \frac{1}{G_{Pj}^O} \right)} \quad (2.35)$$

Resistência série:

$$R_{S(M)} = \frac{1}{\sum_j \left(\frac{I_{SCj}}{\left(\sum_i R_{Si} \right)_j I_{SCj} + m_j V_t} \right)} - \frac{V_t}{\sum_j \frac{I_{SCj}}{m_j}} \quad (2.36)$$

Condutância paralela (inverso da resistência paralela)

$$G_{P(M)} = \sum_j \left(\frac{1}{\sum_i \frac{1}{G_{Pi}}} \right)_j \quad (2.37)$$

Fator de idealidade:

$$m_M = \frac{\sum_j I_{SCj}}{\sum_j \frac{I_{SCj}}{\left(\left(\sum_i \left(\frac{1}{I_{SCi}} \right)^K \right)^{-\frac{1}{K}} \times \sum_i \frac{m_i}{I_{SCi}} \right)_j}} \quad (2.38)$$

3 *Caracterização*

Aos Virgens, para aproveitarem o Tempo

*“Colham botões de rosas enquanto podem,
o velho Tempo continua voando:
E essa mesma flor que hoje lhes sorri,
Amanhã estará expirando.*

*O glorioso sol, lume do céu,
Quanto mais alto eleva-se a brilhar,
Mais cedo encerrará sua jornada,
E mais perto estará de se apagar.*

*Melhor idade não há que a primeira,
Quando a juventude e o sangue pulsam quentes;
Mas quando passa, piores são os tempos
Que se sucedem e se arrastam inclementes.*

*Por isso, sem recato, usem o tempo,
E enquanto podem, vivam a festejar,
Pois depois de haver perdido os áureos anos,
Terão o tempo inteiro para repousar.”*

Robert Herrick (1648)

3.1 Metodologia de testes experimentais

Para a caracterização de uma célula fotovoltaica e extração de seus parâmetros, necessitamos de seguir os seguintes passos:

1. Definição das condições de análise da célula (irradiância, temperatura, etc) e adequação ao melhor método de obtenção da curva I-V;
2. Levantamento da curva I-V da célula através da obtenção de um conjunto de pares de valores tensão-corrente;
3. Modelagem analítica da célula utilizando os conjuntos de valores obtidos para o levantamento da curva I-V;
4. Extração dos parâmetros através das equações ajustadas obtidas na modelagem analítica da célula.

3.2 Obtenção da curva I-V de uma célula

Para obtermos a curva I-V característica de uma célula fotovoltaica, precisamos obter valores de tensão e corrente para diferentes cargas resistivas ligadas em seus terminais. Cada par dessas grandezas corresponde a um ponto na curva I-V pretendida. Para obtê-los, podemos empregar diversas estratégias:

- Levantamento manual: Variando manualmente a carga dos terminais da célula – Esse é um método muito simples e fácil de ser executado, mas traz como desvantagem o pequeno conjunto de pontos a serem obtidos. Para conjuntos maiores, torna-se impraticável, devido ao tempo necessário para sua execução.
- Utilização um circuito simulador de resistência variável: A célula (ou o painel) é conectada a um circuito eletrônico que funciona como carga variável, e utilizando um aparelho de medida com aquisição de dados (como um osciloscópio com interface de dados) podemos obter um conjunto massivo de pontos. Tem como desvantagens o mau funcionamento em altas potências (as correntes elétricas geradas pela células em altas irradiâncias podem ser intensas, podendo danificar o circuito utilizado) além da baixa confiabilidade do circuito em casos extremos (devido a imperfeições dos componentes eletrônicos do circuito). O exemplo de circuito abaixo realiza essa tarefa: a corrente drenada da célula

fotovoltaica é dependente da corrente de entrada na base do primeiro estágio, que por sua vez é alimentado por uma onda de tensão triangular positiva (ou uma rampa de tensão positiva) de baixa frequência (da ordem de unidades de Hz ; deve ser utilizada uma baixa frequência devido à lenta resposta da célula). Essa entrada causa uma variação gradual na corrente que atravessa a resistência R_5 , funcionando assim como uma carga resistiva que varia no tempo.

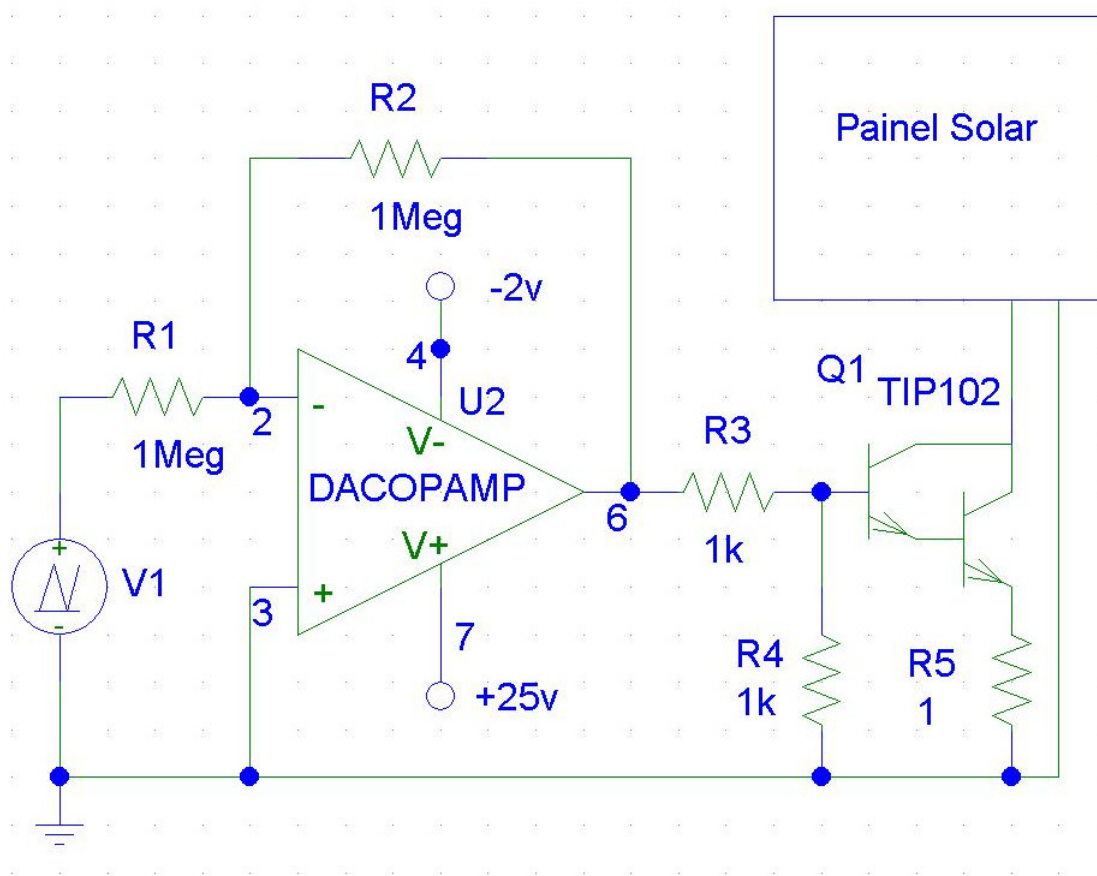


Figura 3.1: Exemplo de circuito simulador de resistência variável (Orcad® Schematics)

- Utilização de equipamento especializado: Existem no mercado equipamentos dedicados à caracterização de dispositivos semicondutores, como SCS (*semiconductor characterization system* ou sistema de caracterização de semicondutores) e SMU (*Source-Meter Unit*). Embora sejam a melhor alternativa para obtenção da curva I-V de uma célula, possuem como desvantagem seu alto custo.



Figura 3.2: SCS 4200 e SMU 2450, da Keithley®, e B1505A da Agilent®

Fonte: [33–35]

O melhor método a ser empregado dependerá das circunstâncias. A melhor alternativa no ponto de vista técnico e funcional é a utilização dos equipamentos especializados para o levantamento dessa curva, pois esses garantem praticidade, velocidade e precisão na medição. Contudo, seu custo pode ser proibitivo em baixos orçamentos. Nesse caso, a melhor alternativa seria a utilização do circuito simulador, que confere uma confiabilidade menor, mas se mostra muito superior à alternativa manual (desde que se conheça seus limites de aplicação).

3.3 Modelagem analítica

Ao se obter a curva I-V de uma célula, ajustaremos um modelo analítico aos conjuntos de pontos obtidos. Utilizando um software de ajuste de curvas (como o Origin® ou o Matlab®), aplicamos o modelo desejado a esses pontos (pode ser o modelo ideal, modelo de duas exponenciais, ou outro qualquer). Os coeficientes da equação ajustada obtidos pelos programas podem ser utilizados para obter os parâmetros (indicados no item 2.4) da célula testada.

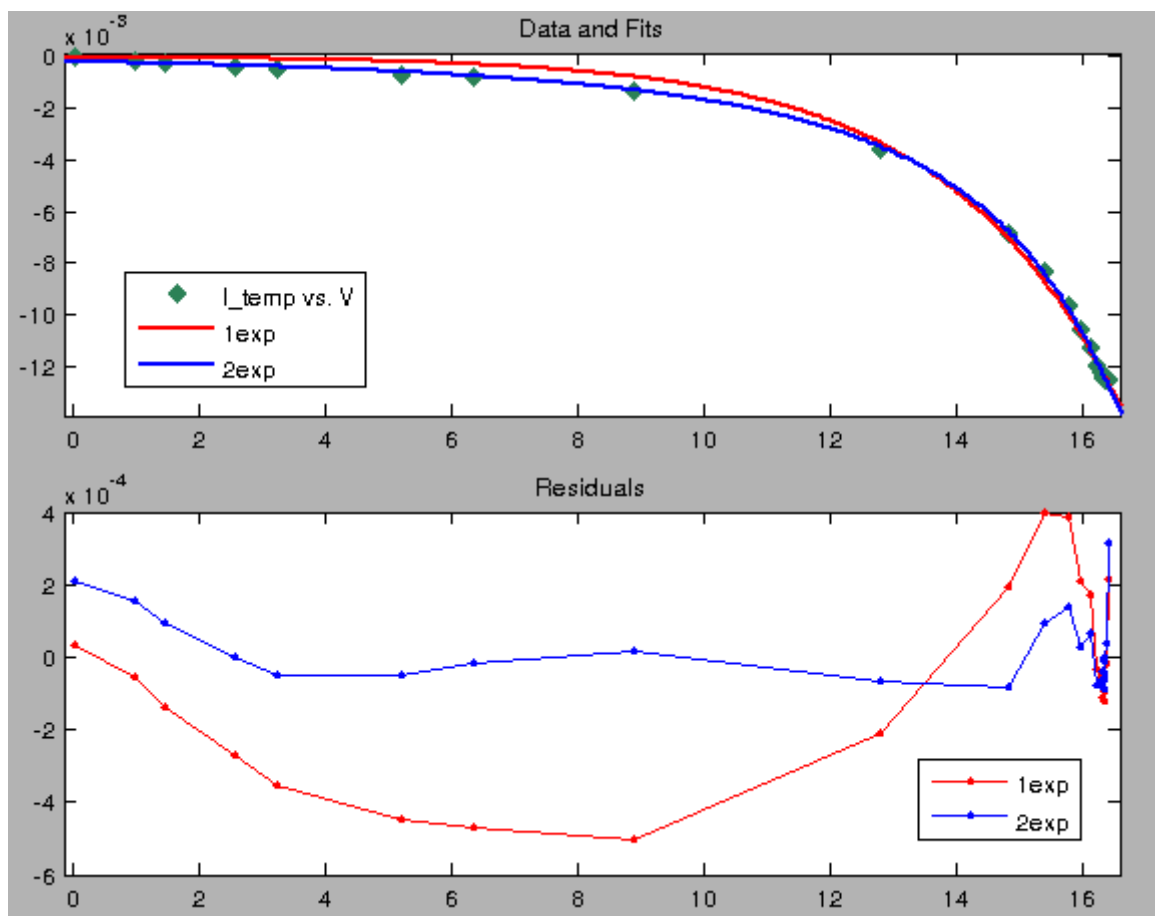


Figura 3.3: Exemplo de ajuste de curvas (uma e duas exponenciais) utilizando Matlab®

Na imagem acima, observamos um exemplo de ajuste dos conjuntos de pontos (obtidos pelo levantamento manual, por isso o número baixo de pontos) na ferramenta *Curve Fitting Tool* do software Matlab®. No gráfico superior observamos os pontos (círculos preenchidos), a curva ajustada pelo modelo de uma exponencial (em vermelho, apresentado na legenda com o nome 1exp) e a curva ajustada pelo modelo de duas exponenciais (em azul, apresentado na legenda com o nome 2exp). No gráfico inferior, observamos as diferenças entre os pontos e as curvas ajustadas - observe que o modelo de duas exponenciais apresenta um resíduo menor para todos os pontos analisados - daí a sua frequente escolha para uma melhor modelagem de uma célula fotovoltaica.

3.4 Extração de parâmetros da célula

De posse da curva I-V e dos coeficientes da equação ajustada, podemos obter os parâmetros de uma célula. As grandezas exibidas nessa seção foram discutidas na seção 2.2 (Curva I-V de uma célula solar) e 2.4 (Parâmetros de uma célula).

Como exemplo, descreveremos o ajuste com duas exponenciais:

$$I = A + B(e^{CV} - 1) + D(e^{EV} - 1) \quad (3.1)$$

Onde o coeficiente A é I_{ph} , B é $-I_{01}$, C é q/m_1kT , D é $-I_{02}$ e E é q/m_2kT .

Para extração das resistências séries e paralelo, podemos utilizar diversos métodos. A resistência série tem relação com a inclinação da curva I-V depois do ponto de máxima potência (altos valores de tensão) - quanto maior a inclinação, menor o seu valor (e por consequência, uma célula de melhor qualidade); já a resistência paralela associa-se com a inclinação antes do ponto de máxima potência (baixos valores de tensão, inclusive negativos – polarização reversa) - para esse parâmetro, quanto menor a inclinação, maior é o seu valor (quanto mais alto seu valor, maior a qualidade da célula).

Algumas maneiras de se calcular a resistência série:

- **Método da inclinação:** Calculando a inclinação da região de tensões acima do ponto de máxima potência ($\Delta I/\Delta V$): esse método nos dá uma aproximação do valor médio da resistência série, pois leva em conta a variação linear entre dois pontos da curva. Sua grande vantagem é sua simplicidade de cálculo, mas deve ser usado com atenção, principalmente no momento de se escolher os pontos da curva - é muito indicado para estimativas preliminares;
- **Método da derivada:** Derivando a equação ajustada obtida e calculando o seu valor em algum ponto após a máxima potência (de preferência em algum ponto próximo da tensão de circuito aberto da curva, que possui um comportamento mais linear): esse método é um pouco mais preciso que o método da inclinação anteriormente citado, mas é um pouco mais complicado de ser utilizado, pois pode requerer auxílio computacional para ser realizado;
- **Método de Luque:** Utilizando o método descrito em [4], que consiste em linearizar o modelo de duas exponenciais e resistências (equação 2.16). Essa expressão é reduzida a uma exponencial com um fator de idealidade misto (exibido como a variável A_0), que fica entre os valores de n_1 e n_2 . Avaliando essa expressão nas condições de curto-circuito e circuito aberto teremos:

$$I_{SC} = I_{ph} - I_0(e^{qI_{SC}R_S/A_0kT} - 1) - I_{SC}R_S/R_P \quad (3.2)$$

$$0 = I_{ph} - I_0(e^{qV_{OC}/A_0kT} - 1) - V_{OC}/R_P \quad (3.3)$$

Utilizando a equação 3.3 e traçando $\log(I_{ph})$ versus V_{OC} (I_{ph} e V_{OC} podem ser obtidos através de várias medidas com diferentes irradiâncias), em um regime onde as resistências não são importantes (e são, portanto, desprezadas, ou seja, $R_S = 0$ e $R_P \rightarrow \infty$), obteremos uma reta, da qual é possível obter A_0 (sua inclinação) e I_0 (ponto onde a reta intercepta o eixo y). Essa reta está demonstrada na figura 3.4 (reta pontilhada). Em um regime onde somente a resistência série é importante, podemos combinar as equações 3.2 e 3.3 e obter:

$$I_{SC}R_S = \frac{A_0kT}{q} \ln\left[\frac{I_0e^{qV_{OC}/A_0kT} - I_{SC}}{I_0}\right] \quad (3.4)$$

Traçando I_{SC} versus $\log(I_0e^{qV_{OC}/A_0kT})$ obteremos uma reta. De sua inclinação, podemos obter R_S . Esse método é bem mais dispendioso que os outros, mas confere valores mais precisos.

