

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 942

**MODELAGEM ANALÍTICA E NUMÉRICA SEMIEMPÍRICA DE CÉLULAS
FOTOVOLTAICAS**

POLIANA HENRIQUES BUENO

DATA DA DEFESA: 22/08/2016

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**MODELAGEM ANALÍTICA E NUMÉRICA SEMIEMPÍRICA DE
CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

POLIANA HENRIQUES BUENO

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

Agosto de 2016

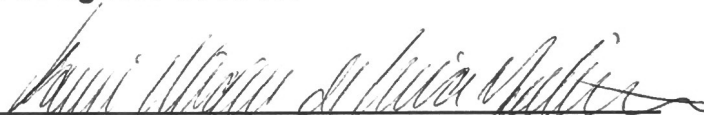
"Modelagem Analítica e Numérica Semiempírica de Células Fotovoltaicas"

POLIANA HENRIQUES BUENO

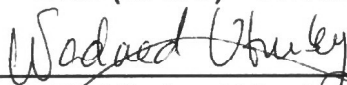
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 22 de agosto de 2016.

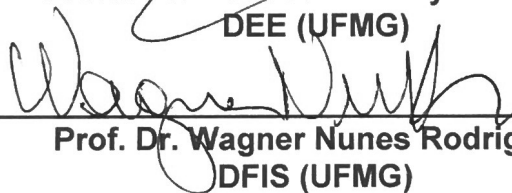
Por:



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



Profa. Dr. Wadaed Uturbey da Costa
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Wagner Nunes Rodrigues
DFIS (UFMG)

Poliana Henriques Bueno

**Modelagem Analítica e Numérica Semiempírica de
Células Fotovoltaicas**

Belo Horizonte – MG, Brasil

23 de agosto de 2016

AGRADECIMENTOS

“Gratidão não é apenas a mais rica das virtudes, mas sim a mãe de todas as outras”

Fazer parte do OptMA já é motivo suficiente para ser grata! Obrigada, Davies, por me conceder essa oportunidade e obrigada por, juntamente dos professores Frank e Luciana, fazerem tanto pela educação e desenvolvimento do grupo. E ainda mais grata por toda sua orientação, incentivo, compreensão e confiança, além de muitas risadas, desorientações, *stroofwafels* e confraternizações. Você acreditou em mim e me ajudou a vencer a batalha, me fazendo enxergar meu potencial e mérito pela conquista.

Agradecer a todos do grupo OptMA, mas em especial, alguns amigos: Meu “coorientador” Pablo, por tantas tardes, noites e madrugadas de pesquisas, de ajuda, conhecimento... sempre com um sorriso no rosto, bom humor e péssimas piadas que só eu rio! O grupo fotovoltaico, começando com o Diogo, ou Lord Zener, quem também se dispôs todas as vezes que precisei de uma ajuda, sem hesitar! Você é cabuloso, Diodo! Badaia, por sempre falar com satisfação de fotovoltaicos e dado todo o apoio inicial, num momento de muita dificuldade e pouco conhecimento no assunto da minha parte. Alexander por pegar minha cadeira todo dia (hahaha). Mentira! Obrigada pela disposição em ajudar no que fosse preciso! *Danke sehr!* Sbampato, também ajudando com o que podia e Dáfiny (fechando o grupo de fotovoltaico), por colaborar em diversos testes!! Clarice, quem me fez companhia em todos os momentos, foi meu ouvido das lamentações, meu ombro que suportava o cansaço e as mãos que me empurraram em tantas e tantas situações de desistência! Ursulinha que, mesmo de longe, me mandou tantas preces e tanta força, essenciais para que eu concluísse esta etapa! Os demais amigos por tantos apoios, as incansáveis confraternizações e zoeiras! Ah! Lidi e suas pizzas salvadoras, nas longas noites que se estendem no lab. Obrigada Optm@s amig@s!

Ao CNPq pelo apoio financeiro nos dois anos de curso e à CEMIG por investir no projeto D470.

Aos recentes companheiros do CEFET-MG, que abraçaram minha causa e me deram todo o suporte que precisei neste início de contrato coincido com minha reta final de mestrado!

A todos os meus amigos que aceitaram meu distanciamento, mas sempre lembrando de mim e sentindo minha falta! Ao meu fiel companheiro patins, por me trazer momentos de prazer e fuga do estresse! Sem essas oito rodinhas e o slalom teria sido bem mais pesado chegar ao fim da jornada!

Só que, para poder agradecer a todos os referidos acima, para chegar até aqui, o apoio maior veio de dentro de casa: meus pais, irmãos e sobrinhos! Aqueles que suportaram toda a minha ausência sem nunca titubear. Sabendo que faltei como filha/irmã/tia por diversas ocasiões para lutar pela realização desse sonho. Minha família, meu maior alicerce. E é a vocês que dedico esse trabalho!

RESUMO

O propósito desta dissertação é apresentar e avaliar um sistema eficaz para caracterização e modelagem elétrica de células solares de silício, a partir de curvas características de corrente-tensão (IxV) obtidas com um simulador solar e com o sol natural, e posterior análise de parâmetros extraídos das curvas, responsáveis por qualificar tal dispositivo. Com esses parâmetros pretende-se alimentar modelos numéricos (Spice®) e analíticos capazes de representar fidedignamente a célula, permitindo a avaliação do desempenho da célula sob diferentes temperaturas e irradiâncias. Modelos precisos são importantes para que se possa prever o comportamento de arranjos de células, e de sistemas compostos não somente por painéis, mas também por circuitos inversores, rastreadores de ponto de máxima potência, controladores de carga e bancos de bateria.

A caracterização exige informação sobre o espectro, a homogeneidade e a intensidade da fonte luminosa; material da célula; geometria da célula e dos eletrodos; temperatura da célula; equipamento utilizado para o levantamento da curva IxV; conexões elétricas e tempo demandado para aquisição de dados. Além disso, deve ser realizada uma caracterização completa para valores de polarização direta acima da tensão de circuito aberto da célula, possibilitando a extração mais precisa da resistência série parasita.

Curvas IxV convencionais para células fotovoltaicas variam desde a condição de curto circuito, com corrente máxima, até a de circuito aberto, com tensão máxima; apresentando um determinado fator de preenchimento e um ponto de máxima potência. O formato da curva carrega consigo informação sobre regiões de dominância de mecanismos de deriva e difusão de portadores de carga fotogerados; magnitude da irradiância; temperatura; finitude da condutância da região de depleção; resistência série parasita das regiões *quasi-neutras* e de contato; e presença de defeitos. A extração de parâmetros acontece por diferentes métodos, porém os mais confiáveis são métodos iterativos onde são realizados ajustes com a equação de Shockley, seja com uma ou duas exponenciais. Parâmetros, como a resistência série, podem ser incorporados à essa equação considerando-se a estrutura interna da célula nos arredores da junção PN e a mobilidade de portadores de carga. As comparações de medidas realizadas sob diferentes condições solarimétricas e de temperatura

ocorrem após conversão para a condição padrão de teste (STC – *Standard Test Condition*).

O trabalho apresenta ensaios elétricos realizados com células poli e monocristalinas de silício, de diferentes geometrias, sob condições distintas de medição e com equipamentos diferentes. As curvas experimentais são comparadas às simuladas com os parâmetros extraídos. Esses procedimentos permitiram identificar diversos fatores dificultadores e cuidados necessários para que se possa obter um modelo confiável e escalonável em temperatura, irradiância e geometria de células.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica, célula solar, diodo, junção PN, curva IxV, caracterização elétrica, STC, resistência série.

ABSTRACT

The purpose of this dissertation is to present and evaluate an effective system for the characterization and electrical modeling of silicon solar cells, by means of current-voltage characteristic curves (I_xV) extracted with a solar simulator and natural sunlight, and further analysis of obtained parameters responsible for qualifying such devices. It is intended to use these parameters to feed numerical (Spice®) and analytical models, capable of faithfully representing a cell, enabling its performance evaluation under different temperatures and irradiances. Accurate models are important in order to predict the behavior of solar cell arrangements, and systems composed not only by panels, but also by inverters, maximum-power-point tracking circuits, charge controllers and battery banks.

The characterization demands information regarding the spectrum, light source intensity and homogeneity; cell material; electrodes and cell geometry; cell temperature; equipment employed for the I_xV curve measurement; electrical connections and time consumed for data acquisition. In addition, the full characterization should be performed for forward bias higher than the open-circuit voltage, allowing the extraction of a more accurate parasitic series resistance.

Conventional I_xV curves, for photovoltaic cells, range from the short-circuit condition, with maximum current, to the open-circuit condition, with maximum voltage; presenting a certain fill factor, and a maximum power point. The curve shape gives information regarding dominance regions of drift and diffusion mechanisms for photogenerated charge carriers; irradiance magnitude; temperature; the finite conduction of the depletion region; *quasi-neutral* and contact regions parasitic series resistance; and presence of defects. The extraction of parameters is performed through different methods. However, the most reliable are the interactive methods, where the Shockley equation, either with one or two exponentials, is used to fit experimental data. Parameters, like the series resistance, can be incorporated to this equation considering the cell internal structure in the surroundings of the PN junction, and the charge-carrier mobilities. Comparisons of measurements under different solarimetric and temperature conditions are performed after the conversion to Standard Test Condition (STC).

This work presents electrical tests performed with both mono- and polycrystalline silicon cells of different geometries, under distinct measuring conditions

and with different equipment. The experimental curves are compared to their simulated counterparts with the extracted parameters. These procedures allowed to identify several hindering factors and necessary caution, in order to obtain a reliable model, that is scalable regarding temperature, irradiance and cell geometry.

Key-words: photovoltaic energy, solar cell, diode, PN junction, IxV curve, electrical characterization, STC, series resistance.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
2. MATERIAIS E MÉTODOS	23
2.1. Interação Fóton – Semicondutor	23
2.2. Características de uma Célula Solar	30
2.2.1. Tipos de Célula.....	30
2.2.2. Modelagem Analítica de Células	34
2.2.3. Associação de células e painéis fotovoltaicos	36
2.2.4. Curvas Extraídas	37
2.2.5. Parâmetros Característicos Internos	40
2.2.6. Parâmetros Característicos Externos	50
2.3. Equipamentos e <i>Softwares</i>	53
2.4. Caracterização dos dispositivos fotovoltaicos	60
2.4.1. Extração de parâmetros pela curva $I \times V$	60
2.4.2. Modelagem do Cálculo de Mobilidade dos Portadores.....	67
3. RESULTADOS E ANÁLISES.....	71
3.1. Testes Elétricos.....	71
3.1.1. Processo de medição e extração de parâmetros.....	78
3.1.2. Comparação entre equipamentos.....	80
3.1.2.1. Norma IEC 60891 para condições padrões de teste.....	81
3.1.2.1.1. <i>Procedimento de correção</i>	81
3.1.2.1.2. <i>Determinação da resistência série R_s</i>	84
3.1.2.1.3. <i>Determinação do fator de correção κ</i>	86
3.1.2.2. Resultados da comparação.....	86
3.1.3. Aproximação para uma exponencial.....	88
3.1.3.1. Comparação entre tamanho de células	101
3.1.3.2. Simulação em PSpice	107
3.1.4. Aproximação para duas exponenciais	113
3.1.5. Comparação entre sol natural e simulador solar	121
3.1.6. Comparação entre valores do fabricante e da medição	124
3.2. Mobilidade.....	125
3.3. Considerações Finais.....	133
3.3.1. Cálculo da resistência série.....	133

3.3.2. Uniformidade de iluminação e geometria dos dispositivos	135
3.3.3. Temperatura de medição.....	137
4. CONCLUSÃO	139
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa de insolação do Brasil, média anual de horas/dia [2]	20
Figura 2.1: Níveis e bandas de energia.....	24
Figura 2.2: Diagrama energia-momento do arseneto de gálio (a) e do silício (b) [5].	25
Figura 2.3: Ligações químicas do material semiconductor extrínseco	26
Figura 2.4: Sentido das correntes de difusão e deriva	27
Figura 2.5: Fóton incidindo no material	27
Figura 2.6: Fóton absorvido em um semiconductor de gap indireto (adaptado de [6])	28
Figura 2.7: Penetração da luz em uma célula solar	29
Figura 2.8: Coeficiente de absorção do silício.....	29
Figura 2.9: Células a) monocristalina e b) policristalina	31
Figura 2.10: Eficiência de células em relação à sua tecnologia de fabricação Fonte: [15] Acessado em 4 de julho 2016	33
Figura 2.11: Circuito simples que representa uma célula solar	34
Figura 2.12: Circuito completo com uma (linhas sólidas) ou duas (acrescido da linha tracejada) exponenciais.	35
Figura 2.13: Efeito na curva IxV de células associadas em série (Adaptado de [16])	37
Figura 2.14: Efeito na curva IxV de células associadas em paralelo (Adaptado de [16])	37
Figura 2.15: Curvas características a) IxV e b) PxV com parâmetros indicados.....	38
Figura 2.16: Curva logarítmica para extração de parâmetros (Adaptado de [17]).....	39
Figura 2.17: Curva Capacitância x Tensão (em azul) e Capacitância ² x Tensão (laranja)	40
Figura 2.18: Eficiência quântica: Comportamento dos portadores de carga	43
Figura 2.19: Resposta espectral da célula de silício sobreposta ao espectro solar ..	44
Figura 2.20: Resistências série em uma célula solar	48
Figura 2.21: Efeito da resistência série na curva IxV [16]	48
Figura 2.22: Efeito da resistência paralela na curva IxV [16].....	49
Figura 2.23: Efeito da variação de irradiância na curva IxV [16]	51
Figura 2.24: Efeito da variação de temperatura na curva IxV [16].....	51
Figura 2.25: Definição de massa de ar (AM)	53

Figura 2.26: Distribuição espectral por comprimento de onda em três diferentes situações (adaptado de [40]).....	53
Figura 2.27: Irradiância espectral a) que atende a norma IEC904-3 e b) do sol artificial SOLSIM.....	55
Figura 2.28: Uniformidade do simulador solar.....	56
Figura 2.29: Imagens do Simulador Solar em uso	57
Figura 2.30: Software Solmetric para extração de curvas IxV e PxV [41]	58
Figura 2.31: Vista frontal do equipamento a) B1505A e b) 2612B	59
Figura 2.32: Modelagem analítica da curva IxV de um painel.....	61
Figura 2.33: Tela do simulador de curvas IxV	62
Figura 2.34: Fluxograma do processo de Newton Raphson	63
Figura 2.35: Indicação das regiões para extração de resistência série (R_s) e paralela (R_p) na curva IxV	66
Figura 2.36: Junção PN com tamanhos e resistências séries indicados.....	67
Figura 2.37: Densidade x Temperatura de um semiconductor extrínseco com dopagem de 10^{15} cm^{-3} [5].....	69
Figura 3.1: Método de 2 fios (Adaptado de [51])	72
Figura 3.2: Aplicação do método de 2 fios na célula monocristalina	72
Figura 3.3: Método de 4 fios (Adaptado de [51])	73
Figura 3.4: Comparação de resultados dos métodos.....	74
Figura 3.5: Montagem da célula em fenolite.....	76
Figura 3.6: Circuito esquemático com a resistência de contato comum.....	77
Figura 3.7: Montagem da célula monocristalina para extração de pontos I e V	78
Figura 3.8: Organograma para extração do melhor ajuste.....	79
Figura 3.9: Curvas da célula monocristalina para o cálculo de resistência série, padrão STC extraídas com o a) <i>Source-Meter</i> e b) Analisador de parâmetros.....	85
Figura 3.10: Curvas da célula monocristalina para o cálculo do fator de correção, padrão STC extraídas com o a) <i>Source-Meter</i> e b) Analisador de parâmetros.....	85
Figura 3.11: Comparação entre equipamentos para a célula monocristalina.....	87
Figura 3.12: Curvas para I_0 e n extraídos do ajuste exponencial da célula monocristalina	90
Figura 3.13: Curvas para I_0 e n extraídos da curva no escuro da célula monocristalina	90

Figura 3.14: Curva com menor <i>RMSE</i> para uma exponencial da célula monocristalina	91
Figura 3.15: Ajuste para 1 exponencial da célula monocristalina com o <i>software 2/3 Diode Fit</i>	91
Figura 3.16: Erro residual entre curva medida e curva ajustada com o <i>software</i>	92
Figura 3.17: a) Curva <i>IxV</i> na polarização direta e b) fator de idealidade pela tensão aplicada para as células comparadas [56]	94
Figura 3.18: Comparação de curvas ao alterar apenas a) I_0 e b) n	95
Figura 3.19: Curvas para I_0 e n extraídos do ajuste exponencial da célula policristalina.....	96
Figura 3.20: Curvas para I_0 e n extraídos da curva no escuro da célula policristalina	96
Figura 3.21: Curva com menor <i>RMSE</i> para uma exponencial da célula policristalina	97
Figura 3.22: Ajuste para 1 exponencial da célula policristalina com o <i>software 2/3 Diode Fit</i>	98
Figura 3.23: Erro residual entre curva medida e curva ajustada com o <i>software</i>	98
Figura 3.24: Ajuste realizado com o ajuste exponencial para extração de I_0 e n da célula policristalina	100
Figura 3.25: Mapa da uniformidade da iluminação com a indicação da área ocupada pelo fragmento de célula [62]	101
Figura 3.26: Curvas para I_0 e n extraídos do ajuste exponencial da célula pequena monocristalina	102
Figura 3.27: Curvas para I_0 e n extraídos da curva no escuro da célula pequena monocristalina	102
Figura 3.28: Curva com menor <i>RMSE</i> para uma exponencial da célula pequena monocristalina	103
Figura 3.29: Erro residual entre curva medida e curva ajustada com o <i>software 2/3 Diode Fit</i>	103
Figura 3.30: Comparação das curvas extraídas em células de tamanhos diferentes	104
Figura 3.31: Curvas a) <i>IxV</i> e b) semilogarítmica das células monocristalinas pequena e grande	104

Figura 3.32: Alteração do comportamento da curva diante variação dos parâmetros	107
Figura 3.33: Esquemático da célula solar no PSpice® para uma exponencial	108
Figura 3.34: Comparação entre a simulação a partir do método não-iterativo e a curva da célula grande monocristalina obtida com o medidor-fonte.....	109
Figura 3.35: Comparação entre a simulação a partir do método iterativo e a curva da célula grande monocristalina obtida com o medidor-fonte	109
Figura 3.36: Comparação entre a simulação a partir do método não-iterativo e a curva da célula pequena monocristalina medida com o medidor-fonte (célula pequena)	110
Figura 3.37: Curvas I_xV da célula pequena monocristalina variando a) corrente de saturação reversa, b) fator de idealidade e c) resistência série	112
Figura 3.38: Curvas para I_{01} , I_{02} , n_1 e n_2 extraídos do ajuste exponencial da célula grande monocristalina	115
Figura 3.39: Curvas para I_{01} , I_{02} , n_1 e n_2 extraídos da curva no escuro da célula grande monocristalina	115
Figura 3.40: Curva com menor <i>RMSE</i> calculado para modelagem de duas exponenciais da célula grande monocristalina	116
Figura 3.41: Comparação dos resultados obtidos com ajustes de uma e duas exponenciais	117
Figura 3.42: Erro residual entre curva da célula grande monocristalina medida e ajustada com duas exponenciais através do <i>software 2/3 Diode Fit</i>	117
Figura 3.43: Curvas para I_{01} , I_{02} , n_1 e n_2 extraídos do ajuste exponencial da célula policristalina.....	118
Figura 3.44: Curvas para I_{01} , I_{02} , n_1 e n_2 extraídos da curva no escuro da célula policristalina.....	118
Figura 3.45: Curva com menor <i>RMSE</i> para duas exponenciais da célula policristalina	119
Figura 3.46: Ajuste exponencial realizado com o <i>cftool</i> para a extração de I_{01} , I_{02} , n_1 e n_2	120
Figura 3.47: Erro residual entre curva da célula policristalina medida e ajustada para duas exponenciais com o <i>software 2/3 Diode Fit</i>	120
Figura 3.48: Curvas I_xV da célula monocristalina da forma que foram extraídas sob diferentes iluminações.....	122

Figura 3.49: Comparação entre curva extraída no sol artificial e sol natural da célula de silício monocristalino	122
Figura 3.50: Suposições de temperaturas da extração da curva no sol real	124
Figura 3.51: Mobilidade de material intrínseco tanto para elétrons quanto para buracos.	126
Figura 3.52: Mobilidade x concentração de impurezas para a) elétrons e b) buracos	127
Figura 3.53: Mobilidade x temperatura para a) elétron como majoritário e b) buraco como majoritário	127
Figura 3.54: Concentração de portadores intrínsecos pela temperatura.....	129
Figura 3.55: Curvas da resistividade x temperatura para material a) tipo N e b) tipo P	130
Figura 3.56: Resistividade de cada material que compõe a célula solar simulada..	132
Figura 3.57: Resistência série de um modelo de célula solar	132
Figura 3.58: Bordas das células a) grande e b) pequena.....	137

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Parâmetros para a fórmula de mobilidade das impurezas	46
Tabela 2.2: Dados de células utilizadas em testes.....	54
Tabela 2.3: Classificação do Simulador Solar referente à área ocupada pela célula	56
Tabela 3.1: Resultados obtidos na extração de parâmetros para a célula monocristalina	93
Tabela 3.2: Resultados obtidos na extração de parâmetros para a célula policristalina.....	99
Tabela 3.3: Resultados dos parâmetros para diferentes tamanhos de célula	106
Tabela 3.4: Comparação de parâmetros entre as curvas medida e simulada no <i>PSpice</i> ®.....	110
Tabela 3.5: Resultados obtidos na extração de parâmetros	114
Tabela 3.6: Comparação de valores <i>RMSE</i> para uma e duas exponenciais da célula monocristalina	116
Tabela 3.7: Erros calculados da célula monocristalina.....	125
Tabela 3.8: Erros calculados da célula policristalina	125
Tabela 3.9: Parâmetros do modelo trabalhado em Luque [17] e utilizado nas simulações	131

1. INTRODUÇÃO

Fontes renováveis de energia têm sido alvo de atenção pela sociedade e se tornado uma necessidade para um mundo carente de energia. O momento em que vivemos também se faz bastante propício para tais estudos. A crise hídrica em reservatórios do país tem ameaçado a distribuição de eletricidade e, conseqüentemente, prejuízos incalculáveis, principalmente em indústrias e no comércio.

Apesar de vantajosas, para o uso destas energias alternativas se fidelizar, ainda é preciso vencer empecilhos que as tornam subutilizadas. Razões econômicas, incertezas técnicas, desprovimento de estratégias governamentais, dentre outros fatores, criam obstáculos para a utilização em grande escala.

A energia solar fotovoltaica vem se desenvolvendo incessantemente, tanto em nível tecnológico quanto no padrão comercial e é, sem dúvida, uma das alternativas mais práticas e exequíveis. Dentre suas vantagens, pode-se destacar a insolação na maior parte do planeta, sua modularidade (tornando possível seu dimensionamento), a economia de combustível fóssil, redução de emissão de gases do efeito estufa, além de ser conhecida como energia renovável e limpa. Essa última, por sua vez, enquanto consumo. Para a produção de células e painéis, passa-se por etapas que produzem resíduos poluentes, descaracterizando a expressão.

A principal alternativa para se aproveitar a energia provida do sol é através de painéis fotovoltaicos, convertendo-a diretamente em eletricidade. A modularidade de painéis é uma prática comum que permite abranger a potência dos sistemas instalados à rede. Juntamente ao arranjo de painéis, encontra-se o uso de inversores para geração de corrente alternada de acordo com a tensão desejada e bancos de bateria que completam o sistema como acumuladores de energia gerada. Para implementar o sistema, o uso de rastreadores solares (rastreadores de ponto de máxima potência) fazem do sistema ainda mais potente, por captar sempre a melhor inclinação dos painéis em relação à angulação solar [1, 2].

O alto custo do kWh é ainda a principal razão para a lenta expansão da energia solar, quando comparado com as restantes fontes de energia elétrica. Tanto a tecnologia exercida na fabricação de células quanto o material utilizado, apresentam alto custo e/ou baixa eficiência de conversão. Diversos estudos buscam o

desenvolvimento de células com diferentes materiais que podem apresentar eficiências superiores àquelas de silício (material tipicamente utilizado). Porém esses apontam custos mais elevados de fabricação, limitando sua produção. O que leva a concluir que demais tecnologias empregadas para tal prática podem não apresentar boa relação custo/eficiência.

O Brasil dispõe de grandes reservas de quartzo e sílica, materiais essenciais para a produção de silício metálico, insumo precípuo da fabricação de células solares. Além disso, é um país com altíssimo potencial para instalações de sistemas PV, devido à sua privilegiada localização, possuindo um alto índice de insolação anual de norte a sul (figura 1.1). Porém, o que se pode observar é que todo esse potencial do país não é explorado, contrapondo o que se vê em países europeus (como a Alemanha), onde governos investem com incentivos financeiros para o uso da energia solar, mesmo apesar da redução de apoio a novas plantas fabris e de geração [1].

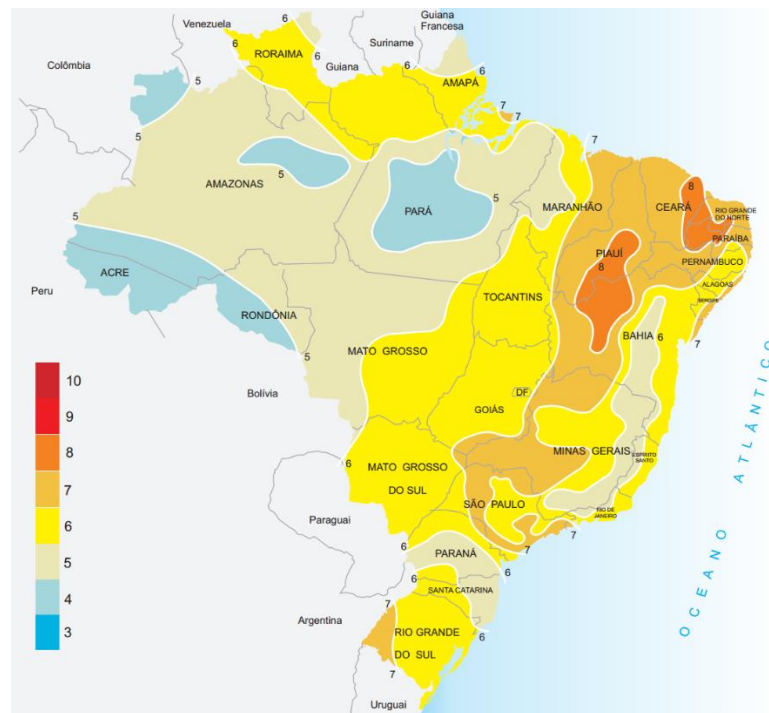


Figura 1.1: Mapa de insolação do Brasil, média anual de horas/dia [2]

Apesar de considerada energia limpa, a produção de célula solar é ainda uma fase de alto grau poluente e o principal motivo para o encarecimento do produto final. Diversos grupos no Brasil e no mundo pesquisam métodos alternativos, tanto no processo em si quanto no material utilizado nas células para a redução de custos e melhorias no impacto ambiental [3, 4].

O intuito deste trabalho é a caracterização elétrica de células em laboratório e sob iluminação solar, para levantamento de desempenho, com resultados que visam subsidiar um modelo mais aprimorado de células de forma a melhor atender às necessidades de uma usina fotovoltaica.

Para esse fim, o trabalho passa por estudos de células solares das principais tecnologias, sendo elas as de silício monocristalino e policristalino. É preciso também identificar as principais ferramentas utilizadas na extração dos parâmetros, tais como *softwares* e equipamentos que consigam levantar curvas $I \times V$ (corrente-tensão), $P \times V$ (potência-tensão) e $C \times V$ (capacitância-tensão). Na simulação solar em ensaios laboratoriais, utiliza-se de um sistema de iluminação artificial com plataforma termostalizada em circuito fechado para levantamento de dados extraídos das curvas baseadas em modelos semi-empíricos. Já na área externa, a própria iluminação solar possibilita obter as medidas necessárias que especificam os dispositivos. Com tais resultados, busca-se a consolidação da caracterização e extração de parâmetros, podendo então avaliar o desempenho dos componentes fotovoltaicos.

No capítulo 2 apresentam-se os conceitos dos métodos elétricos, optoeletrônicos e físicos abordados, além dos recursos teóricos utilizados, com descrição dos principais parâmetros, equipamentos e células que compõem todo o escopo do texto.

No terceiro capítulo são apresentados os resultados e as análises do mesmo. Ademais, apresenta-se uma mesclagem do que foi obtido, mostrando a relação de todos os testes praticados.

As conclusões são apresentadas no capítulo 4, juntamente com propostas para futuros trabalhos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O silício é o semicondutor mais utilizado pela indústria eletrônica. Diversos fatores justificam essa escolha, tais como: ser o segundo material mais abundante da Terra, atrás apenas do oxigênio; apresentar um excelente conjunto de propriedades (tais como facilidade de purificação, de oxidação, dopagem confiável, dentre outras) apropriado para aplicações eletrônicas; e ser um dos semicondutores mais estudados.

Para entender o processo de geração de energia em uma célula solar, é importante compreender características de semicondutores, como os efeitos causados pelos fótons que justificam o comportamento fotovoltaico dos dispositivos. Isto engloba os principais tipos de células disponíveis no mercado (ênfase para células de silício), as técnicas de aproximação de uma célula real por um modelo e parâmetros que estruturam a célula e caracterizam seu comportamento.

Um dos focos do trabalho é a metodologia empregada para encontrar os parâmetros característicos internos do dispositivo fotovoltaico. Para tanto, é preciso analisar situações que comprometem sua eficiência, como efeitos causados pela temperatura. A variação da temperatura é capaz de modificar a mobilidade dos portadores de carga, por exemplo, parâmetro que influencia na resistividade e, conseqüentemente, na resistência série da célula. Esta análise será realizada no capítulo corrente, que também apresenta informações de equipamentos e *softwares* utilizados no decorrer de todo o processo.

Por fim, são apresentados de forma detalhada os testes aplicados no trabalho, fechando a parte teórica que fundamentará os resultados práticos do capítulo 3.

2.1. Interação Fóton – Semicondutor

O efeito fotovoltaico é o principal fenômeno que realiza a conversão de energia solar em eletricidade, por intermédio de materiais semicondutores. Para compreender esse efeito, é preciso analisar algumas características primordiais da estrutura dos materiais.

Todo átomo apresenta níveis de energia discretos (quantizados) que um elétron pode ocupar. Recebendo quantidade suficiente de energia, o elétron pode passar de um nível para outro mais elevado. Os átomos, ao serem aproximados, resultam no desdobramento dos níveis de energia em vários. O conjunto de níveis desdobrados

cria o que se chama de *banda de energia*, considerada contínua pela proximidade dos níveis. A figura 2.1 apresenta o conceito de bandas, comparando o comportamento de um, dois e N átomos.

Entre duas bandas de energia subsequentes pode haver faixas de valores proibidos de energia. Essas faixas recebem o nome de *bandas proibidas* (ou *bandgap*) e suas larguras (dadas em elétron-volt – eV), podem variar de material para material. Faz-se necessário que o elétron então adquira uma energia maior que a da faixa para saltar de uma banda para outra. Silício (Si), germânio (Ge) e os compostos arseneto de gálio (GaAs), fosfeto de gálio (GaP) e sulfeto de cádmio (CdS) são exemplos de materiais semicondutores em que a banda de valência é separada por um *bandgap* da banda de condução. A chamada banda de valência é a última banda onde os elétrons estão ligados aos átomos e não contribuem para a condução elétrica no material. Ao adquirir energia para saltar para a próxima banda (de condução), os elétrons se tornam disponíveis para condução, podendo se mover no cristal. Esses são os elétrons de condução. Simultaneamente, cada elétron que se torna disponível libera um buraco na banda de valência que atua como portador de carga positiva. Seu fluxo irá percorrer o caminho inverso ao das cargas negativas (elétrons) e assim contribui também para a condução.

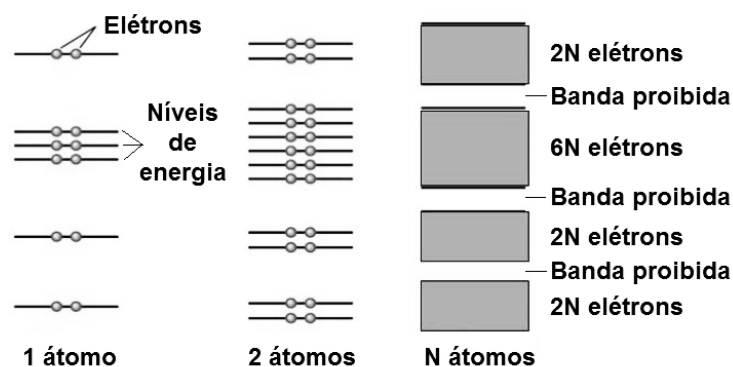


Figura 2.1: Níveis e bandas de energia

O principal aspecto dos semicondutores intrínsecos (apenas átomos do próprio material), é apresentarem características de um isolante quando em zero Kelvin (0 K - zero absoluto) e, ao aumentar a temperatura, se comportarem mais proximamente a um condutor. Fisicamente, a temperaturas baixíssimas, possuem uma banda de condução depleta de elétrons enquanto sua banda de valência está totalmente

preenchida. Com o aumento da temperatura, alguns elétrons recebem a energia suficiente para trocar de banda, alcançando a banda de condução.

Os materiais semicondutores podem ser divididos em duas categorias: Semicondutor de *gap* direto e semicondutor de *gap* indireto. A figura 2.2 apresenta o diagrama de bandas energia-momento de dois materiais diferentes, exemplificando as estruturas do semicondutor. No primeiro, o chamado *gap* direto, é assim determinado por apresentar a base da banda de condução coincidente com o topo da banda de valência, tornando a transição de elétrons diretamente induzida por fótons. Já no *gap* indireto, o vale e o pico das bandas não estão alinhados, sendo necessário não só fótons, mas também fônons para que os elétrons mudem de banda.

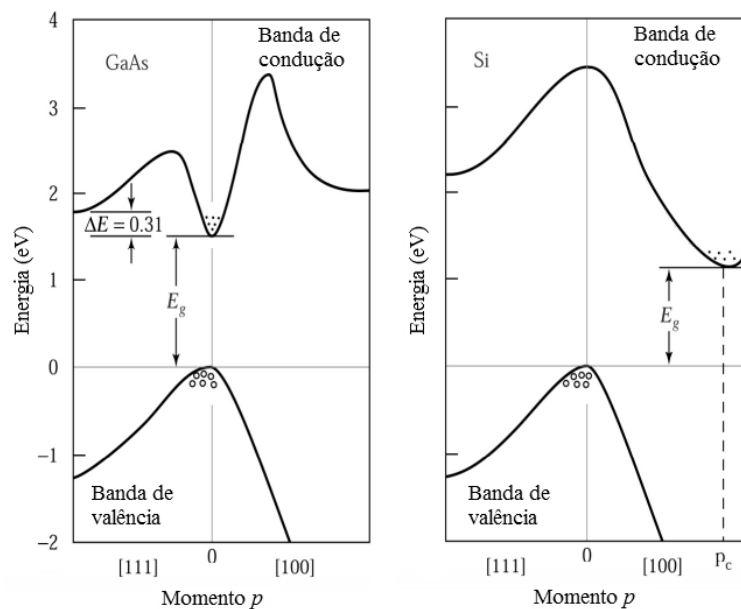


Figura 2.2: Diagrama energia-momento do arseneto de gálio (a) e do silício (b) [5]

Ao introduzir impurezas nos semicondutores (figura 2.3), pode-se criar novos níveis de energia dentro da banda proibida, facilitando a transição de elétrons desse nível para a banda de condução reduzindo a energia mínima para essa transferência. Átomos do material semicondutor são substituídos por átomos de materiais presentes na coluna VA da tabela periódica, como As, P ou Sb (arsênio, fósforo e antimônio) ou na coluna IIIA, como B (boro). Os átomos das impurezas da quinta coluna (impurezas doadoras) possuem cinco elétrons na camada de valência, última camada atômica ocupada, e, ao realizar as ligações covalentes com o silício (tetraivalente, isto é, quatro elétrons na última camada), permite que um elétron fique em excesso, como indicado na Figura 2.3 (a) em vermelho, contribuindo para a condução. Já os átomos da terceira

coluna (impurezas aceitadoras) possuem um elétron a menos, e, após as ligações covalentes, uma delas fica incompleta, liberando um buraco, representado em verde na figura 2.3. O buraco (ou lacuna) é tratado como portador de carga, tal qual o elétron, porém positiva. Esses semicondutores que receberam a introdução das impurezas passam a ser semicondutores extrínsecos do tipo N (impurezas pentavalentes) e tipo P (impurezas trivalentes), respectivamente.

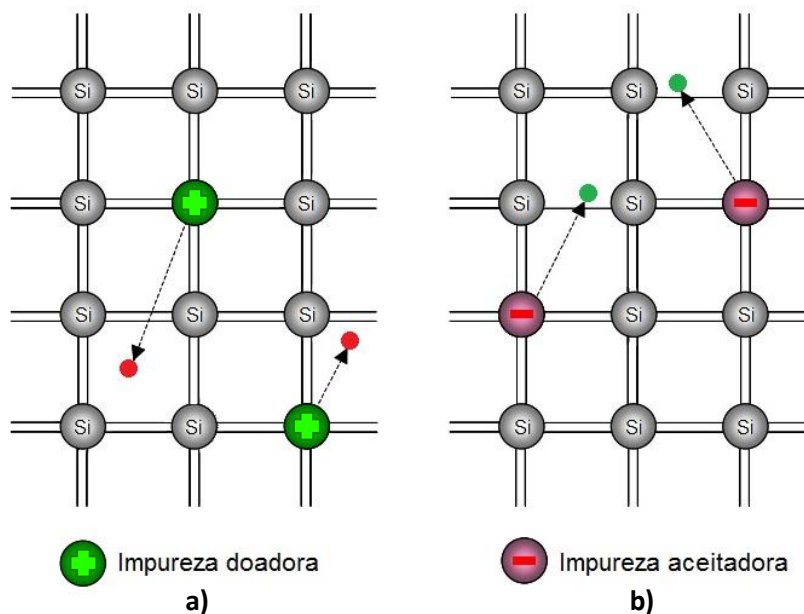


Figura 2.3: Ligações químicas do material semicondutor extrínseco

Ao se criar uma interface entre uma região do tipo P com uma região do tipo N, forma-se a junção PN, estrutura primária de uma célula solar e muito utilizada na microeletrônica. No instante da formação da junção origina-se uma corrente de difusão de elétrons presentes no tipo N para o tipo P e de buracos no sentido contrário. O deslocamento de portadores de carga deixa no centro da junção átomos ionizados fixos em uma zona que recebe o nome de zona de depleção ou região de depleção. Tal nome se deve à ausência de portadores de carga na extensão composta por tais íons, sendo que, íons positivos encontram-se na região tipo N enquanto íons negativos na região tipo P.

É na região de depleção (também conhecida como barreira de potencial) que se origina um campo elétrico que separa os portadores, movendo os buracos no sentido do campo e os elétrons no sentido contrário. Assim é gerada a chamada corrente de deriva que circula no sentido contrário à corrente de difusão (figura 2.4).

Sem polarizar a junção, as correntes de sentidos opostos tendem a se igualar, fazendo com que as cargas entrem em equilíbrio. É esse equilíbrio de cargas que determina a espessura da região.

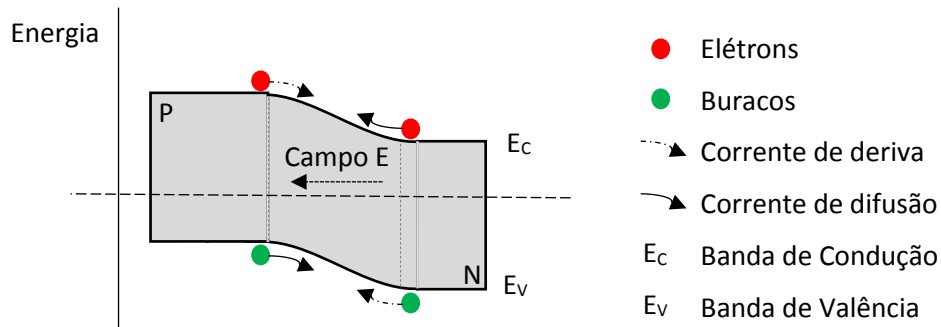


Figura 2.4: Sentido das correntes de difusão e deriva

Quando um elétron adquire a energia de *gap* e salta para a banda de condução, libera um buraco na banda de valência. A essa situação, dá-se o nome de geração de par elétron-buraco. Na figura 2.5 a geração é representada pelo número 1. O contrário também acontece, quando o buraco captura um elétron livre, realizando a recombinação (número 2). Em equilíbrio, o número de processos de geração e recombinação por unidade de tempo é igual. Para realizar a geração de par elétron-buraco, existem três possibilidades: térmica, óptica e polarização direta [5]. A possibilidade de junções semicondutoras gerarem pares através de fótons incidentes no material (número 3) é que permite a fabricação de células solares. Este, então, é o fenômeno denominado efeito fotovoltaico.

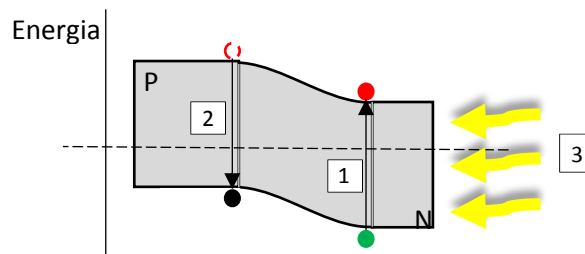


Figura 2.5: Fóton incidindo no material

Uma corrente elétrica chamada corrente fotogerada ou fotocorrente é produzida a partir desse fenômeno. A absorção de um fóton realiza a conversão optoeletrônica e faz com que o dispositivo receba o nome de fotodetector. Como exemplo temos os fotodiodos e as células solares.

Os estudos de fotodetectores podem ser divididos em duas classes: Detectores térmicos e detectores fotoelétricos [6]. O primeiro opera convertendo energia dos fótons em calor, enquanto o segundo, ao absorver fótons, resulta diretamente na geração de cargas móveis, produzindo a corrente elétrica. A absorção de um fóton requer conservação de energia e conservação de momento. Ao serem termicamente excitados, elétrons se deslocam para todas as direções a diferentes velocidades. Alguns elétrons estarão com energia ligeiramente maior ou igual à da banda proibida na direção correta atingindo assim a banda de condução por transições diagonais. Outros tantos, com energia consideravelmente maior que da *bandgap*, realizam a transição vertical, alcançando níveis pertencentes à banda de condução. Rapidamente, esses mesmos elétrons entram em equilíbrio energético com a rede cristalina e deslocam para níveis mínimos da banda de condução, através de um processo chamado termalização, e, pela conservação de momento, seus movimentos são transferidos para vibrações na rede (fônons), como visto na figura 2.6 para um material de *gap* indireto. A recombinação dos pares elétron-buraco é que apresenta maior dificuldade para tais materiais (linhas tracejadas na figura). Elétrons podem retornar à banda de valência emitindo fótons ou fônons. Por suas bandas estarem desalinhadas, essa recombinação requer a liberação de um fônon com energia e momento adequados. Isso permite uma maior permanência dos elétrons na camada de condução, ao mesmo tempo que se vê uma recombinação direta (transição vertical no eixo do momento) reduzida (pouca liberação de fótons).

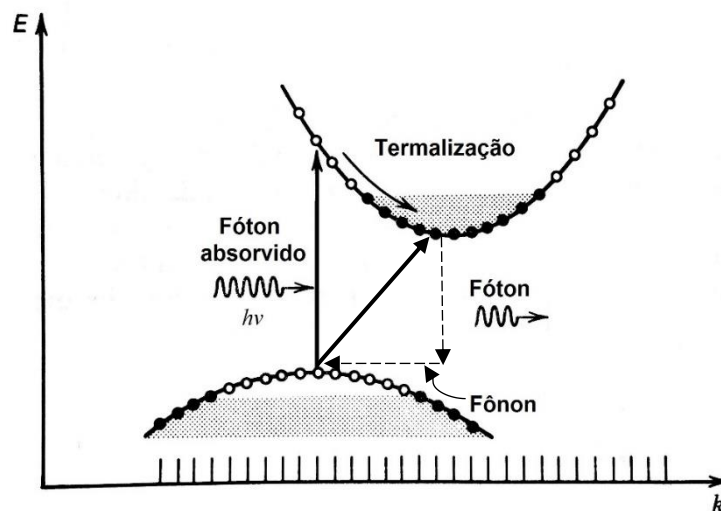


Figura 2.6: Fóton absorvido em um semicondutor de gap indireto (adaptado de [6])

A absorção do fóton pode acontecer em qualquer região ao redor da junção PN, vide figura 2.7. Os fótons incidentes são representados pela cor amarela, enquanto a exemplificação de comprimentos de onda azuis e vermelhos são representados por setas de suas respectivas cores. O coeficiente de absorção está diretamente relacionado ao comprimento de onda pertencente à faixa de luz, isto é, luz vermelha penetra a diferente profundidade que a luz azul, por exemplo.

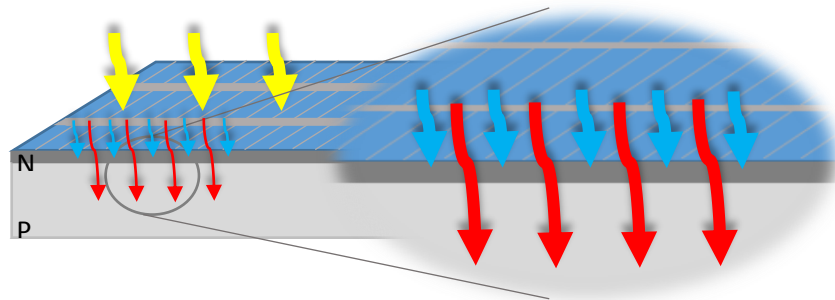


Figura 2.7: Penetração da luz em uma célula solar

O coeficiente de absorção é um parâmetro que praticamente independe da dopagem do material, mas se apresenta diferente para cada semiconductor. Seu valor indica quão fortemente um determinado fóton é absorvido logo que atinge o material. O fóton é menos energético quanto maior é seu comprimento de onda. A figura 2.8 exemplifica a relação do coeficiente de absorção pelo comprimento de onda do silício, indicando que o fóton azul, absorvido na superfície, é mais energético – maior valor do coeficiente de absorção - que o vermelho, que penetra ainda mais na junção.

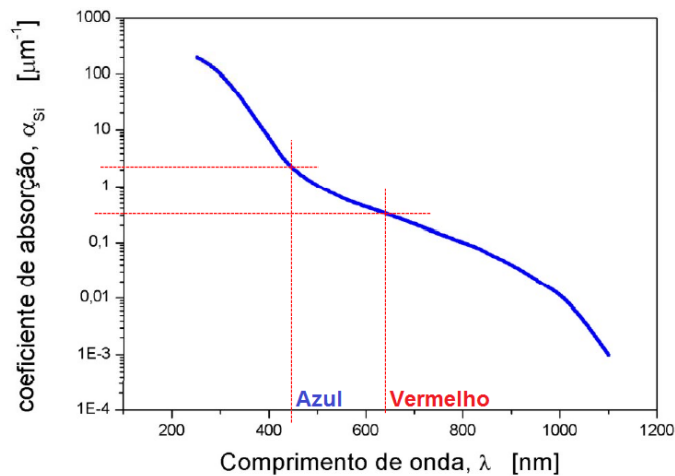


Figura 2.8: Coeficiente de absorção do silício

A região de depleção possui um campo elétrico gerado espontaneamente pela junção dos materiais, que separa os portadores de carga, acelerados em sentidos opostos (elétrons impulsionados para o lado n e os buracos para o lado p), gerando corrente. Fótons que possuem comprimentos de onda suficiente para alcançar essa região e ali serem absorvidos, geram pares elétron-buraco que são separados instantaneamente, contribuindo mais para a condução que fótons absorvidos em outras regiões do semicondutor. Pares gerados nas extremidades de um detector fotoelétrico podem ocorrer longe demais, a uma distância maior que o comprimento de difusão, para alcançar a região de depleção, por terem movimentos aleatórios e um determinado tempo livre médio antes de se recombinarem. Principalmente em célula solares, a junção dos materiais acontece muito próximo à superfície que sofre a incidência de luz. Portanto, é comum dizer que fótons absorvidos longe da superfície (no corpo do semicondutor) geram pares elétron-buraco que não conseguem chegar à região de depleção. Como visto na figura 2.7, pode-se perceber uma maior facilidade em absorver fótons azuis que vermelhos em uma célula solar, por estarem mais próximos da região.

2.2. Características de uma Célula Solar

O mercado mundial de células fotovoltaicas é dominado por células de silício [2]. É necessário que esse silício passe por um processo de purificação para que possa ser utilizado na fabricação das mesmas. Na indústria eletrônica é preciso que o silício tenha um grau de pureza equivalente a 99,9999999%, chamado de silício grau eletrônico. Para a indústria fotovoltaica geralmente espera-se um mínimo de 99,9999%, recebendo o nome de grau solar [2].

2.2.1. Tipos de Célula

O silício utilizado em células solares pode ser encontrado em três tipos, de acordo com sua tecnologia de fabricação.

- Células de silício monocristalino: Células mais eficientes e também as mais caras. Esse silício é obtido pelo método de *Czochralski* (Si-Cz) ou pelo método *Float Zone* (Si-Fz), utilizando silício ultrapuro, que garante alta

confiabilidade do produto, além de uma alta eficiência. Sua aparência uniforme torna fácil o reconhecimento da célula monocristalina (figura 2.9a). Este tipo de célula é considerado como primeira geração, baseada em junções PN [1].

- Células de silício policristalino: Os cristais de silício neste caso, são fundidos e solidificados preservando a formação de múltiplos cristais. Por apresentar imperfeições nos cristais, sua eficiência é menor em relação à monocristalina e, por não passarem pelo processo de monocristalização, à exemplo do processo Czochralski, seu custo também é inferior (figura 2.9b). Assim como a célula c-Si, também são células de primeira geração.



Figura 2.9: Células a) monocristalina e b) policristalina

- Células de silício amorfo: Silício amorfo por si só (não hidrogenado) é inadequado para dispositivos fotovoltaicos e é caracterizado pela sua desordem estrutural. Um elevado número de defeitos provoca a distorção da rede cristalina e ligações pendentes que podem se recombinar com elétrons livres e prejudicar o fluxo de corrente através da célula. Ao introduzir átomos de hidrogênio, esses irão compensar as ligações flutuantes, passivando a superfície. Sua fabricação é mais barata do que o silício cristalino, mas também são menos eficientes. Apresenta baixa temperatura de processo de fabricação e uma estrutura muito fina, que recebe o nome de filmes finos, por esse motivo entram na segunda geração de células. Essas características possibilitam a construção de células

flexíveis, mais leves e até inquebráveis. Desta forma, os negócios na área fotovoltaica se tornam atrativos e versáteis.

Outros tipos de células também são encontrados no mercado, como o exemplo de célula multijunção (também da segunda geração de células). Sua principal característica é a composição de diversas junções PN de diferentes materiais semicondutores, o que produz corrente elétrica gerada em diferentes comprimentos de onda e, conseqüentemente, aumenta a eficiência.

Novos estudos buscam a criação de células solares com materiais semicondutores diversos, na tentativa de manter ou elevar a eficiência na fotoconversão, porém ainda não são economicamente viáveis para produção em larga escala. Células convencionais feitas com arseneto de gálio (GaAs) podem atingir uma eficiência teórica de 25%. Outras, feitas de telureto de cádmio, podem atingir uma eficiência de até 21%, valor próximo das células de disseleneto de cobre, gálio e índio, CIGS e CIGSS (20,5%). Apesar disso, essas tecnologias em geral possuem custo de fabricação mais elevado que as de silício [7-10].

A terceira geração de células é marcada por células como as orgânicas, possuem um custo menor de produção (filmes finos) e menores coeficientes de absorção do espectro da luz solar, podendo ser mais finas no processo de fabricação. Porém essa tecnologia possui limitações, como a baixa eficiência de fotoconversão (comparado a c-Si), *bandgap* elevado e tempo de vida útil mais limitado [11]. Células do tipo *dye-sensitized* ou Gratzel (corantes) são as mais eficientes da terceira geração podendo ser competitiva com tecnologias tradicionais [12, 13].

A figura 2.10 retrata o avanço das tecnologias e da eficiência de conversão de células estudadas ou em estudos atuais de diferentes gerações [15].

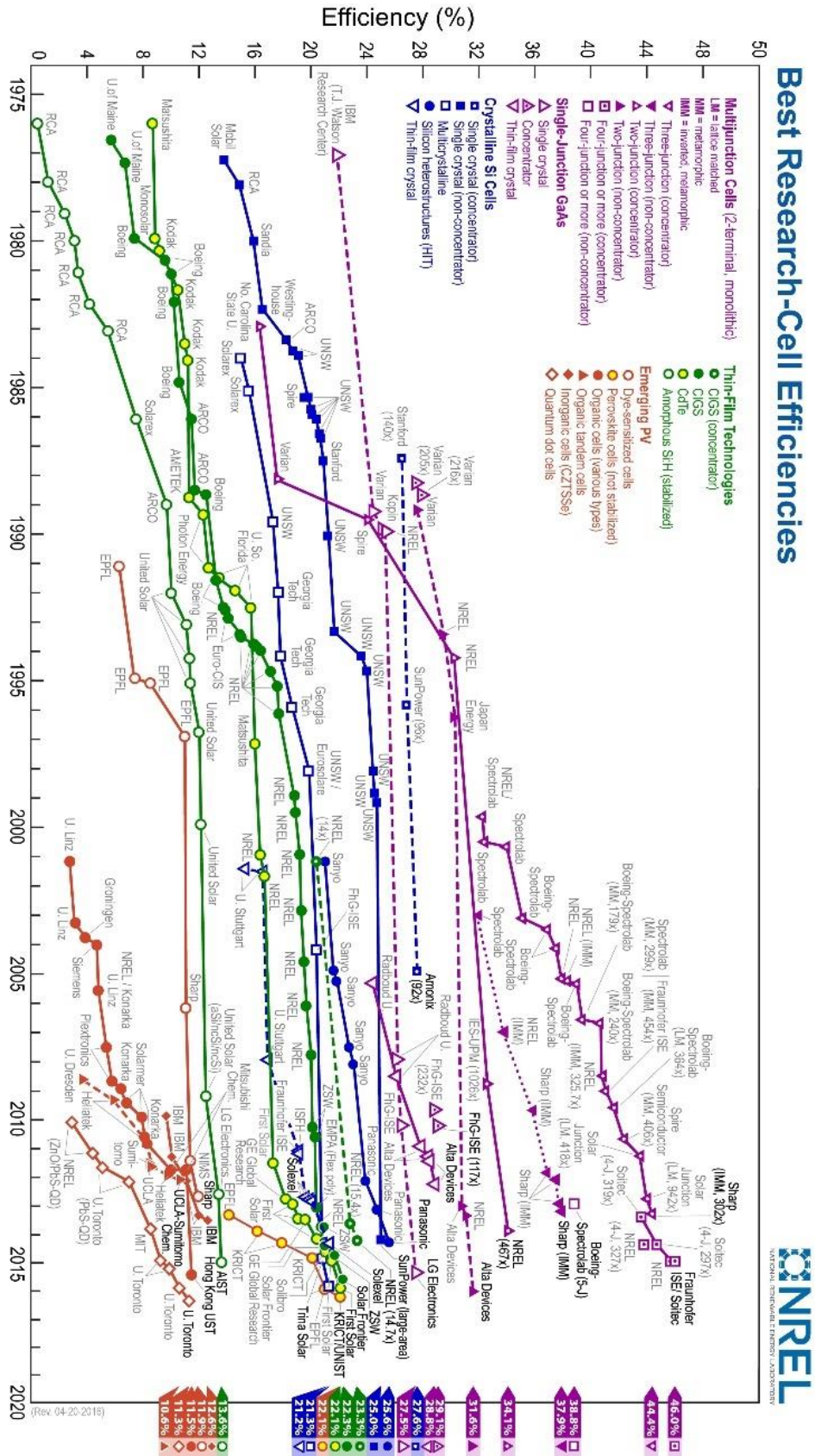


Figura 2.10: Eficiência de células em relação à sua tecnologia de fabricação Fonte: [15] Acessado em 4 de julho 2016

2.2.2. Modelagem Analítica de Células

A maneira mais simples de representar um circuito de uma célula solar é apresentando uma fonte de corrente paralela a um diodo, como mostra a figura 2.11. Essa fonte corresponde à corrente foto gerada enquanto o diodo é o representante da junção PN, base do circuito.

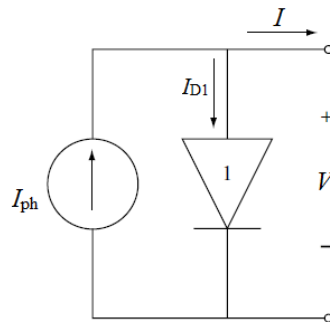


Figura 2.11: Circuito simples que representa uma célula solar

O circuito pode ser descrito matematicamente pela própria lei de Kirchhoff, sendo que a corrente no diodo é representada pela equação de Shockley (2.1).

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V}{k \cdot T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Onde I_{ph} é a corrente foto gerada, I e V são, respectivamente, corrente e tensão sobre a junção PN, I_0 é a corrente de saturação reversa, q é a carga do elétron, k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta.

A equação (2.1) representa apenas o mecanismo de difusão dos portadores de carga através da junção e, embora seja uma boa representação geral para o dispositivo, não leva em consideração perdas encontradas em um modelo experimental. Para compensar tais perdas, o fator de idealidade (n) é introduzido na equação e será melhor interpretado no próximo tópico.

Efeitos parasitas também podem ser observados no experimento, causados especialmente por resistências dos materiais e nas ligações da célula fotovoltaica. Elas reduzem a eficiência dissipando a potência. Analisando o novo circuito da figura 2.12 (linhas sólidas), novamente pela lei de Kirchhoff, pode-se descrever matematicamente como apresentado na equação (2.2).

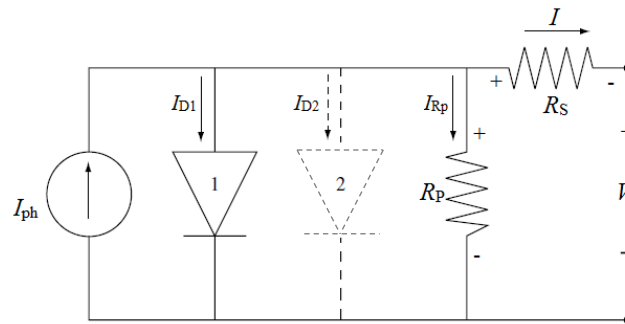


Figura 2.12: Circuito completo com uma (linhas sólidas) ou duas (acrescido da linha tracejada) exponenciais.

Onde R_S é a resistência série e R_P é a resistência paralela. R_S existe como uma soma de resistências, resultante da lâmina do silício (*wafer*), contatos metálicos e junção metal-semicondutor. Já R_P é causada por correntes de fuga, pontos de curto-circuito na junção e impurezas na célula. Para a equação, a corrente que circula pela resistência paralela (I_{Rp}) pode ser representada pela regra simples de V_{Rp}/R_p , onde V_{Rp} é dado pela soma da queda de tensão na resistência série somada da tensão sobre a junção.

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_S}{R_P} \quad (2.2)$$

Outra alternativa de circuito utilizada para analisar separadamente as correntes de geração-recombinação e de difusão, também representada na figura 2.12, é o modelo de duas exponenciais (ou dois diodos), onde cada diodo é atribuído a uma corrente, o primeiro atribuído à de difusão e o segundo à de deriva. Nesta representação considera-se todas as perdas. Isto se torna vantajoso para experimentos na área de fotovoltaicos, uma vez que quão mais elaborado seja o modelo, mais próximo do real se aproxima. Sua diferença no modelo elétrico para o anterior é o aparecimento de mais um diodo em paralelo, descrito na equação (2.3).

$$I = I_{ph} - I_{01} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{n_1 \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - I_{02} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{n_2 \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_S}{R_P} \quad (2.3)$$

Onde I_{01} é a corrente de saturação reversa do diodo de difusão, I_{02} é a corrente de saturação reversa do diodo de deriva e n_1 e n_2 são seus respectivos fatores de idealidade.

2.2.3. Associação de células e painéis fotovoltaicos

Com o intuito de se conseguir um melhor desempenho dos dispositivos fotovoltaicos, esses podem ser arranjados em série, paralelo ou misto, sejam células ou painéis solares. As células de silício cristalino apresentam tensões baixas (em torno de 0,6 V), insuficiente para alimentar a maioria das cargas. Suas associações permitem adquirir tensões e correntes desejadas. Dentre as possibilidades de associações temos:

- Associação em série (figura 2.13): Associação em que o anodo de cada célula é ligado no catodo da seguinte. Da mesma maneira, painéis também podem ser ligados em série. As tensões dos dispositivos são somadas e a corrente elétrica que percorrerá o circuito é a mesma, ou simplesmente multiplica-se o valor da tensão pelo número de células (ou painéis) em série. Caso os dispositivos sejam diferentes, ou estejam diferentemente iluminadas, a célula de menor capacidade de geração de corrente será quem determinará a corrente do circuito. Esse tipo de montagem (com diferentes células) não é recomendada pois pode ocasionar superaquecimento do sistema;
- Associação em paralelo (figura 2.14): Ao contrário do que se obtém na associação série, em paralelo tem-se a soma das correntes de cada célula. Pode encontrar o resultado também através da multiplicação do número de células (ou painéis) em paralelo pela corrente. Neste caso a tensão pouco se altera. A ligação é feita unindo os anodos de todos os dispositivos assim como os catodos.

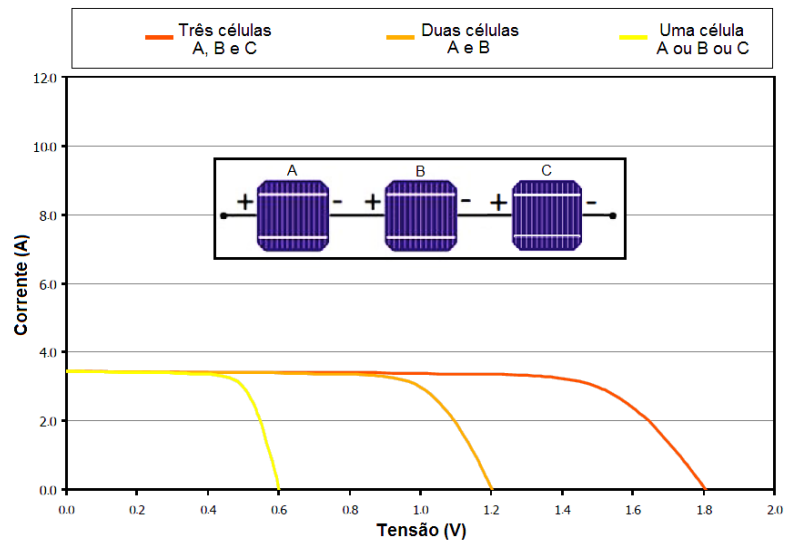


Figura 2.13: Efeito na curva $I \times V$ de células associadas em série (Adaptado de [16])

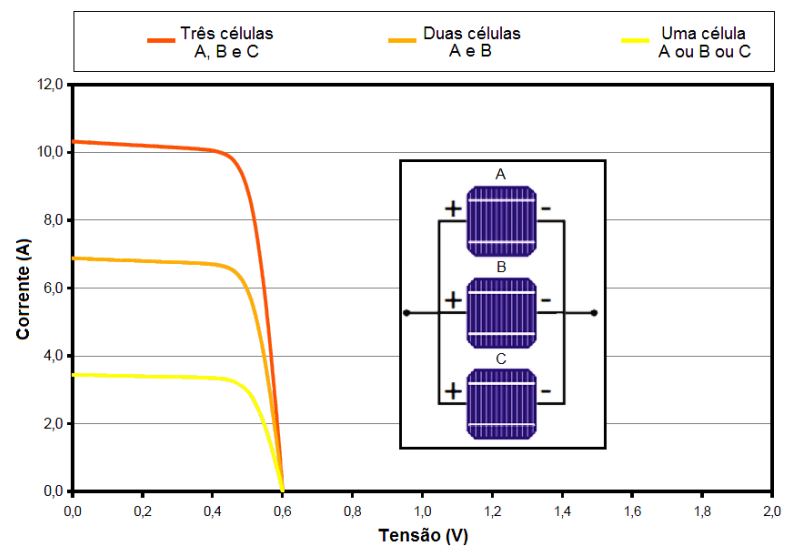


Figura 2.14: Efeito na curva $I \times V$ de células associadas em paralelo (Adaptado de [16])

2.2.4. Curvas Extraídas

As curvas extraídas de células fotovoltaicas (ou painéis) representam graficamente o comportamento do dispositivo diante da modelagem matemática aplicada. É a melhor maneira de avaliar o desempenho dos dispositivos, principalmente através da curva característica $I \times V$, uma vez que, a partir da curva, pode-se extrair diversos parâmetros fundamentais.

O comportamento de uma célula no escuro é exatamente o mesmo de um diodo, o que faz com que suas curvas $I \times V$ sejam extremamente semelhantes.

Uma vez com a célula iluminada, a curva irá apresentar o mesmo aspecto, porém cortando o eixo Y em um valor correspondente ao da corrente fotogerada, não mais próximo ao zero. Para melhorar visualmente sua curva, o valor é transposto e, ao invés de compor o quarto quadrante do plano cartesiano, passa a pertencer ao primeiro quadrante (figura 2.15a). Importante observar que as curvas são parametrizadas com a irradiância e a temperatura nas quais foram obtidas.

Dos mesmos dados, pode-se obter a curva PxV, potência pela tensão, já que a potência depende diretamente da corrente e tensão (figura 2.15b).

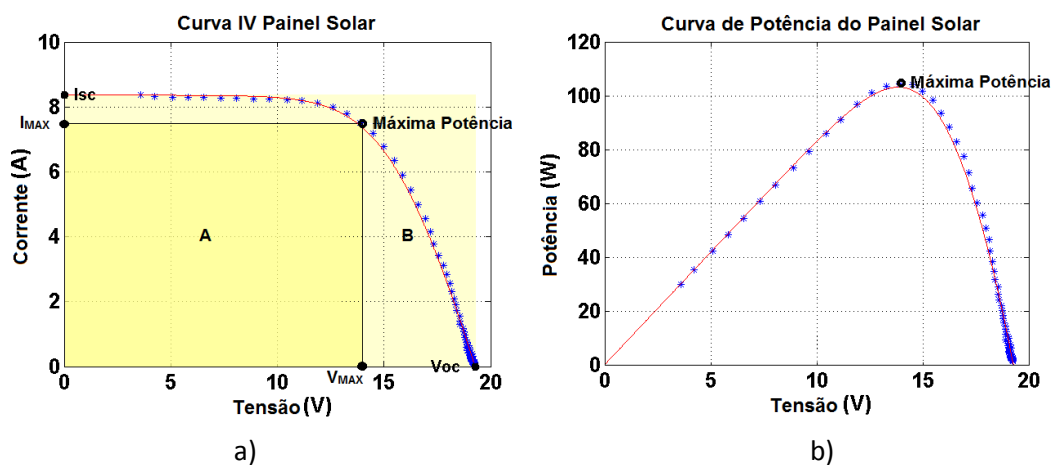


Figura 2.15: Curvas características a) IxV e b) PxV com parâmetros indicados

Outra curva importante para auxílio na extração de parâmetros das equações (2.1), (2.2) e (2.3) é a curva logarítmica gerada a partir da curva no escuro da célula solar (figura 2.16). Ao linearizar a curva, a mesma pode ser dividida em basicamente três regiões, que descrevem as três partes da equação (2.3): a corrente de difusão, a corrente de geração-recombinação e a queda nas resistências. Em uma modelagem de duas exponenciais, as inclinações de cada região fornecem as correntes de saturação reversa, os valores dos fatores de idealidade (para uma ou duas exponenciais) e as resistências série e paralela. As equações (2.1) e (2.2) também podem ter seus valores obtidos da curva logarítmica, porém as inclinações deverão ser aproximadas para apenas uma e, assim, extrair os valores devidos.

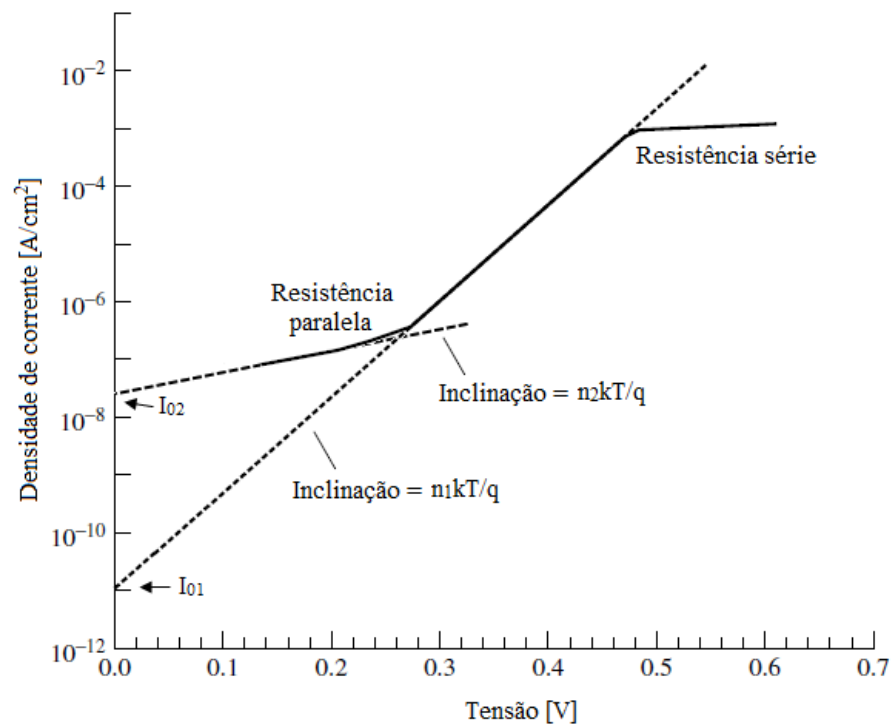


Figura 2.16: Curva logarítmica para extração de parâmetros (Adaptado de [17])

A curva apresentada na figura 2.17, capacitância por tensão ($C \times V$), também fornece informações provindas de uma célula solar, sendo extraída com equipamentos adequados para tal função.

A curva azul é a curva $C \times V$ e o ponto onde intercepta $V = 0$ (eixo Y) é chamado de C_{j0} , o valor da capacitância de junção quando nenhuma tensão de polarização é aplicada. Já a curva laranja é a relação de $1/C_j^2 \times V$. O ponto de interseção em $V = 0$ fornece uma relação que possibilita encontrar a estimativa do valor da densidade de portadores do lado menos dopado (N_B).

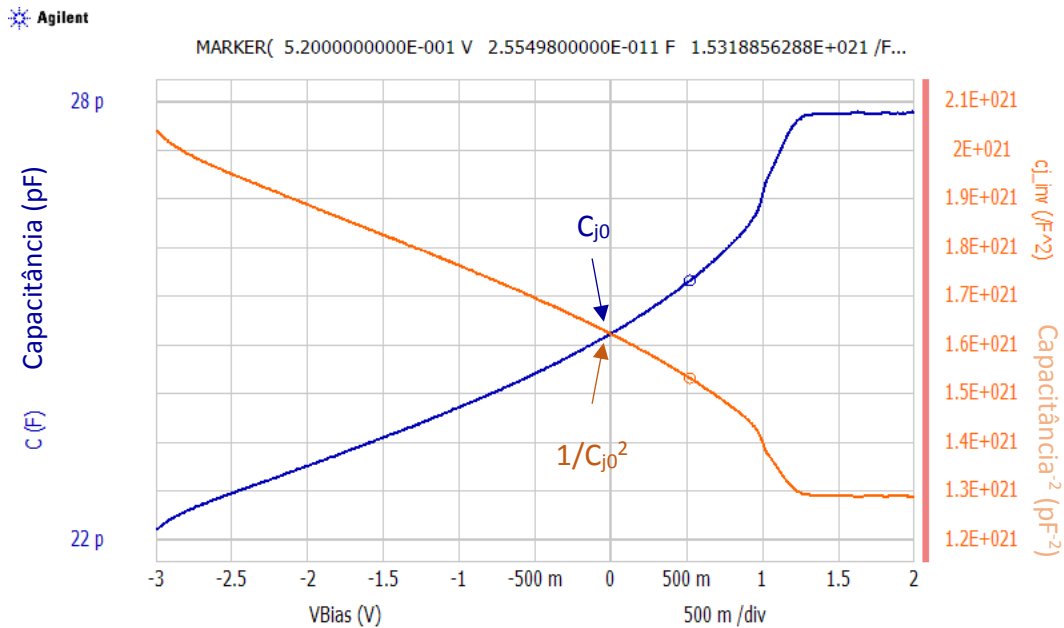


Figura 2.17: Curva Capacitância x Tensão (em azul) e Capacitância² x Tensão (em laranja)

2.2.5. Parâmetros Característicos Internos

- Corrente de curto circuito (I_{SC})

É o valor máximo de corrente que se pode medir em uma célula solar. A tensão nos terminais é igual a zero, isto é, a resistência de carga é zero e, com um amperímetro, pode-se medir o valor de I_{SC} . Seu valor é aproximadamente a I_{ph} e pode ser obtido através do gráfico $I \times V$, como mostra a figura 2.15a.

- Tensão de circuito aberto (V_{OC})

É o valor máximo de tensão que se pode medir em uma célula solar. Os terminais abertos, considera-se que a resistência de carga é infinitamente alta, podendo medir com um voltímetro em seus terminais. Toda a corrente fotogerada passa pelo diodo e seu valor pode ser encontrado através da manipulação da equação (2.1), resultando na (2.4):

$$V_{OC} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right) [V] \quad (2.4)$$

Seu valor, assim como da corrente I_{SC} , também pode ser obtido graficamente (figura 2.15a).

- Ponto de máxima potência (M_{PP} ou P_{MAX})

Como o próprio nome diz, é o ponto onde se extrai o maior valor do produto de corrente pela tensão. Na curva característica do dispositivo, esse valor de P_{MAX} é o “joelho” da curva e seu valor pode ser encontrado com a equação (2.5).

$$P_{MAX} = I_{MAX} \cdot V_{MAX} [W] \quad (2.5)$$

- Fator de preenchimento (FF)

Fator de preenchimento ou fator de forma (do inglês *Fill Factor*) é a razão entre a potência máxima obtida na célula pelo produto da tensão de circuito aberto pela corrente de curto circuito. Seu valor está relacionado com a qualidade da célula, isto é, quanto mais próximo de 1 for seu valor, melhor é o dispositivo testado. Em termos visuais, o valor de FF pode ser visto na curva característica, e será próximo de um valor unitário quanto mais a curva do dispositivo se aproximar do retângulo formado pelos pontos I_{MAX} , P_{MAX} e V_{MAX} . Na figura 2.15a, esse valor é relacionado com os retângulos amarelos, é a relação entre as áreas do retângulo A com o retângulo B. É um parâmetro sem unidade e sua fórmula é dada por:

$$FF = \frac{V_{MAX} \cdot I_{MAX}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (2.6)$$

- Eficiência de conversão (η)

Quando se fala em eficiência de um dispositivo, refere-se a este parâmetro: Eficiência de conversão. É definido pela relação entre a potência obtida através dos fótons incidentes na superfície da célula e a potência gerada pela mesma. Sua equação (2.7) é dada por:

$$\eta = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{A \cdot G} = \frac{I_{MAX} \cdot V_{MAX}}{A \cdot G} \quad (2.7)$$

Onde A é a área da célula e G é a irradiância solar incidente na mesma. Na maioria das vezes seu valor é expresso em %.

- Coeficiente de reflexão (\mathfrak{R})

Coeficiente de reflexão ou refletância de uma célula fotovoltaica é uma grandeza adimensional que expressa, em porcentagem, o quanto da luz incidida no material é refletida pela superfície. É diretamente dependente do material utilizado e da textura da superfície. Quanto menor for o coeficiente de reflexão, maior o número de fótons que adentram na célula, possibilitando um aumento na geração de energia solar.

A equação (2.8) mostra a relação do índice de refração (κ) do material com a refletância e, como mencionado anteriormente, a dependência de tal parâmetro com o material utilizado. Além disso, é importante lembrar que o índice de refração está relacionado com o comprimento de onda da luz, o que implica em diferentes valores de refletâncias para diferentes comprimentos de onda.

$$\mathfrak{R} = \frac{(n - 1)^2 + \kappa^2}{(n + 1)^2 + \kappa^2} \quad (2.8)$$

Onde n é a parte real e κ a parte imaginária do índice de refração.

- Eficiência Quântica (QE)

É a quantidade de portadores de carga que se consegue mensurar nos terminais externos do dispositivo para a quantidade de fótons que atingiram o material.

Dois tipos de eficiência quântica são considerados em uma célula solar. A figura 2.18 retrata algumas situações que ocorrem com os portadores de carga ao acontecer a incidência de fótons. O número total de fótons incididos na célula (indicados com o número 1 na figura) são considerados no cálculo da Eficiência Quântica Externa (EQE). Já para o cálculo da Eficiência Quântica Interna (IQE) o número de fótons considerado é bem limitado. Dentre os fótons incididos, alguns são refletidos (2) e outros podem atravessar toda a junção sem ser absorvido em momento algum, por apresentar um comprimento de onda inferior ao *gap* do material (3). Já os fótons absorvidos, alguns podem ser absorvidos longe da região de depleção e seus pares elétron-buraco gerados se recombinarem antes mesmo de contribuírem para a corrente (4). Terão aqueles que apresentam *gap* maior que o do material, mas os elétrons ou buracos podem ser excitados a níveis muito maiores que suas bandas, fazendo com que os portadores de carga gerem colisões com a rede cristalina

transformando essa energia em calor (termalização, já apresentada na figura 2.6, e aqui mostrado como número 5). No mais, os fótons absorvidos e que contribuem para a geração de pares elétron-buraco mensuráveis nos terminais (6) são aqueles considerados no cálculo de IQE.

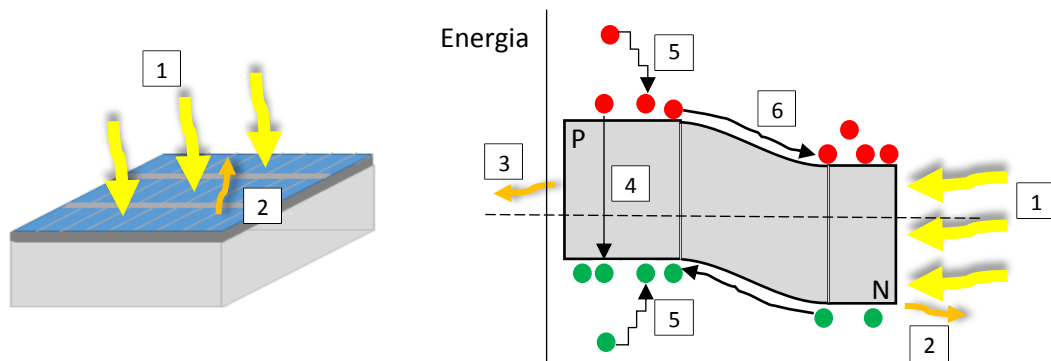


Figura 2.18: Eficiência quântica: Comportamento dos portadores de carga

Como dito anteriormente, quanto maior a refletância, menor será a quantidade de fótons absorvidos, conseqüentemente menor será o valor da eficiência quântica, uma vez que $QE \propto 1 - \mathfrak{R}$.

De acordo com [5], a eficiência quântica pode ser encontrada através da equação (2.9):

$$QE = \left(\frac{I_o}{q}\right) \cdot \left(\frac{P_r}{h \cdot \nu}\right)^{-1} \quad (2.9)$$

Onde I_o é a corrente interna gerada pela potência recebida P_r , q é a carga do elétron e $h\nu$ corresponde à energia do fóton, sendo h a constante de Plank e ν a frequência de oscilação.

- Responsividade (r)

É a relação entre a corrente produzida no dispositivo de junção PN e a potência de luz incidente nesse mesmo dispositivo. É medida então em *Ampere por Watt* (equação (2.10)).

$$r = \frac{I_o}{P_r} [A/W] \quad (2.10)$$

A responsividade pode também ser relacionada com a eficiência quântica a partir da equação (2.11), para cada comprimento de onda [5, 6, 18].

$$r_{\lambda} = \frac{QE \cdot q}{h \cdot \nu} = \frac{QE \cdot \lambda [\mu m]}{1.24} \left[\frac{A}{W} \right] \quad (2.11)$$

Pode-se dizer então que a resposta para cada comprimento de onda é a razão da densidade de corrente de curto-circuito espectral pela irradiância espectral, conforme equação (2.12).

$$r_{\lambda} = \frac{J_{SC\lambda}}{G_{\lambda}} \left[\frac{A}{W} \right] \therefore J_{SC\lambda} = r_{\lambda} \cdot G_{\lambda} \left[\frac{A}{m^2 \mu m} \right] \quad (2.12)$$

A figura 2.19 apresenta a curva da responsividade de uma célula solar de silício pelo comprimento de onda (curva em azul, com eixo Y à direita) sobreposta ao gráfico do espectro solar que apresenta a irradiância no eixo Y da esquerda. A equação (2.12) corresponde à multiplicação de um gráfico pelo outro, apresentando como resultado a densidade de corrente para cada comprimento de onda. Para todos os comprimentos de onda que compõem o espectro solar, se calcula J_{SC} a partir da equação (2.13). Assim como a irradiância, também calculada pela integração da irradiância espectral na faixa do comprimento de onda de interesse.

$$J_{SC} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_{SC\lambda} d\lambda \left[\frac{A}{m^2} \right]; \quad G = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} G_{\lambda} d\lambda \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.13)$$

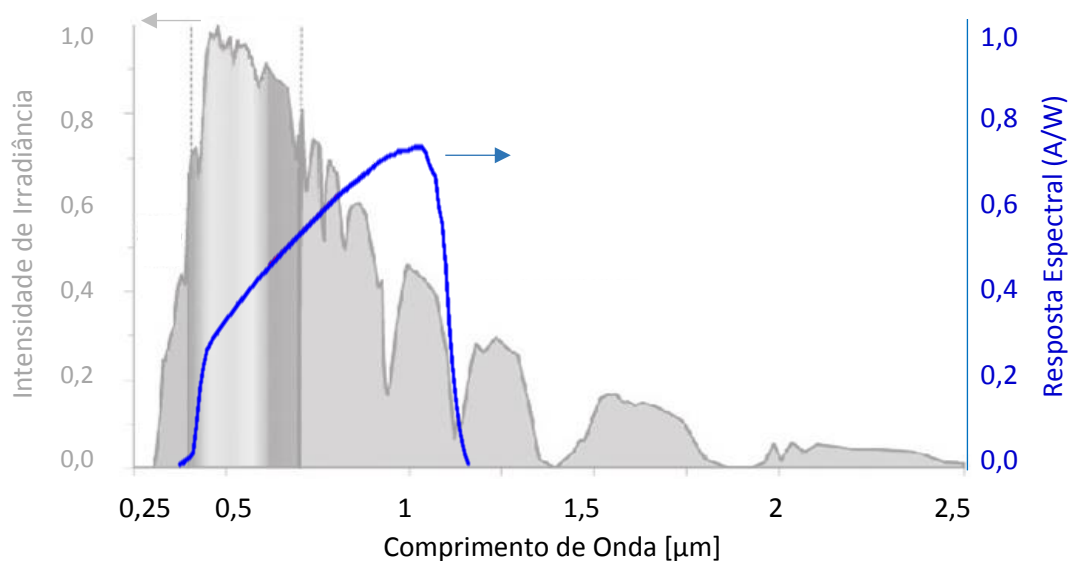


Figura 2.19: Resposta espectral da célula de silício sobreposta ao espectro solar

O resultado é uma resistividade total demonstrada na equação (2.14).

$$r = \frac{J_{sc}}{G} \quad (2.14)$$

- Mobilidade (μ) e Densidade de Portadores Intrínsecos (n_i)

A mobilidade de elétrons e buracos é um parâmetro importante quando se trata de transporte de portadores. Sofre interferência de diversos tipos de mecanismos de espalhamentos como espalhamento dos portadores na rede cristalina (vibrações térmicas dos átomos) e espalhamento por impurezas (deflexão por força eletrostática dos portadores de carga) [5]. Em células solares não é comum encontrar uma forte intensidade de campo elétrico, por esse motivo pode-se dizer que o valor da mobilidade dos portadores independe do campo [17].

A mobilidade influencia diretamente no valor da resistividade e, conseqüentemente, no valor da resistência série do dispositivo, parâmetro que será apresentado em seguida. Para encontrar essa influência, o modelo de mobilidade utilizado neste trabalho foi o MINIMOS 6 [19-21]. Thomas et al. (1967) relata em seu documento que as expressões utilizadas foram obtidas de forma empírica, a partir de dados experimentais. Siegfried Selberherr et al. (1990) mostra a evolução do MINIMOS e apresenta as referências para os ajustes dos valores dos coeficientes utilizados nas fórmulas. Vassil et al. em seu livro [19], apresenta as equações aqui utilizadas com os valores usados nesta dissertação, apresentados na tabela 2.1.

$$\mu_v^L = \mu_v^{min} + \frac{\mu_v^L - \mu_v^{min}}{1 + \left(\frac{C_I}{C_{d_v}^{ref}}\right)^{\alpha_v}} \quad (2.15)$$

Sendo que:

$$\mu_n^L = \mu_{n,300}^L \cdot \left(\frac{T_L}{300K}\right)^{-2} \quad (2.16)$$

$$\mu_p^L = \mu_{p,300}^L \cdot \left(\frac{T_L}{300K}\right)^{-2,18}$$

$$\mu_v^{min} = \begin{cases} \mu_{v,300}^{min} \cdot \left(\frac{T_L}{300K}\right)^{-0,45} & (\text{para } T \geq 200K) \\ \mu_{v,300}^{min} \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{-0,45} \cdot \left(\frac{T_L}{200K}\right)^{-0,15} & (\text{para } T < 200K) \end{cases} \quad (2.17)$$

$$C_{d,v}^{ref} = C_{d,v,300}^{ref} \cdot \left(\frac{T_L}{300K}\right)^{3,2} \quad (2.18)$$

$$\alpha_v = \alpha_{v,300} \cdot \left(\frac{T_L}{300K}\right)^{0,065} \quad (2.19)$$

Tabela 2.1: Parâmetros para a fórmula de mobilidade das impurezas

Material	ν	$\mu_{\nu,300}^L$ [cm ² /(V.s)]	$\mu_{\nu,300}^{min}$ [cm ² /(V.s)]	$N_{d,\nu,300}^{ref}$ [cm ⁻³]	$\alpha_{\nu,300}$
Si	n (elétrons)	1430	80	1,12x10 ¹⁷	0,72
	p (buracos)	460	45	2,23x10 ¹⁷	0,72

Onde:

ν = tipo do portador de carga: n (para elétrons) ou p (buracos)

μ_v^{LI} = mobilidade efetiva dos portadores majoritários (devido ao espalhamento na rede cristalina – índice *L* de *lattice scattering*; e espalhamento de impurezas ionizadas – índice *I* de *impurity scattering*) [cm²/(V.s)]

μ_v^{min} = Fator de ajuste para limite de altas dopagens dependente da temperatura [cm²/(V.s)]

μ_v^L = mobilidade dos portadores majoritários devido ao espalhamento na rede cristalina [cm²/(V.s)]

C_I = concentração de impurezas ionizadas total (soma de impurezas doadoras e aceitadoras – $N_A + N_D$) [22]

$N_{d,\nu}^{ref}$ = densidade de dopantes de portadores majoritários de referência [cm⁻³]

α_ν = parâmetro usado no cálculo da mobilidade efetiva

$\mu_{\nu,300}^L$ = mobilidade devido ao espalhamento na rede cristalina a 300 K [cm²/(V.s)]

T_L = temperatura da rede do material semiconductor [K]

$\mu_{v,300}^{min}$ = Fator de ajuste para limite de altas dopagens a 300 K [$\text{cm}^2/(\text{V.s})$]

$N_{d,v,300}^{ref}$ = densidade de dopantes de portadores majoritários de referência a 300 K [cm^{-3}]

$\alpha_{v,300}$ = parâmetro usado no cálculo da mobilidade efetiva a 300 K

Swirhun. et al. (1986) e del Alamo J. et al. (1985) apresentam um método para encontrar o valor da mobilidade de portadores minoritários para temperatura em 295 K. Pelo fato de seus testes serem para apenas uma temperatura, e os resultados mostrarem valores de mobilidade muito próximos para um mesmo portador de carga como majoritário e minoritário, a mesma fórmula já apresentada será utilizada para representar os portadores minoritários.