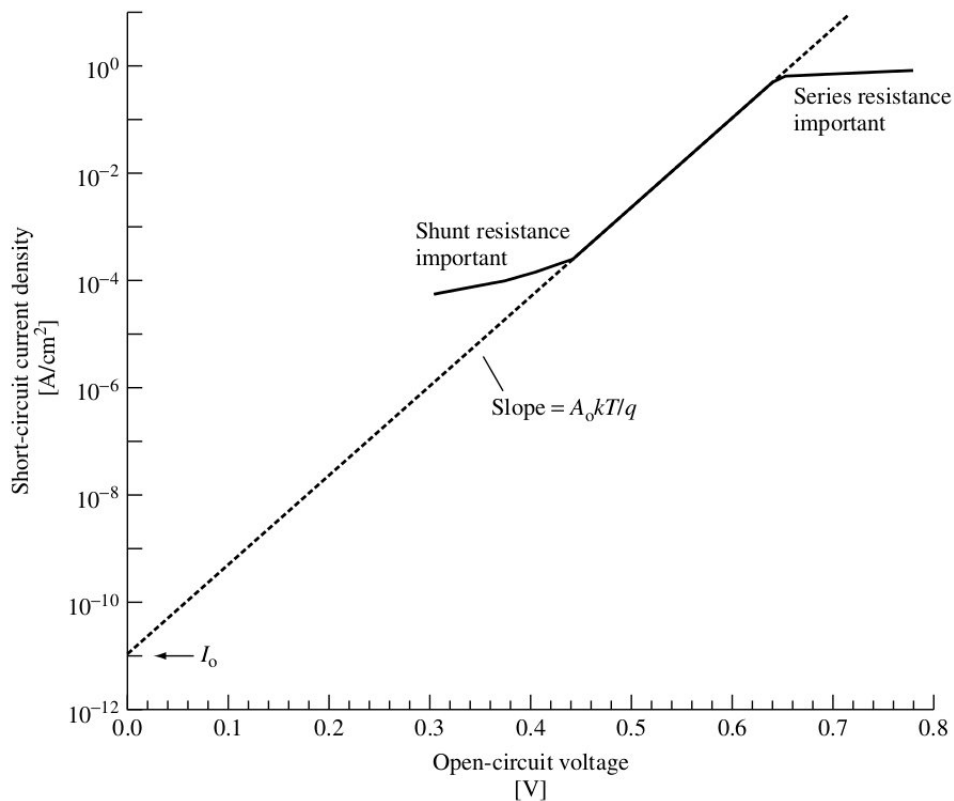


Figura 3.4: Reta obtida da linearização

Fonte: [4]

Já a resistência paralela pode ser calculada:

- Método da inclinação: Calculando a inclinação da região de tensões abaixo do ponto de máxima potência ($\Delta I/\Delta V$): assim como no cálculo da resistência série, podemos utilizar uma linearização local para obtermos a resistência paralela, podendo inclusive utilizar a região de polarização negativa da célula. Como no caso anterior, esse é um método preliminar, não conferindo grande precisão;
- Método da derivada: Derivando a equação ajustada obtida e calculando o seu valor em algum ponto próximo de $V=0$: assim como no caso anterior, a utilização da derivada da expressão da curva pode conferir algum ganho de precisão;
- Método de Luque: Utilizando o método de linearização descrito em [4]: Para o cálculo de R_P , combinaremos mais uma vez as equações 3.2 e 3.3, obtendo:

$$\frac{V_{OC}}{R_P} = I_{SC} - I_0 e^{qV_{OC}/A_0 kT} \quad (3.5)$$

R_P pode ser determinado da inclinação da porção linear do gráfico V_{OC} versus $\log(I_{SC} - I_0 e^{qV_{OC}/A_0 kT})$, e extraído R_P da inclinação dessa reta. Como já foi dito, esse é um método complicado, mas confere maior precisão.

Utilizando o modelo não-ideal apresentado na equação 2.16 podemos calcular as duas resistências simultaneamente, através da avaliação dessa equação utilizando algum *software* para tal. Entretanto, por ser uma equação transcendental, esse método exige maior esforço computacional e apresenta incertezas maiores.

Utilizando a curva I-V para se encontrar o ponto de máxima potência da célula, podemos calcular também o seu fator de preenchimento.

3.5 Comparação entre células e análise de desempenho

Para realizarmos a comparação entre diferentes células fotovoltaicas, precisamos inicialmente definir uma condição padrão de funcionamento. O padrão mais utilizado é o STC, que define os valores padrão de irradiância, temperatura e *air mass* (AM). Definida essa condição, podemos levantar as curvas I-V de cada célula e extrair seus parâmetros.

Como critérios de comparação podemos utilizar a potência máxima gerada (comparação entre os pontos de máxima potência de cada célula), efeitos das resistências série e paralelo

(que determinam as perdas de energia na célula - diretamente ligadas com o fator de preenchimento) e sua eficiência de conversão. Com esses resultados poderemos analisar diversos fatores práticos de sistemas fotovoltaicos: qual seria a melhor célula para uma determinada aplicação, verificação de uma determinada célula em um painel (uma célula pode ter um ótimo desempenho funcionando sozinha, mas pode não ser adequada para arranjos de painéis), contrapor dados obtidos do fabricante (que muitas vezes apresenta seus dados fora de uma situação padrão) além de sua análise em condições ambientais específicas.

Recordando que nosso objetivo é estabelecer uma metodologia de análise de desempenho de células fotovoltaicas e não um critério de escolha, ainda que desconsiderando fatores importantes, como custo, degradação, saturação, dentre outros. De posse do conjunto de pontos da curva I-V obtidos na caracterização, levantamos um modelo analítico da célula, e a partir desse, poderemos levantar um modelo numérico para utilização em simulações (capítulo 4). Após essa etapa, poderemos discutir o quão confiável é o modelo obtido para uma célula real.

3.6 Caso de exemplo: Caracterização

Para validar nossa metodologia de caracterização, iremos aplicá-la em uma célula. Os dados da célula e a curva I-V utilizados foram obtidos a partir de [4], que apresenta a curva I-V e os seguintes dados (utilizando o STC como condição padrão de análise):

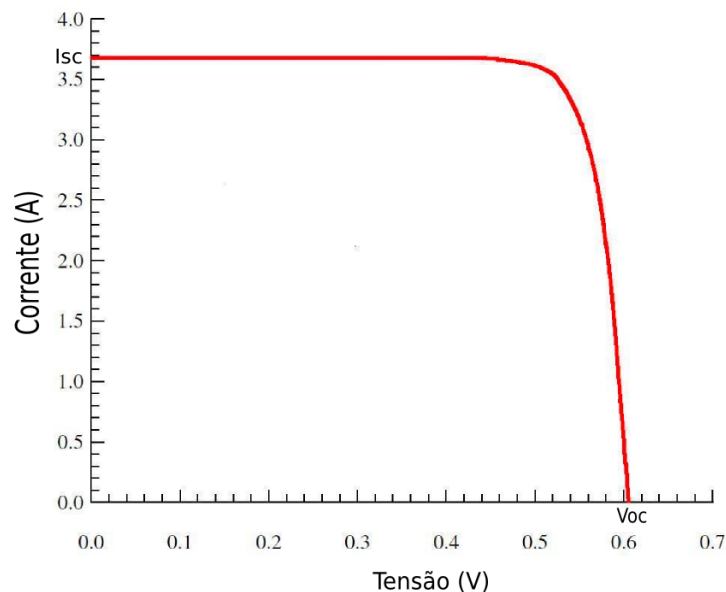


Figura 3.5: Curva I-V da célula de exemplo

Fonte: [4]

Tabela 3.1: Dados da célula solar de exemplo

Grandeza	Valor
Área	$100,0 \pm 0,5 \text{cm}^2$
I_{SC}	$3,670 \pm 0,005 \text{A}$
V_{OC}	$0,6040 \pm 0,0005 \text{V}$
I_{MP}	$3,500 \pm 0,005 \text{A}$
V_{MP}	$0,5250 \pm 0,0005 \text{V}$
P_{MAX}	$1,840 \pm 0,005 \text{W}$

Podemos encontrar células similares no mercado, de fabricação chinesa; essas células são denominadas células de 1,8W, e possuem as seguintes características (dados do vendedor):

Tabela 3.2: Dados da célula solar real

Grandeza	Valor
Tipo	Silício policristalino
<i>Fill Factor</i>	Grade A (maior que 0,7)
Área	$122 \text{cm}^2 (156 \text{mm} \times 78 \text{mm})$
Espessura	$0,2 \text{mm}$
Peso	6 gramas
I_{MP}	$3,60 \text{A}$
V_{MP}	$0,50 \text{V}$
P_{MAX}	$1,8 \text{W}$

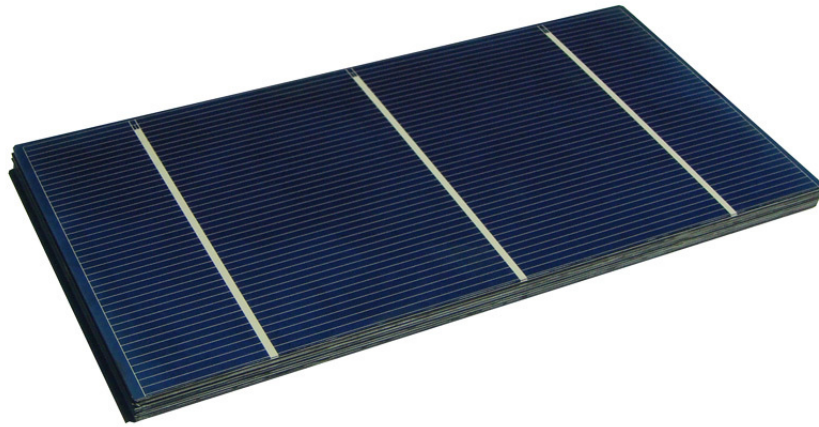


Figura 3.6: Célula de silício policristalino de 1,8W

Fonte: [36]

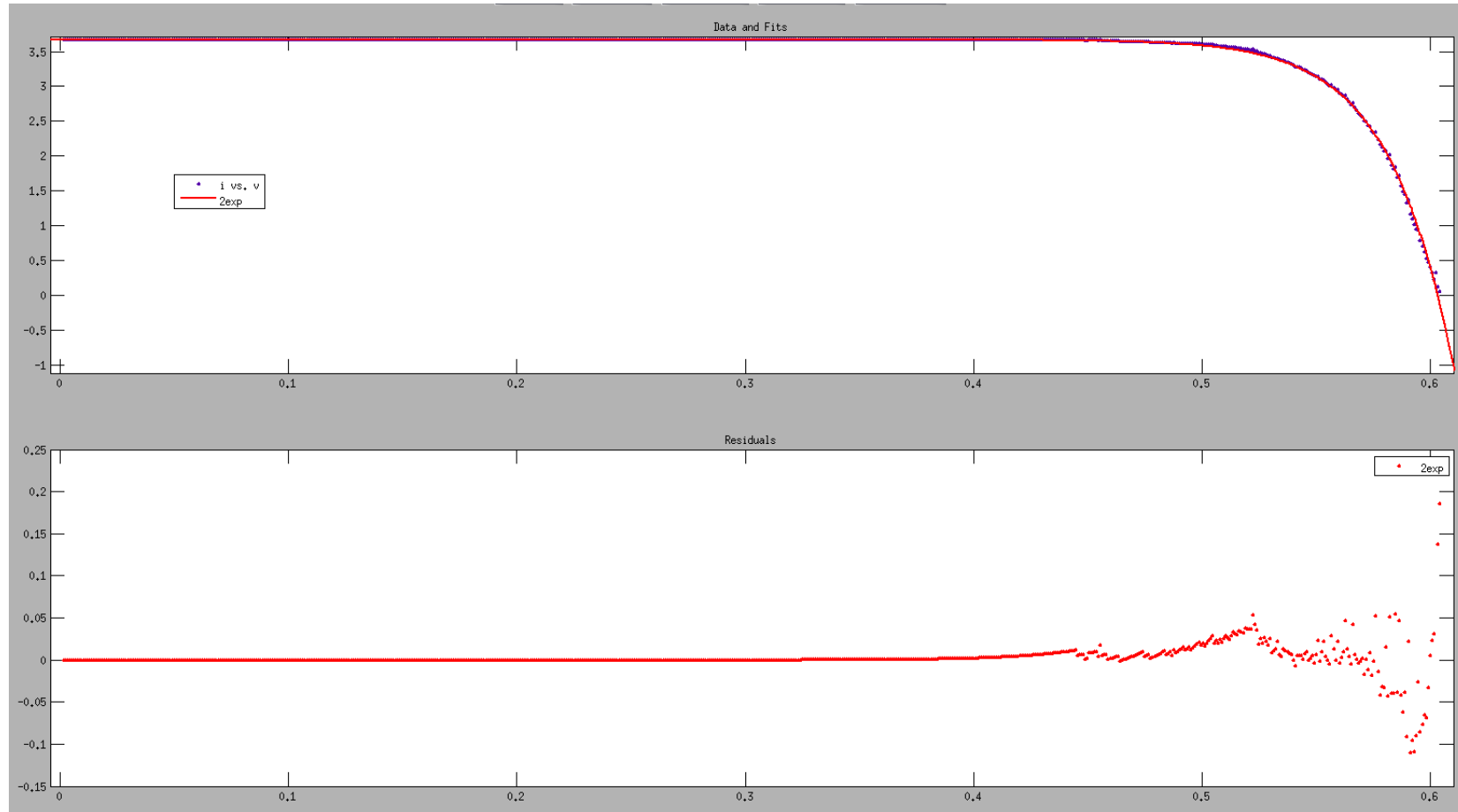
3.6.1 Caracterização e obtenção do modelo analítico

A partir da curva I-V apresentada, criamos o conjunto de pontos a partir do gráfico (utilizamos o programa McLabEn® da CMSOft), que foi inserido no Matlab® para o desenvolvimento do modelo analítico. Para o ajuste do modelo aos pontos, utilizamos a ferramenta *cftool*.

Para essa modelagem foi utilizado o modelo de duas exponenciais (equação 2.15), através da relação:

$$I = 3,67 - A \cdot (e^{B \cdot V} - 1) - C \cdot (e^{D \cdot V} - 1) \quad (3.6)$$

O conjunto de pontos utilizados aparece no gráfico superior da figura 3.7 em azul, e o ajuste aparece em vermelho. O gráfico inferior apresenta o resíduo. A variável independente foi fixada com o valor de I_{SC} , para diminuir os graus de liberdade. Além disso, realizamos um ajuste fino nas configurações do algoritmo, aumentando o número máximo de iterações para 1000, reduzimos a tolerância mínima de convergência para 1×10^{-15} e ajustamos uma região de busca para as constantes B e D. Todas essas ações foram realizadas para facilitar o processo de ajuste.

Figura 3.7: Modelagem obtida no *cftool* do Matlab®

Após o ajuste, obtivemos os valores das constantes (Intervalo de confiança de 95%):

Tabela 3.3: Constantes obtidas no ajuste do modelo analítico

Constante	Valor	Intervalo de confiança	Grandeza equivalente
A	$1,044 \times 10^{-9}A$	$(7,663 \times 10^{-10} \text{ a } 1,321 \times 10^{-09})A$	I_{01}
B	$36,45V^{-1}$	$(36 \text{ a } 36,9)V^{-1}$	$\frac{q}{m_1kT}$
C	$3,251 \times 10^{-8}A$	$(-1,083 \times 10^{-05} \text{ a } 1,089 \times 10^{-05})A$	I_{02}
D	$20 \pm 0,005V^{-1}$	$(-727,7 - 767,7)V^{-1}$	$\frac{q}{m_2kT}$

Tabela 3.4: Dados da qualidade do ajuste

Teste	Valor	Obs.
Soma dos quadrados dos resíduos (SSE)	0,785	Quanto menor, melhor
Coefficiente de determinação (<i>R-square</i>)	0,9965	Quanto mais próximo de 1, melhor
R^2 ajustado (<i>Adjusted R-square</i>)	0,9964	Quanto mais próximo de 1, melhor
RMSE (Raiz média quadrática do erro)	0,03323	Quanto menor, melhor

Observando as constantes obtidas, podemos verificar que os valores de C e D não são confiáveis, pois seu intervalo de confiança é muito grande. Isso se dá devido a falta de precisão das medidas de corrente obtidas da curva original, que ofuscam as contribuições do fenômeno de deriva (predominante em baixas tensões). Portanto, somente a difusão pôde ser modelada corretamente.

Entretanto, não iremos focar na análise dos resultados, pois não é o objetivo do trabalho. Com dados mais precisos, poderemos modelar toda a extensão da curva corretamente, e verificar qual processo de condução é predominante (que é dependente do produto entre a corrente de saturação reversa de cada fenômeno e sua exponencial - essa que carrega o seu respectivo fator de idealidade).

Mesmo com esse problema nos dados, continuaremos a seguir com o nosso caso de exemplo.

3.6.2 Extração de parâmetros

Através modelo ajustado e da curva I-V gerada por ele podemos extrair os parâmetros importantes da célula. Os valores de I_{01} e I_{02} já saem diretamente. m_1 , m_2 , exigem alguma manipulação simples. O *Fill factor* e a eficiência de conversão podem ser calculados. As resistências série e paralela podem ser calculadas pelos métodos descritos na seção 3.4. Nesse exemplo, iremos calculá-las de duas maneiras: utilizando o método da inclinação e o método da derivada (o método de Luque não poderá ser utilizado, pois ele exige diversas medidas com diversas irradiâncias diferentes – não sendo aplicável nesse caso).

Tabela 3.5: Parâmetros obtidos e calculados

Grandeza	Valor
I_{01}	$1,0 \pm 0,3 \times 10^{-9}A$
I_{02}	$3,3 \pm 0,05 \times 10^{-8}A$
m_1	$1,1 \pm 0,5$
m_2	$1,90 \pm 0,05$
V_{OC}	$0,6030 \pm 0,0005V$
I_{SC}	$3,670 \pm 0,005A$
V_{MP}	$0,5210 \pm 0,0005V$
I_{MP}	$3,485 \pm 0,005A$
P_{MAX}	$1,816 \pm 0,004W$
<i>Fill Factor</i>	$0,820 \pm 0,004$ (Grade A)
η	$18,160 \pm 0,002\%$
R_S (Calculado pelo método da inclinação)	$0,0204 \pm 0,0004\Omega$
R_S (Calculado pelo método da derivada)	$0,0076 \pm 0,0004\Omega$
R_P (Calculado pelo método da inclinação)	$\rightarrow \infty$
R_P (Calculado pelo método da derivada)	$26,4000 \pm 0,0004M\Omega$

Como já foi discutido, o método da derivada é mais preciso que o método da inclinação, nos fornecendo valores de resistência mais confiáveis. No próximo capítulo, utilizaremos esses parâmetros em um exemplo de simulação.

4 *Simulação*

*“Num bosque amarelo dois caminhos se separavam,
E lamentando não poder seguir os dois
E sendo apenas um viajante, fiquei muito tempo parado
E olhei pra um deles tão distante quanto pude
Até que se perdia na mata;*

*Então segui o outro, como sendo mais merecedor.
E vendo talvez melhor direito.
Porque coberto de mato e querendo uso
Embora os que passaram por lá
Os tenham percorrido de igual forma,
E ambos ficaram essa manhã
Com folhas que passo nenhum pisou.*

*Oh, guardei o primeiro para outro dia!
Embora sabendo como um caminho leva pra longe,
Duvidasse que algum dia voltasse novamente.*

*Direi isso suspirando
Em algum lugar, daqui a muito e muito tempo:
Dois caminhos se separaram em um bosque e eu...*

*Eu escolhi o menos percorrido
E isso fez toda a diferença.”*

Robert Frost (1916)

4.1 Metodologia de Simulação

Para a construção de um modelo numérico em SPICE, seguiremos os seguintes passos:

1. Definição das condições padrão da simulação preliminar (irradiância, temperatura, etc) para escolha do ponto específico de operação da célula;
2. Escolha do modelo a ser utilizado na simulação (uma exponencial, duas exponenciais, etc) e construção do circuito elétrico equivalente no SPICE;
3. Levantamento da curva I-V da célula simulada;
4. Comparação da curva obtida na simulação com a curva da caracterização e sua validação;
5. Reconstrução do modelo SPICE para obtenção de uma maior precisão e alcance;
6. Utilização do novo modelo em condições alternativas

Os itens 5 e 6 são opcionais, sendo importantes na previsão de funcionamento das células em condições diferentes da padrão.

4.2 Modelagem da célula em SPICE utilizando os parâmetros extraídos

Após a etapa de caracterização de uma célula fotovoltaica (capítulo 3), podemos utilizar os parâmetros extraídos para construir um modelo de circuito SPICE dessa célula. A primeira vista, vamos utilizar o circuito da figura 2.18 - modelo de duas exponenciais mais as resistências parasitas. Esse circuito é uma versão simplificada de uma célula, assumindo uma fonte de corrente constante como corrente fotogerada (posteriormente vamos discutir a modelagem desse componente) e diodos ideais que representarão o comportamento exponencial da corrente. Esses diodos serão editados para a alteração dos parâmetros I_{01} , I_{02} , m_1 e m_2 em seus modelos. As resistências série e paralela também serão inseridas com os valores obtidos na etapa anterior. Essa simulação preliminar representará o funcionamento da célula em uma condição específica; daí a necessidade de utilizar o STC (ou outra condição padrão) como referência de operação.

4.3 Obtenção da curva I-V em ambiente simulado

Para obtenção da curva I-V, utilizaremos a simulação paramétrica, na forma de uma carga resistiva variável conectada nos terminais da célula. Escolheremos uma larga faixa de valores para essa resistência (os valores escolhidos devem percorrer toda a extensão da curva I-V, para uma maior precisão). Se essa condição não puder ser respeitada (limitações temporais e computacionais, por exemplo) deve-se ao menos privilegiar as regiões notáveis (região de máxima potência e extremos da curva) com uma densidade maior de pontos.

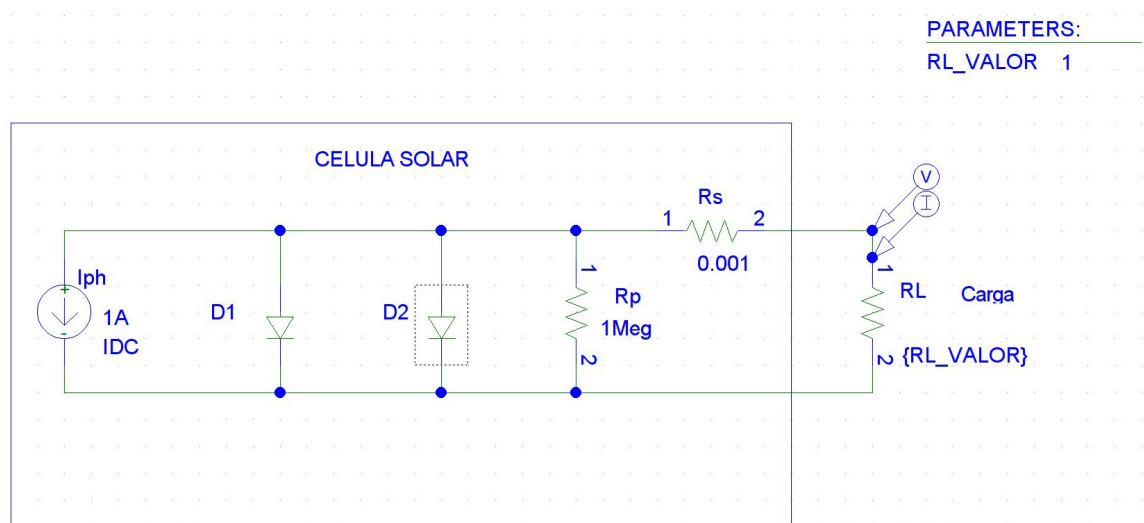


Figura 4.1: Diagrama esquemático de uma célula no SPICE (Orcad® PSPICE Schematics)

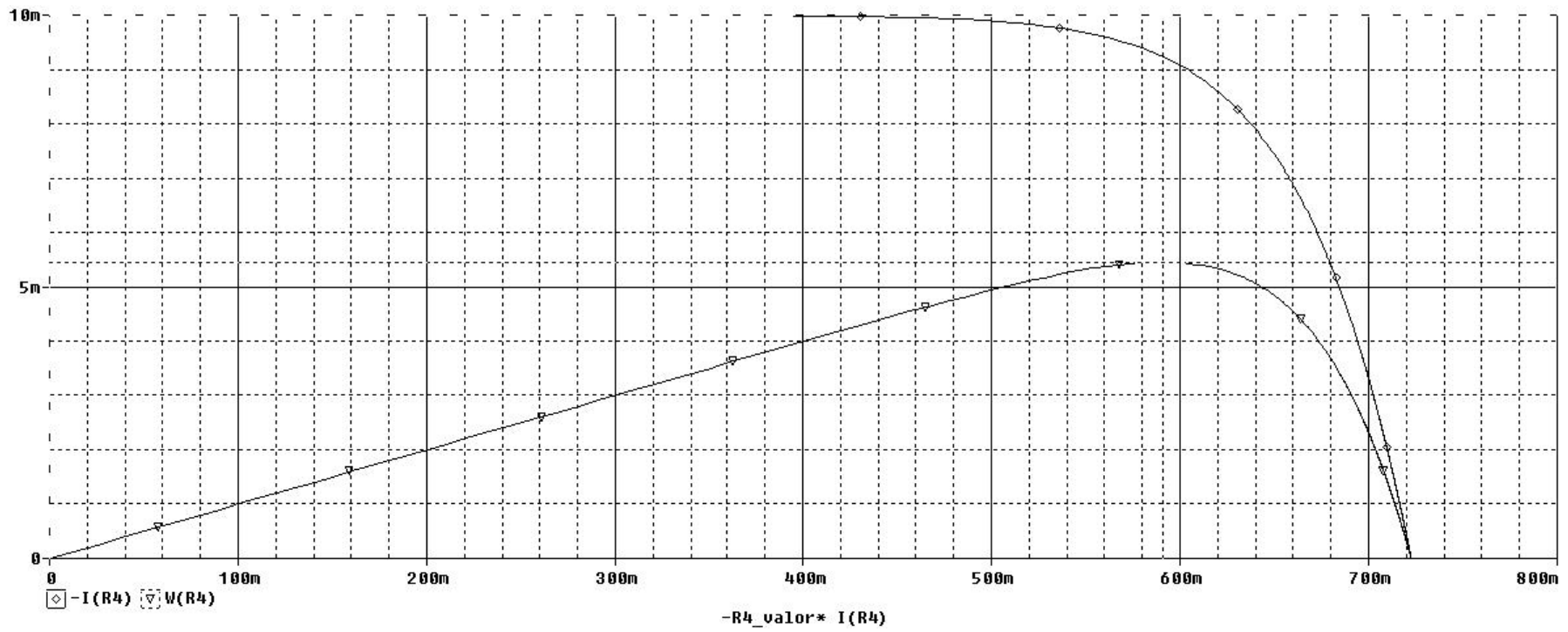


Figura 4.2: Curvas I-V (círculos) e P-V (triângulos) obtida no SPICE (Orcad® PSPICE A/D)

4.4 Comparação das curvas I-V experimental e simulada

Após a execução da simulação, devemos comparar a curva I-V resultante com a curva obtida na caracterização. Podemos utilizar o software Matlab® para tal análise. A comparação pode ser realizada várias formas:

- **Análise gráfica ou qualitativa:** Realizamos uma comparação entre as curvas traçando-as juntas e verificando suas diferenças graficamente; é uma metodologia de análise mais abrangente e menos precisa, mas importante para observarmos as diferenças de comportamento entre a célula real e a simulada. Com esse método, podemos identificar discrepâncias de modelagem, como por exemplo, diferenças consideráveis nas resistências parasitas; facilitando a busca por irregularidades nos modelos.
- **Comparação por resíduos (quantitativa):** Verificação das diferenças entre os valores dos pontos de cada curva, e análise do resíduo obtido. Esse método permite verificar quais trechos da curva I-V foram bem simulados, e com que grau de precisão. O número de pontos obtidos é importante nesse caso: se o conjunto de pontos de cada curva obtida for igual, essa metodologia será facilitada (bastando subtrair um conjunto do outro, e verificar o total). Para conjuntos assimétricos, técnicas de geração (interpolação) ou dizimação de dados devem ser utilizados.
- **Comparação de parâmetros globais:** figuras de mérito globais de ajuste como, por exemplo, desvio padrão, R^2 , covariância, correlação, área residual, entre outros, são úteis, porém não devem ser utilizadas isoladamente na avaliação da qualidade do ajuste de curvas I-V de células fotovoltaicas, pois mascaram aspectos locais importantes em regiões de grande interesse, como nas cercanias do ponto de máxima potência.

4.5 Caso de exemplo: Simulação

Essa seção apresenta a continuação da aplicação da metodologia no caso de exemplo apresentado na seção 3.6. A partir dos dados obtidos do modelo analítico, podemos construir um modelo numérico utilizando o SPICE.