Assim como a mobilidade, a concentração de dopantes também se mostra de suma importância para o cálculo da resistividade e resistência. Um semiconductor intrínseco apresenta um mesmo número de elétrons e buracos, sendo elétrons na banda de condução e buracos na banda de valência. A esta igualdade dá-se o nome de densidade de portadores intrínsecos (n_i). n_i é um parâmetro que apresenta uma relação direta com a temperatura e também com o material utilizado. Sproul e Green (1991) deduzem um valor para n_i em temperatura ambiente a partir de extrações da curva característica $I \times V$ de uma célula solar de silício. O resultado experimental se aproxima do valor teórico encontrado na equação proposta pelos autores. Entretanto o trabalho é limitado em termos de variação de temperatura, sendo estudado apenas entre 275 K e 375 K. A equação foi aprimorada por Mlsiaskos et al. (1993), cobrindo uma maior faixa de temperatura (78 K a 340 K). Essa equação é apresentada em (2.20) e será utilizada nos cálculos deste trabalho.

$$n_i(T_L) = 5,29 \times 10^{19} \cdot \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{2,54} \cdot \exp\left(\frac{-6726}{T_L} \right) \quad (2.20)$$

- Resistência Série (R_S)

Como já citado previamente, a resistência série é um parâmetro parasita que degrada a eficiência da célula fotovoltaica. Seu valor é soma de todas as resistências que compõem o material, como resistências de contato, do próprio semiconductor e a parte da metalização da célula (figura 2.20).

Sua influência na curva $I \times V$ da célula/painel é perceptível, como mostra a figura 2.21, composta de curvas teóricas $I \times V$. Essa alteração pode reduzir o valor de *fill factor* e, conseqüentemente, a eficiência de conversão. Nota-se que o valor de V_{OC} não se altera com a variação da resistência, mas quanto maior for o seu valor, menor será o *fill factor*, alterando, inclusive, o valor de I_{SC} . Esse fato acarreta na descaracterização completa do formato da curva, chegando a reproduzir uma reta de inclinação $1/R_s$.

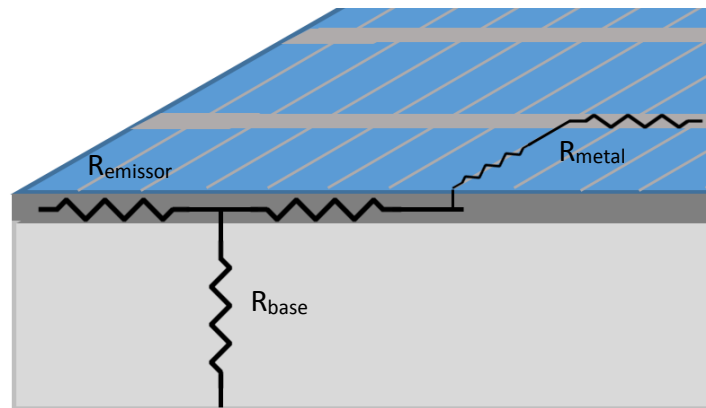


Figura 2.20: Resistências série em uma célula solar

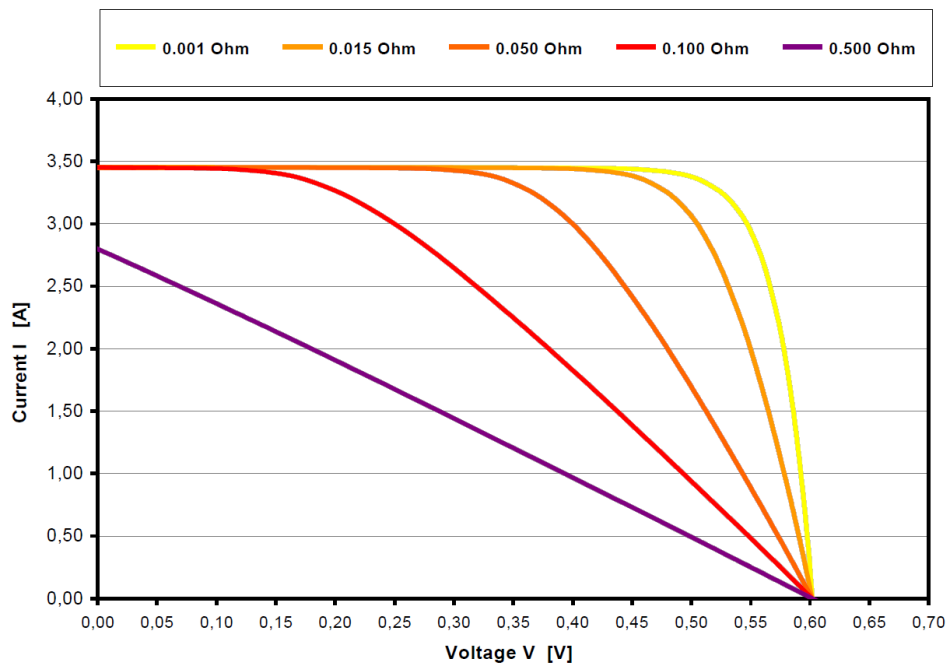


Figura 2.21: Efeito da resistência série na curva $I \times V$ [16]

Existem diversas maneiras de calcular o valor da resistência série, como o método de Castañer [28], Luque [17], da inclinação da curva [2] e diversos outros

modelos encontrados na literatura [29-38]. Os métodos utilizados no trabalho serão reportados posteriormente.

- Resistência Paralela (R_P)

Também já explicado antecipadamente, a resistência paralela surge nos processos de fabricação da célula, nas imperfeições da junção, como correntes de fuga na superfície do material. Quanto menor seu valor, maiores as chances de caminhos alternativos para a corrente foto gerada, ocasionando assim em uma diminuição de V_{OC} . Para valores baixíssimos, o comportamento da curva fica cada vez mais drástico, o que a torna uma reta com inclinação $1/R_P$, como mostra o gráfico da figura 2.22.

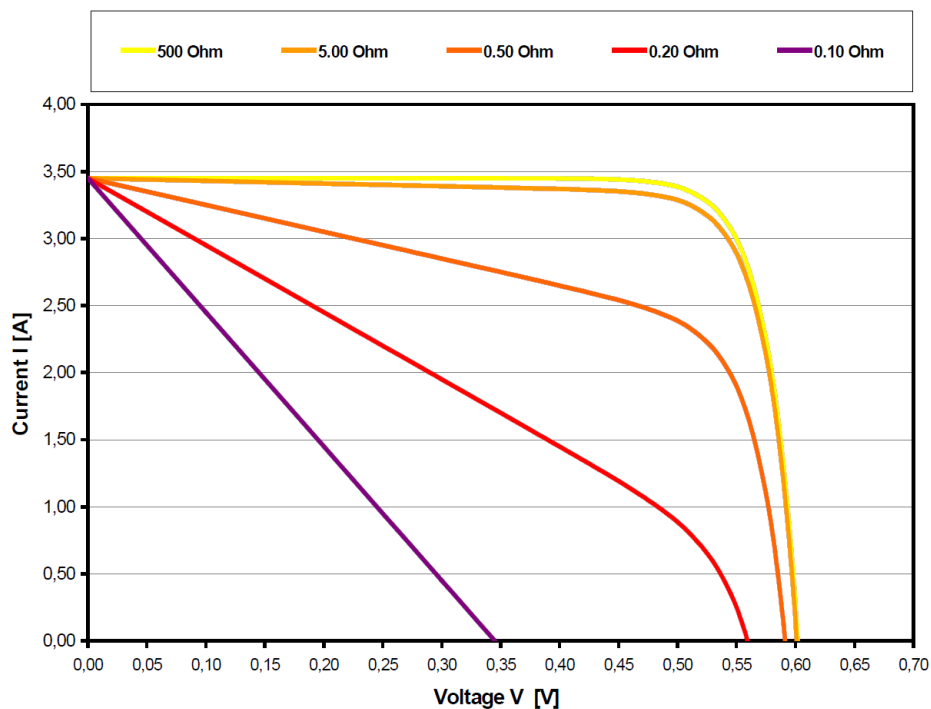


Figura 2.22: Efeito da resistência paralela na curva $I \times V$ [16]

Assim como a resistência série, os processos para encontrar o valor de R_P serão descritos no tópico 2.4.1 deste capítulo.

- Fator de Idealidade (n)

O fator de idealidade, outro parâmetro já apresentado, é um número adimensional geralmente entre 1 e 2 para modelo de um diodo, extraído de ajustes de

dados nos experimentos. Seu valor aproxima de 2 para baixas tensões (geração-recombinação dominante) e próximo a 1 em altas tensões (difusão dominante). Ele leva em conta os portadores de carga de deriva, principalmente pelo campo elétrico na região de depleção, sobretudo em polarização direta. O comportamento não linear na curva semilogarítmica $I \times V$ é devido ao fator de idealidade, indicado pelas linhas tracejadas na figura 2.16.

Como mostrado em [39], o fator de idealidade deixa de ser um parâmetro de ajustes e passa a ter um significado físico. A taxa de incorporação do fator é dependente do ponto de operação, para uma mesma curva $I \times V$ pode-se encontrar diferentes pares de R_S e n . Além disso, mais de um par pode apresentar semelhantes soluções.

2.2.6. Parâmetros Característicos Externos

Além de parâmetros internos do dispositivo que determinam o comportamento de uma célula, o ambiente de trabalho em que ela é exposta também altera significativamente seu funcionamento. Tais como irradiância solar, temperatura, distribuição espectral, dentre outras características climáticas.

- Irradiância (G)

A densidade de potência do sol que incide sobre uma superfície de área unitária é determinada como irradiância ou intensidade da radiação solar, de unidade watt por metro quadrado [W/m^2]. Seu valor é dependente da inclinação angular entre os raios solares e a superfície que os recebe. O valor de referência é obtido por raios perpendiculares em uma superfície plana a uma distância média Terra-sol. Isto quer dizer que existirão diversos valores de irradiância, dependendo da região do planeta aonde realiza a medição (sendo mais baixo nas regiões dos polos) e do horário do dia, uma vez que a posição do sol altera com o decorrer do dia.

A corrente elétrica obtida em uma junção PN varia linearmente com a variação da irradiância, como mostra a figura 2.23. Para uma mesma temperatura, o valor de I_{SC} e V_{OC} diminuem com a diminuição do valor da irradiância.

- Temperatura (T)

A eficiência da célula também varia com a temperatura. Com o aumento da temperatura, a tensão de circuito aberto diminui significativamente (como descreve a equação (2.4) e pode ser visto na figura 2.24, enquanto a corrente sofre um leve aumento, praticamente desprezível. Isto leva a uma diminuição significativa da potência que a célula gera.

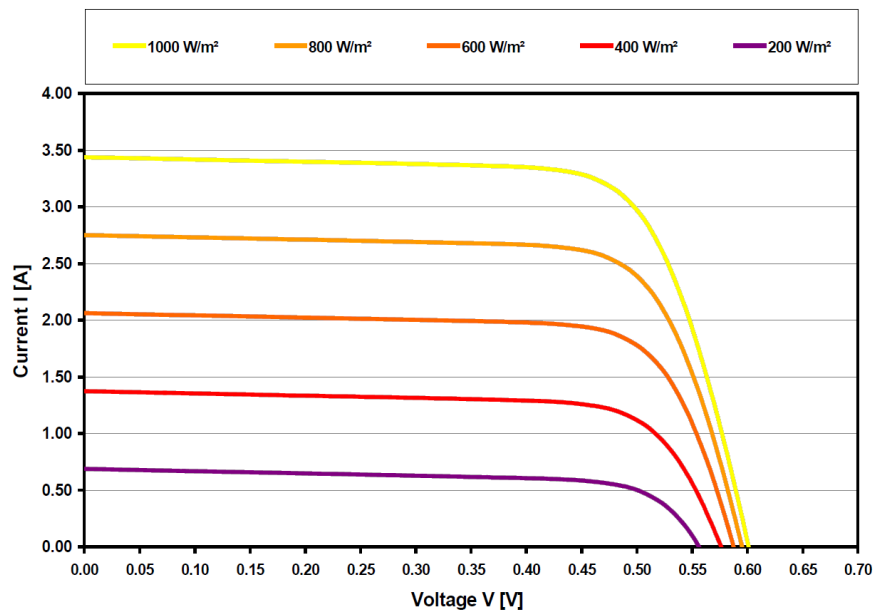


Figura 2.23: Efeito da variação de irradiância na curva IxV [16]

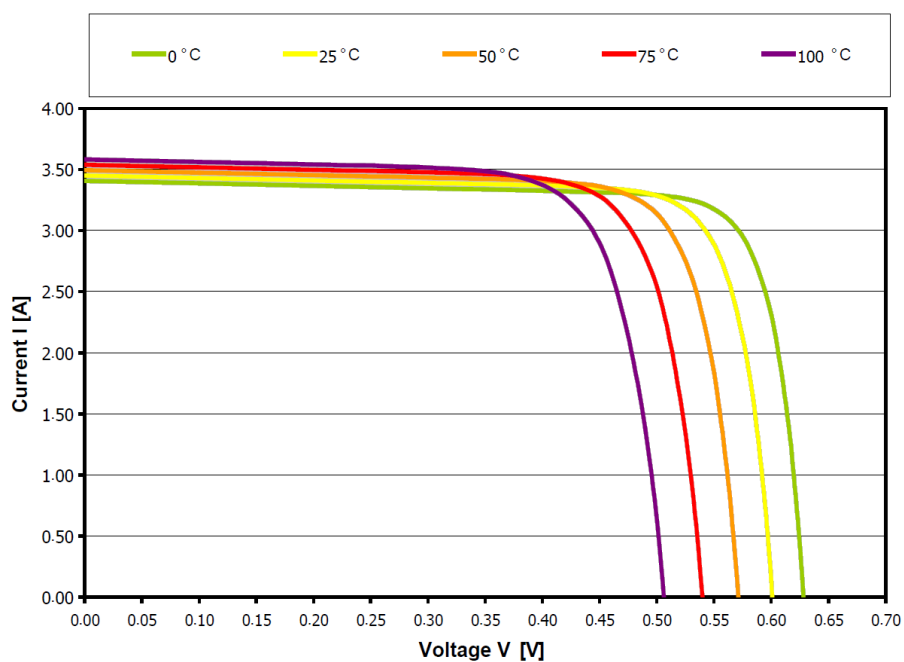


Figura 2.24: Efeito da variação de temperatura na curva IxV [16]

A temperatura também é um parâmetro colocado em questão em [39] onde percebe-se que a variação da temperatura altera o comportamento da resistência série, isto é, o aumento da temperatura diminui o valor da mesma (conduta contrária às dos dispositivos microeletrônicos). Tal questão pode ocasionar em erros percentuais na eficiência da célula se ignorada.

- Distribuição espectral

A característica que contempla diferentes intensidades de energia solar para diferentes comprimentos de onda, é chamada de distribuição espectral. Essa distribuição pode ser afetada por diversos parâmetros atmosféricos que atenuam seu valor. Além disso, os raios solares precisam atravessar uma determinada espessura de camada de ar, dependente do ângulo de incidência do sol. Esta associação é obtida por uma relação chamada de Massa de Ar, do inglês *Air Mass* (AM).

$$AM = \frac{L}{L_0} \approx \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (2.21)$$

Onde L é a radiação direta (caminho efetivo dos raios), L_0 é o caminho no ângulo de zênite (90° em relação à superfície) e θ é o ângulo formado entre os raios de luz e o zênite.

Esta associação recebe na nomenclatura o valor do ângulo de inclinação solar (equação (2.21), onde no ângulo zênite, o valor de θ é zero e AM então é igual a 1. Para o ângulo correspondente, dá-se o nome de AM 1.0 (figura 2.25). Um valor para o espectro solar utilizado como referência corresponde a um $\theta = 48,2^\circ$, equivalente a AM 1.5, que é o incidido sobre a superfície ao nível do mar. Diz-se AM 0 para medições realizadas fora da atmosfera.

O espectro solar normalmente é representado através da curva de irradiância espectral por comprimento de onda (figura 2.26). O exemplo apresenta três condições de irradiância: AM0, AM1.3 e AM1.5. A curva para AM1.3 indica uma inclinação de 37° , voltada para a linha do Equador (global inclinada) [40].

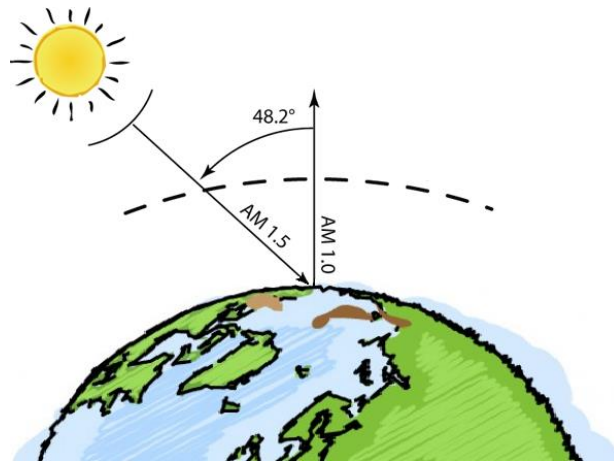


Figura 2.25: Definição de massa de ar (AM)

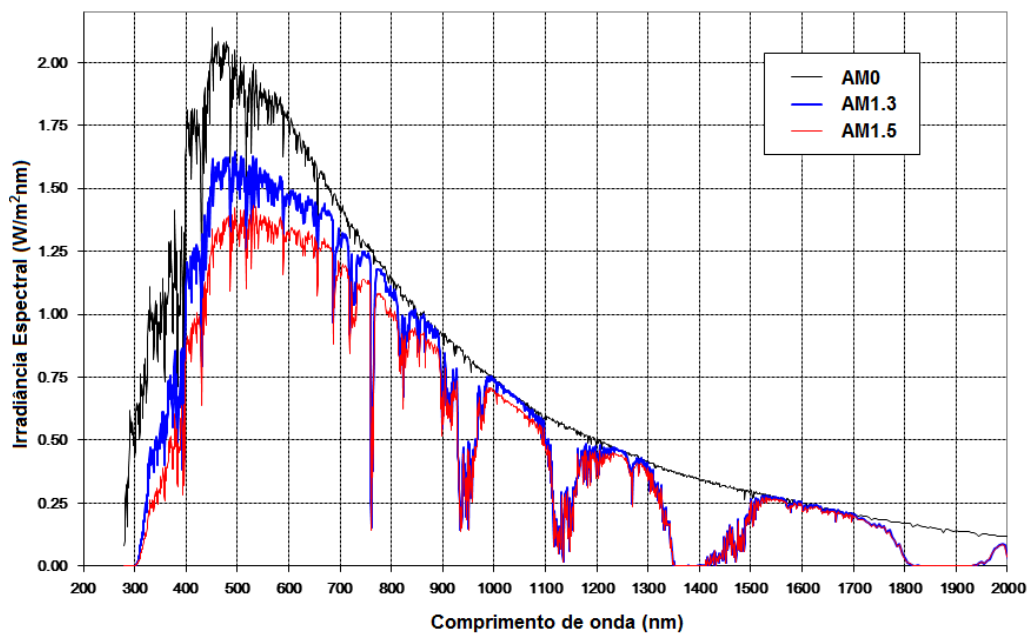


Figura 2.26: Distribuição espectral por comprimento de onda em três diferentes situações (adaptado de [40])

2.3. Equipamentos e Softwares

As medidas realizadas e o processo de caracterização elaborado foram efetuados em dois tipos de célula: de silício monocristalino e policristalino. Suas principais características¹ compõem a tabela 2.2.

Para a caracterização correta de células e painéis é necessário o uso de equipamentos que realizem medições elétricas e estejam dentro de normas e

¹ Dados providos pelos fornecedores dos dispositivos

procedimentos de padronização internacional de simuladores solares determinados pela IEC (*International Electrotechnical Commission*).

Tabela 2.2: Dados de células utilizadas em testes

Tipo		Policristalino	Monocristalino
Fabricante		Indosolar - Índia	Bosch
Dimensão [mm ²]		156 x 156	156 x 156
Largura [mm]		2	2
Eficiência [%]		16	18,22 – 18,43
Potência [Wp]		3,85	4,39 – 4,44
Barramentos (contatos)		2	3
Coeficientes de temperatura	α (%/K)	+0,06	+0,04
	β (%/K)	-0,33	-0,33

Para o trabalho em questão, diversos testes foram realizados em ambientes abertos e fechados, com a utilização de alguns equipamentos descritos abaixo.

- Simulador Solar

Um simulador solar (ou sol artificial) é um dispositivo que oferece uma iluminação com características aproximadas à da luz solar natural, tais como a intensidade, o espectro, a uniformidade e a estabilidade temporal. Sua finalidade é proporcionar uma instalação de ensaio controlável em lugares fechados, em condições de laboratório.

As principais vantagens em utilizar um simulador solar são:

- Redução significativa no tempo de ensaio de equipamentos;
- Garantia de manutenção das condições climáticas reais;
- Redução da incerteza em resultados experimentais.

Para caracterizar uma célula solar dentro dos padrões IEC é necessário que a irradiância a qual ela ficará exposta seja de 1000 W.m⁻² e o espectro solar seja de AM1.5G, obedecendo à norma IEC 904-3 (demonstrado na figura 2.27a), além da temperatura ambiente ser de 25 °C e a área em que a célula será medida deve ser completamente iluminada. O resultado do espectro da combinação de lâmpadas que

formam o simulador solar é exposto na figura 2.27b em comparação com o padrão solar.

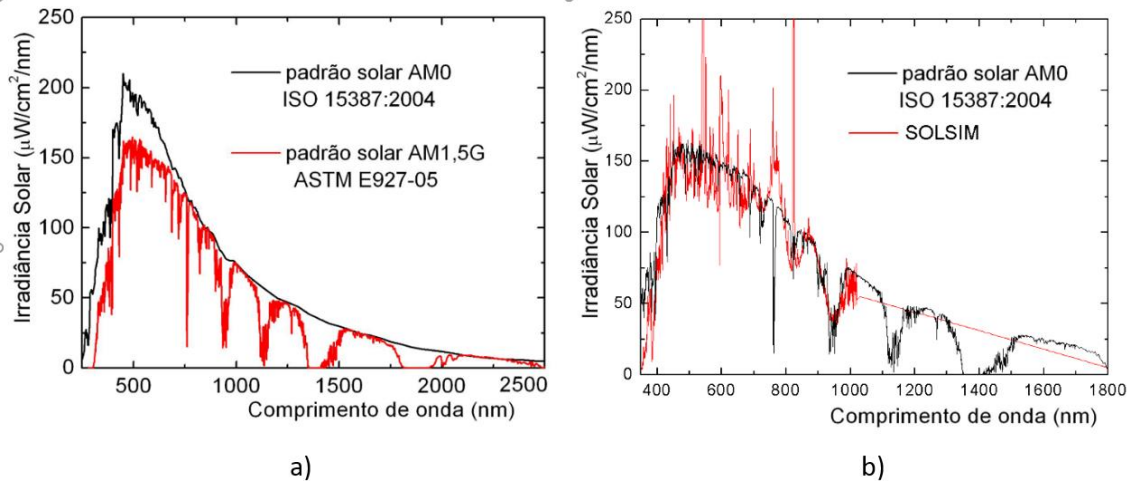


Figura 2.27: Irradiância espectral a) que atende a norma IEC904-3 e b) do sol artificial SOLSIM

No Brasil, a Orbital Engenharia desenvolveu também um simulador solar de iluminação contínua, composto por dois tipos diferentes de lâmpadas. A área de iluminação para o sol artificial é de 160mm x 160mm e sua classe é considerada C (determinada por normas e especificações da ASTM - *American Society for Testing and Materials*, referentes à qualidade de luz reproduzida pelo equipamento). O SOLSIM possui uma mesa de testes composta de um prato de 20 cm de diâmetro, responsável pelo contato positivo da célula, e garfos (garras) que fazem os contatos negativos. Além disso, um sistema de arrefecimento do plano de testes completa o sistema, do qual o banho termostatizado (banho destinado à climatização com um termostato indicando a temperatura da água) o compõe, realizado em circuito fechado do equipamento.

A maior desvantagem apresentada por este simulador solar é a área de iluminação de espectro semelhante ao do sol (figura 2.28). Isto limita a realização de testes em células maiores, apresentando incertezas em resultados obtidos. Conseqüentemente, restringe testes em painéis fotovoltaicos, ou qualquer arranjo celular em laboratório.

Como dito, a classificação dos simuladores solares é determinada pelas normas e especificações da ASTM. Três características são fundamentais para a classificação: Casamento espectral (equivalência com o espectro padrão), estabilidade temporal e uniformidade da radiação. A partir dessas informações e das

medições realizadas diante da irradiação que o SOLSIM produz, foi possível classificá-lo como mostrado na tabela 2.3 para diferentes áreas, sendo que classe A é a melhor classificação e C a pior.

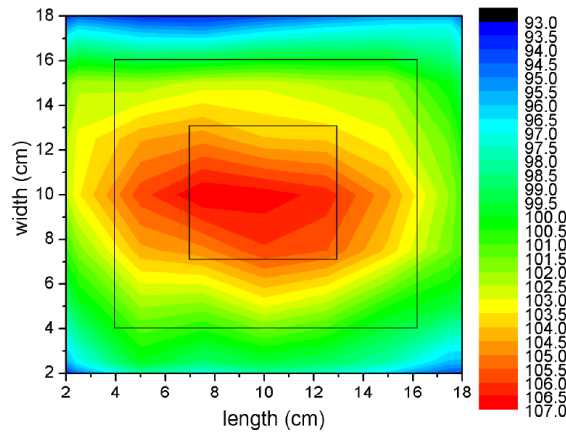


Figura 2.28: Uniformidade do simulador solar

Tabela 2.3: Classificação do Simulador Solar referente à área ocupada pela célula

Área	Classificação
16cmX16cm	CLASSE C
12cmX12cm	CLASSE B
6cmX6cm	CLASSE A

A figura 2.29 a seguir apresenta diversas imagens do sol artificial instalado no laboratório e seus principais elementos indicados. Os números 1 e 2 indicam o conjunto de lâmpadas que formam a intensidade luminosa necessária, sendo o 1 indicando lâmpadas dicróicas e o 2, lâmpadas de descarga a gás. Os números 3 e 4 apresentam a mesa de teste, onde o 3 aponta para os garfos (que farão contato com o emissor da célula) e o 4 aponta para o prato (que fará contato com a base da célula). O número 5 indica o obturador de manutenção, extremamente útil para quando necessário manusear o dispositivo, bloqueando a iluminação. Por fim, o número 6 aponta o painel frontal de controladores, como chave de liga/desliga, ventilação, conjunto de lâmpadas e *display* indicativo de tensão.

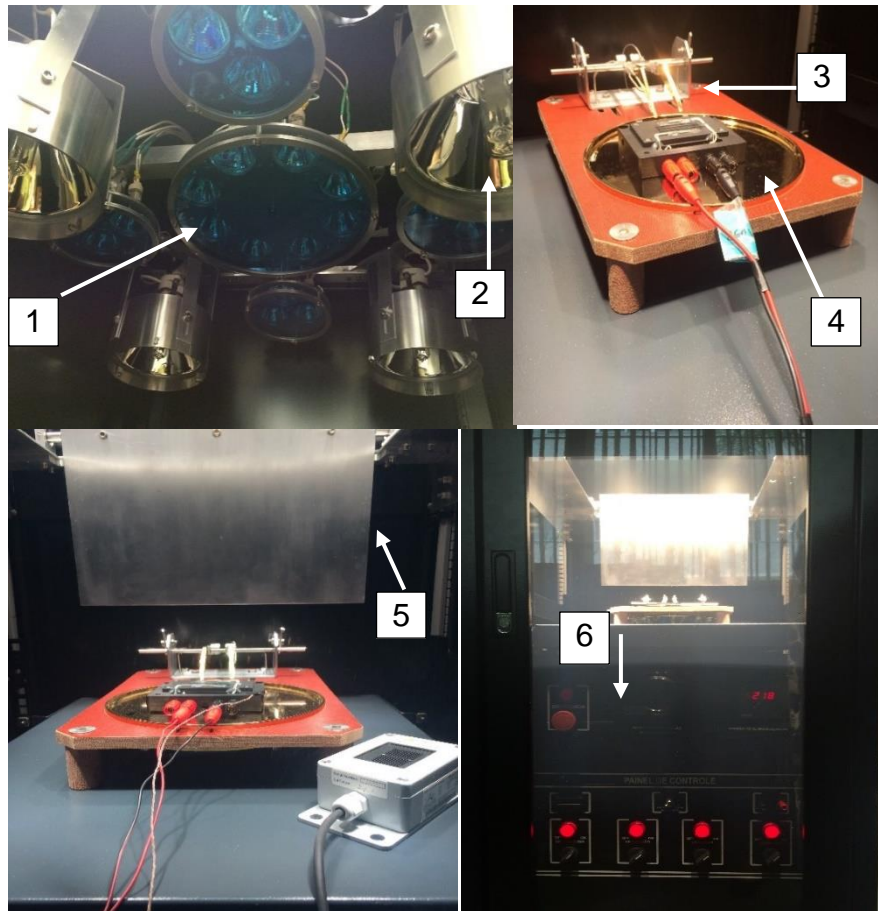


Figura 2.29: Imagens do Simulador Solar em uso

- Analisador de curvas IxV

Solmetric PV Analyzer é um instrumento de teste portátil, que realiza medições de curvas IxV e PxV de módulos fotovoltaicos em campo. Essas curvas são obtidas em um *software* (figura 2.30) instalado em um computador e os dados são transmitidos de imediato, utilizando um adaptador *USB wireless*. O próprio *software* desenvolve uma tabela com diversos pontos de corrente, tensão e potência, incluindo pontos-chaves, como I_{sc} , V_{oc} , V_{mp} , I_{mp} e P_{max} . O instrumento é composto também por sensores sem fios para temperatura e irradiância, atualizadas em tempo real. Esses sensores são os mesmos utilizados para todas as demais medições, incluindo medições com outros equipamentos aqui relatados.

Por ser um equipamento voltado para uso em campo, sua robustez limita um refinamento dos testes realizados com ele. Portanto, ao extrair os pontos IxV da curva encontrada, percebe-se uma maior concentração de pontos próximos ao ponto de V_{oc} e um número insuficiente próximo ao ponto I_{sc} . Esta limitação do equipamento prejudica a caracterização de células e painéis, uma vez que a distribuição de pontos

ao longo da curva aprimora resultados. Além disso, para um resultado mais eficaz é necessário filtrar diversos pontos indesejados para altas tensões, mas, corre-se o risco de comprometer o produto final.

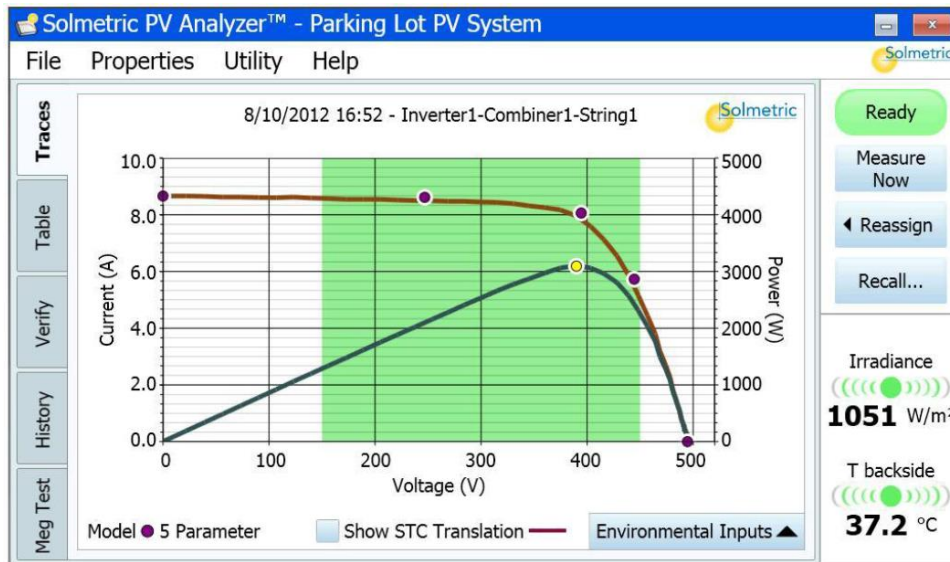


Figura 2.30: Software Solmetric para extração de curvas IxV e PxV [41]

- Analisador de Parâmetros

O *Agilent B1505A* (figura 2.31a) é um equipamento capaz de caracterizar dispositivos de potência de até 1500 A e 10 kV, dependendo das opções adquiridas. Possui vários módulos de Unidade de Alimentação e Medição (SMU - *Source-Measurement Unit*) que dão suporte a outros equipamentos, como o N1265A, expensor de corrente (500 A ou 1500 A). Seu sistema de navegação é baseado no sistema operacional *Microsoft® Windows® 7*. Para a realização de testes, utiliza-se do *software EasyEXPERT*, contido no dispositivo, que contém recursos e toda a configuração necessária. Inclui mais de 200 testes e aplicações, dentre eles aqueles que permitem inicializar medições relevantes de células solares. Por ser *open-source*, pode-se configurar o *hardware* do instrumento ou alterar a programação. Porém, para a realização de testes com painéis fotovoltaicos, é necessário esse manuseamento para conseguir alcançar correntes/tensões maiores a serem aplicadas em seus terminais.

- Medidor-Fonte

O *Source-Meter 2612B* (figura 2.31b), da marca *Keithley* é uma outra opção para extração de pontos I e V de células e painéis. Possui dois canais SMU com quatro quadrantes que permite alimentar e medir, simultaneamente, tensão e corrente com qualquer valor. Sua tensão máxima é de 200 V e a corrente 10 A para o modo pulsado.

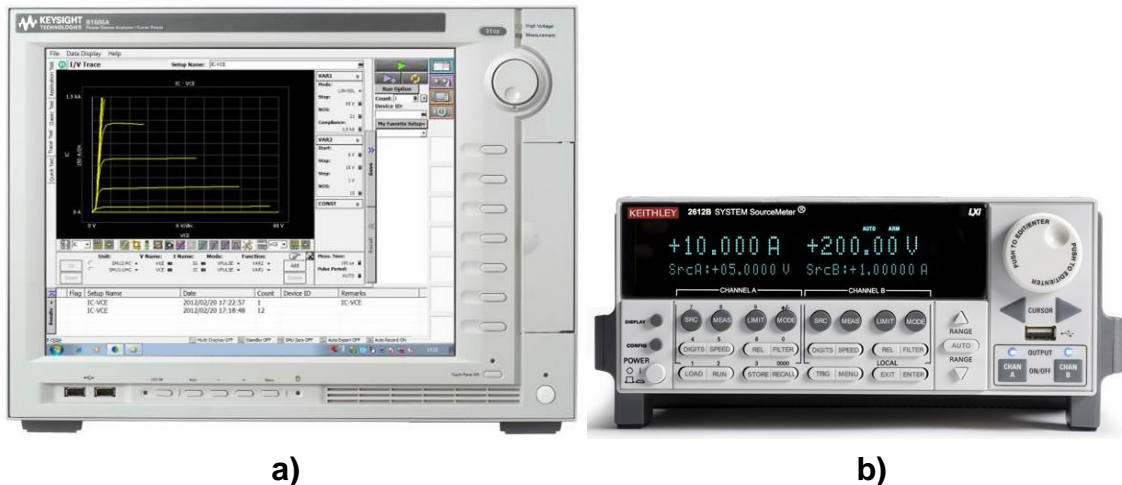


Figura 2.31: Vista frontal do equipamento a) B1505A e b) 2612B

Uma das maneiras de se trabalhar com tal equipamento é através de conexão *Ethernet*, utilizando o *software TSP Express*, criando facilmente as curvas IxV dos dispositivos testados.

- PSpice®

PSpice é a abreviação de *Personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*, ou pode-se dizer em português, programa de simulação pessoal com ênfase em circuitos integrados. Como seu próprio nome diz, sua proposta é a simulação completa de circuitos de diferentes graus de complexidade, incluindo análise não-linear, validando desempenhos e permitindo um refinamento de projetos antes de submetidos à fabricação. Com a utilização da ferramenta OrCAD (*Oregon+CAD - Computer Aided Desing*) para criar e desenhar o esquemático do circuito, PSpice simula e permite analisar o comportamento do mesmo.

A construção de modelos numéricos em um ambiente de simulação facilita a compreensão do funcionamento dos modelos analíticos e permite reproduzir os testes para as células fotovoltaicas. O propósito da simulação com este laboratório virtual é

poder replicar o resultado obtido com apenas uma célula e avaliar seu comportamento quando colocada em um painel, com outras tantas células de mesma fabricação e características. Pode-se assim criar associações em série, paralelo, ou misto e desta forma projetar o efeito de tais associações. Pode-se ainda extrapolar o obtido e multiplicar o que corresponde a um painel, representando sistemas mais complexos como uma usina fotovoltaica.

2.4. Caracterização dos dispositivos fotovoltaicos

De acordo com os tipos de células que se trabalha ou do estilo de arranjo ao qual as mesmas são submetidas para formar um painel solar, as condições de funcionamento se diferem, tais como tensão, corrente e potência, além dos parâmetros que se podem extrair de testes elétricos, físicos e optoeletrônicos, como resistências, eficiência e responsividade. A caracterização consiste em extrair tais parâmetros e avaliar o comportamento do dispositivo, uma vez que os dispositivos se discriminam uns dos outros.

2.4.1. Extração de parâmetros pela curva $I \times V$

A curva $I \times V$ de uma célula, módulo ou painel solar pode ser obtida através dos equipamentos já citados, com o intuito de caracterizar eletricamente o dispositivo. É possível extrair parâmetros físicos da curva que determinam a performance do mesmo, sendo eles a corrente de curto-circuito (I_{SC}), a tensão de circuito aberto (V_{OC}) e o ponto de máxima potência (P_{MAX}). A partir desses, já se pode determinar os demais parâmetros relatados anteriormente (tópico 2.2.5) para que assim, uma representação matemática da curva seja reproduzida e auxilie na compreensão dos fenômenos que ocorrem.

Com a obtenção dos pares de pontos I e V da célula ou do painel, deve-se elaborar um modelo analítico com os mesmos. Com a ajuda de um *software* para cálculo numérico como o Matlab®, e, através de um modelo escolhido dentre os apresentados no tópico 2.2.2, consegue-se extrair os parâmetros necessários para caracterizar o dispositivo fotovoltaico. A figura 2.32 apresenta uma modelagem realizada com a extração dos pontos I e V de um painel da fabricante Kyocera exposto ao sol.

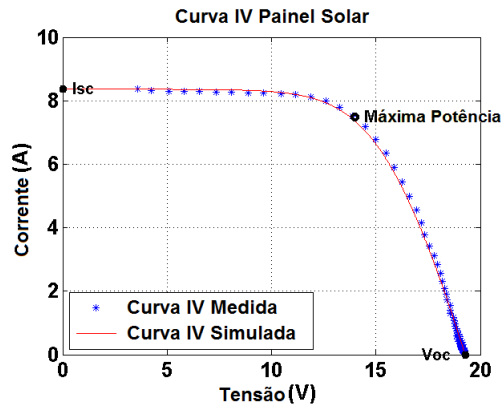


Figura 2.32: Modelagem analítica da curva IxV de um painel

Uma das maneiras aplicadas para tal modelagem é utilizando a ferramenta *cftool* do próprio Matlab®. Para tal, é preciso escolher o ajuste pela fórmula exponencial e descrever a equação. O trabalho em questão apresenta resultados obtidos tanto para uma exponencial quanto para duas exponenciais que são descritas, respectivamente, na ferramenta da seguinte maneira:

$$I = A + B \cdot (e^{C \cdot V} - 1) \quad (2.22)$$

$$I = A + B \cdot (e^{C \cdot V} - 1) + D \cdot (e^{E \cdot V} - 1) \quad (2.23)$$

Onde A é a corrente fotogerada I_{ph} , B é I_0 para (2.22) e I_{01} para (2.23), C é $\frac{q}{nkT}$ para (2.22) e $\frac{q}{n_1 kT}$ para (2.23), D é I_{02} e E corresponde à $\frac{q}{n_2 kT}$. Nota-se que as equações (2.22) e (2.23) são exatamente as mesmas apresentadas em (2.2) e (2.3), porém sem os termos de perdas parasitas e V fazendo o papel de $V+RI$.

A partir desta aplicação, consegue-se extrair de imediato os valores de I_{01} e I_{02} . Os fatores de idealidade n_1 e n_2 requerem apenas uma simples manipulação.

Para esse método, as perdas resistivas são desconsideradas (resistência série $\rightarrow 0\Omega$ e resistência paralela $\rightarrow \infty$), sendo calculadas pelos métodos descritos ainda neste tópico.

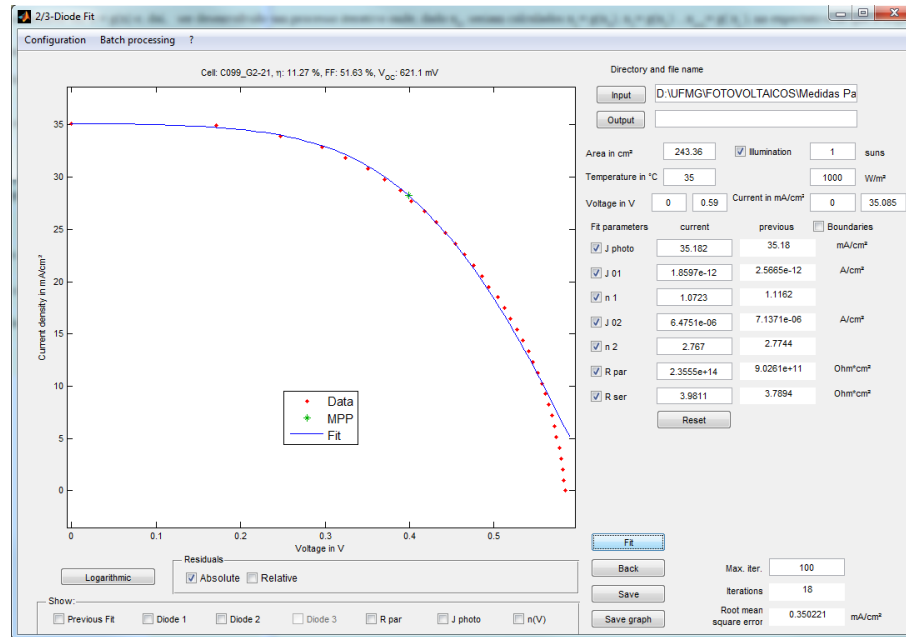


Figura 2.33: Tela do simulador de curvas I_xV

Outra ferramenta *open-source*, de excelente desempenho, para extração de parâmetros e ajuste de curvas é o programa *2/3-Diode Fit* (figura 2.33), desenvolvido por Stephan Suckow [44, 45]. Nela é possível extrair todos os parâmetros para uma ou duas exponenciais, levando em consideração área da célula (valores e gráficos fornecidos em densidade de corrente), temperatura e irradiância. Além disso, com os valores calculados, também é possível simular as curvas extraídas com tais parâmetros. A ferramenta também permite trabalhar com curvas no escuro e é possível realizar os testes desconsiderando o segundo diodo.

Por fim, o método utilizado para ajustar a curva a partir dos parâmetros extraídos é o método numérico de Newton-Raphson ou das tangentes descrito por Mathews [46], que tem por objetivo convergir à raiz da função, encontrando assim a solução.

Sua implementação baseia-se na seguinte fórmula:

$$I_{n+1} = I_n - \frac{f(I_n)}{f'(I_n)} \quad (2.24)$$

Onde $f(I_n)$ é a equação do modelo (equação (2.2) para uma exponencial ou (2.3) para duas exponenciais), $f'(I_n)$ é a sua respectiva derivada, I_{n+1} é o valor de corrente a ser encontrado e I_n é o valor atual da corrente. O processo inicializa com o

valor de corrente igual à corrente de curto-circuito (I_n) como sendo a primeira estimativa da raiz. O valor encontrado, que provavelmente não será zero, será o valor inicial da próxima iteração e assim sucessivamente, até que a tangente que corta o eixo x ($I = 0$) seja bem próximo de I encontrado, por um erro arbitrariamente escolhido ($E=10^{-10}$ A) ou que tenha percorrido todos os valores do vetor x . A lógica do algoritmo é mostrada no fluxograma da figura 2.34.

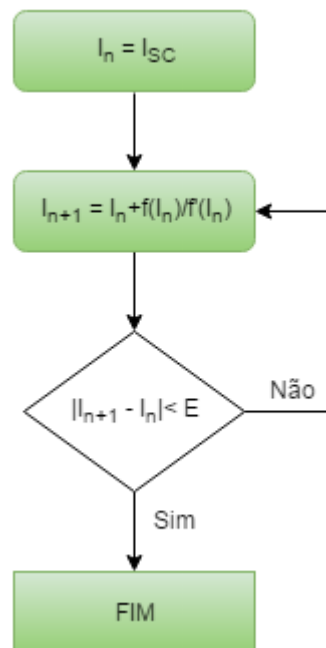


Figura 2.34: Fluxograma do processo de Newton Raphson

Tanto o *cftool* quanto o *2/3 Diode Fit*, extraem os parâmetros do dispositivo (lembrando que o *cftool* não considera as perdas resistivas). Porém, pode-se também encontrar os valores dos mesmos através de fórmulas conhecidas na literatura de forma não-iterativa. A corrente de saturação reversa (para uma ou duas exponenciais) pode ser encontrada com a extração da curva $I \times V$ no escuro (irradiância $\rightarrow 0$ W/m²) e fazendo a linearização da curva, como pode ser visto na figura já comentada anteriormente, no tópico 2.2.4 de Curvas Extraídas (figura 2.16). Com a compressão logarítmica da corrente, fica mais perceptível os efeitos das correntes na curva $I \times V$, que se apresenta então como $\ln(I) \times V$. Vale observar que, somente os valores da corrente serão comprimidos, a curva não é traçada com escala logarítmica.

Para o modelo de uma exponencial, a curva apresentada é aproximada para uma reta $f(x) = ax + b$. O valor de b (para $x = 0$) é o valor da corrente de saturação reversa (I_0). Já a inclinação (a) fornece o valor do fator de idealidade (n). Para o

modelo de duas exponenciais, o raciocínio é exatamente o mesmo, porém a curva será aproximada para duas retas, onde cada uma irá representar o domínio de um diodo. A extração de I_{01} , n_1 , I_{02} e n_2 será exatamente como já descrito, porém cada par de parâmetros para sua respectiva reta.

A resistência série, como falado, possui diversas maneiras de ser encontrada, e ainda é tema de estudos nos dias atuais. De acordo com Castañer [28], quando se restringe apenas à análise da resistência série, a célula solar pode ser modelada apenas em função de um diodo (corrente de difusão). Para o trabalho, três métodos foram escolhidos e comparados:

- 1) Método da derivada: Este método consiste em derivar a equação do modelo pela tensão (dI/dV). Como a resistência série tem um efeito na inclinação da curva entre o ponto de máxima potência e V_{OC} (apontado na Figura 2.35), a derivada é realizada no ponto de V_{OC} por ser o valor conhecido neste trecho. Sua equação é descrita por:

$$R_s = \frac{1}{dV/dI_{V_{OC}}} = \frac{1}{I_0 \cdot \frac{q}{n \cdot k \cdot T} \cdot e^{\frac{q \cdot V_{OC}}{n \cdot k \cdot T}}} [\Omega] \quad (2.25)$$

Para uma exponencial e:

$$R_s = \frac{1}{I_{01} \cdot \frac{q}{n_1 \cdot k \cdot T} \cdot e^{\frac{q \cdot V_{OC}}{n_1 \cdot k \cdot T}} + I_{02} \cdot \frac{q}{n_2 \cdot k \cdot T} \cdot e^{\frac{q \cdot V_{OC}}{n_2 \cdot k \cdot T}}} [\Omega] \quad (2.26)$$

Para duas exponenciais.

- 2) Método da inclinação: Já é sabido que a resistência série tem uma interferência na inclinação da curva entre o ponto de máxima potência e V_{OC} . Calculando a inclinação da reta neste trecho ($\Delta I/\Delta V$), encontra-se um valor médio de R_s . Não é o método mais confiável por depender de pontos escolhidos pertencentes à curva, mas é uma metodologia simples e pode estimar valores preliminares. De forma um pouco mais elaborada, pode-se extrair a resistência série por regressão linear por mínimos quadrados. É preciso selecionar alguns pontos compreendidos entre $-5\% I_{SC}$ e $20\% I_{SC}$

[47] (caso não se tenha valores extrapolados ao de V_{OC} , considera-se o primeiro valor para $I = 0$). O valor invertido da inclinação (e de sinal também invertido) será o valor da resistência.

- 3) Método proposto pela norma IEC 60891 [49]; O detalhamento do seu método de extração virá no tópico 3.1.2.1, quando se explica o procedimento de conversão de curvas $I \times V$ para condição padrão de testes (STC).

A resistência paralela foi encontrada por dois métodos diferentes, sendo eles o método da derivada e o da inclinação, ambos também utilizados para o cálculo da resistência série. Como a resistência paralela interfere nos pontos iniciais da curva pertencentes ao intervalo entre tensão igual a zero e a potência máxima (indicado na Figura 2.35), ambos os métodos serão trabalhados neste intervalo. Para o método da inclinação os valores para a regressão dos mínimos quadrados vão abranger a faixa de $-5\% V_{OC}$ e $20\% V_{OC}$. Para o método da derivada, a mesma será realizada para $V = 0$. As equações (2.27) e (2.28) apresentam as respectivas equações para uma e duas exponenciais.

$$R_p = \frac{1}{dV/dI_{V=0}} = \frac{1}{I_0 \cdot \frac{q}{n \cdot k \cdot T} \cdot e^{(0)}} [\Omega] \quad (2.27)$$

$$R_p = \frac{1}{I_{01} \cdot \frac{q}{n_1 \cdot k \cdot T} \cdot e^{(0)} + I_{02} \cdot \frac{q}{n_2 \cdot k \cdot T} \cdot e^{(0)}} [\Omega] \quad (2.28)$$

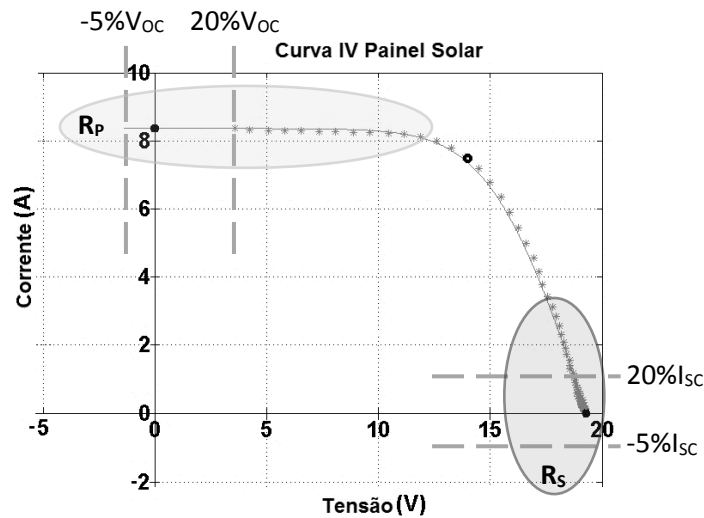


Figura 2.35: Indicação das regiões para extração de resistência série (R_s) e paralela (R_p) na curva IxV

Conhecendo todos os parâmetros que compõem a equação do modelo, a curva IxV ajustada poderá ser traçada. A partir deste ponto, a análise de resultados será dividida em três principais partes:

- Comparação de curvas extraídas com o analisador de parâmetros com curvas extraídas com o medidor-fonte (comparação de equipamentos);
- Uma curva extraída de um equipamento (realizado com o equipamento que apresentar maiores vantagens e resultados) comparada com:
 - As curvas ajustadas pelo método de Newton Raphson a partir dos parâmetros extraídos;
 - A curva ajustada com o *software 2/3 Diode Fit*.
- Curvas extraídas no sol artificial comparadas com curvas extraídas no sol natural.

Como proposto por André Carvalho [48] em seu trabalho, algumas formas de comparação podem ser feitas entre curvas IxV, sendo elas:

- Análise gráfica;
- Comparação por resíduos;
- Comparação de parâmetros globais.

Os três métodos serão utilizados para uma melhor visualização de resultados. O propósito com todos estes testes é validar a melhor forma de se obter resultados satisfatórios, ou, até mesmo, comprovar metodologias falhas, e por vezes implementadas, para caracterização de célula solar.

Para que se possa comparar curvas em diferentes condições de testes ou realizadas em diferentes equipamentos, é preciso considerar algumas observações e padrões estabelecidos pelo IEC. São elas:

- Temperatura: 25 °C na célula, com um erro de +/- 1 °C;
- Irradiância: 1000 W/m²;
- Distribuição espectral: Similar ao padrão AM1.5G.

É fundamental também que o equipamento de medição esteja com uma calibração certificada, para garantir um bom desempenho do instrumento.

Seja o teste realizado sob a luz do sol ou um simulador solar, estas características devem ser mantidas e, em caso de algum parâmetro divergente da condição de teste padrão (STC - *Standard Test Conditions*), deve-se aplicar o fator de conversão proposto na norma IEC 60891.

2.4.2. Modelagem do Cálculo de Mobilidade dos Portadores

Durante o percurso de testes e estudos que engloba todo o grupo dedicado à pesquisa na área de fotovoltaico, surgiu a observação do comportamento da resistência série diante de variações na temperatura. Enquanto para a modelagem em microeletrônica a resistência aumenta ao aumentar a temperatura, na modelagem de uma célula solar o comportamento é inverso, diminuindo ao aumentar a temperatura. Para tanto, um estudo mais detalhado sobre a resistividade é necessário, podendo, desta forma, compreender o que gera esse conflito de comportamento.

Primeiramente, é importante a visualização dos elementos de um semicondutor e que serão essenciais para os cálculos a serem realizados. A Figura 2.36 indica os parâmetros utilizados nos cálculos.

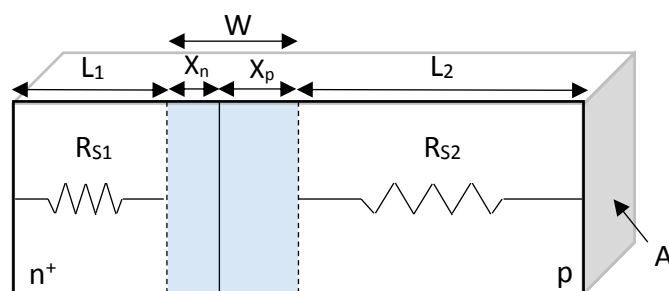


Figura 2.36: Junção PN com tamanhos e resistências séries indicados

Onde W é a largura da região de depleção composta por x_n (região de depleção do lado n) e x_p (região de depleção do lado p), L_1 e L_2 formam a região *quasi-neutra* do dispositivo e, juntamente com W , representam o comprimento do dispositivo. R_{S1} e R_{S2} são as resistências séries do corpo do semiconductor e A é a área da seção transversal.

Como dito anteriormente, a resistência é diretamente proporcional à resistividade, como pode ser visto na equação (2.29) seguinte.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (2.29)$$

Onde ρ é a resistividade do material, L é o comprimento do dispositivo e A é a área da seção transversal. Já a resistividade é dada por:

$$\rho = \frac{1}{q \cdot (\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p)} \quad (2.30)$$

Onde μ_n e μ_p são as mobilidades dos portadores de carga negativa e positiva respectivamente, e n e p representam a densidade de portadores de carga do tipo elétron e buraco, respectivamente.

É sabido que a densidade de portadores do material se altera com a temperatura e seu comportamento pode ser apresentado dividido em três regiões, como mostra a Figura 2.37. *Freeze-out* é a parte onde portadores são considerados “congelados”; a energia térmica não é suficiente para ionizar todas as impurezas presentes, estando então inativas. A região extrínseca é a melhor área para se trabalhar pois nela as impurezas estão completamente ionizadas e a densidade de portadores se iguala à concentração de impurezas. Por fim, a região intrínseca possui um comportamento que se assemelha ao de um semiconductor intrínseco, possuindo mais portadores gerados termicamente que por dopagem.

Analisando a conduta da mobilidade descrita em 2.2.5, assim como a da concentração de portadores pela variação de temperatura, pode-se observar o comportamento da resistividade com a alteração térmica e, conseqüentemente a variação da resistência com a temperatura.

Porém, é preciso levar em conta também o comprimento do material. Como visto na Figura 2.36, L depende diretamente do valor da região de depleção.

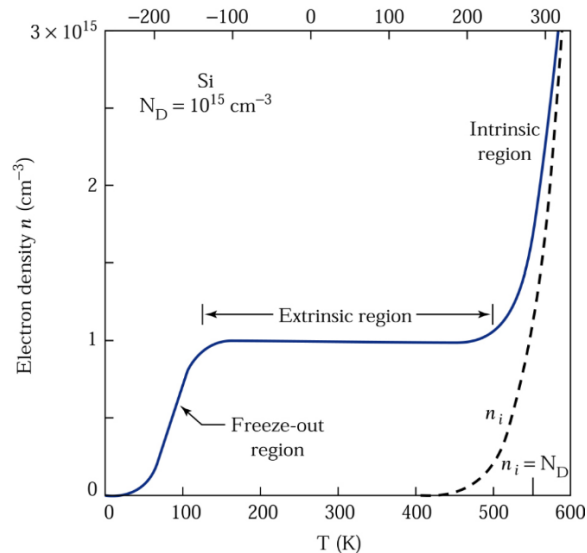


Figura 2.37: Densidade x Temperatura de um semicondutor extrínseco com dopagem de 10^{15} cm^{-3} [5].

A espessura da região de depleção de uma junção PN pode ser escrita como mostra a equação (2.31). Dependente da permissividade do semicondutor (ϵ_s), da carga do elétron (q), das densidades de impurezas aceitadoras e doadoras (N_A e N_D) e da diferença de potencial que aparece espontaneamente na região (*built-in potential* – V_{bi}). Já V_{bi} se mostra dependente (equação 2.32) da constante de Boltzmann (k), da temperatura (T), da carga do elétron, das densidades de impurezas e da concentração de portadores intrínsecos (n_i) (equação 2.20). Analisando as equações (2.32) e (2.20), nota-se que, mesmo sendo um fator logarítmico, a influência dos portadores intrínsecos é maior que a dependência direta da temperatura, acarretando na diminuição do valor de V_{bi} com o aumento da temperatura. Como W depende diretamente de V_{bi} , o aumento da temperatura também irá ocasionar na diminuição de seu valor.

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_s}{q} \cdot \left(\frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D} \right) V_{bi}} \quad (2.31)$$

$$V_{bi} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right) \quad (2.32)$$

A variação da região de depleção está diretamente ligada ao comprimento das regiões quasi-neutras do material (L_1 e L_2), como pode ser visto na Figura 2.37. Como a resistência possui uma relação direta com tal comprimento, ao aumentar a temperatura diminui a região de depleção e, conseqüentemente aumenta o comprimento das regiões do material.

Com a modelagem matemática de tais fatores será possível analisar qual parâmetro (resistividade e comprimento) é predominante em cada temperatura aplicada, resultando na resistência série do material.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo contempla os testes experimentais e computacionais, com o intuito de identificar uma maneira analítica ou numérica que melhor ajuste uma curva IxV experimental. Simultaneamente à descrição do processo elaborado, apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos, considerando parâmetros de ajuste que tenham significado físico. Para tanto foram adotados vários métodos, reportados na literatura, para extração desses parâmetros a partir de curvas experimentais sob sol e no escuro. Diante dos resultados obtidos, faz-se uma discussão sobre dificuldades encontradas e avalia-se as condições para trabalhar com simulações de associações de células e painéis solares.

3.1. Testes Elétricos

A curva IxV de uma célula solar carrega consigo características importantes sobre o seu comportamento. É a partir dela que se pode extrair os valores de parâmetros que representam o dispositivo. Os testes elétricos realizados têm por objetivo a obtenção da curva de células em análise de acordo com a norma internacional IEC e as metodologias desenvolvidas que se adequem às necessidades e limitações do ambiente de trabalho. A partir das curvas encontradas, deve-se analisar os resultados, encontrar os parâmetros para que assim se possa avaliar sua eficiência.

Ao conhecer as características elétricas da célula solar, é possível realizar comparações entre dispositivos e equipamentos utilizados nas medições. Tais comparações por sua vez validam metodologias, apresentam o desempenho dos equipamentos, podendo revelar suas falhas, restrições de medição ou suas potencialidades.

Para realizar os testes elétricos é preciso elaborar um *setup* de montagem, com o qual se tenha a menor interferência possível de fatores externos, analisando somente o comportamento da célula. Duas alternativas foram implementadas na tentativa de extrair a curva IxV das células solares, sendo que uma utiliza apenas dois fios para aplicar e medir tensão e corrente e a outra faz uso de quatro fios com o mesmo propósito. A primeira é conhecida como *2-wire* (2 fios), ilustrada na figura 3.1. É possível escolher qual fonte de alimentação será utilizada (corrente ou tensão) e

aplicada no circuito através do par de fios utilizados. Em série com a fonte é ligado o medidor de corrente, enquanto em paralelo é ligado o medidor de tensão.

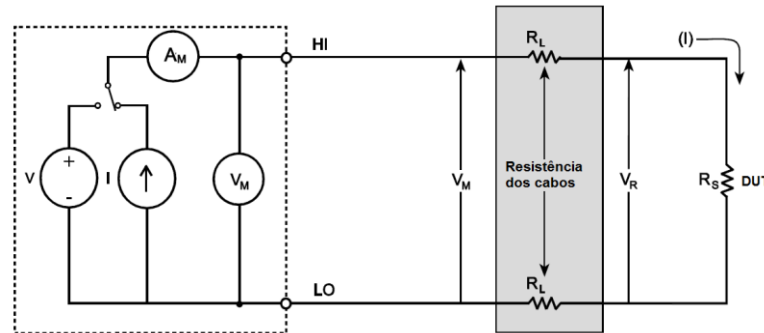


Figura 3.1: Método de 2 fios (Adaptado de [51])

Onde V é a fonte de tensão, I é a fonte de corrente, A_M é o amperímetro, V_M o voltímetro, DUT (*Device Under Test*) é o dispositivo sob teste e R_L (*Lead resistance*) é a resistência dos cabos.

Como pode ser observado, o esquema de dois fios consiste em ligá-los diretamente nos terminais da célula solar (o dispositivo sob teste em questão), medindo a corrente através de A_M em série com a fonte e da tensão através de V_M nos pontos HI e LO (*High* e *Low*) indicados na figura 3.1. Observa-se, porém, que, como os cabos utilizados para a medição não estão imunes de resistências presentes em toda sua extensão, o valor de tensão medido é a soma das quedas de tensões nas resistências do cabo e também a que se encontra na célula solar. Com isso, a tensão que é de interesse (apenas no DUT) não é a única medida. O resultado é caracterizado por um grande efeito de resistência série, descaracterizando o dispositivo. A figura 3.2 retrata o *setup* de montagem para a metodologia descrita.

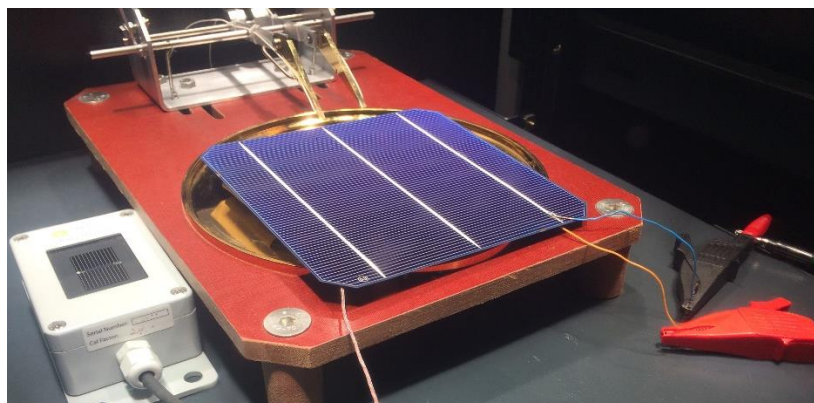


Figura 3.2: Aplicação do método de 2 fios na célula monocristalina

A segunda alternativa foi a utilização do método *4-wire* (4 fios), como mostra a figura 3.3.

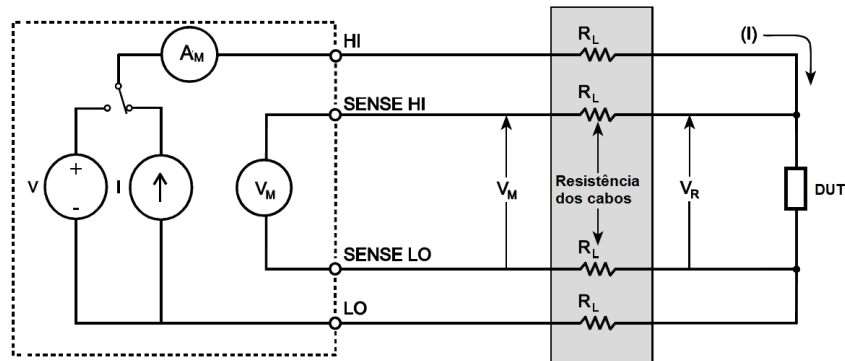


Figura 3.3: Método de 4 fios (Adaptado de [51])

Ao contrário do método anterior, quatro conexões distintas são ligadas ao dispositivo. Um par é responsável em aplicar a tensão ou corrente (além de medir a corrente em série) através dos pontos HI e LO indicados, enquanto com o outro (*sense HI* e *sense LO*) se mede a tensão sobre o dispositivo. Por ter uma alta impedância no voltímetro do equipamento, muito maior que do DUT, a corrente através das resistências dos cabos é desprezível, fazendo com que apenas a tensão no dispositivo seja medida. Como os cabos HI e *sense HI*, LO e *sense LO* só se conectam na própria célula solar, assegura-se que o valor de tensão medido refere-se somente ao dispositivo.

Realizando a medição da curva $I \times V$ de uma célula utilizando os dois métodos descritos acima, a discrepância de resultados encontrados já era notável, como se pode observar na figura 3.4, apresentando as curvas extraídas com o equipamento *Source-Meter*.

Ainda assim, de acordo com o que foi relatado no capítulo anterior referente à curva $I \times V$ de uma célula solar, os resultados obtidos nos testes iniciais se apresentaram distantes de uma curva característica para tal dispositivo. O formato da curva não condiz com o esperado (figura 2.15a) onde o valor de corrente é praticamente constante para baixas tensões, região de onde se extrai a resistência paralela. Além disso, o valor de I_{SC} apresentado no *datasheet* da célula é em torno de 8,9 A, longe do valor visualmente obtido na ocasião (próximo à 4 A).

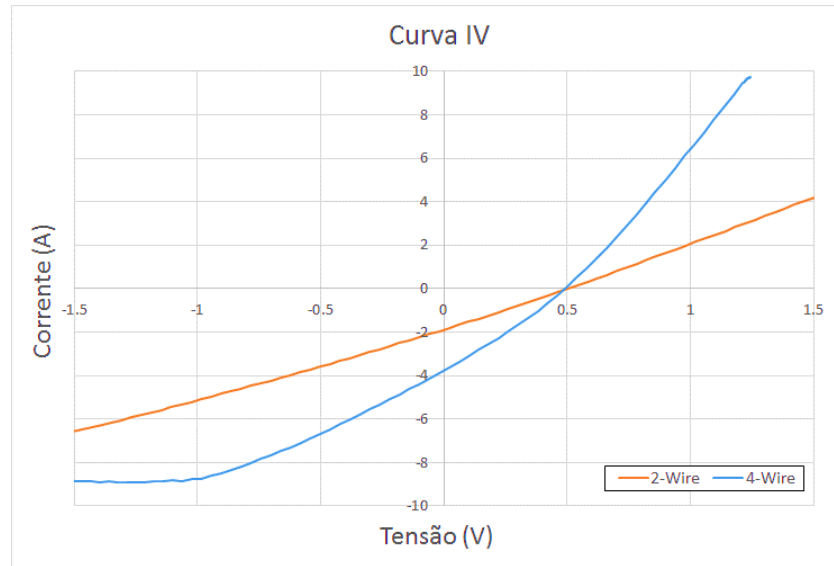


Figura 3.4: Comparação de resultados dos métodos

Neste momento, é muito importante refletir e avaliar os principais motivos que podem impossibilitar o melhor desempenho de uma célula, quando se refere à medição da curva. Dentre os principais pontos, pode-se enfatizar:

- Instrumentação utilizada;
- Controle de medição da temperatura e da irradiância;
- Regime permanente de tensão e corrente entre diferentes medições;
- Contatos elétricos e mecânicos.

Os equipamentos utilizados, como já descrito, apresentam-se calibrados diante de todos os testes realizados, inclusive o kit responsável pela medição de temperatura e irradiância que compõe o *PVAnalyzer*. A medição de ambos os parâmetros característicos externos deve ser feita por toda a extensão dos testes, ocorrendo em paralelo às extrações das curvas. Em caso de impossibilidade de realizar a medição da irradiância ao mesmo tempo que se expõe a célula solar ao sol (como os testes realizados no sol artificial que possui uma área limitada), a irradiância deve ser medida a cada troca de teste (que será explicado no tópico seguinte) e por uma variação temporal que assegure sua estabilidade na medição.

Todos os testes foram exaustivamente repetidos, isto é, testes sequenciais para analisar a repetibilidade de resultados diante as mesmas condições trabalhadas (entende-se condições de trabalho como irradiância, temperatura, dispositivo em teste e fonte de alimentação aplicada). Realizou-se também testes sequenciais diários, o que implica em reiniciar equipamentos em uso de um dia para o outro e assim analisar

a reincidência de resultados. Por fim, testes com um intervalo maior de tempo entre eles, como por exemplo de uma semana para outra também foram avaliados. Foi observado uma consistência nos resultados obtidos, uma vez que não apresentaram mudanças de comportamento de tensões e correntes diante das condições citadas.

O ponto que se pode considerar como perda maior para tal situação então é o contato elétrico entre a plataforma de apoio e a célula. A mesa de testes do simulador solar, como dito no capítulo anterior, possui um prato de diâmetro igual a 200 milímetros e com bordas elevadas, o que impossibilita as células de área igual a $156 \times 156 \text{ mm}^2$ e diagonal de aproximadamente 205 milímetros (suas pontas são chanfradas), de encostar por completo o lado anodo na superfície. Além disso, os contatos realizados pela mesa de testes que engloba o prato e os garfos, são de apenas dois fios, um para cada terminal disponibilizados em conectores na parte frontal do sol.

Diante de tal situação, diversos testes foram realizados na tentativa de reduzir todas as possíveis perdas de potência ocasionadas pelo contato elétrico, tais como:

- Trabalhar com a célula elevada por um isolante em relação à superfície, fazendo contato apenas nas bordas elevadas do prato;
- Realizar testes com células de mesmas características, porém em tamanhos reduzidos, desde que a área fosse conhecida, de forma que seja possível utilizar o próprio prato do sol artificial;
- Utilizar uma placa de fenolite com uma superfície de cobre para realizar o contato com a base da célula de área maior que a da própria célula, possibilitando a conexão dos terminais nas bordas da placa;
- Soldar os quatro fios diretamente na célula (dois em duas fitas condutoras embaixo e dois em duas fitas condutoras em cima), tanto nas pontas das fitas de um mesmo lado da célula quanto em pontas opostas das fitas ignorando os contatos do sol artificial.

Todos os testes realizados sem que a célula tocasse o fundo do prato (apenas nas bordas), apresentavam temperaturas elevadíssimas, em torno de $70 \text{ }^\circ\text{C}$, fazendo com que o banho termostaticado perdesse sua função. Além disso, por não tocar todo o prato, sua resistência de contato também aumenta muito (uma vez que a resistência é inversamente proporcional a área) e faz com que o contato elétrico seja ruim. Ademais, por possuir apenas um terminal para cada sinal (impossibilitando a medição

de quatro fios), os contatos da mesa de teste do sol foram descartados das medições, exigindo uma alternativa diferente para realizar o contato elétrico com a célula.

Utilizar a placa de fenolite com cobre como a plataforma de medição amplia a superfície de contato da célula no lado da base. Desta forma foi possível medir os valores de corrente e tensão utilizando o contato com o cobre e, na parte superior da junção PN, usou-se os garfos que compõem a mesa de teste do sol artificial, como pode ser visto na figura 3.5. Nela é possível visualizar alguns itens principais da montagem. O indicado com o número 1 apresenta a conexão do lado do catodo da junção através dos garfos (as garras realizam o contato do fio com o garfo), enquanto os números 3 e 5 retratam a conexão do lado do anodo a partir da placa de fenolite (que representa o número 4). Já o número 2 aponta para o medidor de temperatura conectado à placa de fenolite, enquanto número 6 indica o medidor de irradiância.

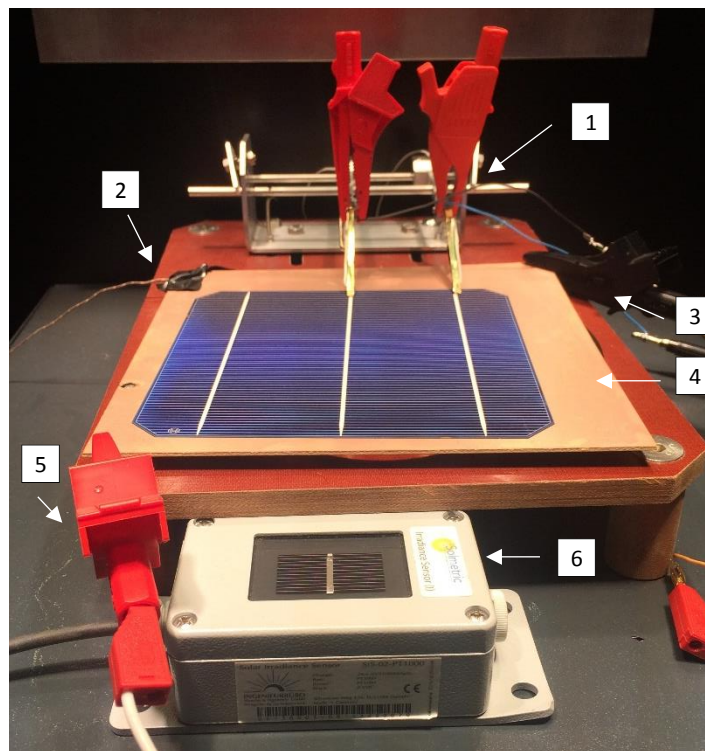


Figura 3.5: Montagem da célula em fenolite

A desvantagem de tal método é o acréscimo da resistência de contato que surge entre a placa e a célula. Como mostrado anteriormente, o método de quatro fios elimina a resistência dos cabos, uma vez que ambos caminham separadamente e só fazem contato entre si quando em contato com a própria célula. Porém, ao utilizar a placa como conector, toda a corrente que flui dos cabos para a célula agora passa por

um novo contato comum. Esse, por sua vez, apresenta uma queda de tensão da qual não se pode eliminar das medições. A figura 3.6 ilustra o acréscimo de tal resistência às medições quando comparado com a figura 3.3.

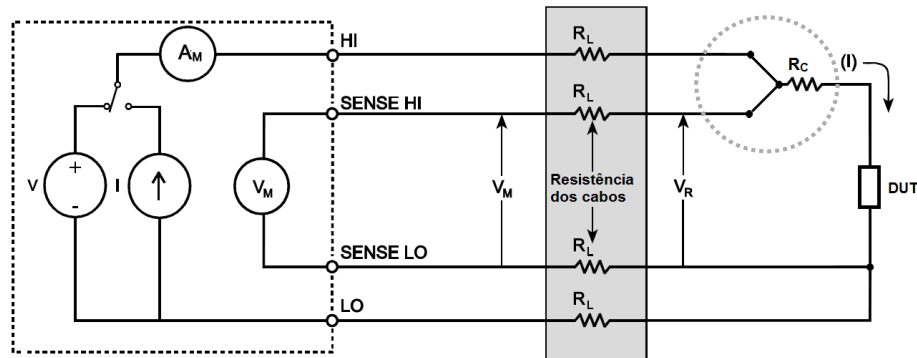


Figura 3.6: Circuito esquemático com a resistência de contato comum

Para medir esta resistência de contato (R_C , na figura), é preciso utilizar um ohmímetro ligado à face de cobre da placa e à base da célula. Já conhecendo a resistência do próprio cabo utilizado na medição, basta subtraí-la do valor obtido. Uma vez com o valor da resistência encontrado e a curva $I \times V$ medida, deve-se ajustar a mesma, de forma a modificar o valor de V medido. Seu novo valor passa a ser a diferença entre o medido e a queda de tensão em R_C .

Soldar os fios depara com um fator comprometedor: a fragilidade da célula. A espessura média dos dispositivos em teste é de 0,19 a 0,21 milímetros e a área de $156 \times 156 \text{ mm}^2$. Suas características físicas fazem da célula um dispositivo muito vulnerável à pressão mecânica sofrida ao soldar os fios, devendo levar em consideração a probabilidade de trincá-la. Apesar de ser um processo mais delicado de se realizar, soldar os fios em pontos distintos, elimina o acréscimo de resistência ocasionada pelo método com a placa de fenolite, possibilitando encontrar resultados melhores. Com o intuito de obter bons resultados, soldar foi o método escolhido para extrair todas as curvas que serão apresentadas neste trabalho. Além disso, como a mesa de teste pertence ao simulador solar, ao realizar medidas externas sob o sol natural não era possível utilizar seus contatos (prato e garfo), enquanto fios soldados na própria célula podem ser transportados para a área externa juntamente com o dispositivo e o equipamento de medição. A figura 3.7 retrata a metodologia adotada.

Definido o *setup* de montagem, é possível extrair então os pontos I e V da célula utilizada. Conforme descrito no início do capítulo, pretende-se extrair os parâmetros

característicos internos de uma célula solar de forma experimental para que assim avalie seu comportamento e sua eficiência.

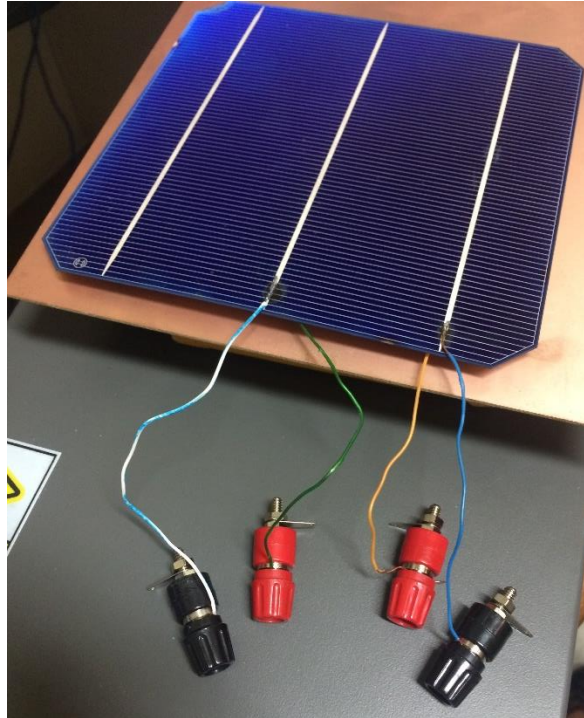


Figura 3.7: Montagem da célula monocristalina para extração de pontos I e V

3.1.1. Processo de medição e extração de parâmetros

Primeiramente curvas providas da exposição da célula ao sol artificial e curvas no escuro são extraídas. A partir delas, os parâmetros corrente de saturação reversa, fator de idealidade, resistências série e paralela são obtidos. Duas formas de extração de I_0 e n foram abordadas: A partir da curva extraída com a célula no escuro - onde utiliza-se do método da curva logarítmica (inclinação e extrapolação de ajustes), e a partir da curva extraída com a célula exposta ao sol artificial com resultados que o ajuste pela fórmula exponencial implementada na ferramenta *cftool* do Matlab® retorna ao ajustar a curva. Baseado nestes valores, duas formas de extração da resistência paralela foram aplicadas: pela inclinação e pela derivada, como descrito em 2.4.1. Já a resistência série foi encontrada através de três formas diferentes: pelo ajuste para STC (calculado como indicado na norma IEC 60891 e explicada no tópico seguinte), pela inclinação e pela derivada, também abordadas no tópico 2.4.1. Os valores encontrados permitem gerar curvas ajustadas para cada combinação de

resultados, podendo assim analisar o quão eficaz é a metodologia de extração. As curvas são comparadas com a curva obtida inicialmente quando exposta ao sol resultando em um valor *RMSE* (*Root Mean Square Error* ou erro médio quadrático) que é utilizado como critério de análise e comparação entre as próprias curvas ajustadas (menor *RMSE*, mais próxima será a curva ajustada da obtida).

O organograma da figura 3.8 apresenta a lógica descrita anteriormente.

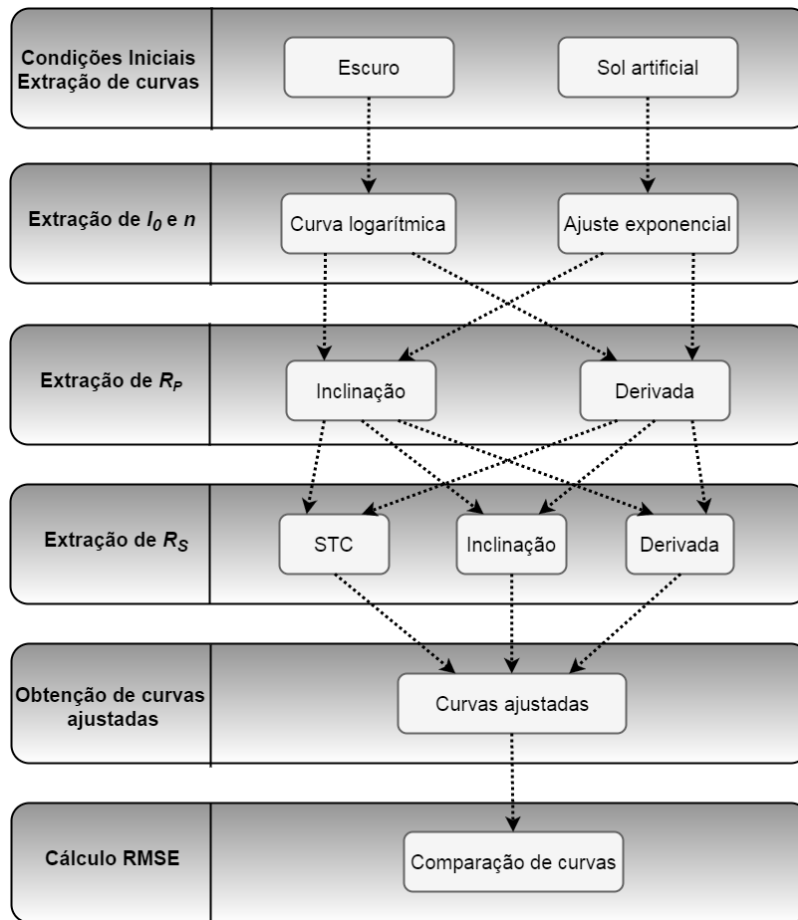


Figura 3.8: Organograma para extração do melhor ajuste

O cálculo *RMSE* foi realizado através da seguinte fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_I} (I_m(j) - I_{fit}(j))^2}{N_I}} \quad (3.1)$$

Onde j é a variável que percorre todos os pontos da corrente (N_I), I_m é o vetor de valores da corrente medida e I_{fit} é o vetor de valores da corrente ajustada.

Todo o processo de extração de curvas, tanto no escuro quanto exposta ao sol artificial (apresentados no primeiro bloco da figura 3.8), foi executado duas vezes para que as medições fossem realizadas pelos dois equipamentos de medição apresentados no capítulo anterior, o medidor-fonte e o analisador de parâmetros. De posse das curvas, passa-se para o processo de extração de parâmetros. Como também já discutido no capítulo dois, existem duas principais maneiras de modelar analiticamente o circuito de uma célula solar, sendo elas a aproximação para uma exponencial e, de forma mais completa, duas exponenciais. Com o intuito de avaliar a qualidade de tais abordagens, todos os parâmetros apresentados na figura 3.8 do segundo bloco em diante, são extraídos com as duas possibilidades. No final de todos os testes pretende-se avaliar: qual equipamento proporciona melhores resultados ou melhor praticidade de manuseio; qual a metodologia de modelagem analítica resulta em uma melhor solução; como avaliar se os resultados estão bons e satisfatórios.

3.1.2. Comparação entre equipamentos

A primeira parte de resultados de testes consiste na comparação entre equipamentos que permitirá avaliar o desempenho de cada um e reduzir a exposição de resultados, uma vez que, ao definir o equipamento que apresentou mais benefícios em relação ao outro, apenas o escolhido será utilizado para seguir com as análises do trabalho.

Para que se possa comparar curvas extraídas de dispositivos diferentes é preciso que se trabalhe com curvas em condições padrões de teste (*Standard Test Conditions* - STC). A Norma Internacional IEC 60904-1 (2006) é a primeira parte de um conjunto de normas para dispositivos fotovoltaicos. Descreve o procedimento para medição da curva característica corrente-tensão em dispositivos expostos à luz solar real ou a um simulador solar. Além disso, estabelece requerimentos básicos para as medições, diminuindo assim as incertezas na caracterização do dispositivo. Caso a curva obtida não esteja nos valores de temperatura e irradiância padrões determinados, faz-se uso da norma IEC 60891 (2009), que apresenta procedimentos para corrigir ambos os parâmetros de uma curva IxV extraída. Portanto, para que se possa comparar as curvas da célula extraídas em equipamentos distintos, é preciso seguir os passos que serão descritos em seguida.