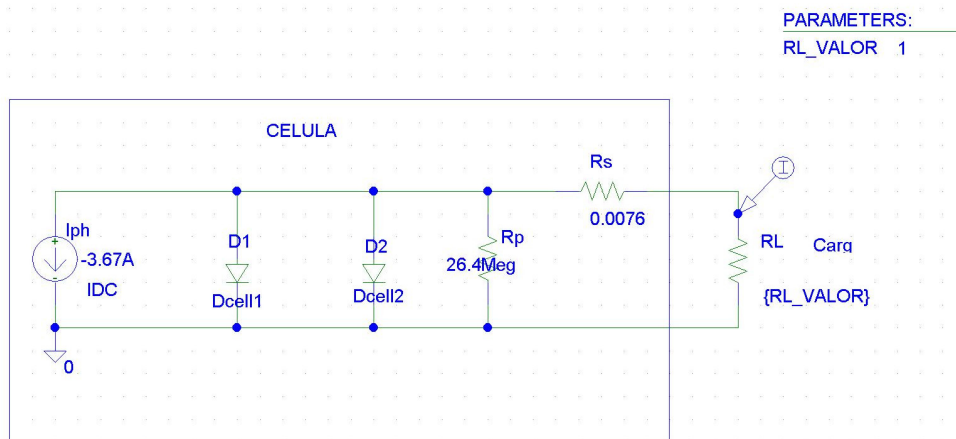


Figura 4.3: Circuito desenhado no SPICE (Orcad® PSPICE Schematics)

Os modelos de componentes do circuito desenhado foram ajustados com os dados obtidos na etapa anterior. A fonte de corrente carrega o valor de $I_{ph} \approx I_{SC}$, as resistências R_P e R_S com seus devidos valores e os diodos D1 e D2 (instâncias do modelo DCell1 e DCell2, respectivamente) com suas grandezas internas modificadas de acordo com os parâmetros extraídos. A resistência de carga R_L é um resistor variável (varia de $1 \times 10^{-12} \Omega$ a $1 M\Omega$) que nos permitirá levantar a curva I-V dessa simulação. Os valores encontrados foram:

Tabela 4.1: Parâmetros obtidos da simulação

Grandeza	Valor
V_{OC}	$0,6255 \pm 0,0005V$
I_{SC}	$3,67 \pm 0,005A$
V_{MP}	$0,5148 \pm 0,0005V$
I_{MP}	$3,480 \pm 0,005A$
P_{MAX}	$1,792 \pm 0,004W$
Fill Factor	$0,7800 \pm 0,004$ (Grade A)
η	$17,910 \pm 0,002\%$

Podemos comparar as duas curvas I-V obtidas (caracterização e simulação) de modo a verificar a validade dos modelos analítico e numérico:

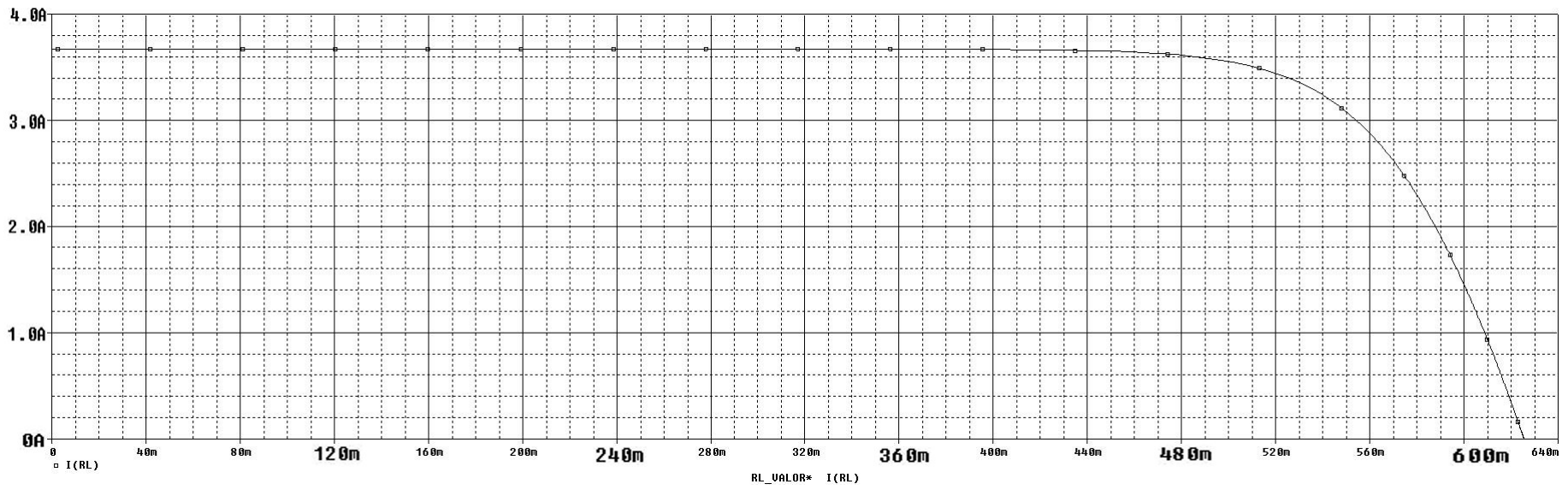


Figura 4.4: Curva I-V obtida no SPICE (Orcad® PSPICE A/D)

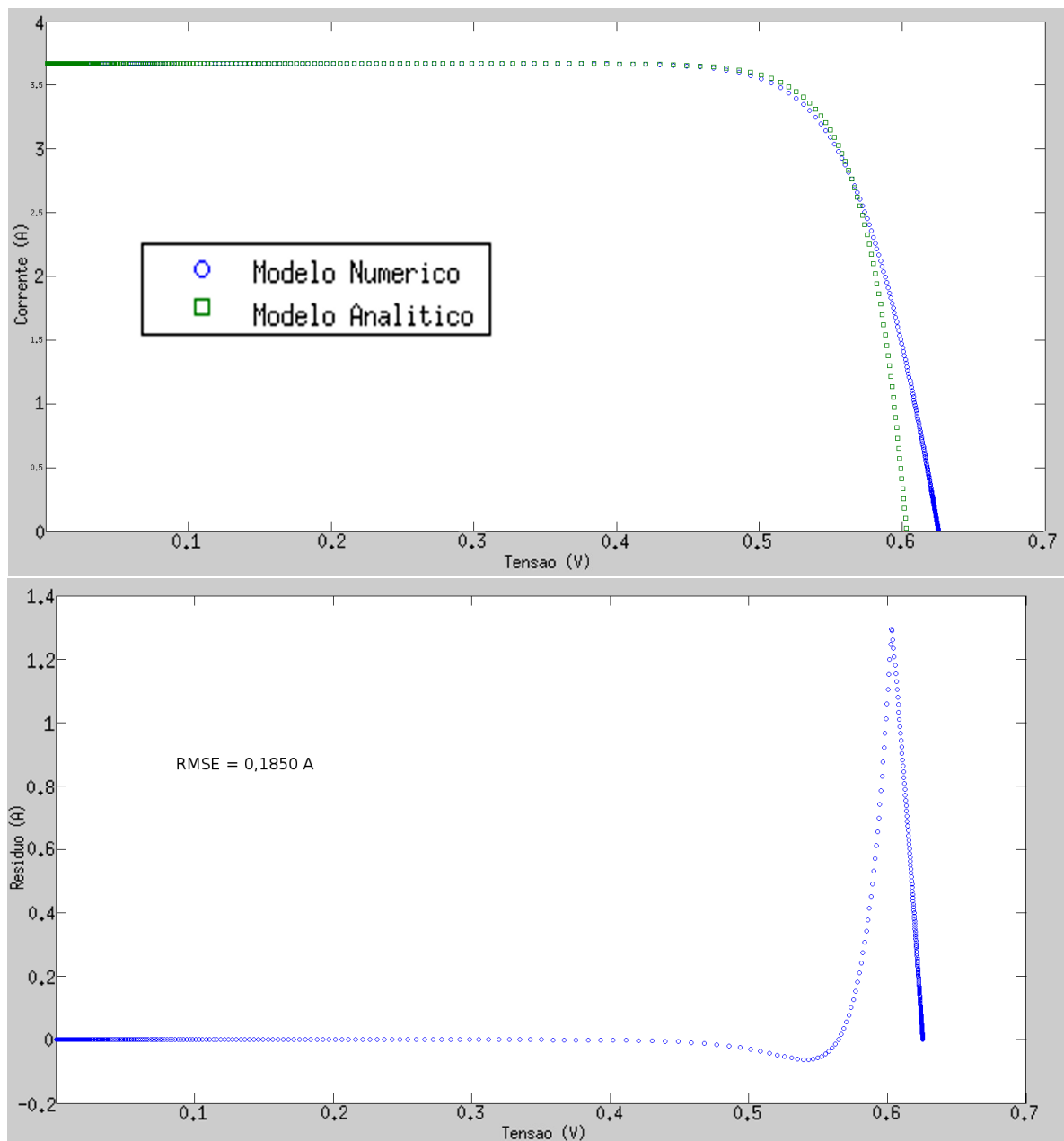


Figura 4.5: Comparação das curvas I-V obtidas (acima) e resíduos (abaixo)

A curva obtida no SPICE apresenta diferenças na região de máxima potência e na região próxima a tensão de circuito aberto. O RMSE entre os modelos também foi bem baixo, evidenciando a proximidade entre os dois.

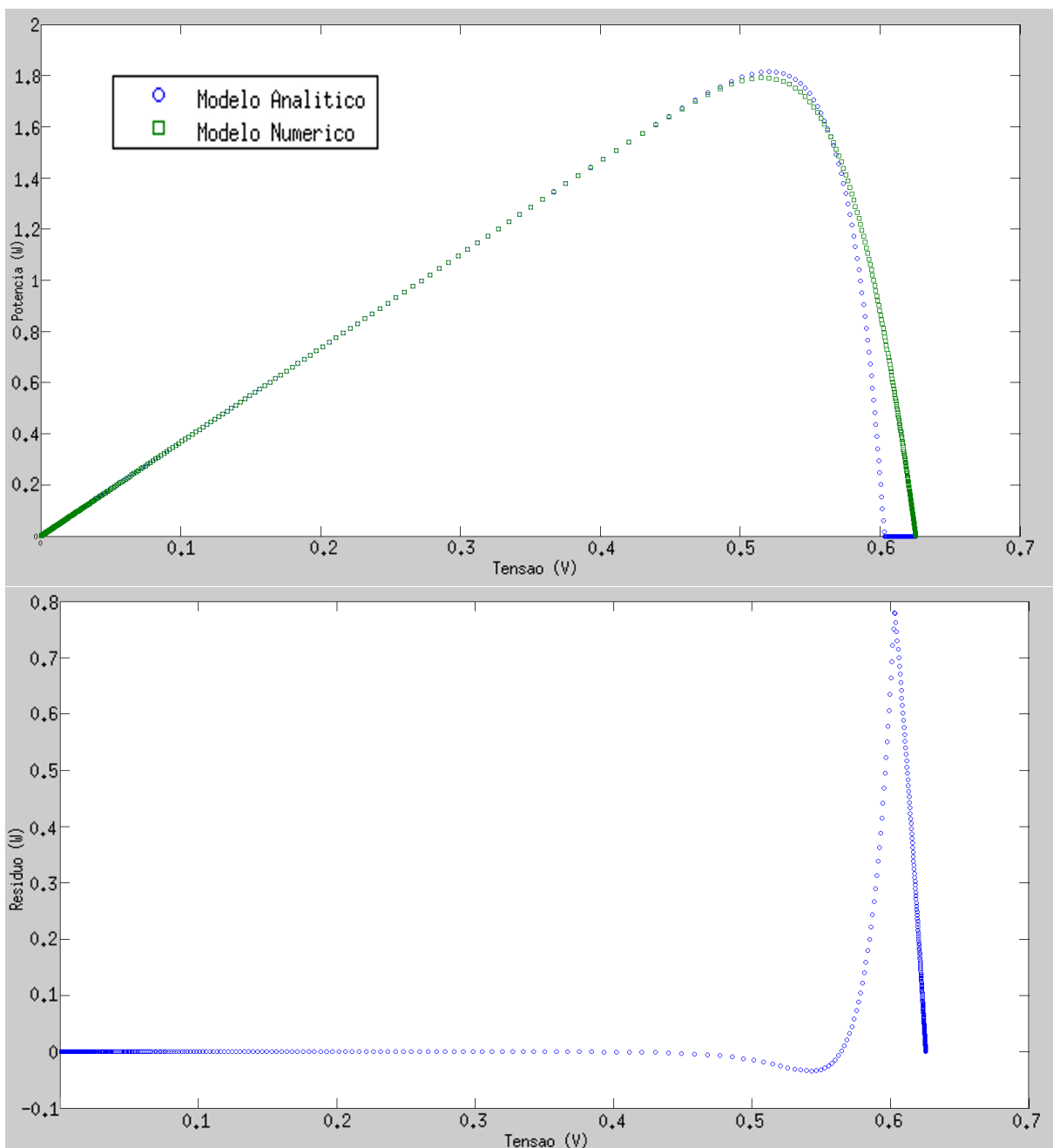


Figura 4.6: Comparação das curvas P-V obtidas (acima) e resíduos (abaixo)

Podemos observar um comportamento semelhante para as curvas P-V (já que a potência depende diretamente da corrente e tensão), também apresentando um RMSE pequeno.

Mesmo com essa discrepância, podemos observar que a diferença entre os modelos é muito pequena (cerca de 4%). Portanto, podemos considerar que a metodologia funciona satisfatoriamente.

4.6 Construção de um modelo de célula mais detalhado

Após verificarmos a validade do nosso modelo preliminar, passaremos ao seu desenvolvimento, para incrementar sua confiabilidade e alcance. Para tal, discutiremos os parâmetros que influenciam a corrente fotogerada, e como simulá-los. O principal ponto de discussão desse tópico é a modelagem da fonte de corrente (I_{ph}), e como podemos inseri-la no SPICE. Uma forma de realizar essa tarefa está descrita em [24]; contudo, iremos utilizar uma abordagem mais simples, utilizando valores médios de algumas grandezas para simplificar a implementação.

Para realizarmos essa tarefa, combinaremos as equações 2.4 e 2.5, obtendo a relação:

$$I_{ph} = \frac{qA(1-R) \cdot IQE \cdot \int_{\lambda} I_{\lambda} \cdot \lambda \cdot d\lambda}{hc} \quad (4.1)$$

Nesse equacionamento podemos calcular a corrente fotogerada a partir da irradiância espectral, área da célula, reflectância e eficiência quântica.

Essa equação pode ser implementada no SPICE, utilizando elementos de circuito para realizar sua avaliação. A figura 4.7 exhibe essa implementação:

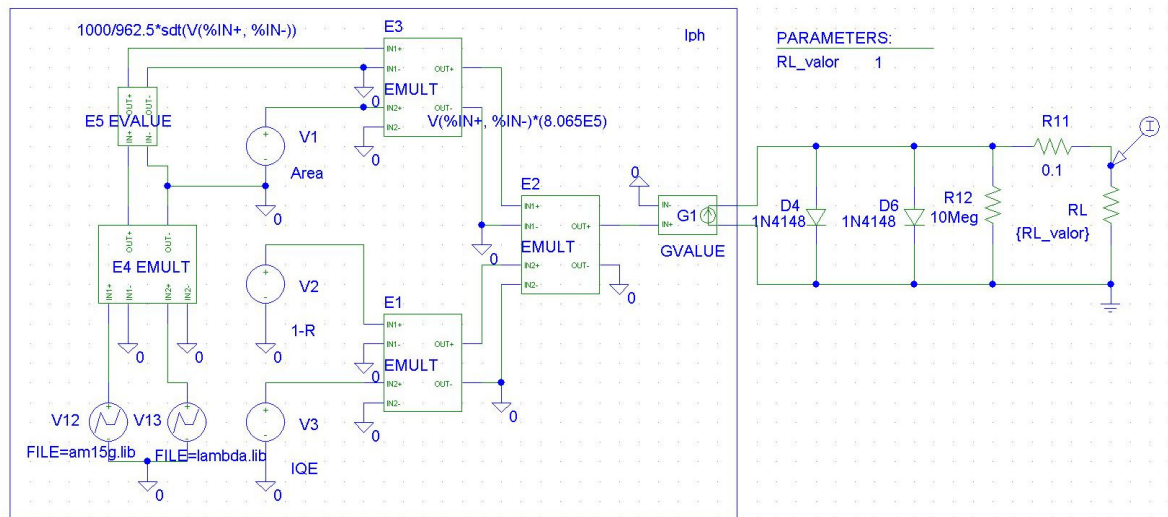


Figura 4.7: Diagrama esquemático de I_{ph} (Orcad® PSPICE Schematics)

A irradiância espectral é inserida como uma fonte de tensão PWL-File (indicado na figura 4.7 como a fonte V12), cuja forma de onda pode ser definida por um conjunto de pontos (inseridos através de um arquivo). Contudo, o SPICE não suporta a unidade da distribuição espectral ($[W/m^2 \cdot \mu m]$). Portanto, essa grandeza apresentará um gráfico equivalente de Tensão *versus* Tempo.