3.1.2.1. Norma IEC 60891 para condições padrões de teste

Como dito, esta norma tem por objetivo definir os procedimentos de correções de temperatura e irradiância obtidos na curva $I \times V$ extraída do dispositivo sob teste, assim como instruções para definir parâmetros relevantes utilizados na realização da correção. São eles a resistência série e o fator de correção, explicitados posteriormente. A norma permite que esse procedimento de correção ocorra para curvas extraídas tanto sob luz natural quanto em simuladores solar, este último atendendo as classificações impostas na norma IEC60904-9.

Os ensaios laboratoriais com a luz solar artificial contínua foram escolhidos por serem conduzidos em um ambiente controlado, variando a temperatura e a irradiância às quais a célula está exposta. Já testes realizados na área externa, com o sol natural, se faz impossível atender aos requisitos da norma. O simulador solar já apresentado no tópico 2.3 atende às especificações da norma, permitindo assim a realização do procedimento adequado.

3.1.2.1.1. Procedimento de correção

A partir da curva $I \times V$, todos os pares de pontos corrente-tensão são corrigidos através das equações [49]:

$$I_2 = I_1 + I_{SC} \cdot \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.2)$$

$$V_2 = V_1 - R_S \cdot (I_2 - I_1) - \kappa \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) + \beta \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.3)$$

Onde:

I_1, V_1 são as coordenadas dos pontos medidos na amostra;

I_2, V_2 são as coordenadas correspondentes dos pontos corrigidos;

G_1 é a irradiância medida na amostra;

G_2 é a irradiância padrão ou a irradiância desejada;

T_1 é a temperatura medida na amostra;

T_2 é a temperatura padrão ou a temperatura desejada;

I_{SC} é a corrente de curto-circuito medida;

α e β são os coeficientes de temperatura de corrente e tensão, respectivamente, da amostra medida;

R_S é a resistência série interna da amostra;

κ é o fator de correção da curva.

Os *datasheets* das células de silício policristalino e monocristalino fornecem os coeficientes α e β , apresentados no capítulo 2, tópico 2.3. Porém a resistência série e o fator de correção são desconhecidos e precisam ser determinados para validar a equação. A própria norma padroniza a maneira de extrair tais valores. Para encontrar R_S é preciso obter no mínimo três curvas com irradiância diferentes sob mesma temperatura. Já para determinar o κ é preciso no mínimo três curvas com temperaturas iguais e irradiâncias diferentes. Diz-se temperaturas iguais uma estabilidade de medição de ± 2 °C, enquanto a irradiância não pode diferir mais que ± 1 %, conforme apresentado e estabelecido na norma IEC 60891.

O procedimento de teste se inicia obtendo a irradiância a qual a célula será exposta na região do prato determinada pelo simulador solar. Porém, como discutido anteriormente, o espaço do prato que compõe a mesa de testes do simulador é inferior ao tamanho da célula, o que impede de trabalhar com o medidor de irradiância simultaneamente enquanto se extrai a curva IxV da célula exposta ao sol. A solução encontrada foi extrair o valor da irradiância antes de cada medição e ao concluir cada uma das medições. Para cada obtenção do valor de irradiância, o medidor foi mantido no mesmo ponto de medida por um período de cinco minutos, com o intuito de observar a variação temporal do valor encontrado. Esse tempo de observação foi escolhido arbitrariamente e o resultado encontrado foi uma estabilidade na medição, onde se constatou uma variação de $\pm 0,6$ % para todas as medidas realizadas. Esse valor é inferior ao de 1 % permitido pela norma, validando assim a condição de irradiância para medição.

A célula de referência que compõe o simulador solar foi, em seguida, exposta aos testes e sua curva extraída apresenta o comportamento esperado, como uma curva IxV dentro do padrão de células solares e um valor de V_{OC} conforme indicado em sua especificação, isto para as condições padrões de testes. O que assegura a realização dos mesmos em outros dispositivos.

Em seguida a célula de teste foi colocada na correta posição de maior irradiância do sol artificial, mas sem estar ainda exposta à luz. Com o obturador

fechado e cobrindo a célula, aguardou-se uma estabilidade de temperatura em torno de 25 °C (variação de ± 2 °C permitida pela norma). Ao alcançar esse valor, iniciou o teste extraindo a primeira curva, com 1000 W/m² de irradiância ($\pm 0,6$ %) e temperatura 25 °C (± 2 °C). Porém, o aumento de temperatura da célula causado pela irradiância incidente nesta parte inicial é muito rápida, chegando a quase 30 °C antes mesmo do término da extração de pontos I e V.

Para o equipamento *Source-Meter*, a velocidade de extração da curva em relação a esta variação de temperatura é mais rápida, sendo que, a uma temperatura de 35 °C é possível realizar a medição completa sob mesma temperatura, ou com variação de ± 2 °C. Por este motivo, as curvas de irradiância diferentes foram extraídas com a mesma temperatura de 35 °C. Porém, o analisador de parâmetros não possui mesma eficácia. Para que não houvesse um aumento da temperatura enquanto os pontos I e V fossem extraídos, o passo da fonte de corrente foi espaçado, de forma a acelerar o processo de obtenção da curva completa antes que a temperatura aumentasse. Contudo, para baixas tensões (onde há uma pequena variação de corrente), o passo dos pulsos de corrente aplicada era suficientemente grande para não ocorrer sequer duas aplicações de corrente e assim tomar mais de um ponto neste trecho. A consequência dessa ausência de pontos é uma linearização do seu gráfico, em que, de um pulso que sucedia em um ponto de tensão negativa (alto valor de corrente), saltou para um ponto da curva em que a tensão já se aproximava de V_{MAX} . Entre tais pontos não ocorria nenhuma medição e, ao ligar os pontos consequentes, uma reta perceptível surge no gráfico. A figura 3.9b ilustra a condição descrita. Essa linearização descaracteriza a mesma e dificulta a extração de parâmetros e a realização do ajuste. O passo mais refinado torna muito lenta a extração, permitindo a variação da temperatura durante a medida. Na tentativa de se conseguir extrair as curvas de forma mais rápida e para uma mesma temperatura, o valor arbitrariamente escolhido para o analisador de parâmetros foi de 60 °C. Tal valor não se mostrou significativo, uma vez que todas as curvas de ambos os equipamentos serão convertidas para a mesma temperatura, indiferente do valor de referência utilizado nas extrações.

Definido o valor de temperatura padrão para cada equipamento, o próximo passo é alterar o valor da irradiância para o cálculo da resistência série. Na norma é falado que os valores exatos das irradiâncias não precisam ser conhecidos. Para

dispositivos lineares elas podem ser calculadas a partir da razão entre corrente de curto circuito, de acordo com a equação (3.4) mostrada abaixo:

$$G_N = \frac{I_{SC,N}}{I_{SC1}} \times G_1 \quad (3.4)$$

Porém, na tentativa de sempre validar as medições realizadas, os valores são medidos e reportados. São esses valores que serão utilizados nas equações (3.2) e (3.3) apresentadas aqui, retiradas da norma IEC 60891 (2009). A célula é resfriada até o valor de temperatura determinada anteriormente, para, assim, extrair a segunda curva IxV. O processo se repete pela terceira vez, obtendo então o conjunto mínimo de curvas para calcular o valor da resistência série interna.

3.1.2.1.2. Determinação da resistência série R_S

O método de calcular a resistência série é descrito no item 5 da norma IEC 60891. Consiste em deslocar as duas curvas de menores valores de irradiância para a de maior valor (maior I_{SC}) ou para o valor de irradiância desejada. Ou seja, para cada ponto de corrente medido, um novo cálculo é realizado a partir das equações (3.2) e (3.3) e seu valor é reajustado, alterando consequentemente o valor de tensão correspondente. O processo começa considerando R_S igual a zero. Em seguida, seu valor é alterado em um passo de 10 m Ω até que seja encontrado um valor em que a máxima potência das curvas ajustadas varie no máximo $\pm 0,5$ % em relação à curva de referência. Essa é a condição para determinar a resistência. A figura 3.9 retrata em a e b as curvas para o exemplo da célula de silício monocristalino utilizando cada equipamento.

Uma vez encontrada a resistência, deve-se determinar o fator de correção da curva, como já falado.

A partir da curva encontrada inicialmente (irradiância de 1000 W/m² $\pm 0,6$ % e temperatura de 35 °C ± 2 °C, no caso do *Source-Meter* e 60 °C ± 2 °C, no caso do analisador de parâmetros semicondutores), dá-se continuidade no teste e, ao alcançar uma temperatura diferente da escolhida anteriormente, a célula é exposta à extração da curva IxV novamente, com a mesma irradiância anterior. E o processo se repete para uma terceira temperatura. As curvas da figura 3.10 retratam as escolhas feitas

para ambos os equipamentos. No caso do analisador de parâmetros, a célula foi resfriada para 34 °C e, a partir dessa temperatura inicializou a medição da curva. Porém, no término da medição, o medidor já contabilizava uma temperatura superior a 36 °C. Pela norma permitir uma variação de ± 2 °C, essa curva extraída não poderia ser utilizada. Entretanto não foi possível obter curvas a baixas temperaturas que não apresentasse comportamento semelhante.

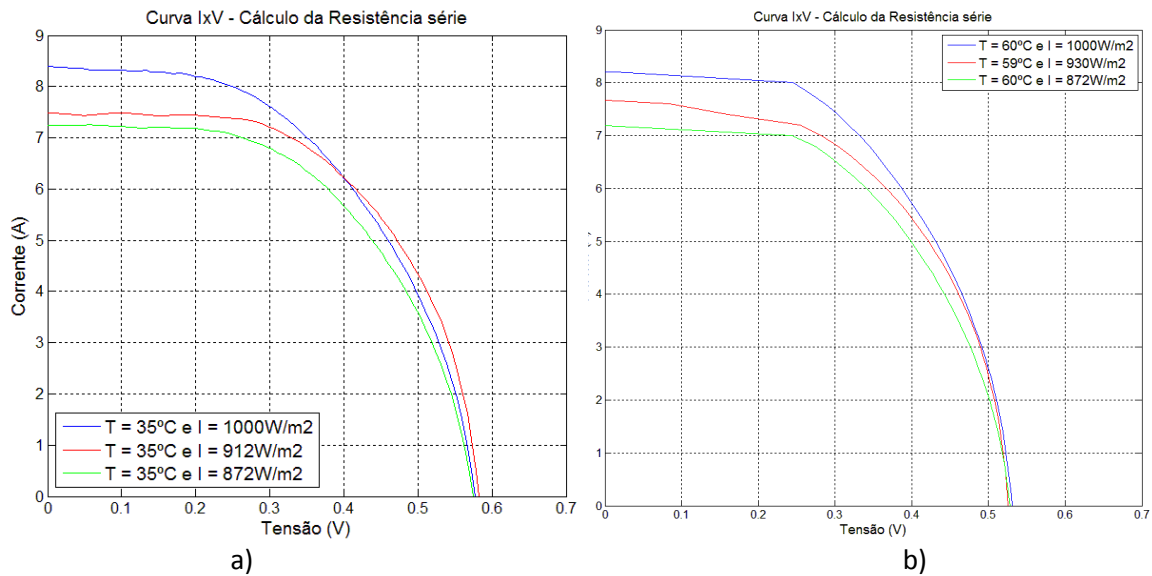


Figura 3.9: Curvas da célula monocristalina para o cálculo de resistência série, padrão STC extraídas com o a) *Source-Meter* e b) Analisador de parâmetros

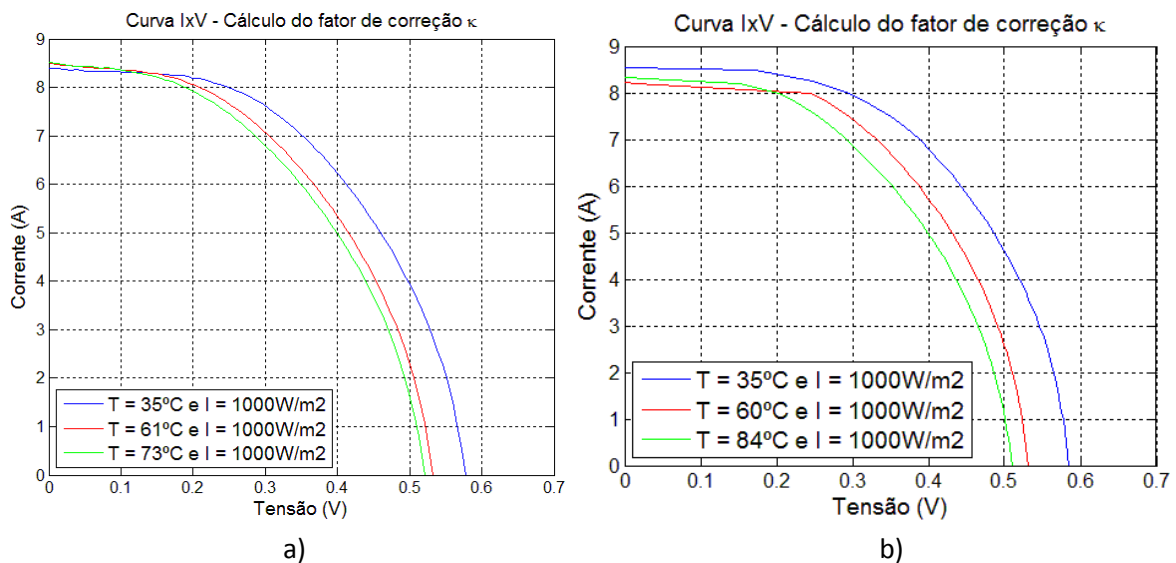


Figura 3.10: Curvas da célula monocristalina para o cálculo do fator de correção, padrão STC extraídas com o a) *Source-Meter* e b) Analisador de parâmetros

3.1.2.1.3. Determinação do fator de correção κ .

De posse das três curvas com mesma irradiância e temperaturas distintas, já se pode obter o valor de κ .

O método proposto na norma (item 6) se assemelha muito com o do cálculo da resistência série, onde as curvas de maiores temperaturas serão deslocadas para a de menor temperatura ou para uma temperatura desejada, também utilizando as equações (3.2) e (3.3) aqui reportadas. Para isso, deve-se aplicar os pontos I e V das curvas extraídas nas fórmulas, considerando κ igual a zero. Variando o valor do fator de correção de 1 m Ω /K para cima ou para baixo (positivo ou negativo), procura-se por um valor em que a máxima potência da curva ajustada varie em relação a curva de referência em, no máximo, $\pm 0,5$ %. O valor médio entre os fatores encontrados será o valor correto de κ .

A irradiância foi mensurada a cada início de uma nova medida sob a célula solar, fazendo necessário retirar o dispositivo para posicionar o medidor no centro do prato. Esse procedimento certifica a estabilidade da medição, desde que seu valor continue dentro da mesma faixa medida inicialmente, como foi observado.

Os testes descritos acima foram realizados também para a célula policristalina com ambos os equipamentos.

3.1.2.2. Resultados da comparação

A partir dos resultados obtidos pode-se comparar os equipamentos por uma análise gráfica, interpretando as curvas obtidas reproduzidas em um mesmo gráfico (figura 3.11) e verificando visualmente suas diferenças. Pode-se comparar também através de resíduos entre valores de cada ponto da curva, podendo expressar visualmente aonde as curvas aparentam uma maior diferença entre si. É a partir do erro residual que se calcula o *RMSE*.

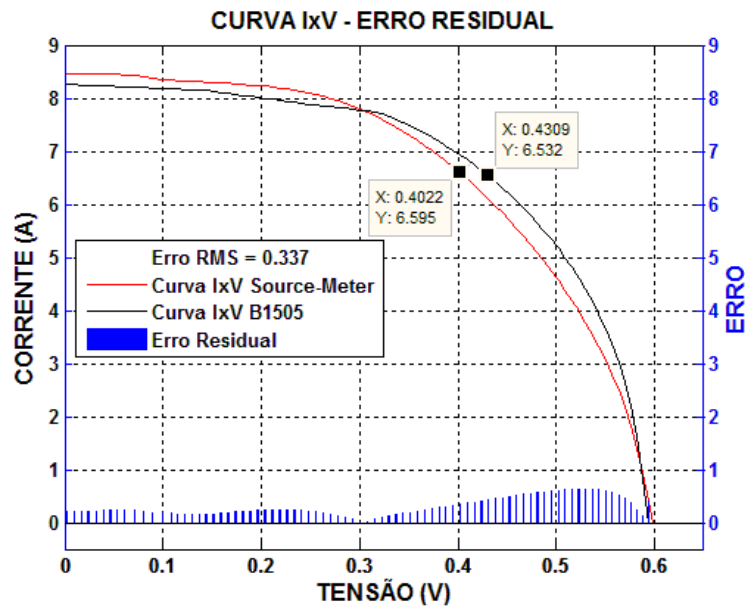


Figura 3.11: Comparação entre equipamentos para a célula monocristalina

A partir da figura 3.11 pode-se observar uma diferença entre as curvas medidas com equipamentos distintos. Por se tratar de equipamentos diferentes, era de se esperar que as curvas apresentassem leves diferenças, inclusive pelo fato de que cada equipamento atua com uma determinada fonte (*Source-Meter* como fonte de tensão e o analisador de parâmetros - B1505 - como fonte de corrente). A diferença de tipo fontes foi realizada propositalmente para que se possa notar uma proximidade entre resultados, não importando o método utilizado para alimentar o sistema. No entanto, alguns pontos discrepantes no decorrer da curva devem ser observados com mais detalhes.

A parte de erro residual inicial (até aproximadamente 0,3 V) é causada, principalmente, pelo problema já relatado referente ao analisador de parâmetros, onde um passo maior para extração da curva gera uma linearização no início. É visível o quanto a parte erroneamente reta gera uma discrepância de resultado quando comparado ao medidor-fonte. Outro ponto que se deve observar na diferença dos equipamentos é o valor medido para o ponto de máxima potência. Percebe-se, como apresentado na figura em função de V e I, que a curva do analisador obteve uma maior potência ($P = 2,81 \text{ W}$) que a encontrada pelo medidor-fonte ($P = 2,65 \text{ W}$). O ponto de máxima potência é considerado um aspecto muito importante para células solares e deve ser levado em consideração em todas as análises realizadas.

Tomado o conhecimento da semelhança de curvas, as principais diferenças de resultados entre equipamentos e a dificuldade encontrada com o equipamento analisador de parâmetros semicondutores quanto ao passo, pode-se avaliar qual equipamento é melhor para se trabalhar diante das condições apresentadas pelo ambiente de trabalho. A parte saturada do início da curva apresentada pelo analisador de parâmetros afeta a obtenção da resistência paralela, encontrada a partir do trecho inicial da curva. Além disso, não foi possível encontrar o valor exato de I_{SC} com tal equipamento, apenas obtido com a interseção da curva com o eixo das ordenadas. O ponto positivo está na indicação do valor do ponto de máxima potência. Apresenta-se um maior valor, o que sugere que o medidor-fonte (que exibe um menor valor de máxima potência) consome parte desta potência gerada pela célula e demonstra assim uma deficiência em apresentar o valor real da.. Entretanto, o *source-meter* ainda permite que se faça testes na área externa, diante do sol natural, condição com a qual não se pode trabalhar com o analisador de parâmetros por não ser portátil e deve-se permanecer dentro do laboratório. A partir de agora, portanto, todos os resultados apresentados foram obtidos com o medidor-fonte, para que assim possa evitar redundância em resultados e análises.

3.1.3. Aproximação para uma exponencial

Um modelo de célula solar de uma exponencial é o método mais utilizado por ser mais simples e ser dependente de apenas cinco parâmetros: I_{ph} , I_0 , n , R_S e R_P [52]. A corrente fotogerada é usualmente aproximada ao valor da corrente de curto circuito, I_{SC} . Apenas em casos de resistência série alta ($>10 \Omega\text{cm}^2$) que o valor de I_{SC} assume um valor menor que o da I_{ph} [53]. Os demais parâmetros foram obtidos através da metodologia mostrada no capítulo anterior a partir das curvas extraídas (tópico 2.4.1).

Seguindo o fluxo apresentado na figura 3.8 do tópico 3.1.1, após calcular e obter os resultados de todos os parâmetros pertencentes à equação que modela a célula solar, o próximo passo é ajustar a curva. No capítulo dois foi apresentado o método utilizado, sendo ele o processo de Newton Raphson.

I_0 e n são encontrados com o ajuste de uma função exponencial a uma curva experimental extraída a partir do simulador solar utilizando a ferramenta *cftool*. Seus valores combinados com as resistências série e paralela leva a seis resultados distintos apresentados na figura 3.12. O processo é repetido, porém para I_0 e n

encontrados a partir da curva logarítmica provinda da curva no escuro, gerando outros seis possíveis resultados que são apresentados na figura 3.13. Todos os gráficos gerados são comparados com a curva extraída no momento da medição da célula de silício monocristalino.

De posse dos doze gráficos gerados, pode-se realizar uma análise qualitativa e visualmente apontar qual seria a melhor combinação de resultados obtidos. Porém, como já visto anteriormente, é possível encontrar o erro *RMSE* (análise quantitativa) para melhor pressupor qual seria o resultado eminente da célula. O *RMSE* de todas as curvas é então calculado e comparado, indicando assim aquela que mais se aproximou da curva medida. Os valores dos erros são reportados posteriormente no tópico 3.1.4, ao contrapô-los aos encontrados com a aproximação por duas exponenciais.

As curvas ajustadas com I_0 e n extraídos da curva no escuro apresentaram um V_{OC} maior que da curva medida. Percebe-se este fato por todas as curvas estarem incompletas quando traçadas e não cortam o eixo das abscissas. Como o objetivo é a comparação das curvas e não há como realizá-la após a tensão de circuito aberto da curva medida, a reprodução da curva ajustada se completa no ponto em que sua tensão é o valor de V_{OC} da curva medida. Uma comparação após tal ponto poderia ser realizada em caso da curva medida apresentar valores de corrente negativa, isto é, a célula polarizada diretamente e extraído dela a continuação da curva. Porém, como não foi possível obter tais pontos, não há como comparar o restante da curva ajustada. Falsos testes são reproduzidos ao considerar que a corrente a partir desse ponto tem valor constante em zero.

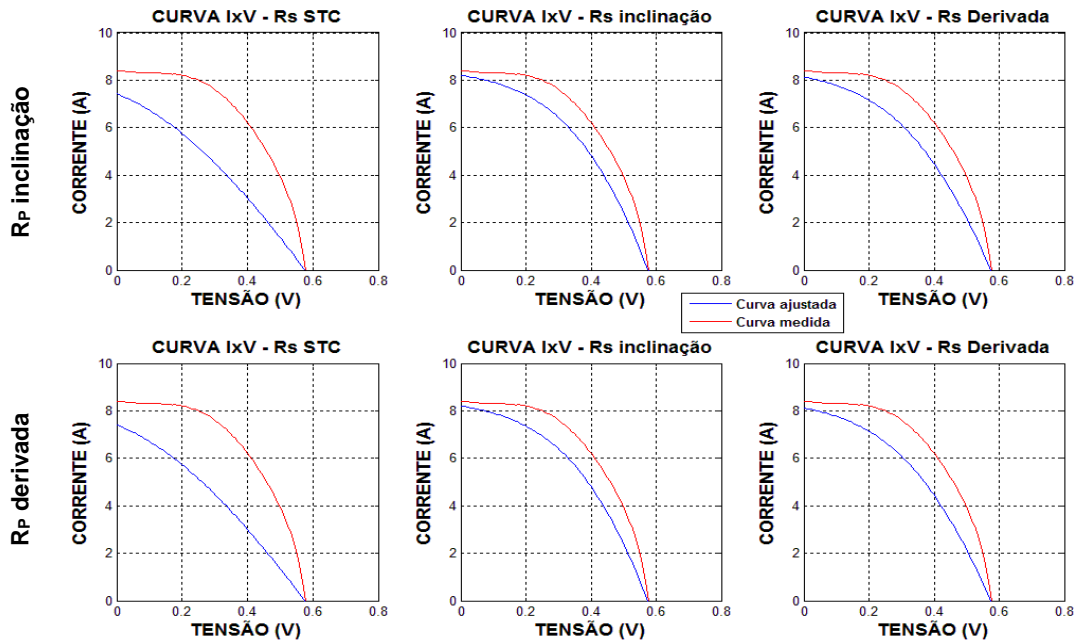


Figura 3.12: Curvas para I_0 e n extraídos do ajuste exponencial da célula monocristalina

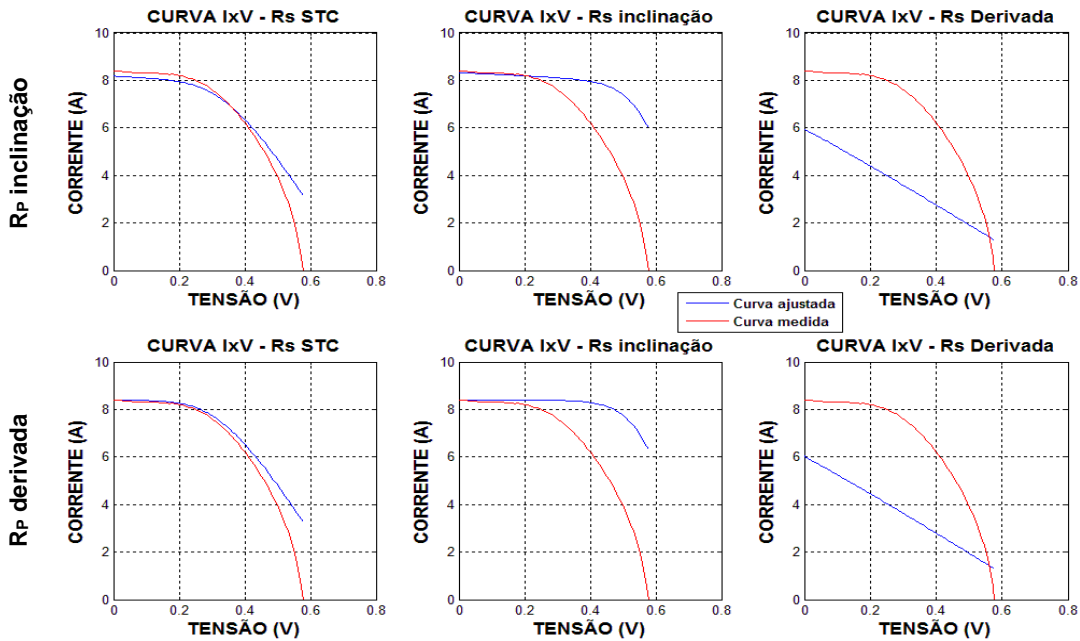


Figura 3.13: Curvas para I_0 e n extraídos da curva no escuro da célula monocristalina

A curva que apresentou o menor $RMSE$ possui os seguintes parâmetros: I_0 e n extraídos através da curva no escuro, R_P encontrado pela inclinação e R_S encontrado pelo método proposto para STC. Seu erro residual é apresentado na figura 3.14.

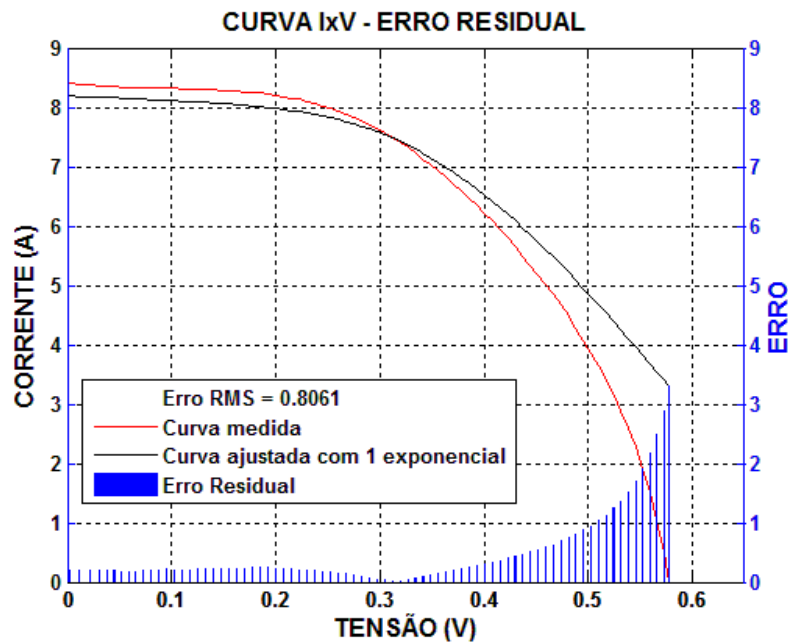


Figura 3.14: Curva com menor *RMSE* para uma exponencial da célula monocristalina

Em seguida, a mesma curva medida foi submetida ao código proposto por Stephan Suckow que, de forma iterativa extrai todos os cinco parâmetros que o modelo de uma exponencial possui. Para métodos iterativos é preciso fornecer valores iniciais para os parâmetros que serão estabelecidos. Valores inapropriados podem resultar em algoritmos não convergentes. Os valores de entrada fornecidos pelo usuário além dos pontos da curva são: I_{SC} , V_{OC} , irradiância, área e temperatura. Seu resultado pode ser visto na figura 3.15.

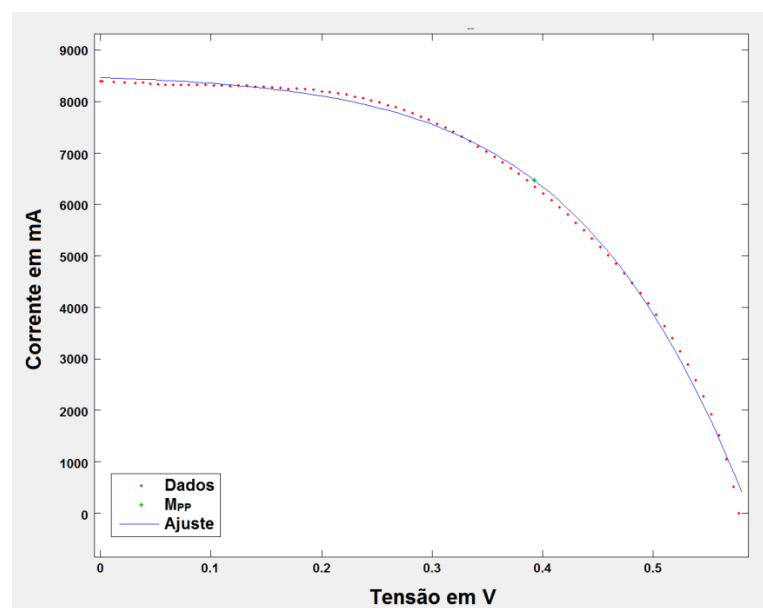


Figura 3.15: Ajuste para 1 exponencial da célula monocristalina com o *software 2/3 Diode Fit*

O erro residual gerado a partir da aproximação acima é retratado na figura 3.16 seguinte.

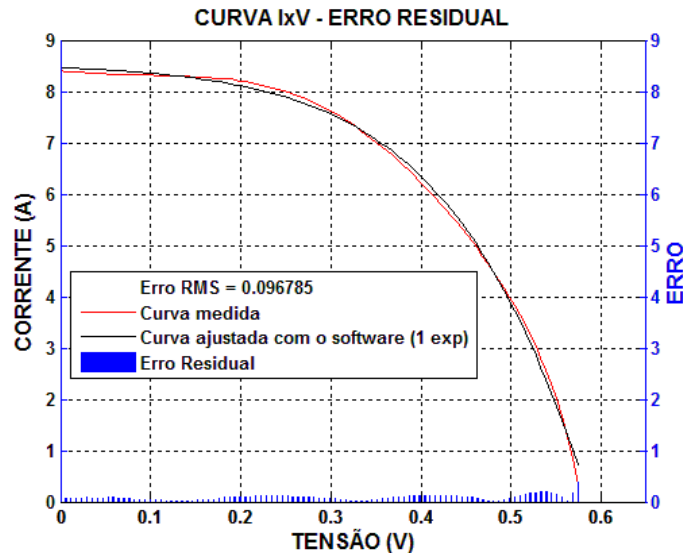


Figura 3.16: Erro residual entre curva medida e curva ajustada com o *software*

A tabela 3.1 apresenta todos os resultados encontrados, com os resultados do melhor ajuste em destaque.

As figuras 3.14 e 3.16 apresentam os erros residuais para cada ponto de tensão entre as curvas medida e ajustada no modelo de uma exponencial. Para a primeira comparação é notável que, para os pontos de maior interesse que pertencem à região de máxima potência, os erros são baixos, aumentando quando se afasta da região. Diferente do resultado obtido com o ajuste do *software*, que se mostrou bem mais estável por toda a curva apresentando baixíssimos erros.

De acordo com os valores obtidos e apresentados na tabela 3.1, todos os parâmetros apresentaram resultados bem diferentes quando comparados os métodos analíticos não-iterativos e o proposto por Suckow. O efeito de uma resistência paralela menor é visivelmente perceptível, pois, ao aumentar apenas o seu valor, a principal diferença na curva é a elevação da reta que a caracteriza, aproximando o valor de I_{sc} entre medido e ajustado. A resistência série, o fator de idealidade e a corrente de saturação reversa foram os parâmetros que apresentaram maiores diferenças após o ponto de máxima potência. O fator de idealidade encontrado pelo método de Suckow extrapola o valor clássico (igual a 2). De acordo com o manual do simulador e algumas

literaturas [2, 55-59], valores assim são normais e aceitáveis na prática, para células repletas de defeitos.

Tabela 3.1: Resultados obtidos na extração de parâmetros para a célula monocristalina

		Célula Monocristalina	
		Analítico não-iterativo	<i>2-Diode Fit</i>
R_s (Ω)	STC	0,0380	0,0041
	Inclinação	0,0121	
	Derivada	0,1096	
R_p (Ω)	Inclinação	1,445	8,9819 x10 ⁺³
	Derivada	7,0890x10 ⁺³	
I₀ (A)	Escuro	7,3560 x10⁻⁶	0,062274
	Ajuste exponencial	0,1030	
n	Escuro	1,9638	4,4959
	Ajuste exponencial	4,9682	
V_{oc} (V)		0,5776	0,5878
I_{sc} (A)		8,3978	8,484
V_{MAX} (V)		0,3857	0,3925
I_{MAX} (A)		6,4689	6,4669
P_{MAX} (W)		2,4953	2,5384
FF (%)		51,44	51,02
Eficiência (%)		10,25	10,43
RMSE (A/cm²)		0,73867	0,09678

Um experimento em células é apresentado por O. Breitenstein et al. (2009), onde ranhuras são aplicadas com o intuito de modelar defeitos permanentes nas células. Com o uso de um diamante, essas ranhuras foram feitas no dispositivo com diferentes cargas (peso no diamante que reproduzia um risco em cada profundidade, desde algo superficial até ultrapassar a junção da célula). A célula “virgem” é colocada

em comparação com células que possuíam defeitos modelados. Seu resultado provou que o fator de idealidade altera significativamente com a agressividade do defeito, sendo que, quanto mais afetada a célula está, maior será o fator de idealidade do dispositivo. A figura 3.17 em seguida apresenta o resultado extraído de seu texto, onde prova a relação do fator de idealidade pela tensão e a corrente na polarização direta também pela tensão.

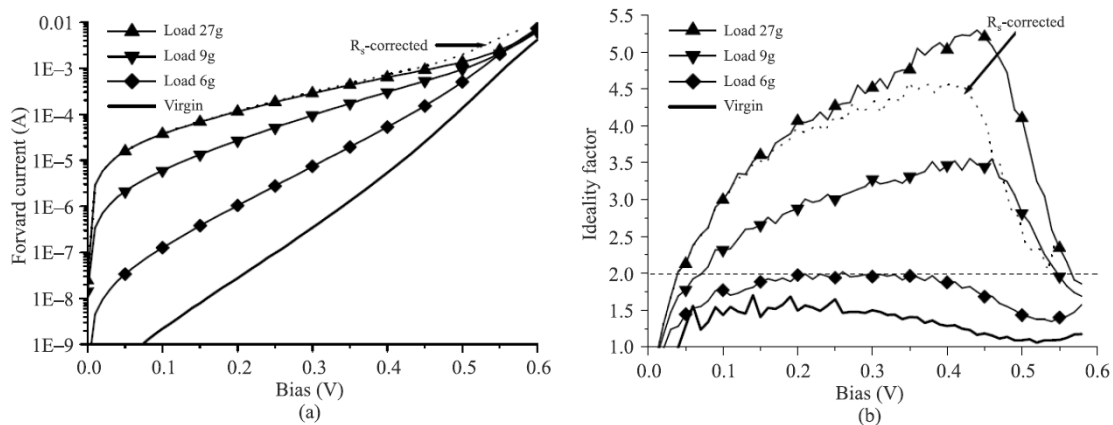


Figura 3.17: a) Curva $I \times V$ na polarização direta e b) fator de idealidade pela tensão aplicada para as células comparadas [56]

Ao simular uma curva no *software* e alterando apenas um parâmetro em cada simulação, pode-se obter os resultados apresentados na figura 3.18. A curva central apresentada tanto na figura a) quanto na figura b) é a mesma, com $I_0 = 3,4108 \times 10^{-5}$ A, $n = 1,8438$ e $I_{SC} = 1,466$ A. A partir dela, primeiramente alterou apenas a corrente de saturação reversa (I_0), aumentando ou diminuindo o seu valor. Ao aumentar, como pode ser visto, o valor de V_{OC} da curva diminuiu, assim como o ponto de máxima potência. Ambos na mesma proporção, o que mantém as curvas paralelas na região entre P_{MAX} e V_{OC} . Ao diminuir I_0 , os parâmetros aumentam também na mesma proporção e, conseqüentemente, a curva se apresenta paralela às demais. O valor de I_0 é retornado para o inicial e o fator de idealidade é ajustado. Ao aumentar, seu V_{OC} aumenta, assim como o ponto de máxima potência, mas a nova curva gerada não se manteve paralela à anterior. Seu V_{OC} obtido foi igual à de sua curva correspondente quando alterou I_0 , mas P_{MAX} se apresentou menor. Semelhantemente, ao reduzir n , a tensão de circuito aberto reduziu, mas o ponto de máxima potência não reduziu na mesma proporção. Já a resistência série, como discutido e já mostrado na figura 2.21, capítulo 2, apresenta um papel muito importante na inclinação da reta para valores

próximos ao V_{OC} . Seu aumento basicamente não altera o valor de V_{OC} , mas reduz drasticamente a P_{MAX} , enquanto a redução aumenta o valor do ponto de máxima potência. É importante observar a sensibilidade da curva diante dos três parâmetros, o que pode dificultar simulações para prever o comportamento do dispositivo, caso essas não sejam realizadas a partir de parâmetros fidedignos da célula caracterizada. Trabalhando com os valores simultaneamente, consegue-se resultados bem melhores e mais próximos da curva medida.

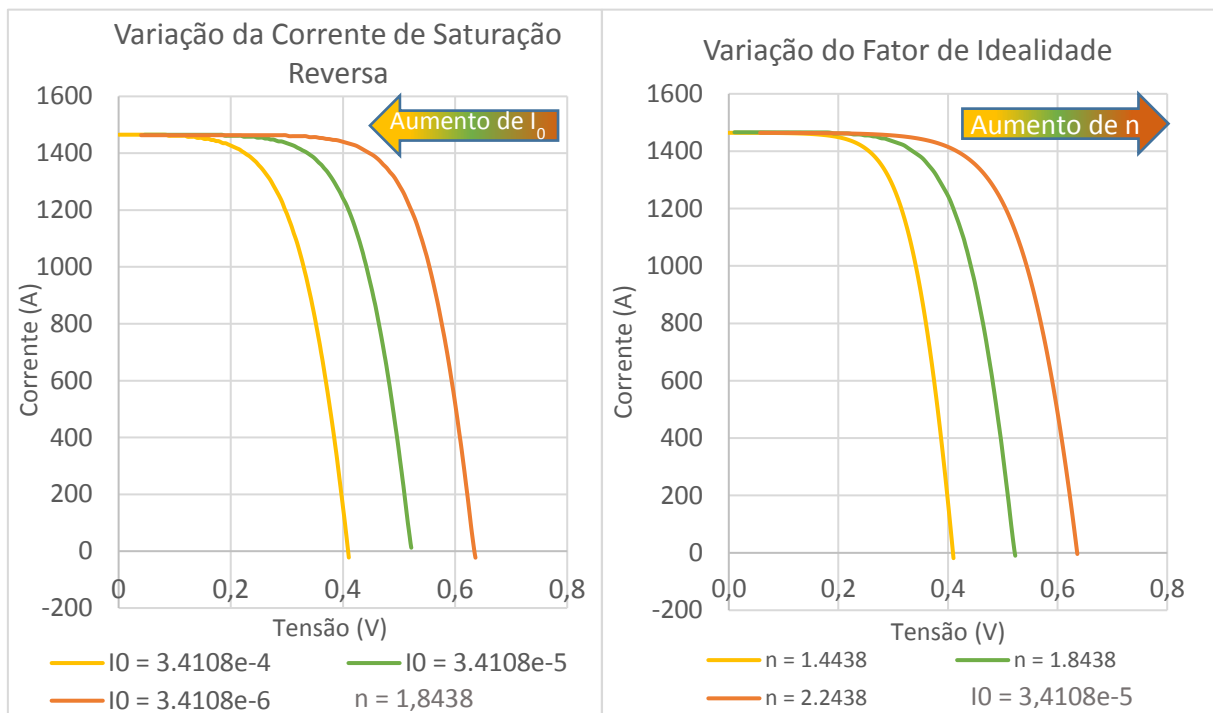


Figura 3.18: Comparação de curvas ao alterar apenas a) I_0 e b) n

Percebe-se através das figuras 3.14 e 3.16 e do valor de $RMSE$ que métodos iterativos apresentam resultados mais eficazes e próximos de uma resposta ideal. Isto ocorre por que o método iterativo parte de um valor inicial para cada parâmetro e, realizando iterações sucessivas, busca a solução para uma dada precisão, recalculando todos os parâmetros para cada nova iteração. Estes resultados demonstram a fragilidade de se extrair parâmetros através de métodos diretos apresentados em diversas bibliografias [17, 60]. Porém, tais métodos apresentam uma simplicidade computacional para obter os resultados. Portanto, deve-se analisar quão precisos devem ser os resultados obtidos para decidir o método a ser utilizado. Determinadas situações podem se satisfazer com o resultado se aproximado de um método iterativo.

Os mesmos testes realizados para a célula monocristalina foram aplicados na célula de silício policristalino. Os resultados são apresentados nas figuras 3.19, 3.20 e 3.21 para o método não-iterativo e figuras 3.22 e 3.23 para o método iterativo. Os valores são apresentados na tabela 3.2.

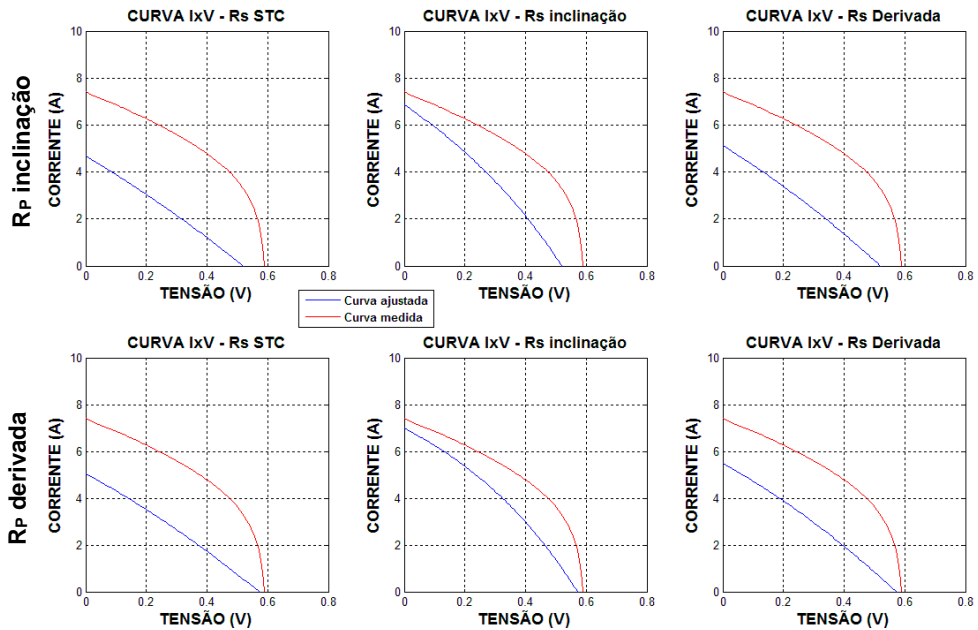


Figura 3.19: Curvas para I_0 e n extraídos do ajuste exponencial da célula policristalina

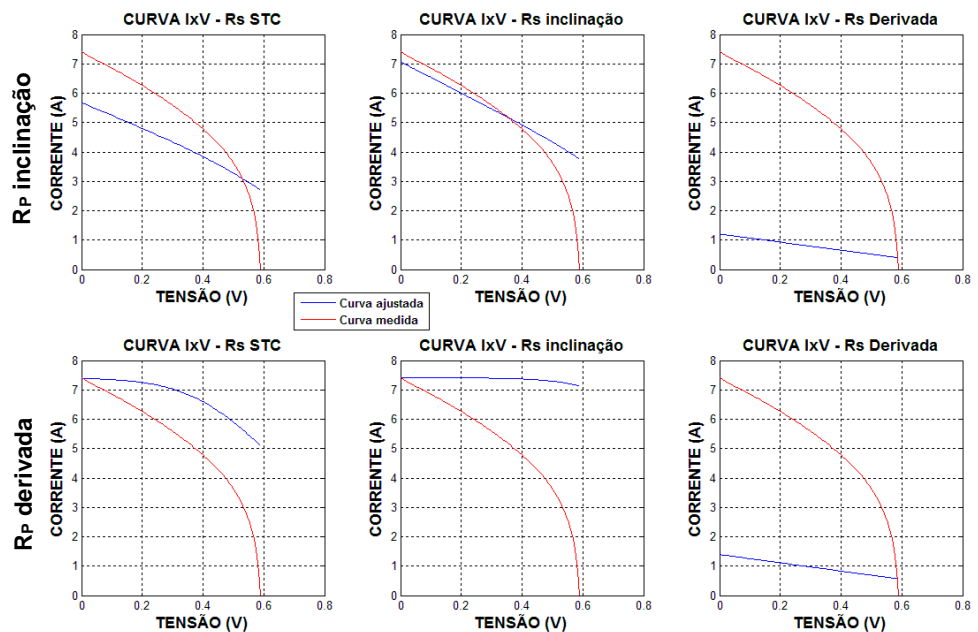


Figura 3.20: Curvas para I_0 e n extraídos da curva no escuro da célula policristalina

Todos os resultados encontrados foram fora do esperado, isto é, os modelos aplicados, considerados como referência para extração de parâmetros, quando aplicados a valores medidos não retratam o fenômeno. Nenhuma combinação de fórmulas conseguiu aproximar a curva pelos métodos diretos. Dentre as possibilidades apresentadas acima, a curva encontrada com I_0 e n extraídos da curva no escuro, R_p e R_s pela inclinação, foi a que apresentou menor $RMSE$, indicado na figura 3.21.

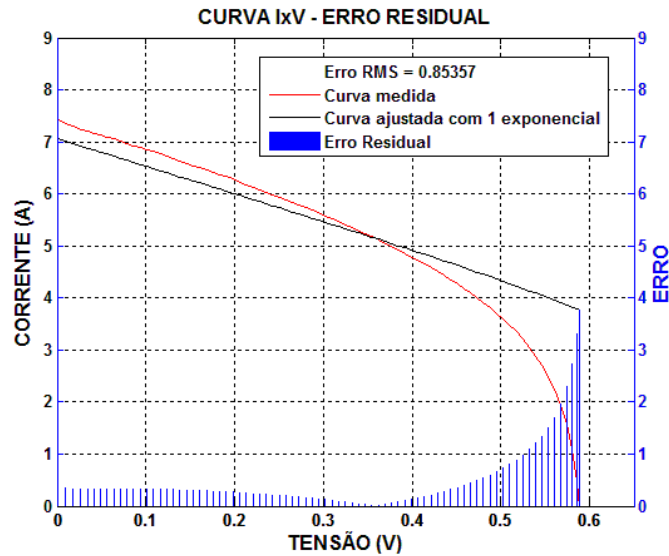


Figura 3.21: Curva com menor $RMSE$ para uma exponencial da célula policristalina

Diferentemente dos métodos diretos, o modelo iterativo realizou um ajuste fino, com um erro $RMSE$ baixíssimo, como pode ser visto nas figuras 3.22 e 3.23 correspondentes.

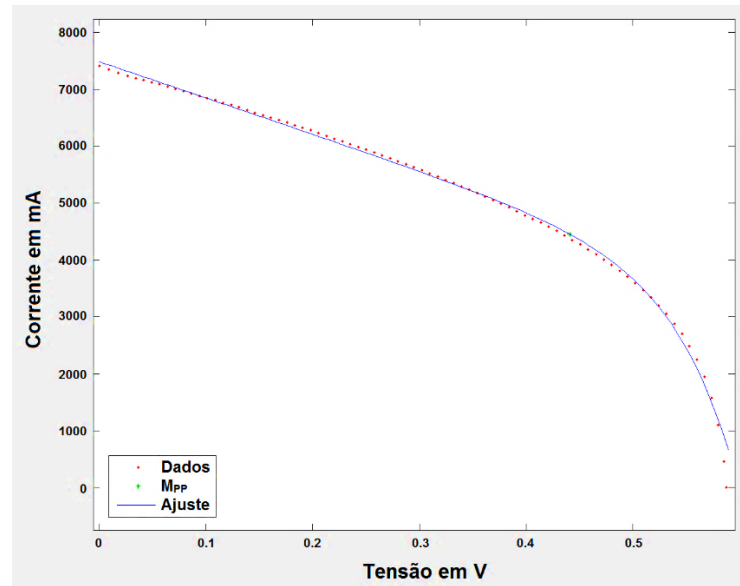


Figura 3.22: Ajuste para 1 exponencial da célula policristalina com o software 2/3 Diode Fit

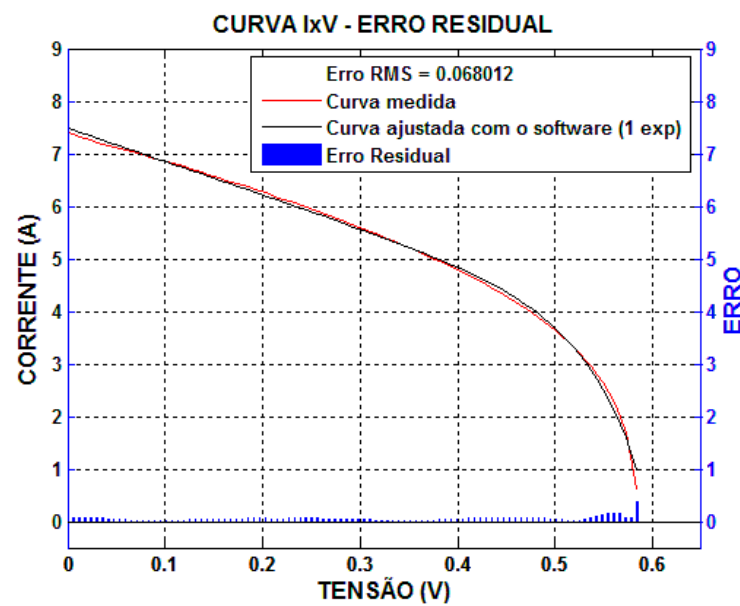


Figura 3.23: Erro residual entre curva medida e curva ajustada com o software

Mais uma vez, o método iterativo se destaca em seus resultados e demonstra sua eficácia para a extração de resultados condizentes com a própria curva. A tabela 3.2 apresenta os valores encontrados.

Os valores de I_0 e n encontrados no ajuste exponencial foram significativamente diferentes dos valores encontrados no modelo iterativo. A aproximação por tal método foi ineficiente, como mostra a figura 3.24. Para uma exponencial, não houve combinação de termos que conseguisse representar a curva com tal precisão. Isto

também se deve pela ausência das perdas parasitas (resistências série e paralela) que se mostram necessárias para uma melhor aproximação.

Tabela 3.2: Resultados obtidos na extração de parâmetros para a célula policristalina

		Célula Policristalina	
		Análítico não-iterativo	<i>2-Diode Fit</i>
R_s (Ω)	Inclinação	0,0090	2,6781x10 ⁻⁶
	Derivada	0,6917	
	STC	0,0550	
R_p (Ω)	Inclinação	0,1803	0,1569
	Derivada	226,6858	
I₀ (A)	Escuro	4,4787 x10 ⁻⁴	9,2229 x10 ⁻⁵
	Ajuste exponencial	0,9645	
n	Escuro	3,8234	2,1334
	Ajuste exponencial	11,2515	
V_{oc} (V)		0,5881	0,6012
I_{sc} (A)		7,4146	7,4866
V_{MAX} (V)		0,4286	0,4410
I_{MAX} (A)		4,5100	4,4539
P_{MAX} (W)		1,9330	1,9642
I_{ph} (A)		7,4146	7,4867
FF (%)		44,33	43,6376
Eficiência (%)		7,94	8,07

Pode-se observar então que ambas as células, desenvolvidas com tecnologias diferentes, apresentaram resultados abaixo do esperado para métodos diretos não-iterativos já conceituados na bibliografia, como dito anteriormente. A partir deste ponto surge a incerteza diante das medições. As células possuem áreas maiores que

a área recomendada para utilização no sol artificial na qual ele se comporta como classe A e garante a irradiância uniforme por toda a célula.

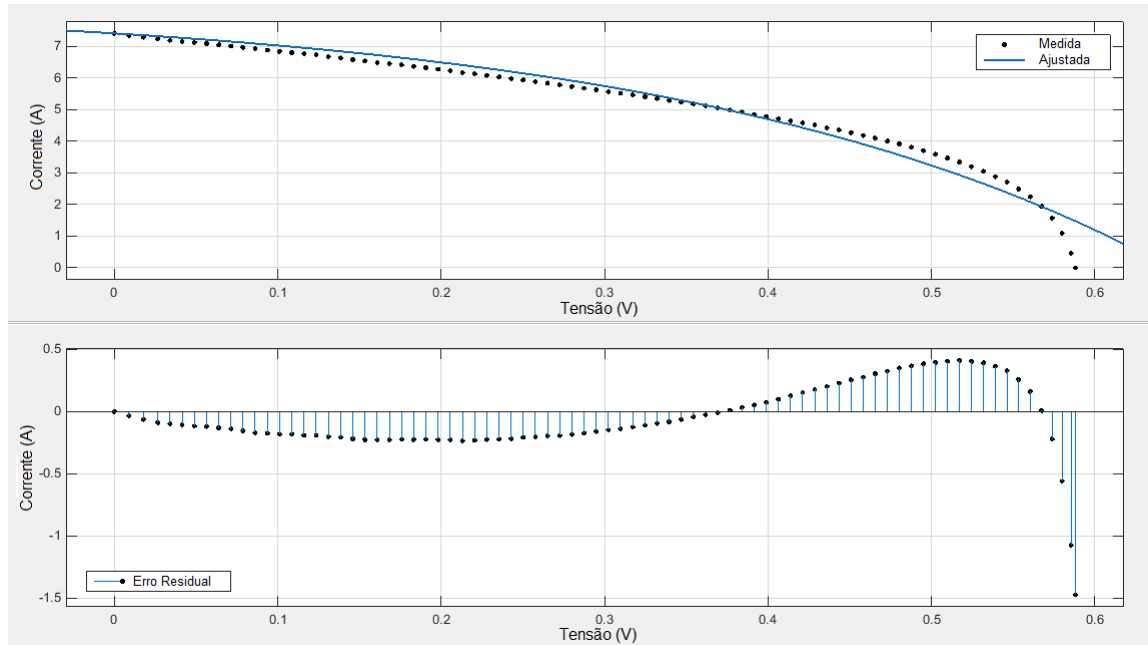


Figura 3.24: Ajuste realizado com o ajuste exponencial para extração de I_0 e n da célula policristalina

Mais uma vez é importante refletir sobre os principais motivos que causam perdas de eficiência de uma célula, desta vez referindo-se à fonte de iluminação. Dentre os principais pontos, pode-se enfatizar:

- Estabilidade temporal;
- Dependência angular;
- Uniformidade espacial.

Para a realização da condição de teste padrão (STC), fez-se a varredura temporal da irradiância, o que garantiu sua estabilidade no passar do tempo em testes. Além disso, todos os testes foram realizados com a célula posicionada perpendicular ao sol, eliminando a possibilidade de interferências angulares.

A figura 3.25 apresenta o mapa da uniformidade de iluminação em uma área de 16x16 cm, o que se aproxima da área da célula em teste, 15,6x15,6 cm². É perceptível a não homogeneidade da iluminação por toda a extensão da célula, diferentemente de uma célula pequena que ocupe uma área central de 6x7 cm² ou menor. Nota-se o quão impactante é o espalhamento da irradiância recebida pela célula.

Para poder avaliar este impacto, células de mesmas tecnologias, porém com áreas menores, foram colocadas em testes. Essas células nada mais são que fragmentos das células grandes já testadas e apresentadas. O propósito de tais testes é comparar as células de diferentes tamanhos, uma de área igual a 42 cm² e outra de área aproximadamente igual a 243 cm².

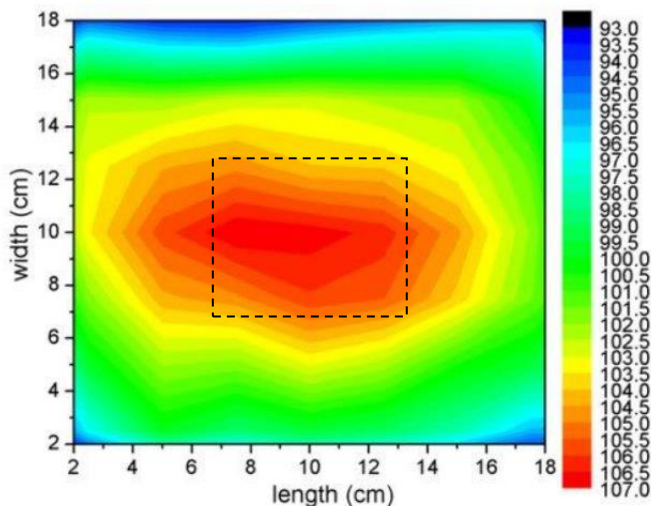


Figura 3.25: Mapa da uniformidade da iluminação com a indicação da área ocupada pelo fragmento de célula [62]

3.1.3.1. Comparação entre tamanho de células

Colocando tais células menores em testes exatamente iguais aos aplicados às células maiores, os resultados apresentados foram mais eficazes e mais próximos do que se espera. As figuras 3.26 e 3.27 ilustram os resultados.

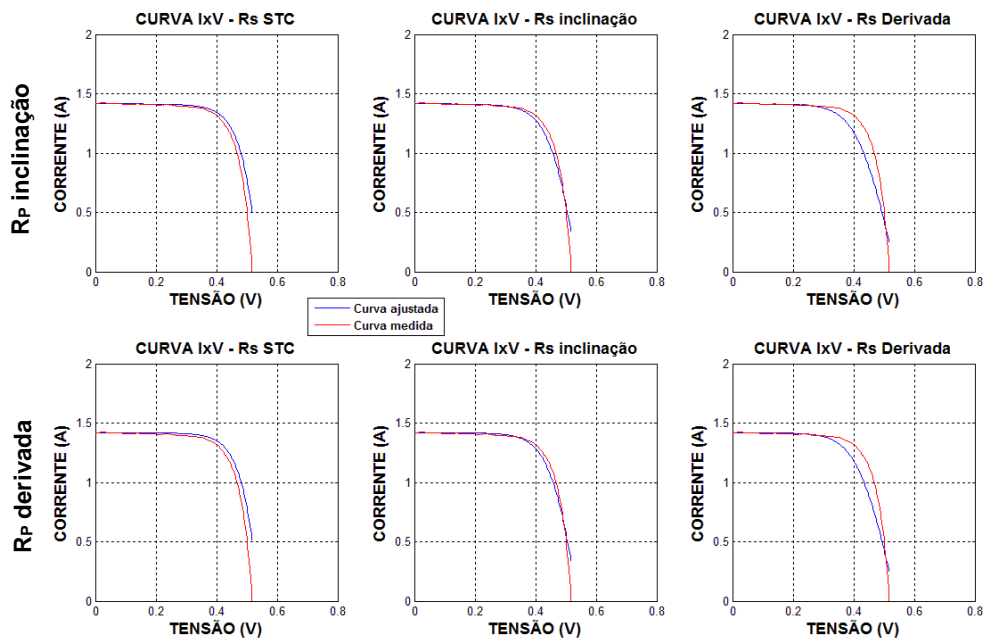


Figura 3.26: Curvas para I_0 e n extraídos do ajuste exponencial da célula pequena monocristalina

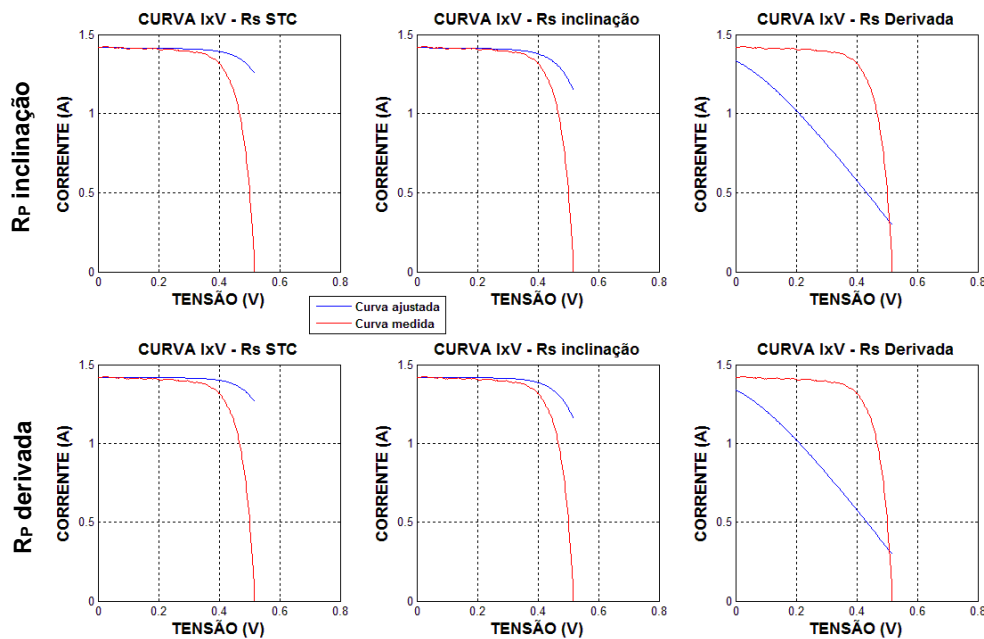


Figura 3.27: Curvas para I_0 e n extraídos da curva no escuro da célula pequena monocristalina

Diferentemente dos demais resultados, os ajustes realizados pelo método não-iterativo para uma célula menor apresentaram curvas mais coesas para distintos parâmetros. Principalmente para os parâmetros extraídos através do ajuste exponencial. As únicas curvas que permanecem apresentando resultados inferiores são aquelas que a resistência série foi obtida pela derivada.

O erro *RMSE* juntamente com o gráfico de erro residual provam a melhoria dos resultados obtidos ao trabalhar com a célula menor e são apresentados na figura 3.28.

A mesma curva no método iterativo de Stephan Suckow apresentou o resultado demonstrado na figura 3.29.

Apesar de ainda não apresentarem resultados ideais ou com erros semelhantes ao que o método iterativo apresenta, as curvas de células menores e mesma tecnologia apresentaram resultados bem melhores que os já encontrados anteriormente. A principal alteração realizada na base do teste é a área da célula em avaliação.

Por serem mesma tecnologia, alterando apenas as áreas, as curvas *I*xV passam a ser tratadas como curvas *J*xV, onde *J* é a densidade de corrente dada pela divisão da corrente pela área do dispositivo ($J = I/A$ [A/m²]) para que sejam traçadas no mesmo gráfico facilitando a comparação.

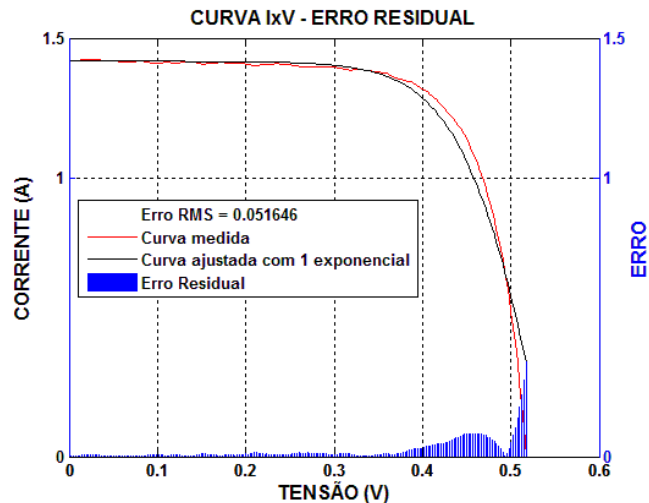


Figura 3.28: Curva com menor *RMSE* para uma exponencial da célula pequena monocristalina

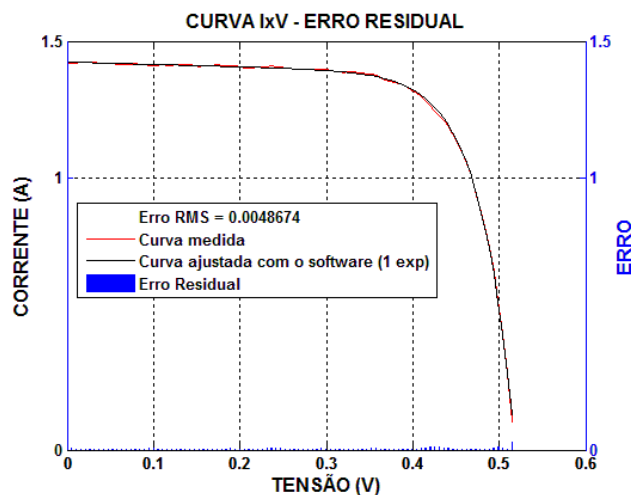


Figura 3.29: Erro residual entre curva medida e curva ajustada com o software 2/3 Diode Fit

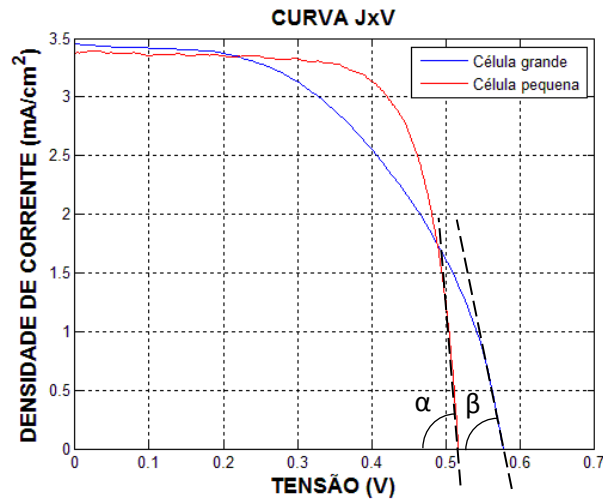


Figura 3.30: Comparação das curvas extraídas em células de tamanhos diferentes

As curvas para comparação entre as células de diferentes tamanhos apresentadas na figura 3.30, foram extraídas no simulador solar. Da mesma forma, as curvas no escuro também foram obtidas e ajuda na análise de comparação. Seu resultado é apresentado na figura 3.31, sendo a) a curva IxV e b) a mesma curva, porém em escala semilogarítmica. A compreensão do efeito causado por cada parâmetro (corrente de curto-circuito, corrente de saturação reversa, fator de idealidade, resistência série e paralela) pode elucidar as diferenças de comportamento entre diferentes tamanhos.

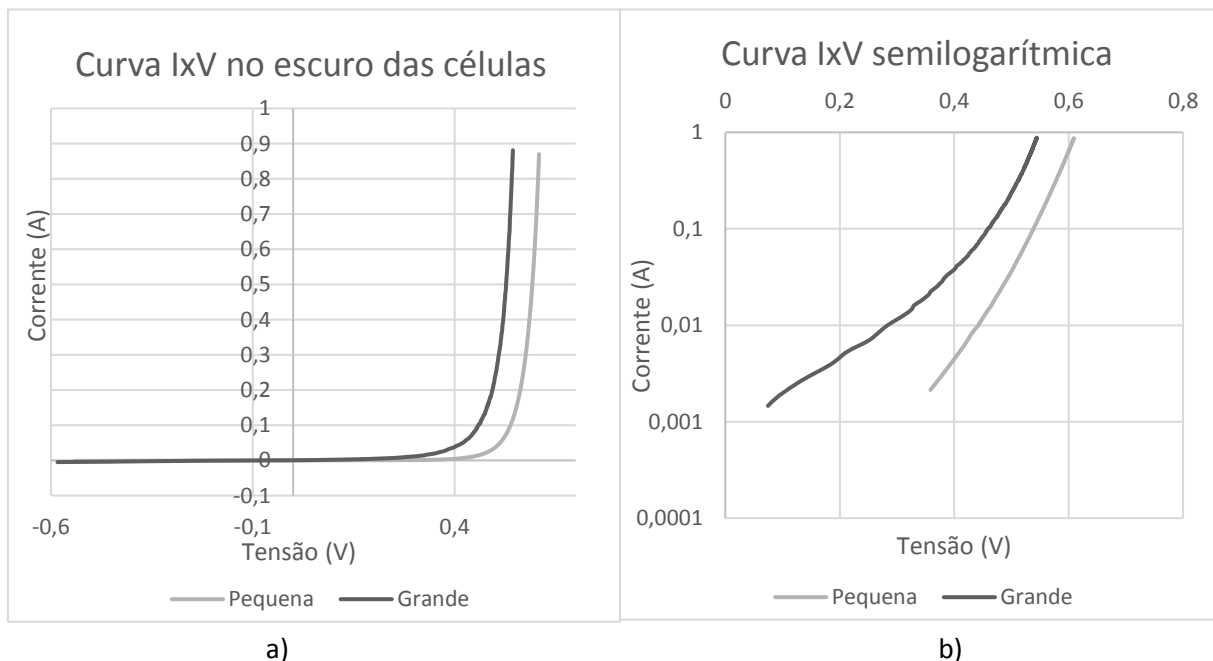


Figura 3.31: Curvas a) IxV e b) semilogarítmica das células monocristalinas pequena e grande

As curvas extraídas sob iluminação apresentam um comportamento semelhante em momento inicial. Uma densidade de corrente de curto-circuito próxima, como esperado, e, observando o trecho de principal atuação da resistência paralela (inclinação do trecho que antecede o ponto de máxima potência), pode-se dizer que seus valores também estão próximos. A resistência paralela simboliza defeitos de fabricação e imperfeições na junção e, uma vez que são dispositivos de mesma tecnologia, mas de tamanhos diferentes, não é esperado uma alteração de valor. Já a resistência série, referente à inclinação da reta no trecho entre ponto de máxima potência e tensão de circuito aberto (ilustrados pelos ângulos α – célula pequena e β – célula grande na figura 3.30), se mostra bem diferente. A célula pequena apresenta uma inclinação maior que da célula grande, isto é, $\alpha > \beta$, o que implica em um valor de R_S menor. É possível que essa diferença seja um reflexo da heterogeneidade do material na lâmina (*wafer*).

As curvas extraídas no escuro apresentam um comportamento típico para curvas com diferentes valores de corrente de saturação reversa, onde quanto maior o valor dessa corrente, menor será o valor da tensão de disparo de condução da junção. A figura 3.18 ilustra essa condição quando se compara três valores distintos de I_0 . Por apresentarem áreas diferentes, é esperado que a célula de maior área tenha uma maior corrente. Já a curva semilogarítmica auxilia na extração do fator de idealidade, como apresentado na figura 2.16 do capítulo 2. A inclinação, determinada por nkT/q , mostra que, para uma menor inclinação, maior será o valor de n , portanto a célula grande apresentará um fator de idealidade maior.

Utilizando o *software 2/3 Diode Fit*, de Suckow, pode-se extrair todos os parâmetros. Os resultados são observados na tabela 3.3. Apesar da corrente de saturação reversa (I_0) e do fator de idealidade (n) apresentarem o comportamento esperado, os resultados de densidade de corrente se divergem e contrariam as expectativas de se apresentarem com um mesmo valor. As tentativas para explicar tal fato serão discutidas no tópico 3.3.2.

Tabela 3.3: Resultados dos parâmetros para diferentes tamanhos de célula

Célula	Área (cm ²)	J_0 (A/cm ²)	I_0 (A)	n
Grande	243,36	$6,1315 \times 10^{-9}$	$1,4922 \times 10^{-6}$	1,6204
Pequena	42	$3,6559 \times 10^{-10}$	$1,5355 \times 10^{-8}$	1,3336

Com a utilização do código de Stephan Suckow foi possível visualizar o comportamento da curva da célula diante da alteração de cada parâmetro que compõe sua equação. A figura 3.32 ilustra essa variação da maneira descrita a seguir.

Para todas as imagens contidas na figura 3.32, a curva em vermelho representa o resultado obtido pela célula pequena, enquanto a curva em azul apresenta o resultado da célula grande. A primeira ilustração (a) são os valores reais das curvas, as mesmas apresentadas na figura 3.30. Os resultados em destaque da curva azul são os valores obtidos pelo ajuste iterativo, já em função da densidade de corrente. A partir desses valores iniciais, apenas a resistência série foi alterada, reduzindo seu valor em dez vezes. O resultado é a curva apresentada em (b). Percebe-se que houve uma mudança em que o ponto de máxima potência já se aproxima ao da curva vermelha, porém, a partir deste valor, a diferença causada por uma maior redução da resistência série já não faz diferença perceptível. Não foi possível encontrar nenhuma resistência série que fizesse com que as curvas se aproximassem mais do que o representado em (b). Em seguida os valores da densidade de corrente de saturação e do fator de idealidade foram reduzidos de forma iterativa (J_{01} reduzido em aproximadamente 1000 vezes e n_1 reduzido em aproximadamente 2,5 vezes). O resultado dessa redução aparece em (c) com seus valores em destaque. Como pode ser notado, a curva azul se aproximou bastante da curva vermelha. Essa situação é totalmente condizente com o que foi encontrado e discutido anteriormente diante das curvas obtidas no escuro (figura 3.31).

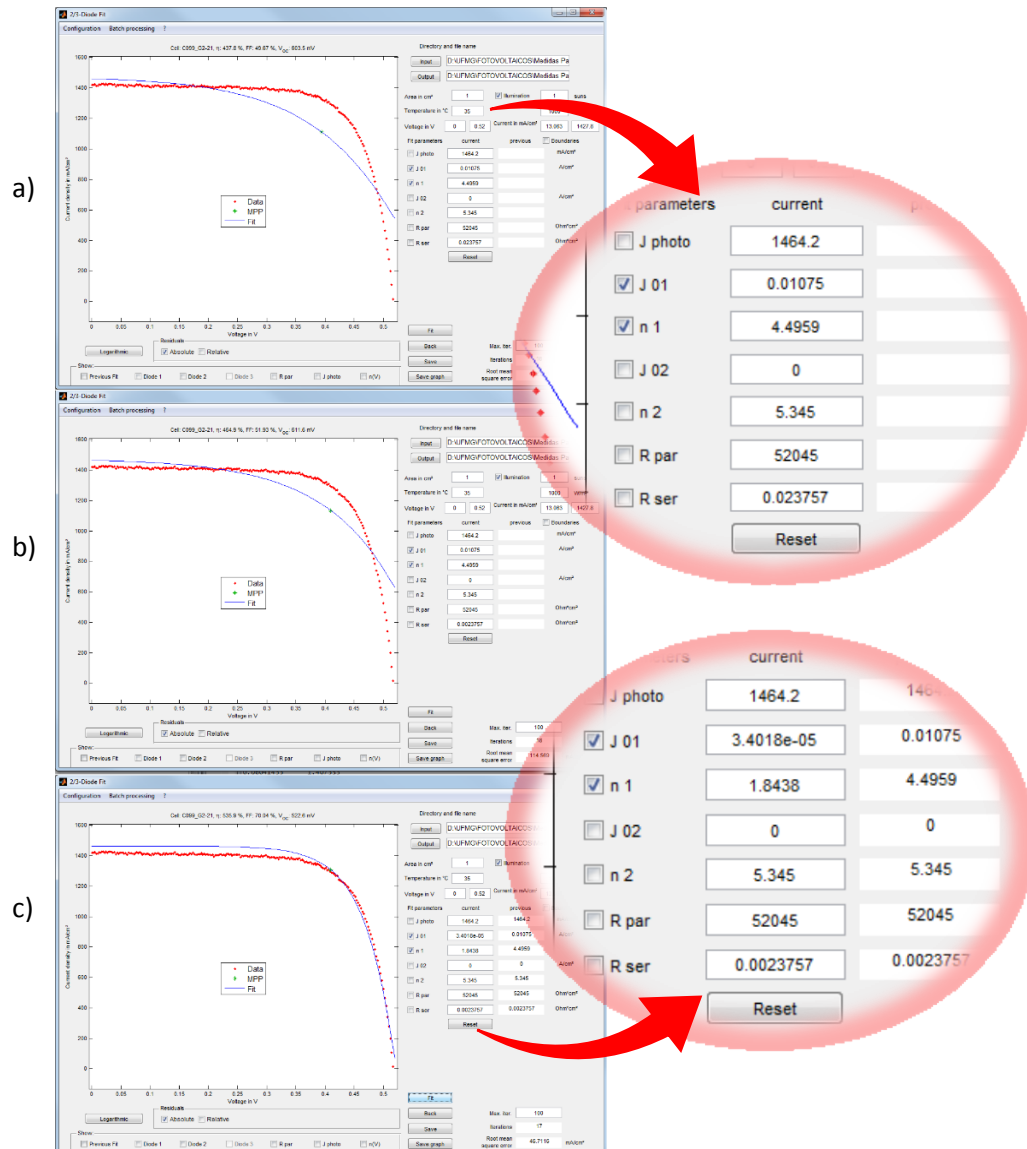


Figura 3.32: Alteração do comportamento da curva diante variação dos parâmetros

Sendo que J_{photo} é dado em mA/cm², J_{01} em A/cm² e as resistências em Ωcm².

3.1.3.2. Simulação em PSpice

Carvalho A. [48] propõe uma metodologia de simulação utilizando o programa PSpice® (OrCAD) para desenvolver o modelo numérico de uma célula solar. Seu procedimento exige definições de irradiância e temperatura de operação da célula, bem como o modelo analítico da mesma (uma ou duas exponenciais). A partir da criação do circuito em esquemático (OrCAD), a simulação apresenta a curva IxV como resultado e também aponta os principais pontos da curva, tais quais I_{SC} , V_{OC} , P_{MAX} , I_{MAX} e V_{MAX} .

A modelagem escolhida para o trabalho é para uma exponencial, seguindo a linha de testes traçada até então. O esquemático da figura 3.33 retrata a célula simulada, sendo que os valores dos cinco parâmetros físicos (resistência série, resistência paralela, corrente de saturação reversa, fator de idealidade e corrente fotogerada) são aqueles encontrados por algum método aplicado (ora iterativo, ora não-iterativo) e o diodo é representado pela equação de Shockley.

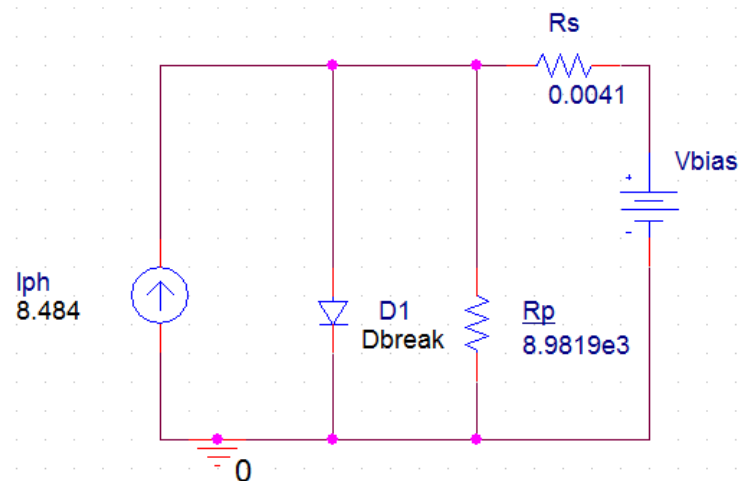


Figura 3.33: Esquemático da célula solar no PSpice® para uma exponencial

Para que a simulação de associações de células ocorra e corresponda a resultados confiáveis é preciso que os parâmetros extraídos pelos métodos anteriores e aplicados na ferramenta sejam bons e próximos do real da célula. Afinal, da mesma maneira que as associações de células podem ampliar valores de tensões e correntes, as perdas e defeitos também serão ampliados, provocando danos ao comportamento do dispositivo.

Utilizando o circuito apresentado na figura 3.33, a primeira simulação foi gerada a partir do melhor resultado de parâmetros extraídos com o método analítico não-iterativo. A figura 3.34 apresenta o resultado da simulação em comparação com a curva medida. Percebe-se que a curva traçada não reproduz de forma fidedigna os resultados experimentais.

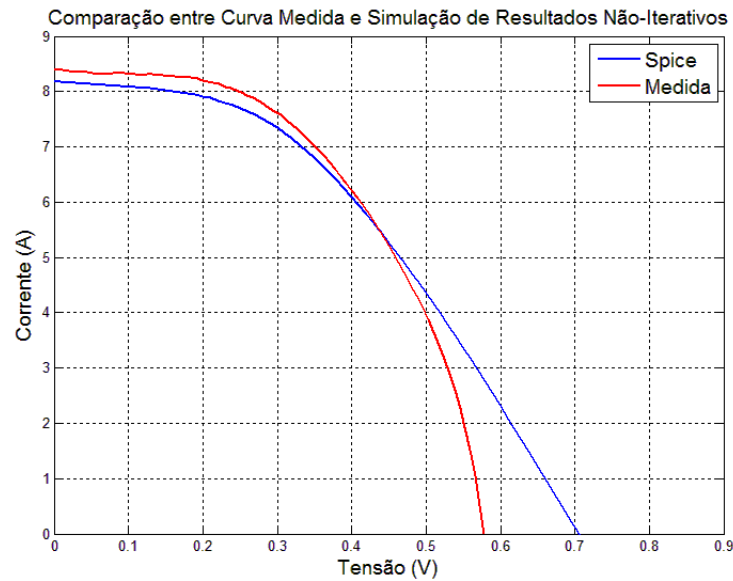


Figura 3.34: Comparação entre a simulação a partir do método não-iterativo e a curva da célula grande monocristalina obtida com o medidor-fonte

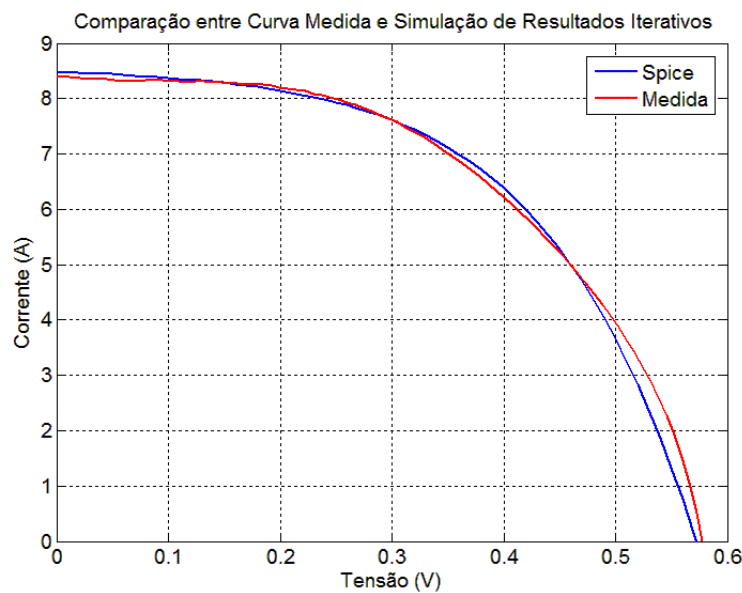


Figura 3.35: Comparação entre a simulação a partir do método iterativo e a curva da célula grande monocristalina obtida com o medidor-fonte

Ao comparar seus parâmetros característicos como corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e ponto de máxima potência (apresentados na tabela 3.4), fica numericamente perceptível que a curva simulada não representa a curva medida, isto é, ela não retrata um dispositivo com uma combinação de parâmetros físicos (R_S , R_P , I_{PH} , I_0 e n) equivalente ao da célula real. Ao construir o sistema mais complexo, toda essa diferença seria ampliada e o resultado distanciaria de uma situação verídica.

Usando da mesma metodologia, os resultados obtidos pelo método iterativo também foram aplicados na simulação de forma que a curva encontrada é retratada na Figura 3.35.

O método iterativo gerou parâmetros físicos que conseguem aproximar a curva simulada na ferramenta da curva extraída pelo medidor-fonte. Os valores também são apresentados na tabela 3.4 para melhor comparação entre as curvas medida e simulada.

Tabela 3.4: Comparação de parâmetros entre as curvas medida e simulada no PSpice®

	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_{MAX} (W)
Medida	8,3978	0,5776	2,4953
PSpice (não-iterativo)	8,1794	0,7054	2,4406
PSpice (iterativo)	8,4626	0,5723	2,4665

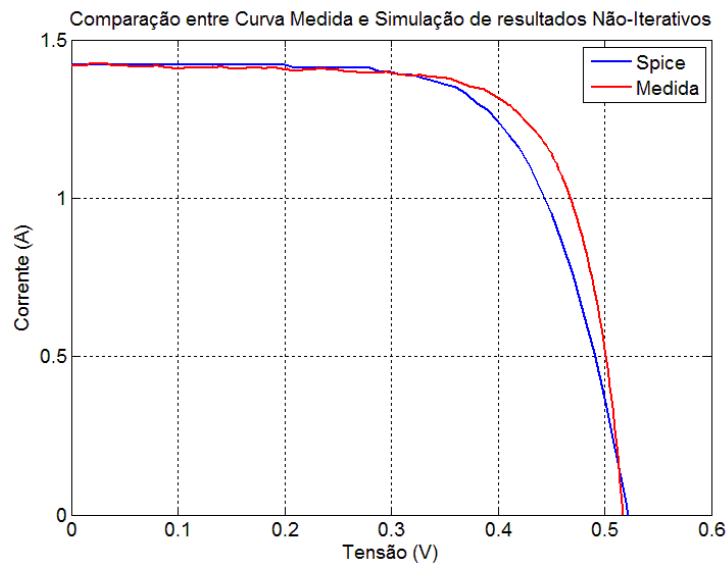


Figura 3.36: Comparação entre a simulação a partir do método não-iterativo e a curva da célula pequena monocristalina medida com o medidor-fonte (célula pequena)

A curva extraída da célula pequena, com a qual foi possível encontrar melhores resultados no método não-iterativo, passou pela mesma simulação e resultou em uma curva que pode ser comparada na Figura 3.36: Comparação entre a simulação a partir do método não-iterativo e a curva da célula pequena monocristalina medida com o medidor-fonte (célula pequena).