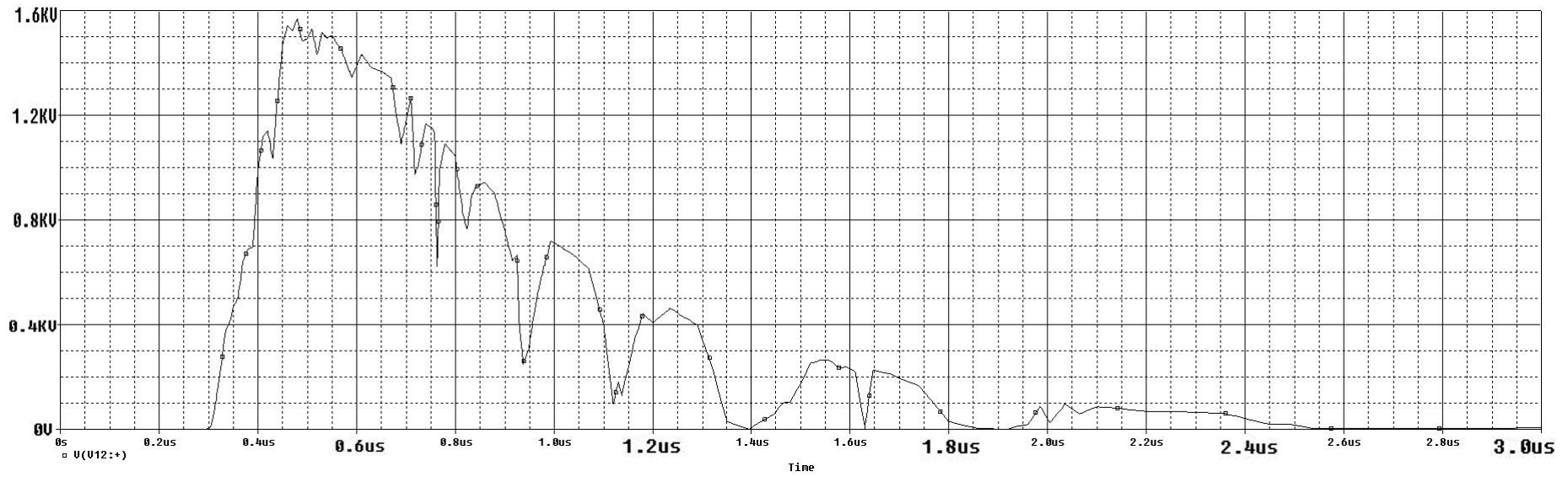


Figura 4.8: Gráfico do espectro AM1.5 (Orcad® PSPICE A/D)

A reflectância e a eficiência quântica dependem de λ , mas para essa modelagem, utilizaremos seus valores médios (utilizaremos $IQE = 0,6$ e $R = 0,4$, obtidos através das médias dos gráficos apresentados em [24]). Essas grandezas são modeladas no SPICE como fontes de tensão DC (essas grandezas são representadas na figura 4.7 pelas fontes V3 e V4). A área também foi implementada dessa forma (o valor utilizado para esse exemplo foi de 200cm^2 , e aparece na figura 4.7 representada pela fonte V1).

As etapas de multiplicação foram efetuadas pelo dispositivo EMULT (dispositivo cuja saída é o produto de suas entradas). A integral foi calculada utilizando o item EVALUE (dispositivo que implementa uma equação de acordo com sua entrada, sendo sua entrada e saída na forma de tensão). A função utilizada para integração é a $sdt()$. Ao integrarmos o espectro utilizado, a irradiância resultará em $962,5$ e não 1000 W/m^2 como esperávamos. Para contornar essa diferença, utilizamos uma etapa de normalização no dispositivo (apresentado na equação como uma constante multiplicativa).

Para o cálculo final da corrente I_{ph} , utilizamos o dispositivo GVALUE, que como o EVALUE, implementa uma equação, mas sua saída se dá na forma de corrente. A constante multiplicativa que aparece na equação do dispositivo se as constantes físicas que aparecem na equação 4.1 (q/hc). Nessas condições, a corrente fotogerada obtida na simulação desse circuito foi de aproximadamente $3,95\text{A}$.

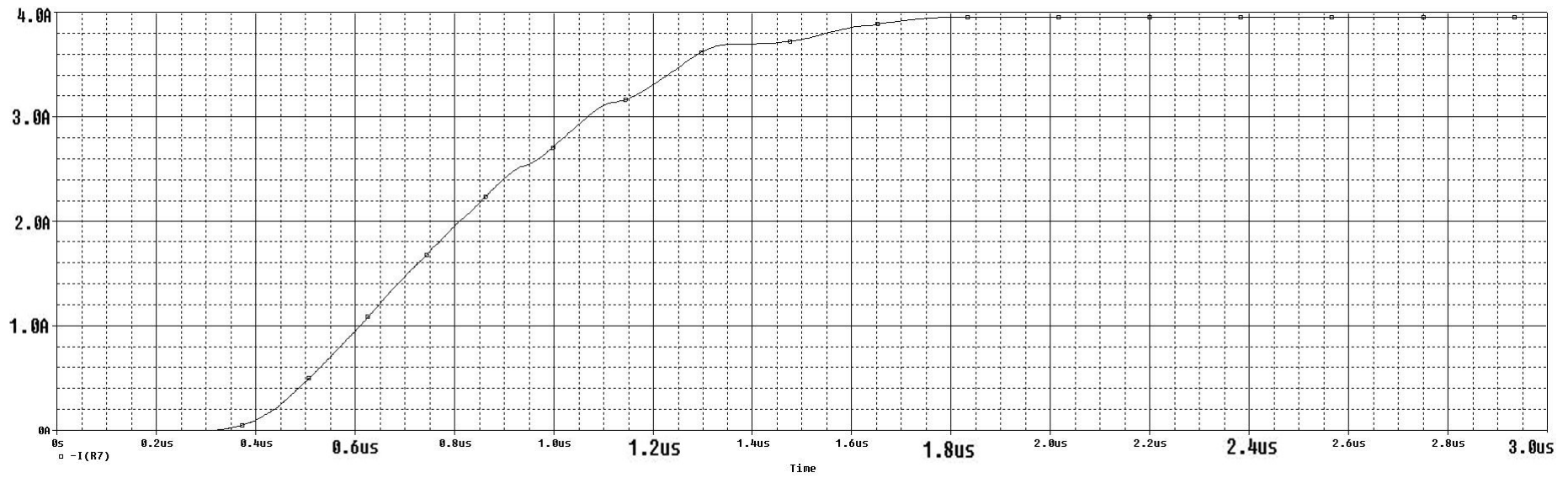


Figura 4.9: Corrente fotografada obtida (Orcad® PSPICE A/D)

De posse do valor da corrente, basta modificarmos o valor de I_{ph} no modelo anterior (seção 4.2). Não é possível acoplar os dois circuitos e levantar a curva I-V diretamente, porque são necessárias duas análises diferentes. O levantamento da curva I-V utiliza a análise *DC Sweep*, que analisa o circuito sob um ponto de operação DC específico; já o circuito que calcula o valor de I_{ph} realiza a análise transiente (porque quando implementamos a irradiância espectral como fonte, utilizamos o tempo como grandeza independente). A corrente só se estabiliza no valor correto depois de percorrer toda a extensão da irradiância espectral (que é multiplicada pelo comprimento de onda e integrada – note pela figura 4.9 que a estabilidade acontece a partir de $2\mu s$). Poderíamos contornar essa limitação se conseguíssemos realizar a análise DC após a corrente se estabilizar, mas o SPICE (O PSPICE) não nos dá essa opção.

O limite desse modelo está nos parâmetros utilizados. Por exemplo, ao invés dos valores médios das grandezas, poderíamos inserir seus valores como gráficos, representados como fontes de tensão (como fizemos com a irradiância espectral), aumentando a precisão. Podemos ir ainda mais longe: ao invés de se usar a eficiência quântica como parâmetro de entrada, podemos descrever a geração de portadores no semiconductor (levando em consideração diversas outras grandezas), aprimorando ainda mais o modelo. Podemos ainda considerar os efeitos da absorção, temperatura, etc.

De posse de um modelo mais preciso, podemos analisar células com diferentes características, e simulá-las com bastante flexibilidade, sendo ainda possível uma análise sob diversas condições ambientais.

5 *Análise de painéis solares fotovoltaicos*

Ilimite-se

*“Você já tentou tornar uma música parte de você?
Transformar os sons em palavras, e dessas, obter sentimento?”*

*Você já tentou ouvir as cores, como se fosse sons da natureza?
Bagunçando os sentidos, ampliando os horizontes?*

*Você já sentiu o doce cheiro da luz?
O gosto forte da energia do sol?*

*Você já tentou ler pensamentos e já quis que alguém conhecesse os seus?
Você já pensou na magnitude disso? Compartilhar a sua mente?*

*Você já tentou enxergar o amor?
Não como coisa vermelha
Mas como algo incompreensível
Mas no fundo você entende?*

*Realmente você já tentou ser muito mais que realmente é?
Ultrapassar os sentidos e viver eternamente?*

*Agradeça aos seus átomos por serem sempre companheiros
E te conhecerem em um nível que mais ninguém ousa tentar.”*

A.L.C.C. (2013)

5.1 Caracterização e parametrização de painéis fotovoltaicos

Um painel ou módulo fotovoltaico é o dispositivo obtido através da associação de células solares, somado a uma estrutura mecânica para acomodação e proteção dessas células.

De acordo com o arranjo empregado em um painel, teremos diferentes condições nominais de funcionamento (tensão, corrente e potência, demonstrados no levantamento da sua curva I-V), além dos parâmetros possíveis de ser extraídos (resistências parasíticas, fator de idealidade, etc).



Figura 5.1: Exemplo de painel solar fotovoltaico

Fonte: [37]

Podemos estender a metodologia utilizada para análise de células para os painéis fotovoltaicos, obtendo assim sua curva I-V característica e seus parâmetros.

O método de levantamento da curva I-V de um painel é idêntico ao utilizado em células individuais (Seção 3.2). Contudo, devemos observar que os valores de tensão e corrente de um painel são bem mais elevados, exigindo assim equipamentos mais robustos.

A extração de parâmetros também pode ser obtida utilizando os métodos apresentados para células (Seção 3.4). Contudo, se o nosso painel for formado de células com parâmetros conhecidos, podemos estimar os parâmetros utilizando o método Alonso-Garcia apresentado na seção 2.7.

5.2 Modelagem e simulação de um módulo fotovoltaico

A construção de um modelo analítico para um painel solar é bastante complicado, devido a complexidade de agregação das equações de cada célula formadora desse painel. Contudo, podemos utilizar aproximações para tal, e construir um modelo baseado em parâmetros equivalentes, utilizando as equações da associação equivalente (seção 2.7). Também podemos tentar ajustar uma função à curva I-V do painel, utilizando algum dos modelos apresentados anteriormente (seção 2.6) - preferencialmente o modelo de dois diodos com resistências parasitas.

Já a modelagem numérica em SPICE pode ser executada de uma forma mais simples. Podemos construir dois tipos para painéis fotovoltaicos:

- **Modelo simplificado (caixa cinza):** Esse modelo representa o painel como uma grande e única célula fotovoltaica, concentrando suas grandezas em parâmetros equivalentes. Embora não seja tão preciso quando o modelo detalhado, possui um custo computacional para cálculo bem baixo. É indicado para grandes arranjos e redes de painéis.
- **Modelo discreto ou detalhado (caixa branca):** O modelo é confeccionado a partir das células fotovoltaicas, com seus respectivos parâmetros. Elas são conectadas a partir do arranjo presente no painel. Esse modelo tem como vantagem uma maior precisão e flexibilidade, caso seja bem conhecida cada uma das células do painel. Contudo, o custo computacional para cálculo aumenta consideravelmente com o aumento do número de células no arranjo. É interessante para modelagem de painéis constituídos de células com pouca dispersão entre seus parâmetros (bastando criar uma célula padrão, instanciá-la diversas vezes e fazer as conexões). É indicado para arranjos mais simples, e quando se é necessário avaliar grandezas internas.

A simulação dos painéis pode ser realizada da mesma forma que a simulação de células (Capítulo 4), bastando conectar uma carga resistiva variável para levantamento da curva I-V do módulo. Após a implementação do modelo escolhido, ainda podemos simular efeitos como mudança de inclinação do painel, efeitos do vento ou sombreamento (conectando interruptores nos terminais das células, e as desligando depois de um período de tempo – entretanto, esse efeito só é possível de se simular no modelo detalhado – inclusive empregando os diodos de desvio na conexão) para verificação do comportamento do módulo nessas condições.