A principal divergência entre as curvas está na inclinação entre o trecho de V_{OC} e P_{MAX} . Os pontos de máxima potência de cada curva são 0,531 W e 0,498 W, sendo o primeiro da curva medida e o segundo da simulação. Na tentativa de analisar o comportamento da curva simulada, os parâmetros corrente de saturação reversa, fator de idealidade e resistência série, foram alterados separadamente para avaliar qual apresenta uma maior influência na diferença observada, isto é, verificar se algum parâmetro não está de acordo com o extraído pelo método não-iterativo. Os gráficos que compõem a Figura 3.37 retratam as comparações entre a curva medida (de cor preta em todos os gráficos), a curva nominal (em vermelho) e as demais simulações alterando os parâmetros para um valor acima e um valor abaixo do nominal, observando a tendência de tais variações. O gráfico em c), onde apenas a resistência série é manipulada, apresenta uma aproximação da curva nominal para a medida ao reduzir o valor de R_s . Os demais parâmetros, como já discutido no tópico 3.1.3, figura 3.18, alteram de forma significativa os valores de V_{OC} , impossibilitando de aproximar a curva nominal para a medida.

O cálculo da resistência série pelos métodos não-iterativos passam a ser questionáveis. Os métodos de extração de R_s propostos pela literatura e adotados neste trabalho (apresentados no tópico 2.4.1) são maneiras que utilizam da curva $I \times V$, seja pela inclinação do trecho desejado, pela derivada da curva na mesma região ou pela padronização das curvas na norma de STC. Curva $I \times V$ de células fotovoltaicas são apresentadas de forma limitada entre I_{SC} (no eixo das ordenadas) e V_{OC} (no eixo das abscissas), o que implica em não reproduzir a terceira região da curva quando em escala semilogarítmica, trecho esse que apresenta um efeito causado apenas por resistência série (como apresentado no tópico 2.2.4, figura 2.16). Nos dois outros trechos que compõem a curva há também o efeito da resistência série, entretanto não é o único efeito retratado. A região 2, por exemplo, carrega consigo uma tendência causada por R_s , mas também de um fator de idealidade, que por sua vez depende das contribuições de difusão e deriva. Como descrito em [39], há uma correlação entre R_s e n , onde foi provado que existem diversos pares de tais parâmetros que podem gerar o mesmo formato de curva $I \times V$ (dada uma determinada margem de erro). Conclui-se que a resistência série encontrada a partir dos métodos usuais para células fotovoltaicas não é a resistência que deveria estar associada à equação de Shockley, identificada na Figura 2.36 como a soma das resistências R_{S1} e R_{S2} e descrita no tópico 2.4.2. Deve-se, portanto, polarizar a célula positivamente até um valor de

tensão maior que V_{OC} de maneira a ter acesso ao trecho correto da curva para a extração de R_S que irá caracterizar a célula solar e que de forma exata será aplicada na equação que modela o dispositivo fotovoltaico.

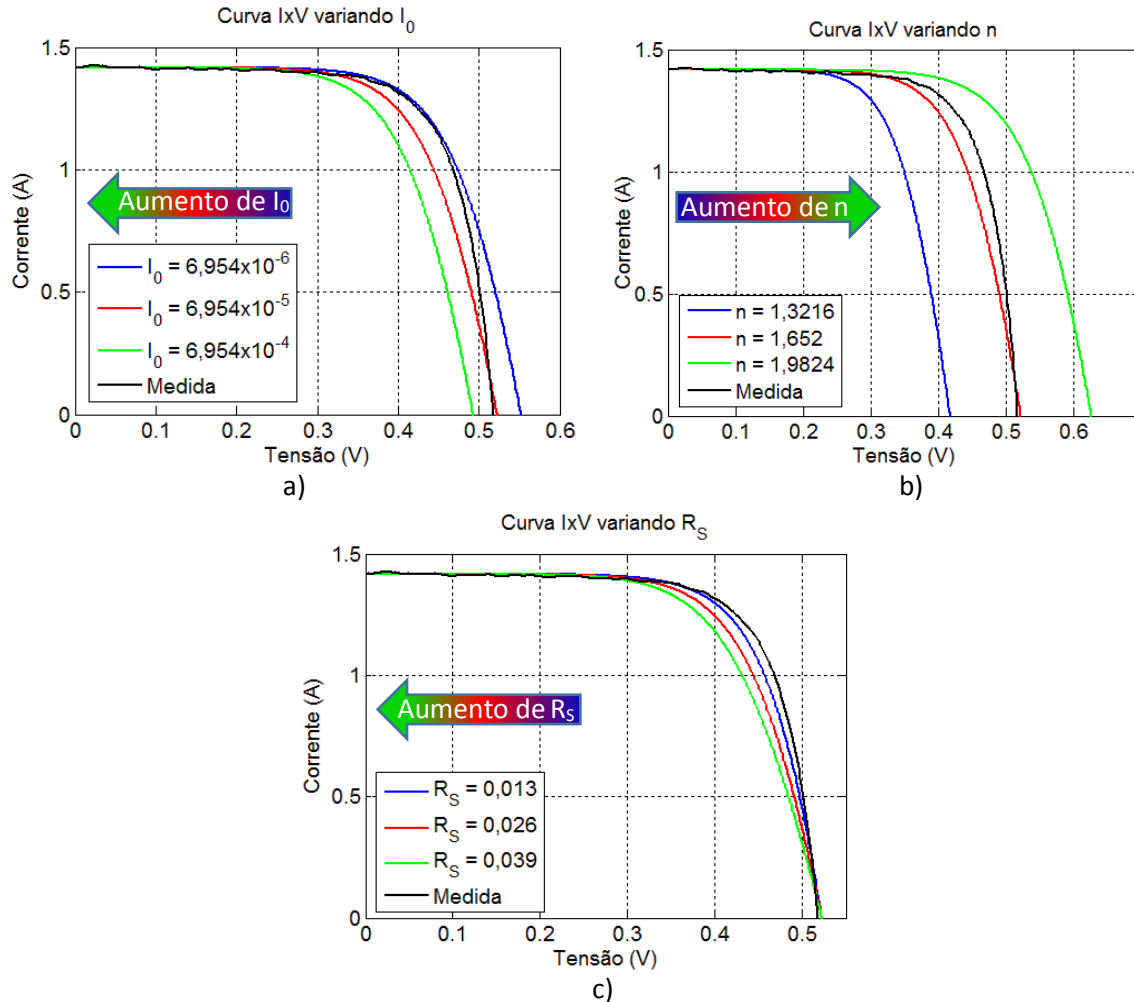


Figura 3.37: Curvas IxV da célula pequena monocristalina variando a) corrente de saturação reversa, b) fator de idealidade e c) resistência série

Portanto, apesar da simulação da figura 3.36 aproximar-se da curva medida (principalmente quando comparada com os resultados da célula grande - figura 3.34), a diferença encontrada nos pontos de máxima potência ocasiona erros intensificados quando se cria um sistema complexo, proporcionando resultados imprecisos.

Através das simulações é possível ratificar que os resultados encontrados por métodos analíticos não-iterativos geram respostas insatisfatórias, desde sistemas construídos com o elemento mais básico aos mais complexos (associações). Quando

comparados com o método iterativo, percebe-se que o segundo apresenta aproximações mais fiéis às respostas de uma célula.

3.1.4. Aproximação para duas exponenciais

O modelo de duas exponenciais passa a ser dependente de sete parâmetros: I_{ph} , I_{01} , I_{02} , n_1 , n_2 , R_S e R_P . Da mesma maneira como proposto na aproximação de uma exponencial, a corrente fotogerada terá seu valor igual ao da corrente de curto circuito, I_{SC} . Os métodos para cálculo dos demais parâmetros também foram apresentados anteriormente, sendo que a resistência série apresenta diferença apenas para o método da derivada. Como também já falado, os parâmetros físicos, tais quais V_{OC} , I_{SC} , I_{MAX} e V_{MAX} , são encontrados na própria extração da curva, sendo mantidos nos cálculos e apresentados com os mesmos valores das tabelas 3.1 e 3.2.

Os valores calculados conforme metodologia apresentada no tópico 2.4.1 são apresentados na tabela 3.5 tanto para a célula de silício monocristalino quanto para a de silício policristalino. A partir deles, utiliza-se do método de Newton Raphson para encontrar a curva obtida no método não-iterativo, assim como feito e exibido no tópico 3.1.3. Todas as combinações de resistências, correntes de saturação reversa e fatores de idealidade foram realizadas, da mesma maneira mostrada na figura 3.8 e descrita no tópico 3.1.1.

A principal razão para apresentar tais resultados é a comparação dos métodos de uma e duas exponenciais, que, como já previsto em teoria, espera-se que com duas exponenciais as aproximações de cada método utilizado (iterativo e não-iterativo) sejam melhores que seus correspondentes para uma exponencial.

A célula monocristalina apresentou os resultados exibidos nas figuras 3.38 e 3.39. Os valores do *RMSE* para cada uma das doze combinações de parâmetros realizadas são comparados com os valores das suas respectivas simulações para uma exponencial (apresentados nas figuras 3.12 e 3.13), sendo apresentados os 24 valores na tabela 3.6. A tabela segue a ordem das figuras na leitura horizontal e em seguida vertical, para os doze gráficos gerados.

Tabela 3.5: Resultados obtidos na extração de parâmetros

		Célula		Célula	
		Monocristalina		Policristalina	
		Analítico não-iterativo	<i>2-Diode Fit</i>	Analítico não-iterativo	<i>2-Diode Fit</i>
R_s (Ω)	STC	0,0380	0,0088	0,0550	1,0734x10 ⁻¹⁰
	Inclinação	0,0121		0,0090	
	Derivada	0,0707		0,1181	
R_p (Ω)	Inclinação	1,4596	3,9972x10 ⁺⁶	0,1803	0,18582
	Derivada	1,1667x10 ⁺³		126,4834	
I₀₁ (A)	Escuro	2,4486x10 ⁻⁶	4,9561x10 ⁻¹⁴	3,9969x10 ⁻⁶	6,0081x10 ⁻¹⁷
	Ajuste exponencial	3,749x10 ⁻¹¹		1,71x10 ⁻¹⁰	
I₀₂ (A)	Escuro	7,7829x10 ⁻⁵	0,0363	0,0013	0,016963
	Ajuste exponencial	0,1036		2,9730	
n₁	Escuro	1,7315	0,7330	1,9164	0,58354
	Ajuste exponencial	1,0708		0,9765	
n₂	Escuro	3,8554	4,3110	6,2505	4,5032
	Ajuste exponencial	5,1457		24,2503	
V_{oc} (V)		0,5776	0,5842	0,5881	0,5887
I_{sc} (A)		8,3978	8,4632	7,4146	7,4064
V_{MAX} (V)		0,3857	0,3925	0,4286	0,4291
I_{MAX} (A)		6,4689	6,4415	4,5100	4,5006
P_{MAX} (W)		2,4953	2,5284	1,9330	1,9312
FF (%)		51,44	51,1413	44,33	44,29
Eficiência (%)		10,25	10,3897	7,94	7,9340

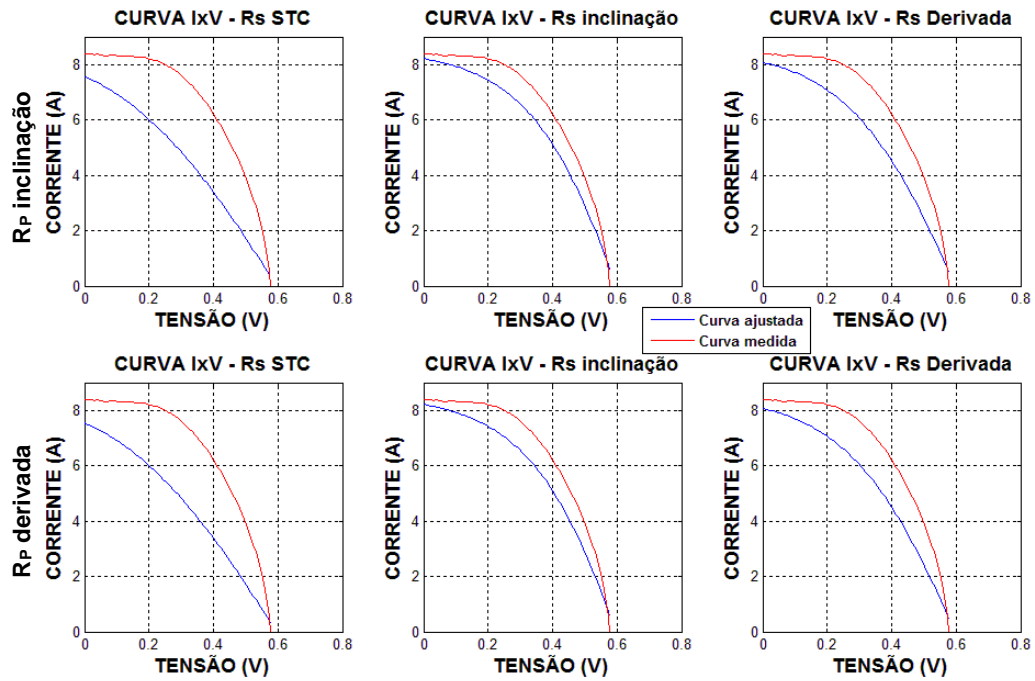


Figura 3.38: Curvas para I_{01} , I_{02} , n_1 e n_2 extraídos do ajuste exponencial da célula grande monocristalina

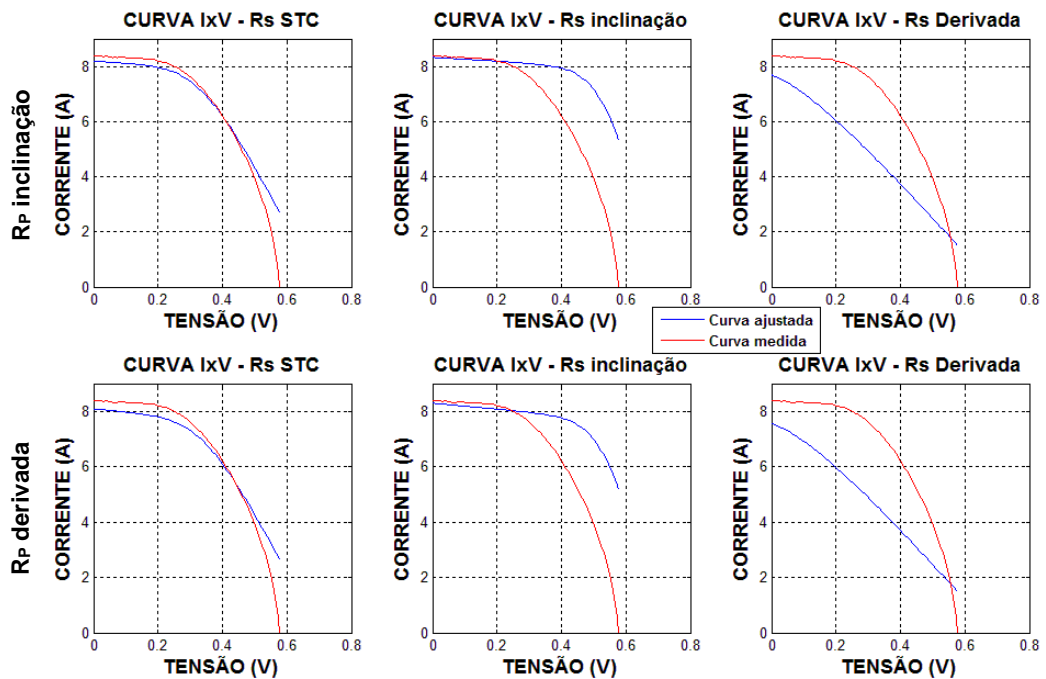


Figura 3.39: Curvas para I_{01} , I_{02} , n_1 e n_2 extraídos da curva no escuro da célula grande monocristalina

Assim como para uma exponencial, as curvas ajustadas a partir da curva obtida no escuro (Figura 3.39) apresentaram um V_{OC} maior que da curva medida. O tópico 3.1.3 traz a explicação para tal diferença.

Graficamente não é fácil observar as diferenças entre os gráficos de uma e duas exponenciais, por este motivo criou-se a tabela a seguir (Tabela 3.6) onde é quantitativamente legível a redução do erro em todos os casos para duas exponenciais. Algumas simulações apresentam uma maior redução, outras uma menor redução.

Tabela 3.6: Comparação de valores *RMSE* para uma e duas exponenciais da célula monocristalina

	RMSE											
	Ajuste exponencial						Ajuste curva no escuro					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 EXP	0,81	2,13	3,18	0,87	2,34	3,13	2,36	1,05	1,29	2,37	1,08	1,31
2 EXP	0,58	1,95	1,94	0,60	1,85	1,99	2,16	0,83	1,24	2,17	0,85	1,26

Pode-se observar também na comparação entre valores que para ambas as modelagens o menor valor de *RMSE* é para a mesma condição: correntes de saturação e fatores de idealidade extraídos da curva no escuro, R_P pelo método da inclinação e R_S pelo método STC. A figura 3.40 apresenta o melhor resultado para a modelagem de duas exponenciais, assim como a figura 3.14 apresentou para de uma exponencial. Ambas são sobrepostas e apresentadas na figura 3.41, juntamente com o erro residual encontrado na comparação entre elas.

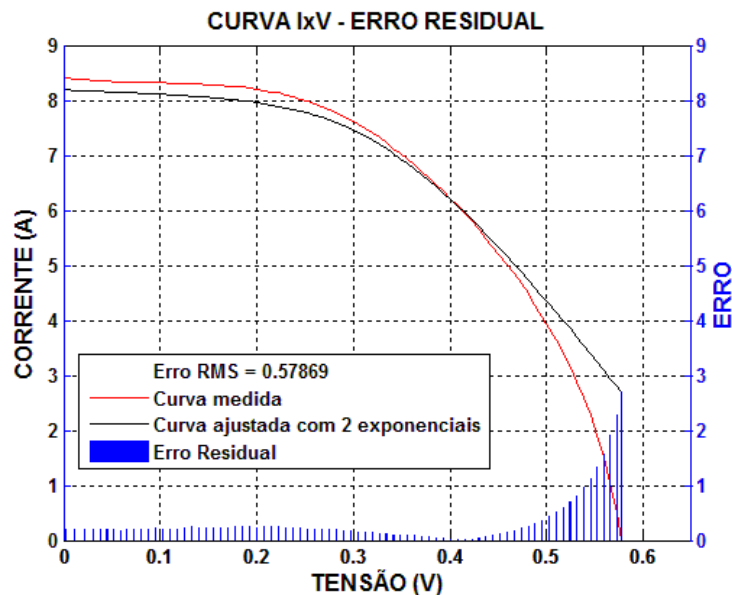


Figura 3.40: Curva com menor *RMSE* calculado para modelagem de duas exponenciais da célula grande monocristalina

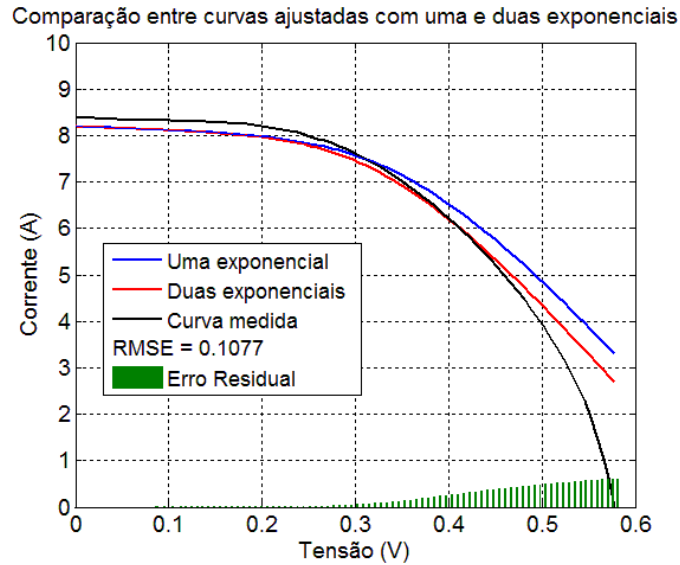


Figura 3.41: Comparação dos resultados obtidos com ajustes de uma e duas exponenciais

Seguindo a fase de testes, a curva medida foi novamente colocada em testes com o software *2/3 Diode Fit*, porém utilizando duas exponenciais como ajuste. A figura 3.42 retrata o resultado incluindo o valor *RMSE* calculado. Seu valor pode ser comparado com o apresentado na figura 3.16 para uma exponencial. Mesmo já apresentando uma excelente aproximação no primeiro ajuste, o acréscimo da segunda exponencial conseguiu um resultado ainda melhor e demonstra mais uma vez a melhoria na obtenção de parâmetros e curvas ajustadas através de métodos iterativos.

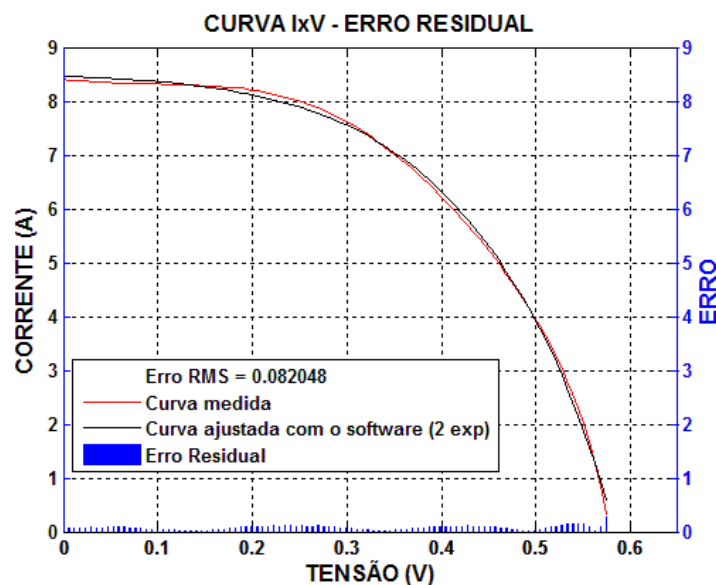


Figura 3.42: Erro residual entre curva da célula grande monocristalina medida e ajustada com duas exponenciais através do *software 2/3 Diode Fit*

Semelhantemente aos testes realizados com a célula monocristalina, a policristalina também foi submetida aos mesmos testes. Os resultados das 12 combinações de parâmetros para duas exponenciais são apresentados nas figuras 3.43 e 3.44, equivalente aos resultados das figuras 3.19 e 3.20.

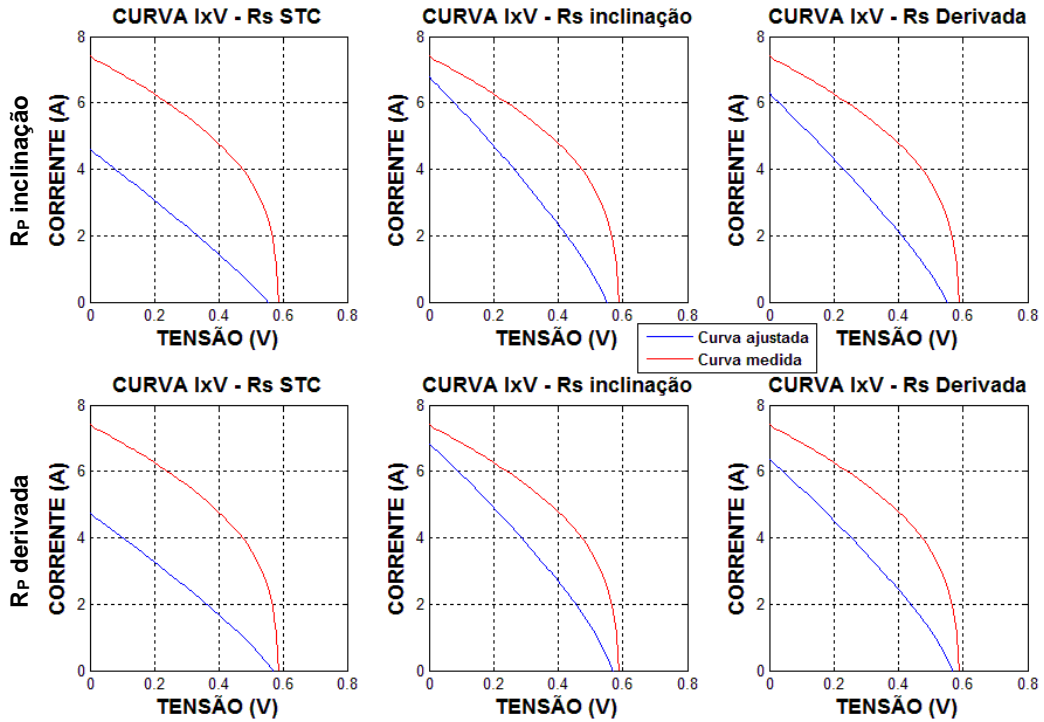


Figura 3.43: Curvas para I_{01} , I_{02} , n_1 e n_2 extraídos do ajuste exponencial da célula policristalina

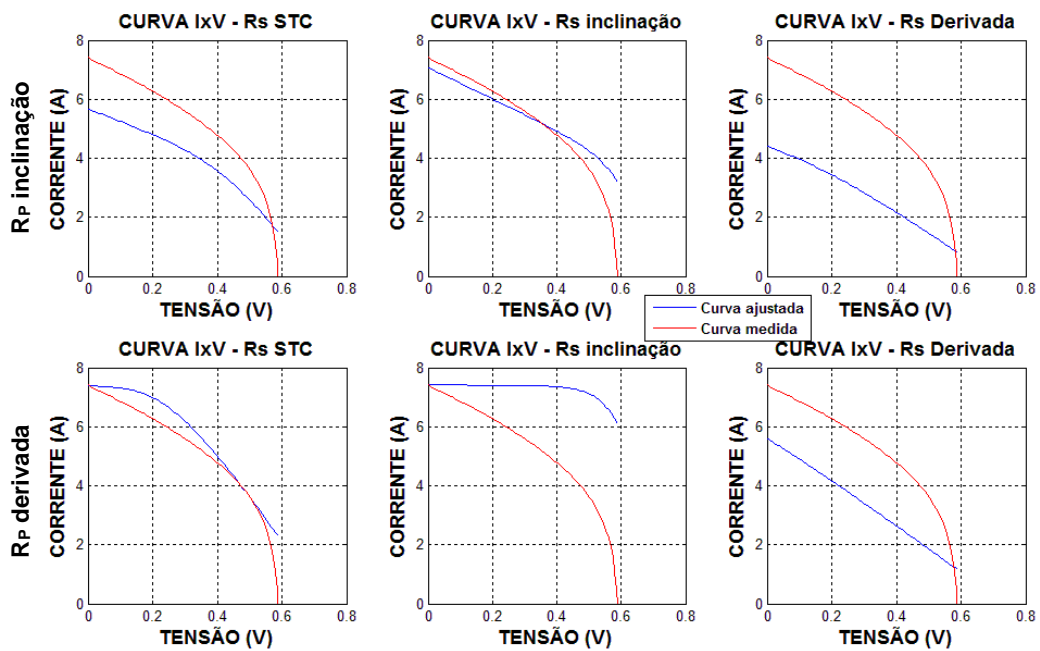


Figura 3.44: Curvas para I_{01} , I_{02} , n_1 e n_2 extraídos da curva no escuro da célula policristalina

Novamente os resultados obtidos se encontram fora do provável. Apesar de se apresentarem com *RMSE* melhores que para uma exponencial, ainda está aquém do que se espera e da precisão que pode e deve ser obtido para reproduzir fidedignamente o comportamento experimental. Dentre os resultados encontrados, a possibilidade que apresentou menor erro foi aquela simulada com as correntes de saturação e os fatores de idealidade extraídos da curva no escuro, a resistência série do método STC e a resistência paralela pela derivada. O resultado é apresentado na figura 3.45.

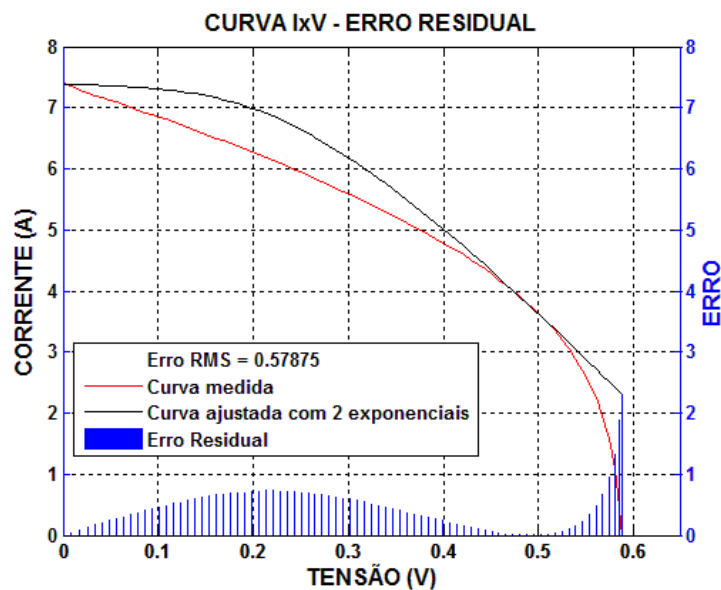


Figura 3.45: Curva com menor *RMSE* para duas exponenciais da célula policristalina

De forma comparativa com a figura 3.24 apresenta-se a figura 3.46. O ajuste exponencial pela ferramenta *cftool* para duas exponenciais se mostrou muito melhor que para uma exponencial, mas não o suficiente para conseguir um melhor ajuste da curva quando realizado o método não-iterativo. Tal situação comprova a necessidade de extrair os parâmetros que carregam consigo as perdas parasitas, isto é, resistência série e resistência paralela.

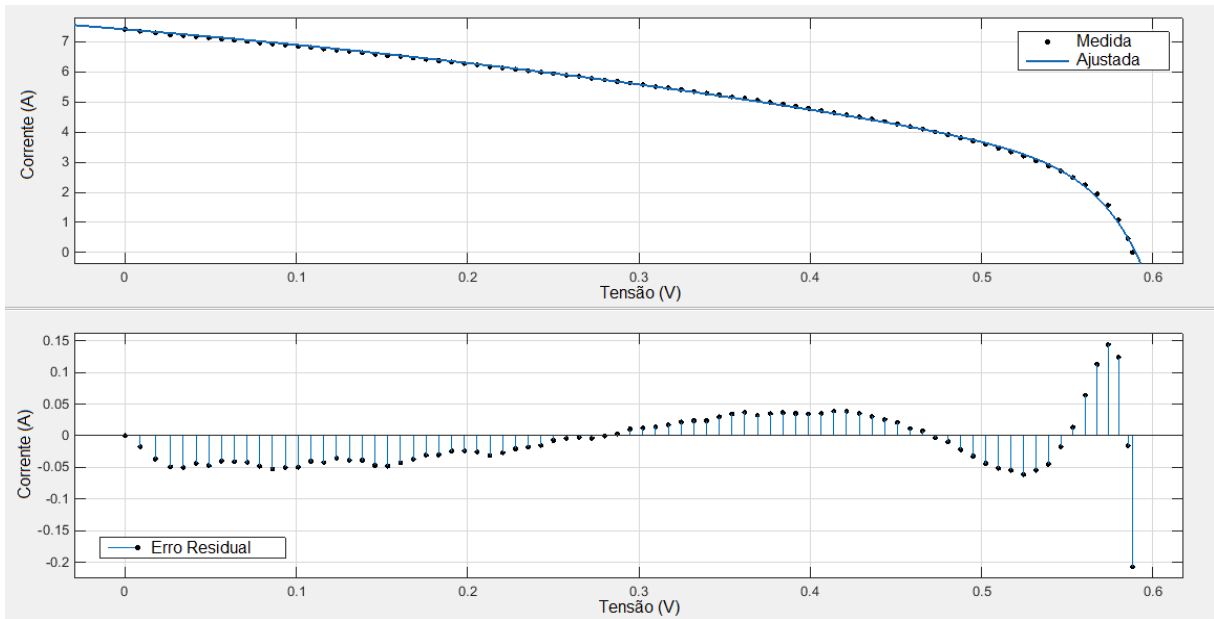


Figura 3.46: Ajuste exponencial realizado com o *cftool* para a extração de I_{01} , I_{02} , n_1 e n_2

O método iterativo também foi aplicado para a modelagem de duas exponenciais para a célula de silício policristalino. O resultado pode ser visto na figura 3.47 e comparado com o apresentado na figura 3.23 para uma exponencial, onde o erro RMS na ocasião foi de 0,068.

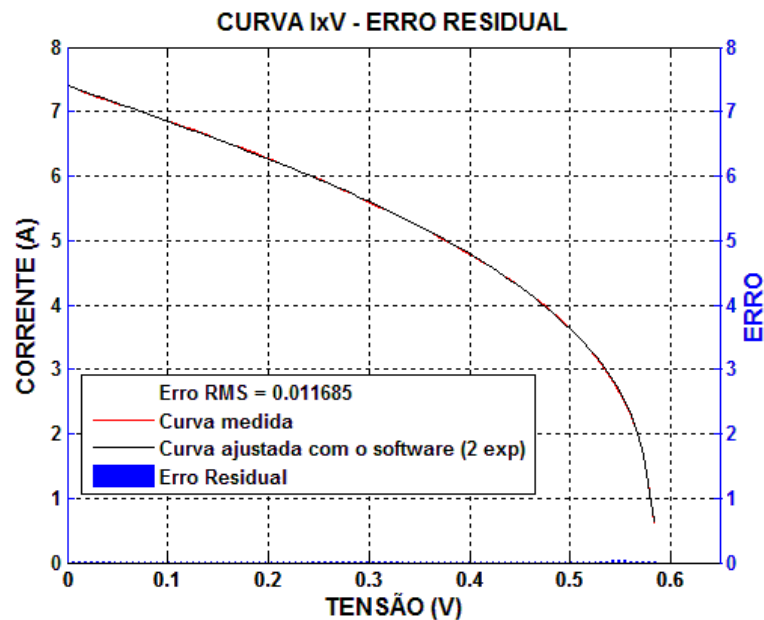


Figura 3.47: Erro residual entre curva da célula policristalina medida e ajustada para duas exponenciais com o software *2/3 Diode Fit*

3.1.5. Comparação entre sol natural e simulador solar

Com o equipamento *source-meter* (medidor-fonte) da Keithley é possível ter acesso à parte externa do laboratório para que se possa obter a curva característica IxV a partir do sol natural. As medidas efetuadas foram feitas em dias de céu claro e em horários onde a irradiância se aproximava do valor padrão. Os valores da irradiância e da temperatura foram monitorados com o kit *PVAnalyzer*, porém não é possível registrar a velocidade do vento. Como base de comparação, a Figura 2.27, apresentada no tópico 2.3, retrata a diferença de espectro solar do sol real e do simulador.

O teste foi realizado com a célula monocristalina, exatamente a mesma utilizada em testes laboratoriais. A figura 3.48 apresenta duas curvas extraídas e que serão comparadas entre si: exposta ao simulador solar, com temperatura igual a 73 °C e irradiância 1000 W/m²; exposta ao sol natural, com temperatura igual a 58,3 °C e irradiância 1163 W/m². Teoricamente o comportamento de ambas está correto pois a que apresenta menor irradiância também apresenta menor corrente de curto-circuito, assim como a de menor temperatura apresenta maior tensão de circuito aberto.

O resultado encontrado foi convertido para a condição padrão de testes (STC) a partir do padrão extraído com o sol artificial já apresentado no tópico 3.1.2.1. Por ser utilizado o mesmo equipamento de medição e mesma célula, os valores da resistência série e fator de ajuste calculados para a condição padrão podem ser os mesmos já apresentados anteriormente. A figura 3.49 apresenta as curvas extraídas após convertidas, sendo que todas agora estão teoricamente sob a mesma temperatura (35 °C) e a mesma irradiância (1000 W/m²), ambas com a indicação de temperatura no momento de extração.

A partir das figuras 3.48 e 3.49, dois principais pontos devem ser observados e analisados. O primeiro deles é que, com a obtenção da curva no sol natural esperava-se encontrar uma curva graficamente semelhante à apresentada pela célula pequena (tópico 3.1.3.1), uma vez que na área externa, a exposição da célula grande encontra um cenário de intensidade luminosa uniforme por toda sua área. Esta discussão será abordada no tópico 3.3, Considerações Finais. O segundo ponto é que, uma vez que as curvas são convertidas de acordo com a norma, provindas de um mesmo dispositivo e apenas com fonte luminosa diferente, o parâmetro V_{OC} não poderia apresentar diferença após a conversão.

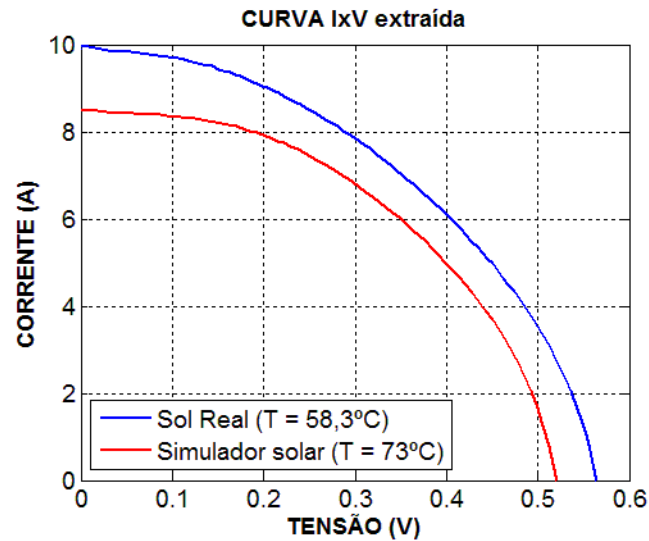


Figura 3.48: Curvas IxV da célula monocristalina da forma que foram extraídas sob diferentes iluminações

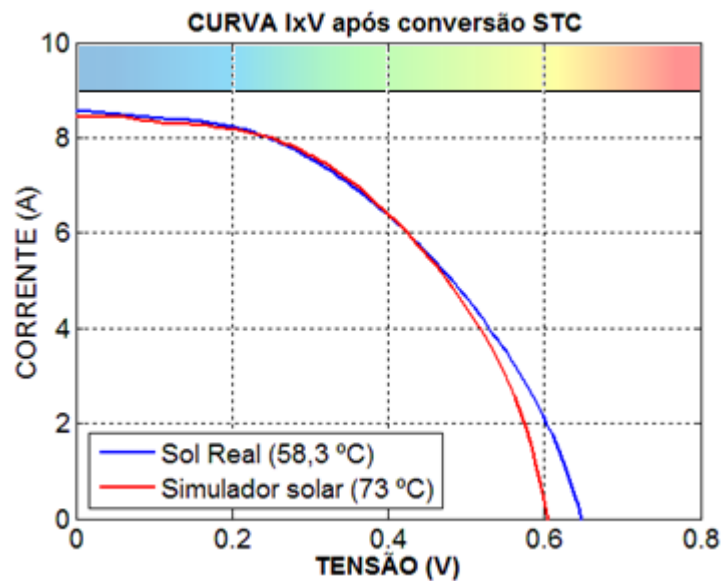


Figura 3.49: Comparação entre curva extraída no sol artificial e sol natural da célula de silício monocristalino

A conversão para as condições padrões de testes (assunto abordado no tópico 3.1.2.1) exigia a extração de ao menos, cinco curvas. Dentre elas, três foram obtidas com mesma irradiância, porém temperaturas diferentes, utilizadas no cálculo da resistência série. O cálculo do fator de ajuste exige também três curvas, sendo essas de irradiâncias diferentes e mesma temperatura. Uma curva foi utilizada para ambos os cálculos. Como discutido, a variação da temperatura foi um problema encontrado

em diversas medições, seja pelo seu aumento no decorrer da extração da curva (principalmente para menores temperaturas – caso de 35 °C), seja pela lentidão de obtenção de pontos (no caso do analisador de parâmetros, alternativa incontornável). O gradiente apresentado na figura 3.49 remete ao aumento da temperatura durante a medição no simulador solar. A medição inicializa com a corrente de curto-circuito (I_{SC}) onde a temperatura medida é de 35 °C, o menor valor de temperatura registrado na medição. Enquanto a célula fica exposta à luz, a temperatura aumenta, mas, por necessitar de um tempo de atualização entre uma medida e outra, o medidor não é capaz de exibir o valor correto ao encerrar a extração da curva. A última captação antes de finalizar a medida indicava valores próximos de 37 °C, não havendo uma garantia de que esta era realmente a temperatura final. A consequência desta variação de temperatura é a alteração da curva no decorrer da extração, o que pode ocasionar em um V_{OC} menor do que de fato deveria ser apresentado, visto que o aumento da temperatura reduz o valor da tensão de circuito aberto (figura 2.24 do capítulo 2). Inicialmente esta diferença foi ignorada e tratada como valores aceitáveis para realizar a conversão. Entretanto, nesta fase de testes, se mostra crucial e, possivelmente, a justificativa mais condizente para que as curvas apresentem diferenças em suas tensões de circuito aberto.

Além disso, a obtenção da curva que ocorre na área externa também pode apresentar uma medição de temperatura errônea. A figura 3.50 apresenta testes realizados na conversão da curva extraída no sol real para caso a temperatura medida tivesse apresentado outro valor. Percebe-se que reduzir o valor da temperatura impacta numa redução de V_{OC} após a conversão. A combinação de ambas as possibilidades de falhas na medição de temperatura justifica a diferença encontrada na comparação entre as diferentes fontes de iluminação.

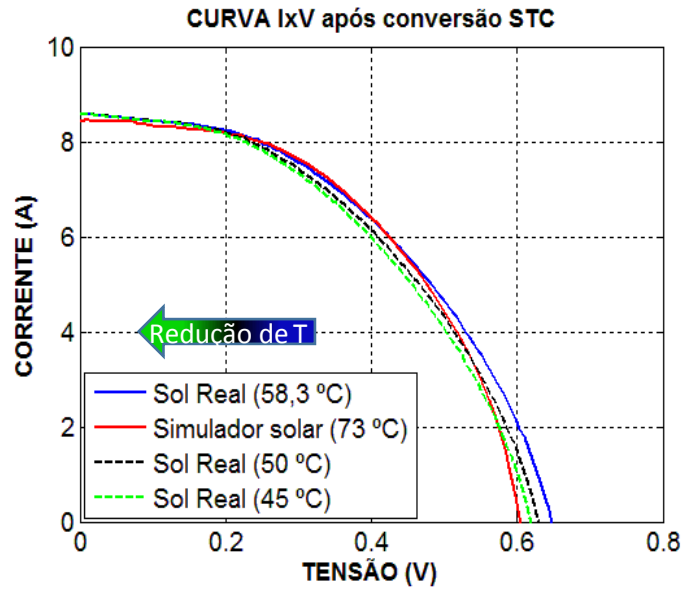


Figura 3.50: Suposições de temperaturas da extração da curva no sol real

3.1.6. Comparação entre valores do fabricante e da medição

A conclusão dos testes elétricos se dá com a comparação entre os dados fornecidos pelos fabricantes das células monocristalina e policristalina e o valor medido nos dispositivos com o sol artificial.

O erro absoluto apresenta a diferença dos valores nominais fornecidos pelo fabricante com os valores medidos, apenas como comparação dos valores que se tem sobre o mesmo dispositivo. Já com o erro relativo pretende-se indicar a margem de erro, comparada com o valor fornecido. Seu cálculo é obtido a partir do erro absoluto, dividindo-o pelo do fabricante. As equações (3.5) e (3.6) apresentam as relações descritas:

$$Err_{abs} = X_{Fab} - X_m \quad (3.5)$$

$$Err_{rel} = \frac{Err_{abs}}{X_{Fab}} \cdot 100 \quad (3.6)$$

Onde Err_{abs} é o erro absoluto, Err_{rel} é o erro relativo, X_{Fab} é o parâmetro fornecido pelo fabricante e X_m é o parâmetro medido.