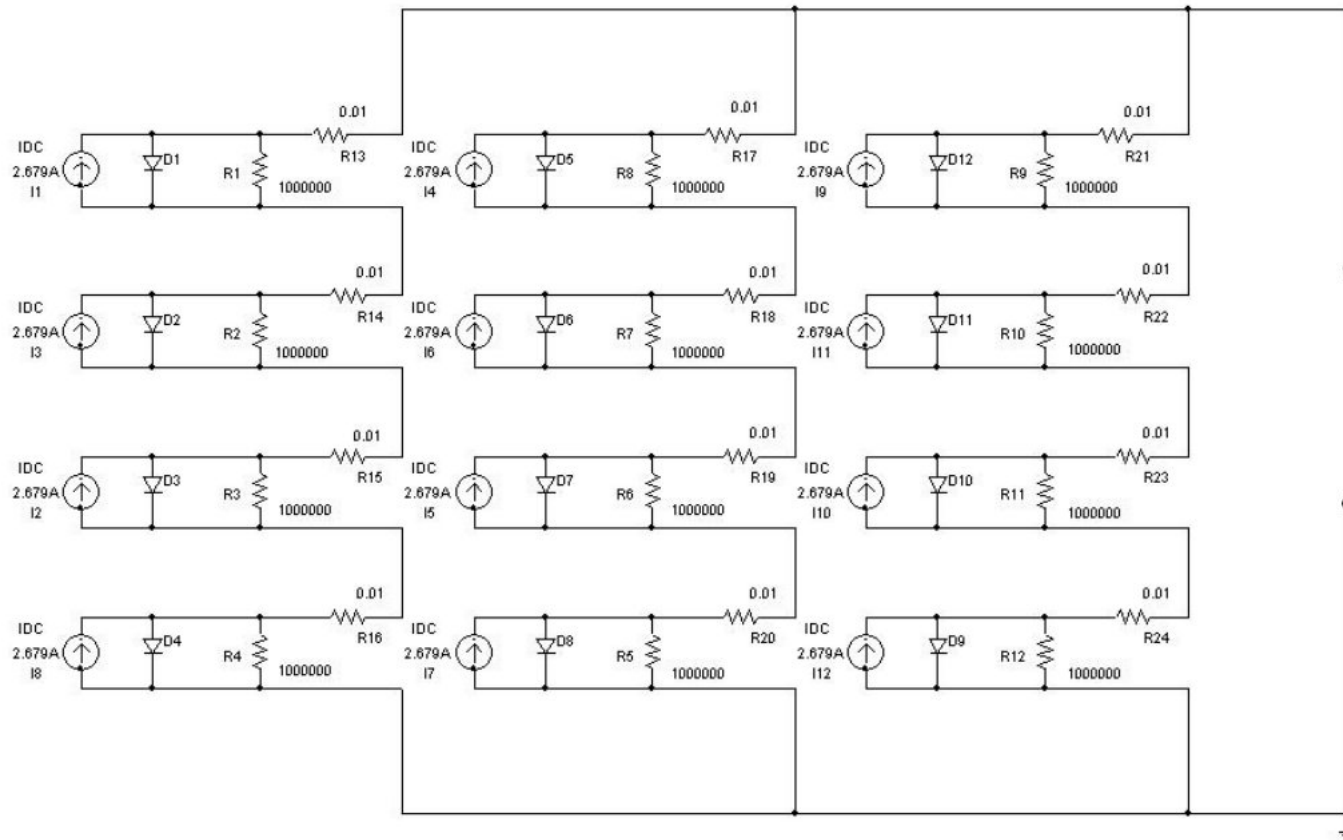


Figura 5.2: Exemplo de modelo detalhado de painel em SPICE (Orcad® PSPICE Schematics)

Fonte: [32]

5.3 Metodologia de análise de painéis

Nessa seção apresentamos um protocolo geral para análise, caracterização e simulação de painéis. Podemos utilizar a metodologia de duas formas:

- A partir de um painel: Toda a análise é feita para um painel já montado (caso comercialmente mais comum). Nesse caso não temos informação das células que constituem o painel, não sendo possível a construção de um modelo numérico detalhado;
- A partir de células individuais: Nesse caso, utilizamos as informações de uma célula caracterizada (capítulo 3) para construir um painel de acordo com um arranjo específico (podemos construir um modelo numérico detalhado do painel e além disso, usar a estimação de parâmetros para construção de modelos analíticos e numéricos simplificados desse painel), Podemos inclusive construir esse painel na prática e aplicar o primeiro item.

Após a caracterização, construção dos modelos e levantamento de suas curvas I-V (curva I-V real, analítica, numérica simplificada e numérica detalhada), podemos compará-las entre si, para validação dos modelos obtidos.

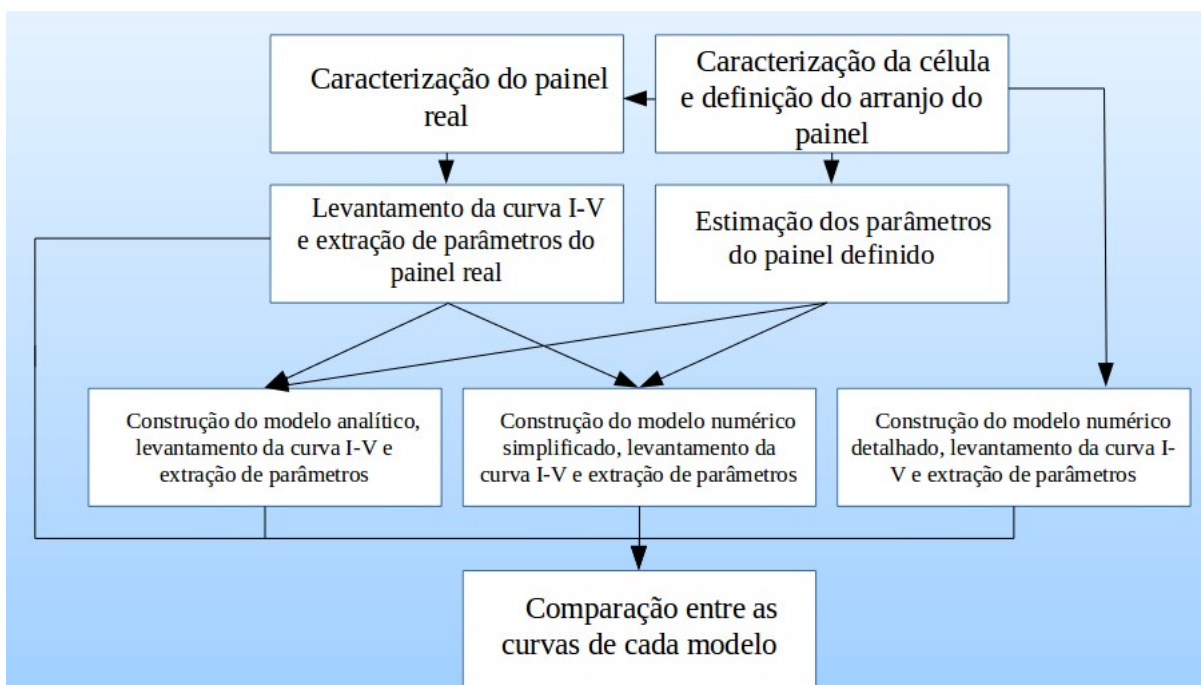


Figura 5.3: Organograma da metodologia de análise de painéis

5.4 Caso de exemplo: Modelagem e simulação de um painel

Neste item construiremos um painel solar de exemplo a partir da célula solar analisada na seção 3.6 e aplicaremos a metodologia de análise para esse dispositivo. Esse trabalho se dará em seis passos:

1. Definição do arranjo das células do painel;
2. Estimativa dos parâmetros do painel;
3. Construção do modelo analítico do painel, levantamento de sua curva I-V característica e extração de seus parâmetros;
4. Construção do modelo numérico simplificado do painel, levantamento de sua curva I-V característica e extração de seus parâmetros;
5. Construção do modelo numérico detalhado do painel e levantamento de sua curva I-V característica e extração de seus parâmetros;
6. Comparação dos parâmetros obtidos a partir de cada curva I-V de cada modelo.

5.4.1 Determinação do arranjo de células

O arranjo escolhido para esse caso de exemplo será 2x3 (dois ramos em paralelo, cada um com três células). Todas as células desse arranjo serão instâncias da nossa célula de exemplo (garantindo assim que todas as células do arranjo sejam idênticas).

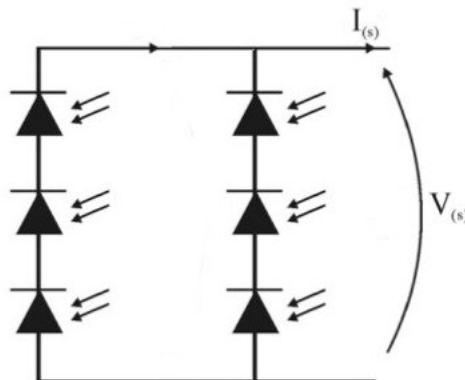


Figura 5.4: Diagrama da associação escolhida para o exemplo

5.4.2 Determinação dos parâmetros do painel

Utilizando as expressões para associação mista discutidas na subseção 2.7.4, podemos estimar os valores das grandezas do nosso painel. Assim, temos como resultado:

Tabela 5.1: Dados obtidos na estimação de parâmetros:

Grandeza	Valor
$I_0(M)$	$6,17 \pm 0,03 \times 10^{-07} A$
$I_{SC}(M)$	$7,33 \pm 0,01 A$
$V_{OC}(M)$	$1,808 \pm 0,002 V$
$R_S(M)$	$0,011 \pm 0,001 \Omega$
$R_P(M)$	$39,600 \pm 0,001 M\Omega$
$m(M)$	$4,459 \pm 0,005$

Para essa estimativa, consideramos os valores de resistência constantes (possuindo igual valor na situação de circuito aberto e curto-circuito) e o fator de idealidade m igual a média dos obtidos anteriormente (m_1 e m_2).

5.4.3 Levantamento da curva I-V utilizando modelo analítico

Utilizando o Matlab®, podemos utilizar os parâmetros estimados para construir um modelo analítico, utilizando o modelo de uma exponencial (equação 2.14), e substituindo os valores obtidos:

$$I = 7.3264 - (6.1661 \times 10^{-7}) * (e^{V/(4.4587 \cdot 26 \times 10^{-3})} - 1) \quad (5.1)$$

Nesse caso, estamos considerando $I_{SC} \approx I_{ph}$. Para obtermos a curva I-V dessa expressão, criamos um vetor de pontos de tensão e aplicamos esses pontos na expressão 5.1, obtendo um outro vetor I com o mesmo número de pontos. Traçando esses pontos:

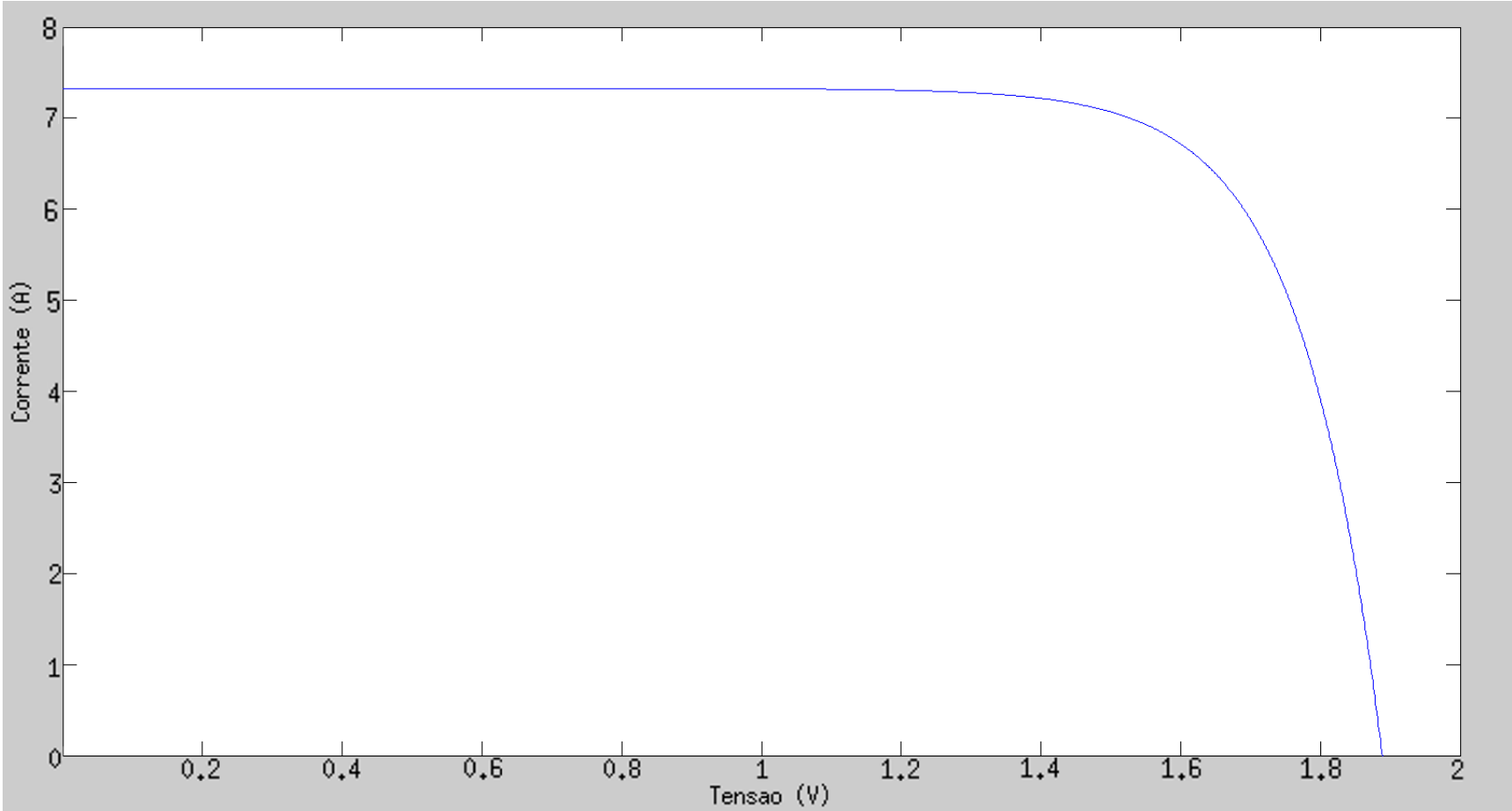


Figura 5.5: Curva I-V do painel de exemplo (modelo analítico)

Dessa curva, podemos retirar novamente os parâmetros para comparação:

Tabela 5.2: Parâmetros extraídos da curva I-V (modelo analítico)

Grandeza	Valor
V_{OC}	$1,888 \pm 0,002V$
I_{SC}	$7,33 \pm 0,01A$
V_{MP}	$1,578 \pm 0,002V$
I_{MP}	$6,82 \pm 0,01A$
P_{MAX}	$10,77 \pm 0,03W$
Fill Factor	$0,770 \pm 0,004$
η	$17,950 \pm 0,001\%$

5.4.4 Simulação do painel: Modelo simplificado

Utilizando os parâmetros obtidos na subseção 5.4.2, podemos levantar um modelo numérico do painel (modelo simplificado). Nesse caso, construiremos um modelo de circuito no SPICE (modelo de uma exponencial) e levantaremos a sua curva I-V.

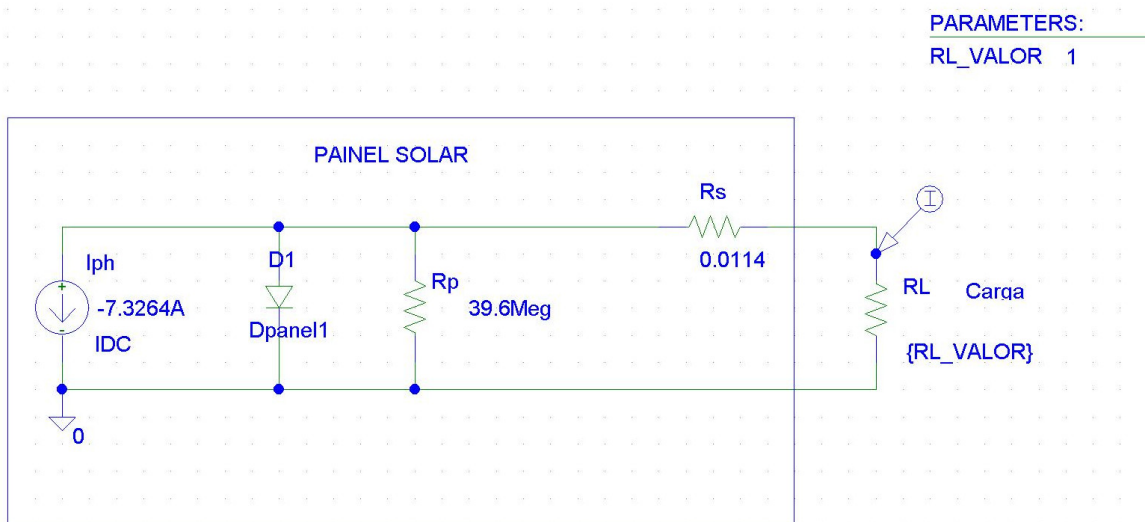


Figura 5.6: Circuito equivalente do painel (modelo simplificado)

Com a simulação do circuito, levantamos a sua curva I-V:

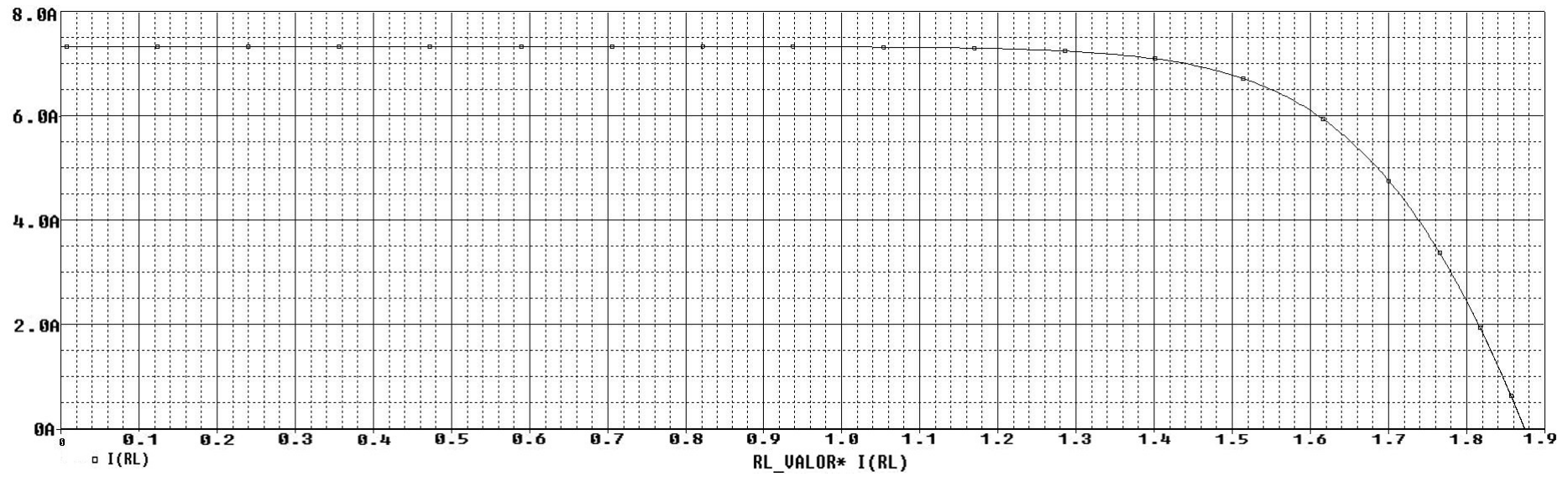


Figura 5.7: Curva I-V do painel simulado (modelo simplificado)

Com essa curva, podemos extrair os parâmetros de interesse:

Tabela 5.3: Parâmetros extraídos da curva I-V do painel (modelo simplificado)

Grandeza	Valor
V_{OC}	$1,874 \pm 0,002V$
I_{SC}	$7,33 \pm 0,01A$
V_{MP}	$1,497 \pm 0,002V$
I_{MP}	$6,79 \pm 0,01A$
P_{MAX}	$10,17 \pm 0,03W$
<i>Fill Factor</i>	$0,740 \pm 0,004$
η	$16,940 \pm 0,001\%$

5.4.5 Simulação do painel: Modelo Detalhado

Agora iremos simular nosso painel de modo detalhado, utilizando o modelo de célula construído na seção 4.5. Extraindo os parâmetros:

Tabela 5.4: Parâmetros extraídos da curva I-V do painel (modelo detalhado)

Grandeza	Valor
V_{OC}	$1,888V \pm 0,002$
I_{SC}	$7,34 \pm 0,01A$
V_{MP}	$1,562 \pm 0,002V$
I_{MP}	$6,94 \pm 0,01A$
P_{MAX}	$10,84 \pm 0,03W$
<i>Fill Factor</i>	$0,782 \pm 0,004$
η	$18,0700 \pm 0,001\%$

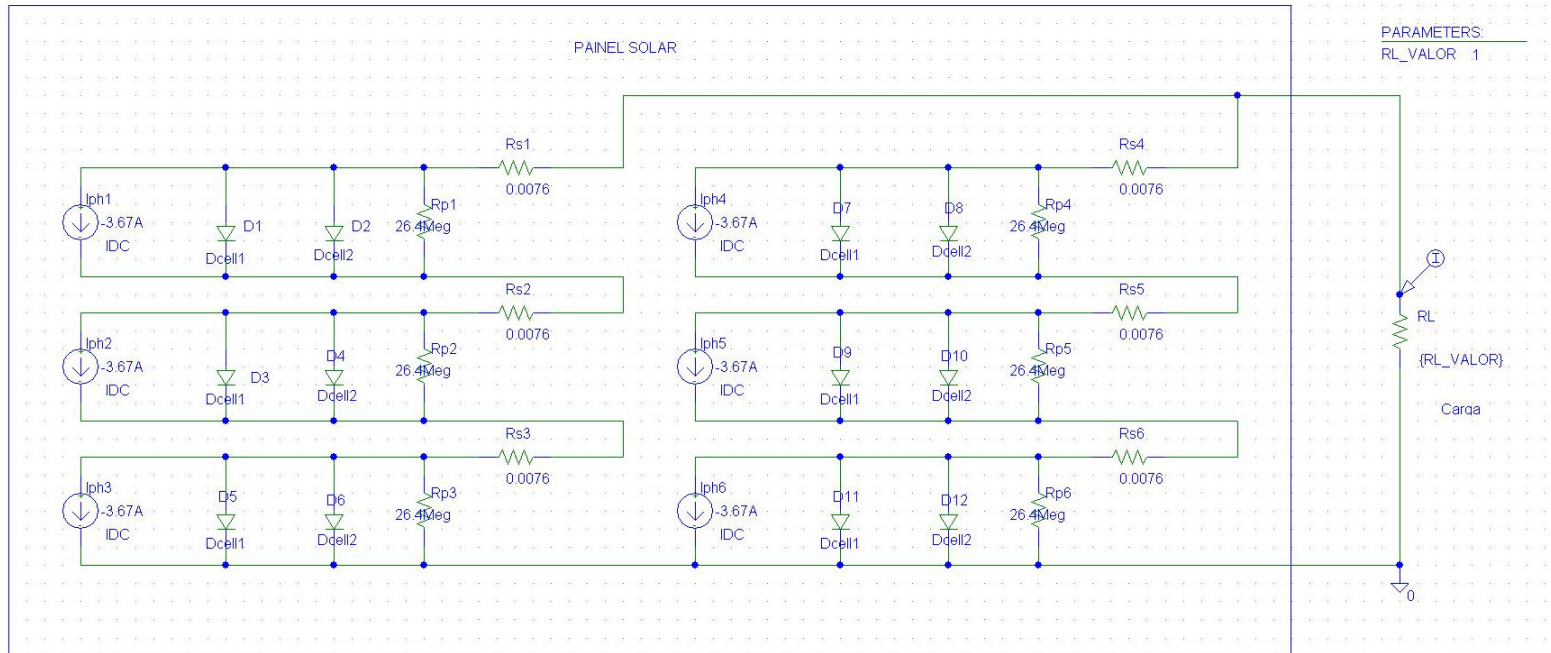


Figura 5.8: Circuito equivalente do painel (modelo detalhado)

Levantando a curva I-V respectiva a esse circuito:

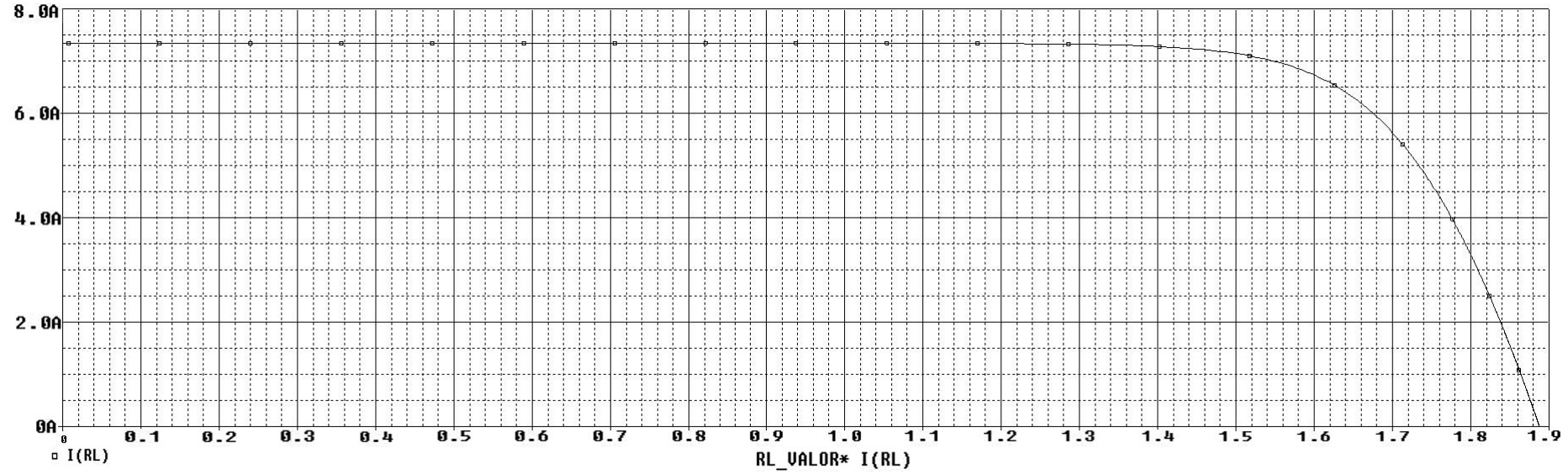


Figura 5.9: Curva I-V do painel simulado (modelo detalhado)

5.4.6 Comparação dos resultados obtidos

Agora iremos comparar os parâmetros obtidos para cada um dos modelos utilizados:

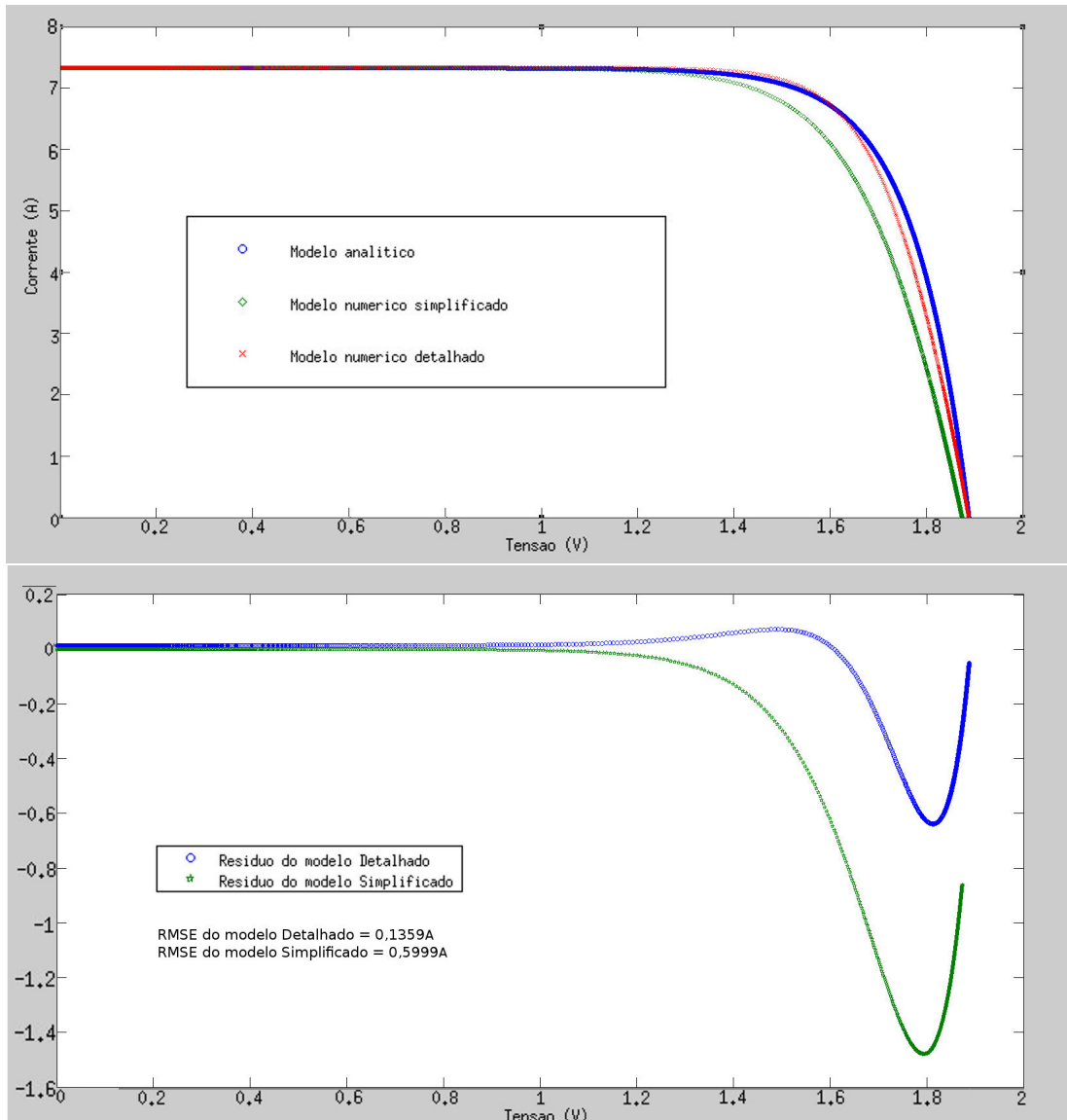


Figura 5.10: Comparação entre as curvas I-V de cada modelo (superior) e resíduos (inferior)

Tabela 5.5: Comparação entre os parâmetros obtidos na simulação do painel de exemplo

Grandeza	Modelo Analítico	Modelo N. Simplificado	% Rel. Desvio	Modelo N. Detalhado	% Rel. Desvio
V_{OC}	1,8884V	1,8740V	0,76%	1,8877V	0,04%
I_{SC}	7,3264A	7,3264A	0	7,3400A	0,19%
V_{MP}	1,5780V	1,4971V	5,13%	1,5621V	1,01%
I_{MP}	6,8233A	6,7900A	0,49%	6,9390A	1,69%
P_{MAX}	10,7671W	10,1656W	5,59%	10,8396W	0,67%
FF	0,77	0,7404	3,84%	0,7823	1,59%
η	17,95%	16,94%	5,63%	18,07%	0,67%

Como podemos observar, os valores dos modelos ficaram muito próximos. A diferença percentual entre o modelo analítico e o numérico simplificado ficou menor que 7%, enquanto o modelo detalhado ficou abaixo de 2%, mostrando ser a melhor escolha. O modelo numérico simplificado se apresenta como mais conservador, com um *Fill Factor* menor, devido a um valor de resistência série equivalente maior do que o dos outros modelos (é possível de se perceber esse fato observando a figura 5.10). Devido a isso, uma maior queda de tensão é verificada nessa resistência, fazendo com que o modelo apresente uma tensão de máxima potência ligeiramente menor. A corrente I_{MP} também apresenta um valor menor. Isso aconteceu devido a modelagem do diodo equivalente do painel simplificado (baseado nos parâmetros estimados), que drenava uma maior quantidade de corrente do que o modelo detalhado (para uma dada tensão), além da diferença entre as correntes de curto-circuito dos modelos (a aproximação de corrente na estimação de parâmetros apresentou um valor menor que a do modelo detalhado). Através da análise de RMSE (Raiz média quadrática do erro) dos resíduos de cada modelo em relação ao modelo analítico, verificamos que o modelo detalhado se aproxima mais do modelo analítico (o valor do modelo detalhado foi menor). Com essas variações de corrente e tensão, tivemos um impacto acumulado na curva de potência (ou curva P-V), como mostrado na figura 5.11:

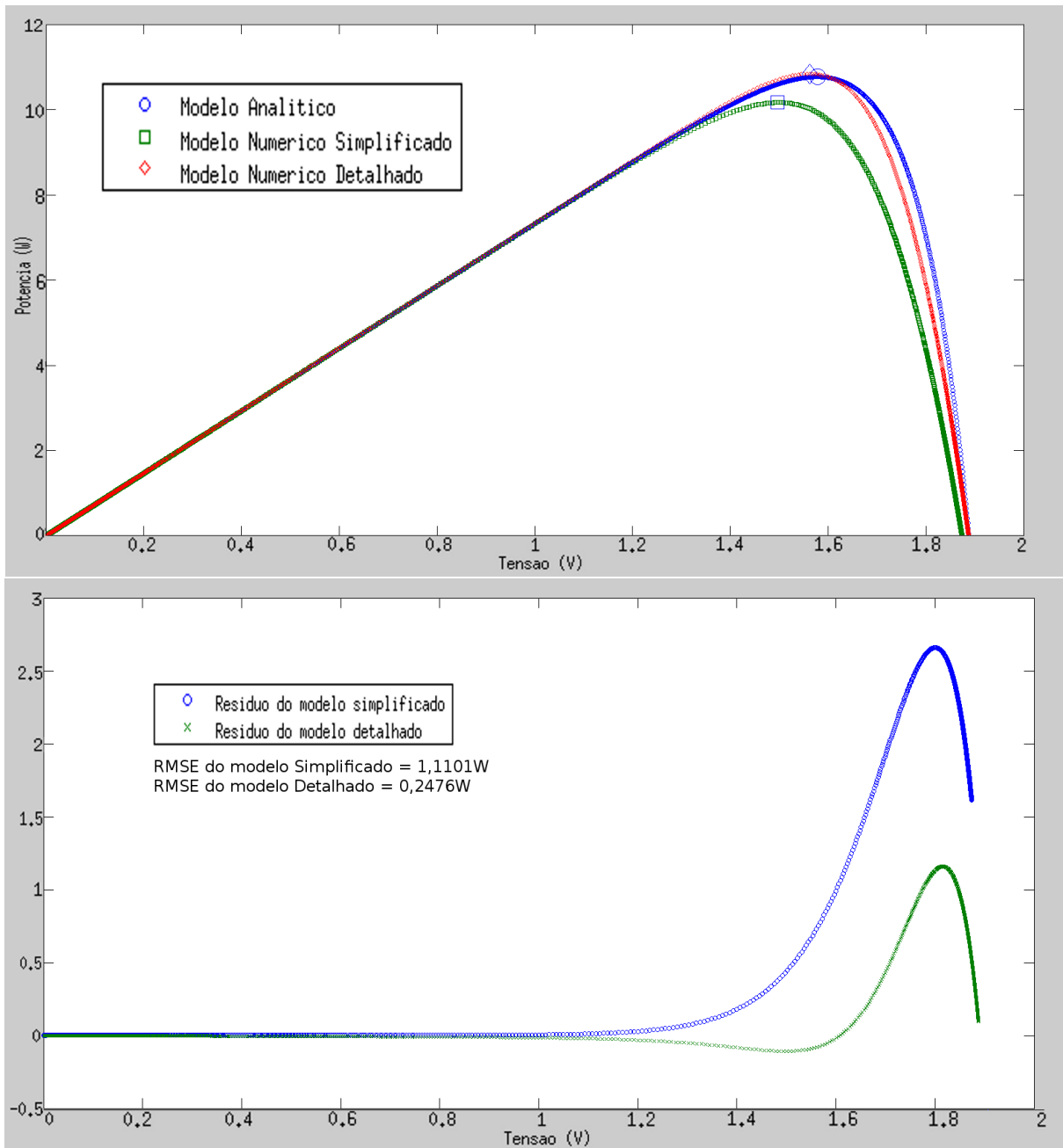


Figura 5.11: Comparação entre as curvas P-V de cada modelo (superior) e resíduos (inferior)

Também seguindo a análise do RMSE, podemos observar a supremacia do modelo detalhado, que apresentou esse parâmetro em menor magnitude, como anteriormente. Por consequência, as grandezas derivadas dessa, como o *Fill Factor* e eficiência também apresentaram valores mais baixos.

5.5 Comparação entre painéis e análise de desempenho

Neste capítulo estudamos uma metodologia de análise de painéis fotovoltaicos a partir de modelos analíticos e numéricos, obtidos através da caracterização e simulação desses painéis em uma condição característica.

Em sistemas fotovoltaicos funcionais, o elemento de análise é o módulo, pois dificilmente um sistema será implementado a partir de células; embora seja possível desenvolver um projeto a partir de células avulsas, é mais fácil encontrar no mercado painéis já montados. O fabricante divulga dados referentes ao painel (nem sempre confiáveis), em uma certa condição de funcionamento (STC, por exemplo), mas não há informação sobre as células que constituem esse painel (e é bem complicado obter essas informações através de uma análise reversa). Nesse aspecto, essa metodologia de análise é necessária.

Diversos critérios utilizados para a análise das células podem ser também utilizados para os painéis; contudo, existe um outro ponto de vista a ser considerado: o da aplicação. Esse quesito é indispensável na análise de desempenho do ponto de vista prático. Vejamos algumas delas:

- **Sistemas de geração conectados a rede elétrica tradicional:** São sistemas fotovoltaicos destinados a geração de energia para consumidores residenciais e pequenos estabelecimentos comerciais. São sistemas secundários de obtenção de energia, mais voltados a diminuição dos gastos com energia elétrica. Os principais indicadores para essa situação se relacionam com a produção de energia, como a potência máxima gerada e a geração de energia anual. A área utilizada pelos painéis também é importante (principalmente para lugares com espaço restrito, como residências).
- **Sistema de geração autônomos:** Como os sistemas conectados, também são destinados a consumidores com baixa demanda de energia, mas com a diferença de serem sistemas primários de geração – principalmente em regiões remotas, onde a concessionária de energia não está presente. Além dos indicadores relacionados com produção de energia, a eficiência de conversão também é um critério importante (para que o sistema sobreviva aos horários de baixa irradiância), principalmente em dias nublados.
- **Equipamentos de baixo consumo:** São equipamentos que funcionam com energia solar, como calculadoras, telefones celulares, e alguns outros dispositivos portáteis. Seu foco principal não está na geração de energia mas sim na eficiência de conversão em baixas irradiâncias (principalmente por se utilizar de painéis com a área extremamente reduzida).

- **Sistemas espaciais:** São sistemas desenvolvidos para funcionamento em ambiente extra-terrestre, como satélites, sondas e espelhos solares. Esses equipamentos utilizam a mais alta tecnologia fotovoltaica vigente. Seus principais indicadores são a eficiência de conversão, resistência a radiação e estabilidade térmica.
- **Usinas fotovoltaicas:** São grandes centrais geradoras de energia elétrica, que alimentam uma grande quantidade de consumidores. Possuem uma grande exigência de espaço para a produção da potência requerida. Contudo, podem empregar estratégias de funcionamento para minimizar essa característica, como o uso de concentradores de luz.

Na nossa análise mais uma vez desconsideramos diversos fatores importantes (como custo dos painéis, degradação e tempo de vida útil), mas que fogem ao escopo desse trabalho, que foca na análise em si e não em um critério de escolha de painéis. [3,4]

6 *Conclusões e trabalhos futuros*

*“Hoc factum est verbum
Quia de vita est speciosa
Et in singulis quae incidere
Eorum gaudia scilicet et dolores.*

Memento mori.”

A.L.C.C.

Este trabalho apresentou uma metodologia para análise de células e painéis fotovoltaicos, que teve como foco o caráter funcional das células, por basear-se principalmente nas suas características elétricas. Esse viés foi utilizado na etapa de caracterização, que consistia na análise de funcionamento de uma célula/painel real através de ensaios em laboratório utilizando condições ambientais controladas. Ensaios ao ar livre também são interessantes para a análise, principalmente do ponto de vista da aplicação, mas as condições ambientais devem ser conhecidas. Os dados obtidos nessa etapa nos permitiram realizar a construção de uma base de simulação preliminar de operação em SPICE, flexível a ponto de poder ser estendida através da construção de modelos numéricos mais completos e detalhados, inclusive permitindo a variação das condições de funcionamento em ambiente de simulação.

Contudo, podemos enriquecer ainda mais esse trabalho: como perspectiva futura, podemos desenvolver essa metodologia, tornando-a um verdadeiro manual de consulta para profissionais da área de fotovoltaicos. Para tal, apresento algumas sugestões:

- Discussão sobre equipamentos utilizados para medição das condições ambientais e calibração das células e painéis;
- Análise dos materiais semicondutores e das diversas técnicas de fabricação empregadas em fotovoltaicos, e seu impacto na geração de energia;
- Apresentação de modelos mais completos na etapa de simulação, que levam em consideração diversos fatores não considerados nessa análise, como temperatura, velocidade do vento, características do semicondutor, etc;
- Desenvolvimento de uma metodologia de escolha e avaliação de células e painéis através dos dados experimentais obtidos e simulações.
- Apresentação, análise e simulação de circuitos condicionadores de energia e exemplos de sistemas fotovoltaicos reais.

Podemos afirmar a importância dessa metodologia observando o crescimento do mercado de fotovoltaicos no Brasil. Esse mercado está cada vez mais difundido em nosso país, embora ainda tímido. Além do interesse cada vez maior dos consumidores residenciais, que instalam sistemas fotovoltaicos em suas casas para uma maior economia na sua conta de luz, há projetos de construções de usinas fotovoltaicas por parte das concessionárias de energia elétrica. Além disso, temos projetos de veículos, dispositivos portáteis, projetos de iluminação pública, sistemas agrícolas de bombeamento de água, todos baseados em energia solar fotovoltaica.

O futuro da área é bem promissor: Profissionais com conhecimento dessa área serão muito requisitados, assim como o desenvolvimento de ferramentas para análise e simulação de sistemas fotovoltaicos. Definitivamente é uma área em que se vale a pena apostar.

Referências Bibliográficas

- [1] “Solar products store.” <http://www.solarproductsstore.com/understanding-solar-equipment/>, 2012. [Online; acessado em 06-maio-2014].
- [2] S. M. Sze, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 2nd edition. Wiley, 2008.
- [3] T. Markvart and L. Castañer, *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Elsevier, 2003.
- [4] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley, 2003.
- [5] “Silicon solar.” <http://www.siliconsolar.com/commercial-solar-cells.html>, 2012. [Online; acessado em 06-maio-2014].
- [6] M. A. Pinho, J. T. e Galdino, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. GTES - CEPTEL - DTE - CRESESB, Rio de Janeiro, Brasil, 2 ed., Março 2014.
- [7] “National renewable energy laboratory.” <http://www.nrel.gov/ncpv/images/>, 2013. [Online; acessado em 03-junho-2014].
- [8] “Openstax.” <http://cnx.org/content/m41217/latest/>, 1999. [Online; acessado em 06-maio-2014].
- [9] M. E. Eron, *Thin film CuInSe₂/Cd(Zn)S Heterojunction Solar Cell: Characterization and Modeling*. Phd, Drexel University, Philadelphia, 1984.
- [10] J. Weisse, “Concentrated solar photovoltaics.” <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/weisse2/>, 2010. [Online; acessado em 14-junho-2014].
- [11] P. Hersch, S. E. R. I. T. I. Office, and K. Zweibel, *Basic Photovoltaic Principles and Methods*. Solar information module, Technical Information Office, Solar Energy Research Institute, 1982.
- [12] J. F. Klem and J. C. Zolper, “Semiconductor tunnel junction with enhancement layer,” Oct. 21 1997. US Patent 5,679,963.
- [13] L.-W. Lai, J.-T. Chen, L.-R. Lou, C.-H. Wu, and C.-T. Lee, “Performance improvement of (nh₄)₂s x-treated iii–v compounds multijunction solar cell using surface treatment,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 155, no. 12, pp. B1270–B1273, 2008.
- [14] N. V. Yastrebova, “High-efficiency multi-junction solar cells: Current status and future potential,” *Solar Energy*, 2007.
- [15] M. A. Green, *Third generation photovoltaics: advanced solar energy conversion*, vol. 12. Springer, 2006.

- [16] D. J. Aiken, “Antireflection coating design for series interconnected multi-junction solar cells,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 8, no. 6, pp. 563–570, 2000.
- [17] “Expo solar.” <http://www.exposolar.org/2010/eng/center/>, 2010. [Online; acessado em 06-maio-2014].
- [18] “Wikipedia.” http://pt.wikipedia.org/wiki/Célula_solar_polimérica, 2013. [Online; acessado em 14-junho-2014].
- [19] M. Helgesen, R. Søndergaard, and F. C. Krebs, “Advanced materials and processes for polymer solar cell devices,” *Journal of Materials Chemistry*, vol. 20, no. 1, pp. 36–60, 2010.
- [20] B. C. Thompson and J. M. Fréchet, “Polymer–fullerene composite solar cells,” *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 47, no. 1, pp. 58–77, 2008.
- [21] S. Günes, H. Neugebauer, and N. S. Sariciftci, “Conjugated polymer-based organic solar cells,” *Chemical reviews*, vol. 107, no. 4, pp. 1324–1338, 2007.
- [22] S. E. Shaheen, D. S. Ginley, and G. E. Jabbour, “Organic-based photovoltaics: toward low-cost power generation,” *MRS bulletin*, vol. 30, no. 01, pp. 10–19, 2005.
- [23] T. B. Teixeira, “Influência da temperatura em aglomerados auto-reconfiguráveis de células solares fotovoltaicas,” especialização, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2008.
- [24] L. Castañer and S. Silvestre, *Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice*. Wiley, 2002.
- [25] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, and W. Warta, “Solar cell efficiency tables (version 35),” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 18, no. 2, pp. 144–150, 2010.
- [26] A. Moehlecke and I. Zanesco, “Development of silicon solar cells and photovoltaic modules in brazil: analysis of a pilot production,” *Materials Research*, vol. 15, no. 4, pp. 581–588, 2012.
- [27] S. Donati, *Photodetectors - devices, circuits and applications, 1st edition*. Prentice Hall PTR, 2000.
- [28] F. Kininger, “Photovoltaic systems technology,” 2003.
- [29] A. B. Meinel and M. M. P., *Applied solar energy: an introduction, 4th edition*. Addison-Wesley, 1976.
- [30] “Green rhino energy.” <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/spectra.php>, 2013. [Online; acessado em 03-junho-2014].
- [31] M. Alonso-Garcia and J. Ruiz, “A model for the series–parallel association of photovoltaic devices,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 14, no. 3, pp. 237–247, 2006.
- [32] T. M. Barcelos, D. W. D. L. Monteiro, and M. F. Lessa, “Analytical model for a mixed association of photovoltaic cells,” *ECS Transactions*, vol. 14, no. 1, pp. 529–537, 2008.

-
- [33] “Keithley.” <http://www.keithley.nl/products/dcac/currentvoltage/4200scs>, 2014. [Online; acessado em 11-Março-2014].
- [34] “Keithley.” <http://www.keithley.com/products/dcac/currentvoltage/2450smu>, 2014. [Online; acessado em 11-Março-2014].
- [35] “Agilent technologies.” <http://www.home.agilent.com/en/pd-1480796-pn-B1505A/>, 2014. [Online; acessado em 12-junho-2014].
- [36] “Ali express.” <http://pt.aliexpress.com/>, 2014. [Online; acessado em 22-maio-2014].
- [37] “Painel solar.” <http://painelsolares.com/o-que-e-um-painel-solar/>, 2012. [Online; acessado em 29-Abril-2014].