As tabelas 3.7 e 3.8 apresentam os resultados dos erros calculados para ambas as células (monocristalina e policristalina).

Tabela 3.7: Erros calculados da célula monocristalina

	Célula Monocristalina			
	Fabricante (STC)	Medido (STC)	Erro absoluto	Erro relativo
V_{OC} [mV]	630	584	46	7,3%
I_{SC} [mA]	8951	8463	488	5,45%
P_{MAX} [Wp]	4,39-4,44	2,53	1,86	42,37%
<i>Eficiência</i> [%]	18,01-18,22	10,39	7,62	42,31%

Tabela 3.8: Erros calculados da célula policristalina

	Célula Policristalina			
	Fabricante (STC)	Medido (STC)	Erro absoluto	Erro relativo
V_{OC} [mV]	609	589	20	3,28%
I_{SC} [mA]	8297	7406	891	10,74%
P_{MAX} [Wp]	3,89	1,93	1,96	50,4%
<i>Eficiência</i> [%]	16,00	7,93	8,07	50,44%

3.2. Mobilidade

A compreensão do comportamento da resistência série em uma junção PN é uma busca recorrente tanto para a comunidade de microeletrônica quanto para de fotovoltaico. Em ambos os casos este parâmetro afeta o desempenho do dispositivo em questão. Na tentativa de observar a atuação da temperatura e da concentração de impurezas em um dispositivo fotovoltaico, realizou-se a modelagem matemática para simular a variação da resistência série com tais parâmetros.

No tópico 2.4.2 do capítulo 2 foram apresentadas as fórmulas que relacionam os parâmetros temperatura e concentração de impurezas que agem diretamente na maneira como a resistência se porta em uma célula solar. De posse de tais fórmulas e a partir de características de fabricação das células, pode-se modelar dispositivos e assimilar seu comportamento a partir de gráficos e valores obtidos.

Para o cálculo da mobilidade, o método utilizado foi o já apresentado MINIMOS 6 [21]. Suas fórmulas mostram uma dependência tanto da temperatura quanto da concentração de impurezas.

Primeiramente é interessante observar a mobilidade de elétrons e buracos para materiais intrínsecos, como mostra a figura 3.51. Percebe-se que para qualquer temperatura a mobilidade de buracos é menor que a mobilidade de elétrons. Tais mobilidades dependem apenas do espalhamento da rede cristalina, uma vez que não há impurezas adicionadas no material.

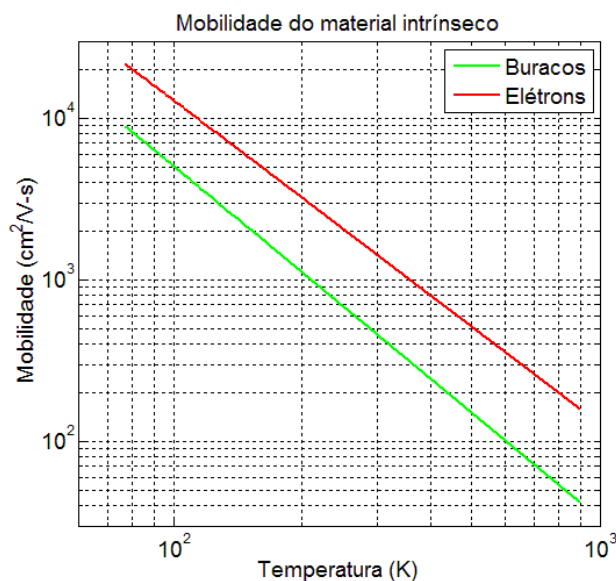


Figura 3.51: Mobilidade de material intrínseco tanto para elétrons quanto para buracos.

Agora os materiais são analisados após a dopagem, porém ainda sem configurarem junções PN. A figura 3.52 mostra a variação da mobilidade do portador de carga com a variação de concentração de impurezas para quatro temperaturas diferentes: 77 K, 150 K, 300 K e 500 K (-196 °C, -123 °C, 26 °C e 226 °C respectivamente). A figura (a) apresenta o comportamento da mobilidade de elétrons, enquanto a figura (b) apresenta o comportamento da mobilidade de buracos, em função da dopagem.

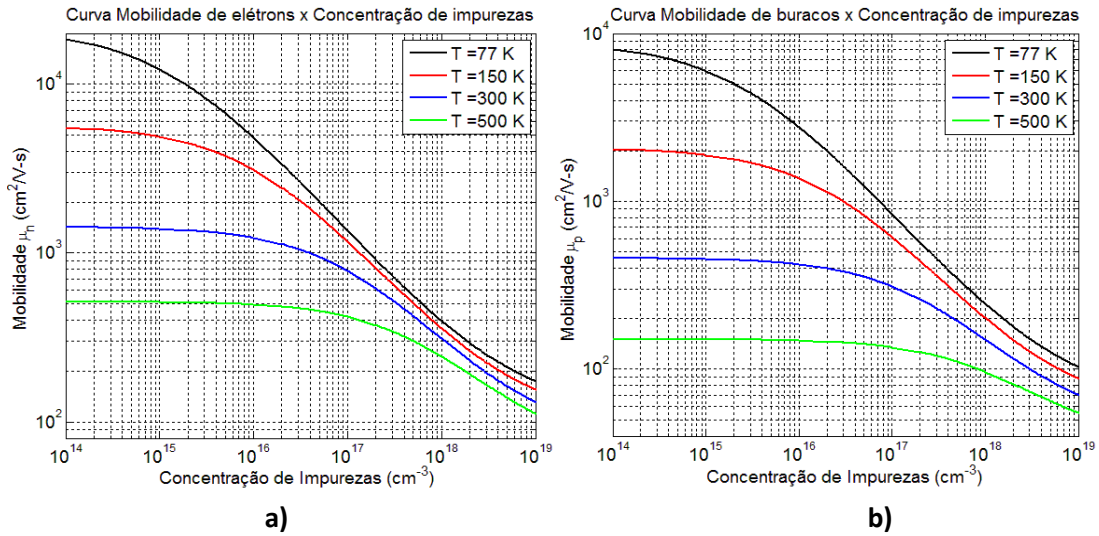


Figura 3.52: Mobilidade x concentração de impurezas para a) elétrons e b) buracos

Como pode ser observado, os gráficos acima se mostram independentes da impureza ao qual o material foi submetido, isto é, a mobilidade do elétron como majoritário é muito próxima ao do elétron como minoritário. Swirhun et al. (1986) apresenta uma comparação entre os dois casos: para um silício do tipo P (elétrons minoritários) com um silício do tipo N (elétrons majoritários). Apenas para altas dopagens é que o valor das mobilidades se diferencia. Por este motivo, em todos os cálculos realizados para a resistência do material, os portadores minoritários terão a mesma fórmula de mobilidade dos portadores majoritários.

Já a figura 3.53 relaciona a temperatura com a mobilidade do portador majoritário para sete concentrações de dopagem diferentes: 10^{11} cm^{-3} , 10^{12} cm^{-3} , 10^{14} cm^{-3} , 10^{16} cm^{-3} , 10^{17} cm^{-3} , 10^{18} cm^{-3} e 10^{19} cm^{-3} .

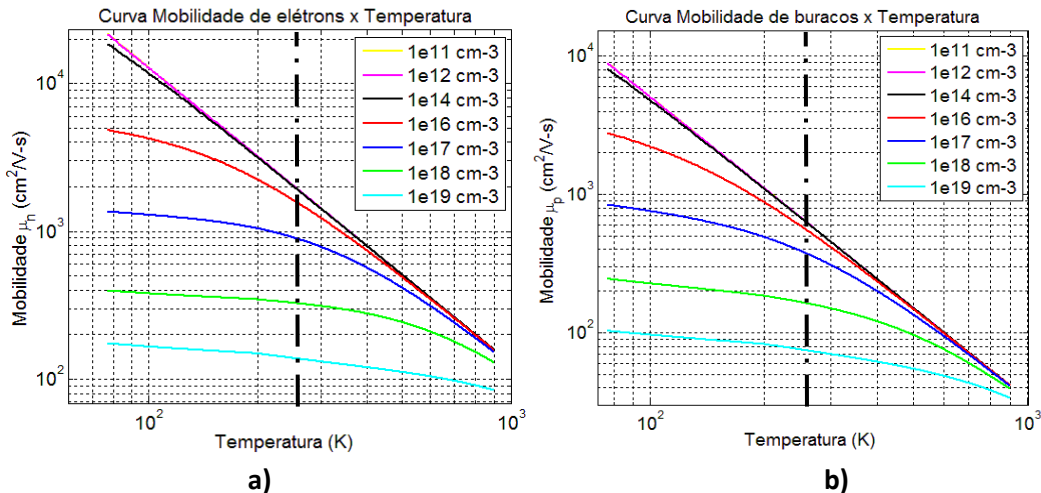


Figura 3.53: Mobilidade x temperatura para a) elétron como majoritário e b) buraco como majoritário

Analisando ambas as figuras, pode-se observar que a mobilidade diminui com o aumento da concentração de impurezas. O que é de se esperar, uma vez que quanto maior a concentração de impurezas, maior a chance do portador de carga sofrer espalhamento em seu percurso, recombinando-se mais rapidamente. Já ao analisar a variação da temperatura, nota-se que quanto mais alta a temperatura, menor é o valor da mobilidade, isto é, maior é a quantidade de portadores contribuindo para a corrente, isso aumenta a possibilidade de se chocarem e assim recombinarem. Sze [5] relata que a dependência da mobilidade para com a temperatura está também relacionada ao espalhamento de portadores de carga na rede cristalina e ao espalhamento por impurezas ionizadas. Para baixas dopagens o espalhamento da rede cristalina domina e a mobilidade diminui com o aumento da temperatura. Este efeito pode ser visto na figura 3.53 para dopagens como 10^{-12} ou 10^{-14} cm^{-3} . Porém, para altas dopagens o espalhamento devido às impurezas ionizadas deveria dominar em baixas temperaturas e fazer com que a mobilidade aumente com o aumento da temperatura. Com o aumento da temperatura, o espalhamento devido a rede cristalina passa a dominar indiferente da dopagem praticada, causando o efeito de diminuição da mobilidade para o aumento de temperatura. Ao contrário do que escrito por Sze, para o método do MINIMOS aplicado, como se pode observar a partir dos gráficos apresentados, o aumento da temperatura provoca uma diminuição da mobilidade para qualquer concentração de dopagem, tanto para buracos quanto para elétrons. A linha tracejada em destaque na vertical em ambos os gráficos aponta o momento inicial em que a curva encontrada neste trabalho apresenta a mesma tendência do resultado apresentado por Sze. Para tanto, percebe-se que tal método não é eficiente para baixas temperaturas, retratando o correto comportamento devido ao espalhamento de impurezas ionizadas, mas não considerando a intervenção do espalhamento pela rede cristalina com sua devida predominância nesta faixa de temperaturas.

Esta limitação será relevada e o método MINIMOS continuará sendo utilizado por se tratar de uma modelagem referente a células solares, dispositivo com o qual não se trabalha em baixíssimas temperaturas. Portanto as simulações são refeitas e a faixa considerada é entre 250 K e 400 K (-23 °C e 127 °C respectivamente).

Outro parâmetro fundamental envolvido na física dos semicondutores é a densidade de portadores intrínsecos (n_i). Seu cálculo envolve densidade de

portadores minoritários e propriedades de recombinação. Além disso, como visto no capítulo anterior (equação 2.17), há uma relação direta com a temperatura, o que, conseqüentemente, afetará os cálculos da resistividade. Seu comportamento é apresentado na figura 3.54 seguinte.

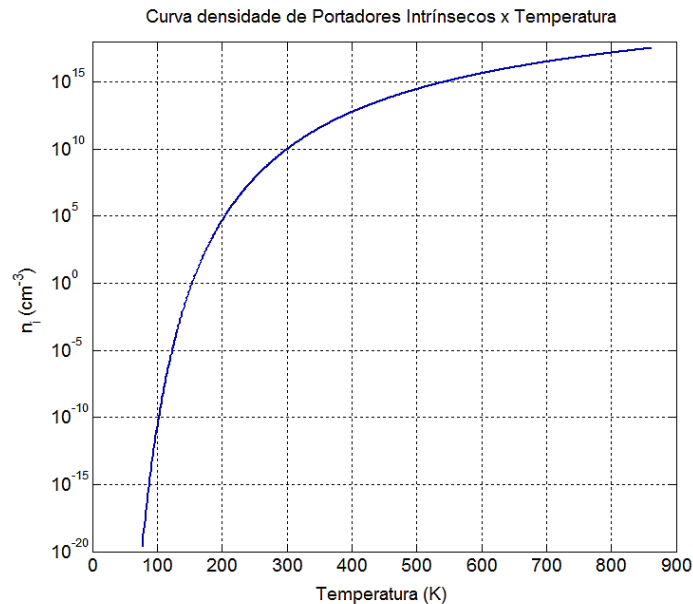


Figura 3.54: Concentração de portadores intrínsecos pela temperatura

O resultado encontrado foi compatível ao apresentado na literatura [27, 64] onde o valor de referência, para temperatura ambiente (a 300 K) o valor de n_i foi de $9,696 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$, enquanto a literatura seu valor é de $9,65 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$.

Calculado os valores de mobilidade e concentração de portadores intrínsecos, pode-se encontrar a concentração de portadores de carga, tanto para buracos quanto para elétrons. Para o lado da junção tipo N, os portadores majoritários (elétrons) apresentam a seguinte equação:

$$n_n = \frac{1}{2} \left[N_D - N_A + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2} \right] + n_i \quad (3.7)$$

Enquanto os minoritários (buracos) são estabelecidos por:

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \quad (3.8)$$

Onde N_D é a concentração de doadores, N_A é a concentração de aceitadores, o que permite calcular a concentração de elétrons a partir de uma dopagem por compensação (quando no material existe impurezas de ambas polaridades, sendo que a de uma determinada natureza domina e define o tipo do material).

Semelhantemente às equações (3.7) e (3.8), pode-se calcular a densidade de portadores majoritários e minoritários do material tipo P.

$$p_p = \frac{1}{2} \left[N_A - N_D + \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2} \right] + n_i \quad (3.9)$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \quad (3.10)$$

A partir das respectivas densidades calculadas, é possível encontrar o valor da condutividade e conseqüentemente da resistividade, por serem inversos um parâmetro do outro. Os resultados da resistividade para os materiais tipo N e tipo P com a variação da temperatura são apresentados na figura 3.55. Apesar da área de interesse ser menor do que o apresentado nas figuras, o gráfico esboçado é mais abrangente para apresentar o comportamento para uma grande faixa.

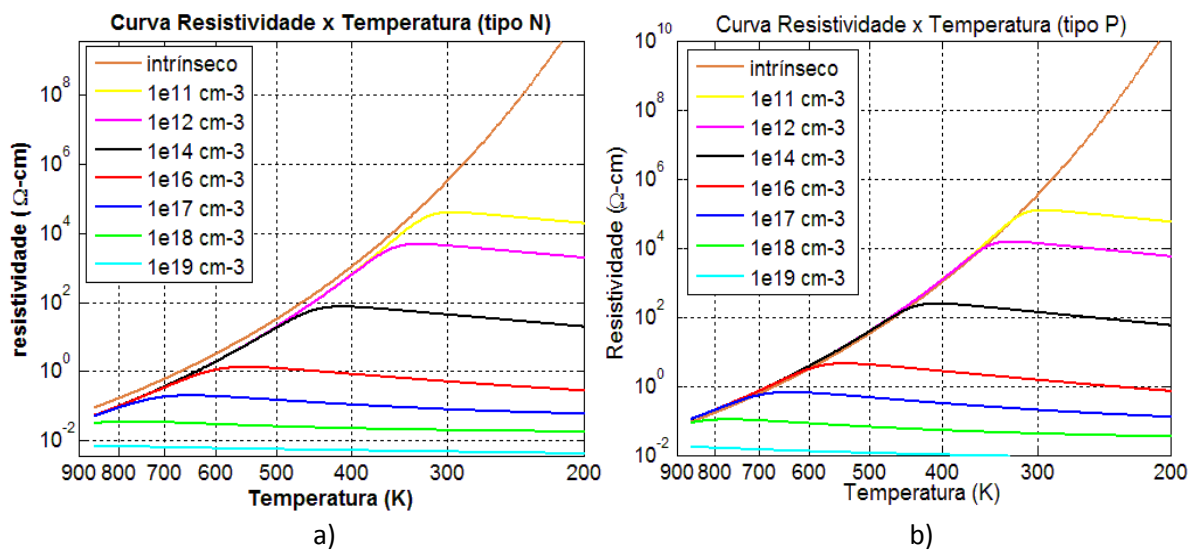


Figura 3.55: Curvas da resistividade x temperatura para material a) tipo N e b) tipo P

Os elétrons, por terem massa efetiva menor que dos buracos, apresenta uma maior mobilidade de portadores e, conseqüentemente uma menor resistividade, indiferente da dopagem aplicada.

De posse de todas as informações acima já se pode aplicar a metodologia para uma junção PN conhecida. Para o exemplo trabalhado, utilizou-se o modelo apresentado por Luque [17] que descreve uma célula solar com os seguintes parâmetros físicos:

Tabela 3.9: Parâmetros do modelo trabalhado em Luque [17] e utilizado nas simulações

N_A (cm⁻³)	N_D (cm⁻³)	Área (cm²)	Espessura (cm)
1x10 ¹⁵	1x10 ²⁰	100	335x10 ⁻⁴

A resistividade para cada lado do material (tipo P e tipo N) é então calculada em função da temperatura. Os resultados obtidos são apresentados na figura 3.56. A dopagem do material tipo N é muito maior que do material tipo P, conseqüentemente sua resistividade será muito menor. Um material mais dopado apresenta uma concentração de portadores muito maior que o material intrínseco, como é de se esperar de um material extrínseco. Simultaneamente a este fato, como visto na figura 3.57, esse mesmo material mais dopado apresenta uma menor mobilidade dos portadores. Porém, o aumento do número de portadores é muito maior que a diminuição da mobilidade, acarretando em uma elevação do denominador na fórmula da resistividade (equação (2.30) e, conseqüentemente, na diminuição deste último. O caso inverso, para um material menos dopado, também apresentará uma resposta inversa.

O próximo passo é a obtenção da resistência série da junção PN como um todo, variando com a temperatura. Para isto, é preciso compreender a variação que ocorre no comprimento do semiconductor pois, como já discutido no tópico 2.4.2, a região de depleção é um parâmetro dependente da temperatura a qual o material se submete. Todas as equações necessárias para avaliar a alteração do comprimento da junção se encontram no mesmo tópico já citado. O resultado da resistência para o material simulado é apresentado na figura 3.57.

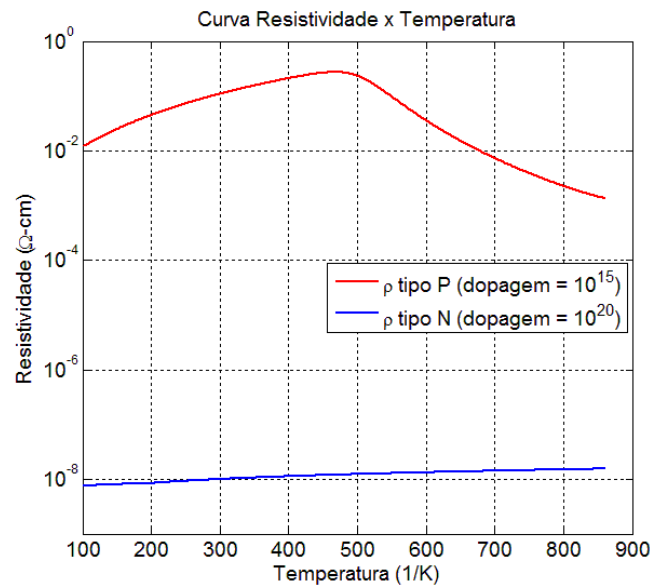


Figura 3.56: Resistividade de cada material que compõe a célula solar simulada

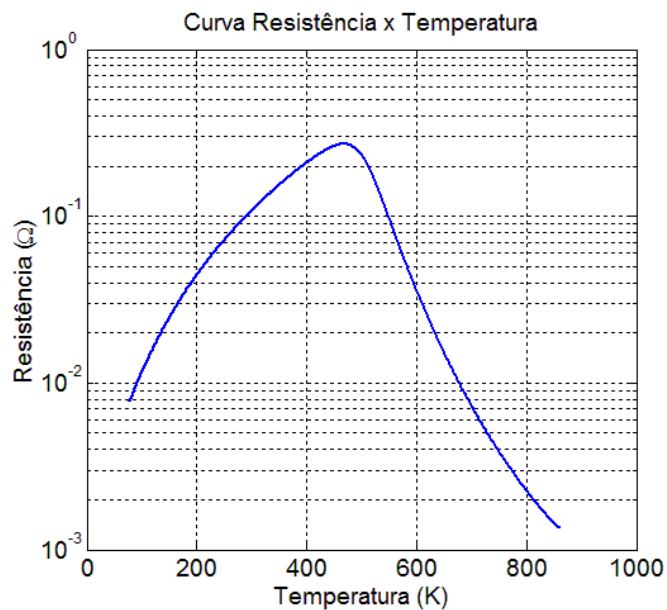


Figura 3.57: Resistência série de um modelo de célula solar

Como se pode observar, a resistência série apresenta um comportamento semelhante à resistência do material menos dopado (como apresentado na figura 3.56). Um aumento até próximo a uma temperatura de 500 K e uma redução após essa temperatura. É aproximadamente em 500 K que o material volta a se comportar como intrínseco, isto é, um momento em que os elétrons que saltam para a banda de condução são conduzidos em sua maioria pela temperatura e não mais pela inclusão de impurezas, assim como nos materiais não dopados (intrínsecos).

Mais uma vez o cálculo de resistência série pelos métodos propostos pela comunidade fotovoltaica se torna controverso. A metodologia utilizada para encontrar a resistência série neste caso (a partir da resistividade da região *quasi-neutra*) é a maneira usual em microeletrônica. Para células fotovoltaicas, entretanto, o método usual é o comportamental, ou seja, através de diversas maneiras que se baseiam na curva $I \times V$ onde, em suma, considera-se a polarização direta abaixo da tensão de circuito aberto. Sabe-se que o aumento da temperatura implica em um menor valor de V_{oc} (figura 2.24 do capítulo 2) e, conseqüentemente, a inclinação do trecho da curva entre o ponto de máxima potência e de tensão de circuito aberto passa a ser maior, como já discutido e apresentado na figura 3.30. Portanto, na metodologia usual para células fotovoltaicas, ao aumentar a temperatura, aumenta também o ângulo de inclinação e diminui o valor da resistência série, contradizendo o resultado encontrado e apresentado na figura 3.57.

3.3. Considerações Finais

Dentre tantas dificuldades encontradas no decorrer da elaboração deste trabalho, algumas necessitam de uma análise mais aprofundada, tais como:

- Cálculo da resistência série;
- Uniformidade de iluminação;
- Geometria do dispositivo;
- Temperatura de medição.

Para fundamentar todas as abordagens, cada ponto será discutido nesta seção com o intuito de concatenar e elucidar os problemas deparados.

3.3.1. Cálculo da resistência série

Foi observado tanto no tópico 3.1.3.2 quanto no 3.2 que a obtenção da resistência série pelos métodos não-iterativos são contestáveis.

O resultado apresentado na figura 3.37 ilustra uma falha comportamental da curva causada pelo equivocado valor de resistência utilizada na simulação. Valor este extraído dos métodos padrões propostos pela comunidade fotovoltaica, relatados na seção 2.4.1 e também por diversos autores [28-38].

A metodologia tipicamente utilizada para a avaliação de junções PN em microeletrônica, também possibilita a extração do valor da resistência série em junções de células solares, com o efeito apresentado na figura 3.57. Como dito em 3.2, a faixa de temperatura de interesse para dispositivos fotovoltaicos não extrapola centenas de Kelvin da temperatura ambiente, tratando o intervalo de 270 K a 400 K (-23 °C e 127 °C respectivamente) como faixa conveniente. Nessa faixa o aumento da temperatura gerou o aumento da resistência, contrariando os métodos comumente utilizados na comunidade fotovoltaica, onde o aumento da temperatura causa a diminuição da resistência série para a mesma faixa de interesse.

Apesar da divergência de resultados obtidos entre os métodos típicos de cada comunidade, ambas utilizam a equação de Shockley para modelar o diodo e em ambas as perdas parasitas aparecem da mesma maneira, atuando do mesmo modo na equação (como apresentado nas equações (2.2) e (2.3)). Isto implica em uma falha na aplicação da fórmula. O valor calculado para corrente é dependente do valor da resistência série, porém é esperado que essa resistência acrescida na fórmula apresente um comportamento onde o aumento da temperatura cause o seu aumento. Se a resistência ali adicionada não condizer com a expectativa, o valor de corrente encontrado também apresentará falhas e, conseqüentemente, uma curva IxV simulada a partir destes dados não irá corresponder à curva extraída. Isto justifica os resultados insuficientes encontrados e apresentados no tópico 3.1.3.2, tanto de uma célula grande (figura 3.34), quanto de uma célula pequena (figura 3.36). Conclui-se que a resistência série encontrada a partir dos métodos usuais para células fotovoltaicas não é a resistência que deveria estar associada à equação de Shockley. Obter esse parâmetro a partir da inclinação ou derivada de trechos da curva IxV abaixo do valor de V_{OC} , por se tratar de um gráfico corrente por tensão, implica em encontrar uma resistência série. Contudo, como a inclinação nesses trechos depende concomitantemente de mecanismos de deriva e difusão, além do valor do parâmetro parasita, não se sabe com precisão qual a parcela devida referente à resistência série. Essa correlação justifica a presença de mais de um resultado da combinação entre R_s e fator de idealidade (n) que podem gerar o mesmo formato de curva IxV (com uma determinada margem de erro), como descrito em [39] e por isso não é a resistência correta que se espera para calcular a corrente.

Neste ponto nota-se uma limitação de cunho prático. Geralmente não se tem acesso às informações físicas de uma célula solar, tais como profundidade de junção

e concentração de dopagem, que permitiriam o cálculo da resistência da forma descrita em 3.2. Assim como a terceira região da curva $I \times V$ semilogarítmica. Isto exige polarizar diretamente a célula com o uso de fonte externa e obter valores acima do ponto de tensão de circuito aberto, onde alcançaria a região da curva mostrada na figura 2.16 do capítulo 2. A inclinação que a curva apresenta neste trecho é causada basicamente pela resistência série que compõe a região *quasi-neutra* do dispositivo. Sem esta continuidade da curva se torna impossível um autêntico cálculo do parâmetro parasita. Diante de tais dificuldades, cabe à comunidade fotovoltaica reavaliar alternativas para definir R_S , sendo essas as maneiras já discutidas provindas da curva $I \times V$ limitada pela máxima corrente (de curto-circuito) e a máxima tensão (de circuito aberto).

Ao aplicar métodos iterativos para a extração dos parâmetros, como já descrito no capítulo 2, tópico 2.4.1, não há uma fórmula exclusiva para cada um, como proposto por Castañer [28], Luque [17] e tantos outros autores. O método de Levenberg-Marquardt [44, 65, 66] otimiza a curva e pondera cada variável que compõe a equação de Shockley de forma a aproximar o comportamento apresentado pela curva à equação. A consequência dessa metodologia é uma combinação de resultados mais fiéis, possibilitando prever o comportamento de um sistema mais complexo nas simulações decorrentes deles.

A divergência de resultados obtidos entre os métodos não-iterativo e iterativo, principalmente nas simulações obtidas com o *PSPICE*®, corrobora a errônea maneira de extrair os parâmetros como proposto pela comunidade fotovoltaica, principalmente da resistência série.

Para que se possa simular um dispositivo de forma confiável é preciso então que a caracterização da junção apresente parâmetros fiéis, adequados de uma dada célula, para que assim possa reproduzir o sistema desejado, seja ele um único componente ou um arranjo mais complexo, painel ou usina fotovoltaica.

3.3.2. Uniformidade de iluminação e geometria dos dispositivos

A comparação entre o sol natural e o simulador solar trouxe o questionamento sobre a uniformidade de luz incidida em uma célula solar. Ao realizar os testes no simulador com o fragmento da célula e também com a célula em seu tamanho real, obteve-se uma diferença significativa entre suas curvas e valores de parâmetros. Toda

essa diferença observada foi justificada por ambas serem extraídas do mesmo sol artificial que apresenta uma não uniformidade luminosa pela extensão de sua mesa de testes (mapa de uniformidade apresentado na figura 3.25). Esta discussão foi apresentada no tópico 3.1.3.1.

A justificativa se mostrou falha ao extrair a curva da célula em tamanho padrão (15,6 x 15,6 cm²) exposta à iluminação solar natural (tópico 3.1.5) onde espera-se uma uniformidade luminosa por toda a área da célula, assim como a obtida para uma célula pequena (6 x 7 cm²) quando exposta ao simulador solar. Ao contrário do que se aguardava, o fator de preenchimento da curva extraída foi muito próximo ao encontrado pela célula também em tamanho padrão no simulador, ao invés de uma semelhança com a célula pequena. Percebeu-se então que a uniformidade da luz não é o ponto primordial que diferencia os resultados obtidos no simulador solar para diferentes tamanhos de célula. Não é a intensidade que caracteriza a alteração de valores dos parâmetros que compõem a modelagem do dispositivo.

Um ponto que se deve observar sobre essa não uniformidade luminosa que pode comprometer o resultado apresentado em 3.1.5 é que, a conversão para condições padrões (STC) é realizada por um método que não leva em consideração a não homogeneidade de luz. Tal situação impede que a comparação realizada entre os diferentes tipos de iluminação seja fiel ao que se propõe. Caso as medições apresentassem a mesma irradiância, a comparação poderia se tornar mais autêntica, por apresentar menos parâmetros distintos.

Para tentar justificar a diferença na densidade de corrente de cada tamanho de célula que foi apresentado na tabela 3.3 cogitou-se as diferenças de bordas entre elas. A figura 3.58 ilustra as bordas de cada célula. A célula grande (figura a) possui uma borda sem a presença de contatos metálicos por toda sua extensão, é limitada por um eletrodo que contorna todos os demais e a uma certa distância do término do dispositivo, como aponta o número 1. Já a célula pequena não possui limitações e todos os seus eletrodos aparecem até a ruptura de suas laterais, indicado pelo número 2. A corrente de deriva acontece na região de depleção por toda a extensão da célula e, na borda, por apresentar maior defeito de superfície, pelos átomos nas regiões possuírem ligações abertas, acontece um efeito de recombinação mais substancial. Esta teoria poderia elucidar se a relação entre perímetro e área não provasse o contrário. Quanto maior for a área do dispositivo, menor será a relação perímetro/área. Isto significa que o efeito de deriva proporcionado pela borda será menos significativo

quando relacionado ao mecanismo de recombinação devido a região de depleção. Portanto, aumentar a borda não implica, necessariamente, em um maior efeito de recombinação, uma vez que, para este caso, o aumento da área foi mais significativo que do perímetro. Se faz necessário um número maior de amostras com diversas variações de bordas, com ou sem eletrodos que alcançam o fim da célula, para assim avaliar o impacto causado por diferenças de tamanho e de geometria.

Apenas com o material que se tem acesso apresentando diversos fatores diferentes, não se sabe em que proporção cada um deles afeta o comportamento do dispositivo. O que se sabe é que células com geometrias e tamanhos diferentes, mesmo quando fabricadas com mesma tecnologia, dopagem e material, podem apresentar efeitos distintos; não correspondente a um simples escalonamento de valores. Os fatores que podem acarretar essa diferença são diversos, como: diferença de borda, do perímetro, proximidade das trilhas metálicas da borda, defeitos na borda, estresse mecânico, dentre outras características. Seria necessário então um conjunto de dados compatível com esta diversidade encontrada para que se torne possível chegar a um veredito sobre como se comporta a célula com a redução ou aumento de seu tamanho.

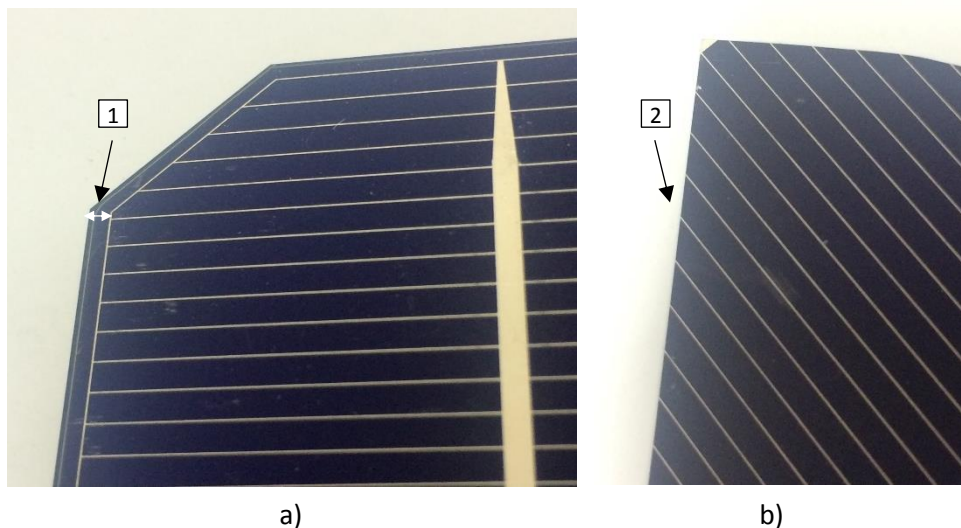


Figura 3.58: Bordas das células a) grande e b) pequena

3.3.3. Temperatura de medição

Por fim, vale enfatizar a importância das medições com um total controle de temperatura e registro preciso desta grandeza. Como visto no tópico 3.1.5, uma falha

em mensurar um correto valor de temperatura leva a comparações imprecisas e resultados duvidosos, uma vez que a conversão para STC se torna prejudicada ao ocorrer variação de temperatura no decorrer da medição. Para um modelo fiel na simulação de uma célula, essa situação invalida o procedimento.

Ao utilizar simuladores solares, é fundamental trabalhar com um sistema de arrefecimento confiável, com o qual se possa estabilizar a temperatura do dispositivo colocado em teste e garantir uma medição completa sem que haja influência de tal parâmetro, principalmente ao longo de toda a aquisição de pontos em um mesmo conjunto de dados.

4. CONCLUSÃO

A proposta do trabalho foi prever o funcionamento de células solares a partir de um sistema de caracterização completo de maneira a traduzir de forma mais fidedigna a influência de parâmetros parasitas. As células solares foram então expostas a ensaios laboratoriais com condições climáticas controladas e a ensaios ao ar livre sob medições de irradiância e temperatura. A obtenção de todos os dados e parâmetros permitiu criar um modelo numérico completo em *PSpice®*, admitindo variações dos parâmetros que compõem a equação de Shockley e também dos parâmetros característicos externos.

Entretanto percebe-se que se as condições solarimétricas forem diferentes, ocorrer variações de temperatura e irradiância no decorrer das medições, a própria medida se torna controversa com a precisão que se gostaria de garantir para esse modelo. Passa a ser questionável a possibilidade de extração de forma fiel de todos os parâmetros para que se possa criar o modelo de arranjos de células, estendendo para sistemas maiores, como seria o caso de uma usina. Extrapolações podem apontar para uma direção completamente diferente daquela em que de fato uma usina iria operar. Existem tantos parâmetros que variam sob condições diferentes de medidas que implementar sistemas em cascatas com modelos incertos se torna duvidoso. Em casos onde haja necessidade de simular usinas completas, é preciso levar em consideração a importância de que todos os resultados de curvas $I \times V$ sejam obtidos sempre no mesmo equipamento, com mesma temperatura, dispositivos de mesma geometria, mesmo tamanho e mesma tecnologia, i. e. mesmo substrato e mesmo processo de fabricação.

Dada a impossibilidade com os testes realizados de se chegar ao objetivo original, é importante dar continuidade ao trabalho para alcançar tal objetivo com as seguintes propostas:

- Extrair uma maior quantidade de amostras para realizar bateladas de testes mais específicos para cada hipótese que gere a variação de comportamento:
 - A partir de um número grande de amostras de células em diferentes tamanhos (e demais características idênticas), tentar encontrar uma possível relação na variação de resultados, seja linear ou não linear;

- Inserir diferentes defeitos (como ranhuras, impurezas, estresses mecânicos, trincas, dentre outros) em células idênticas para analisar o comportamento resultante de cada dispositivo defeituoso;
 - Obter curvas $I \times V$ que possuem a terceira região para que se extraia a resistência série e comparar com diversas outras alternativas da literatura, e principalmente com resultados de métodos iterativos;
 - Desenvolver testes físicos que se possa extrair parâmetros de uma célula como a profundidade de junção e concentração de dopagem para aprimorar metodologias de obtenção de resistências série;
 - Analisar o comportamento da variação de temperatura ao longo da medição e avaliar as diferenças encontradas de resultados provindos de medições estáveis.
- Utilizar de uma célula pequena (que ocupe apenas a região homogênea do simulador solar) e analisar o comportamento da não homogeneidade ao usar filtros de densidade neutra com distintas transmitâncias na periferia da mesma, reduzindo a intensidade luminosa das bordas;
 - Aprimorar a metodologia numérica para que se possa abranger os materiais semicondutores adotados e poder obter resultados para qualquer tipo de célula atuante no mercado;
 - Uso de câmaras de intemperismo para realizações de testes de envelhecimento em células solares e assim se possa prever seu comportamento com a agressividade climática;
 - Estudos sobre resistência paralela analisando seu impacto nos dispositivos fotovoltaicos, inclusive seu comportamento sob condições diferentes de medidas;
 - Alterar a mesa de testes do simulador solar, eliminando a borda que limita o prato e que impede o contato de células maiores com o processo de arrefecimento que o compõe.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. C. Marques, "Minicurso de Fabricação de Células Solares e Módulos Fotovoltaicos," IFGW/Unicamp, Ed., ed, 2014.
- [2] J. T. Pinho e M. A. Galdino. (2014, March) "Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos." *GTES, CEPEL, DTE, CRESESB*.
- [3] P. A. C., "Processos de fabricação de células solares bifaciais em fornos de aquecimento rápido." 2004. 123 p, Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) –PGETEMA, PUCRS, 2004.
- [4] C. Dias, I. Mattoso, H. Moutinho, e L. Cruz, "Processamento de filmes finos fotovoltaicos de CdTe para aplicação em células solares: Microestrutura e propriedades de absorção," *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, vol. 23, pp. 82-87, 2008.
- [5] S. M. Sze, "Semiconductor Devices: Physics and Technology." Wiley: John Wiley & Sons, INC, 2001.
- [6] B. E. Saleh e M. C. Teich, "Fundamentals of photonics" vol. 22: Wiley New York, 1991.
- [7] A. Belghachi, A. Helmaoui, and A. Cheknane, "High efficiency all-GaAs solar cell," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 18, pp. 79-82, 2010.
- [8] W. Li, R. Yang, e D. Wang, "CdTe solar cell performance under high-intensity light irradiance," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 123, pp. 249-254, 2014.
- [9] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, e E. D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (Version 45)," *Progress in photovoltaics: research and applications*, vol. 23, pp. 1-9, 2015.
- [10] X. Wu e P. Sheldon, "A novel manufacturing process for fabricating CdS/CdTe polycrystalline thin-film solar cells": National Renewable Energy Laboratory, 2000.
- [11] A. M. Bagher, "Comparison of organic solar cells and inorganic solar cells," *Int J Renew Sustain Energy*, vol. 3, pp. 53-58, 2014.
- [12] B. O'regan e M. Grfitzeli, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized," *nature*, vol. 353, pp. 737-740, 1991.
- [13] M. Grätzel, "Dye-sensitized solar cells," *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, vol. 4, pp. 145-153, 2003.
- [14] J. J. Soon, K.-S. Low, e S. T. Goh, "Multi-dimension diode photovoltaic (PV) model for different PV cell technologies," *Proc. 23rd IEEE ISIE*, pp. 2496-2501, 2014.
- [15] NREL. http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg. Acessado em 04 de julho de 2016.
- [16] F. Kininger e R. Energiewandlung, "Photovoltaic systems technology," *Universität Kassel*, vol. 155, 2003.

- [17] A. Luque e S. Hegedus, "*Handbook of photovoltaic science and engineering*": John Wiley & Sons, 2011.
- [18] J. Mark, "*Photodetection and measurement: maximizing performance in optical systems*": New York: McGraw-Hill Professional, 2003.
- [19] V. Palankovski e R. Quay, "*Analysis and simulation of heterostructure devices*:" Springer Science & Business Media, 2004.
- [20] T. B. Teixeira, "Influência da temperatura em aglomerados auto-reconfiguráveis de células solares fotovoltaicas," MSc em Universidade Federal de Minas Gerais-Instituto de Ciências Exatas, 2008.
- [21] D. M. Caughey e R. E. Thomas, "Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field," *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, pp. 2192-2193, 1967.
- [22] S. Selberherr, "Device modeling and physics," *Physica Scripta*, vol. 1991, p. 293, 1991.
- [23] N. D. Arora, J. R. Hauser, e D. J. Roulston, "Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature," *IEEE Transactions on Electron Devices*, pp. 292-295, 1982.
- [24] S. Swirhun, Y. Kwark, e R. Swanson, "Measurement of electron lifetime, electron mobility and band-gap narrowing in heavily doped p-type silicon," em *Electron Devices Meeting, 1986 International*, 1986, pp. 24-27.
- [25] J. del Alamo, S. Swirhun, e R. Swanson, "Simultaneous measurement of hole lifetime, hole mobility and bandgap narrowing in heavily doped n-type silicon," em *Electron Devices Meeting, 1985 International*, 1985, pp. 290-293.
- [26] A. B. Sproul e M. A. Green, "Improved value for the silicon intrinsic carrier concentration from 275 to 375 K," *Journal of Applied Physics*, vol. 70, pp. 846-854, 1991.
- [27] K. Misiakos e D. Tsamakis, "Accurate measurements of the silicon intrinsic carrier density from 78 to 340 K," *Journal of Applied Physics*, vol. 74, pp. 3293-3297, 1993.
- [28] L. Castaner e S. Silvestre, "*Modelling photovoltaic systems using PSpice*." Chichester: John Wiley & Sons, 2002.
- [29] J. Thongpron, K. Kirtikara, e C. Jivacate, "A method for the determination of dynamic resistance of photovoltaic modules under illumination.," *14th International Photovoltaic Science and Engineering Conference*, pp. 3078-3084, 2006.
- [30] M. Wolf e H. Rauschenbach, "Series resistance effects on solar cell measurements.," *Advanced energy conversion 3.2*, pp. 455-479, 1963.
- [31] V. N. Singh e R. P. Singh, "A method for the measurement of solar cell series resistance.," *Journal of Physics D Applied Physics 16*, pp. 1823-1825, 1983.

- [32] P. Singh, S. N. Singh, M. Lal, e M. Husain, "Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell.," *Solar Energy Materials and Solar Cells* 92.12, pp. 1611-1616, 2008.
- [33] Y. Li, W. Huang, H. Huang, C. Hewitt, Y. Chen, G. Fang, *et al.*, "Evaluation of methods to extract parameters from current–voltage characteristics of solar cells.," *Solar Energy* 90, pp. 51-57, 2013.
- [34] A. W. Haas, J. R. Wilcox, J. L. Gray, e R. J. Schwartz, "Extracting a series resistance from $\ln[J_{sc}] - V_{oc}$ and $FF - V_{oc}$ characteristics.," *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE*, pp. 481-485, 2011.
- [35] M.-K. Lee, J. C. Wang, S. F. Horng, e H. F. Meng, "Extraction of solar cell series resistance without presumed current–voltage functional form.," *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94.3, pp. 578-582, 2010.
- [36] K. C. Fong, K. R. McIntosh, e A. W. Blakers, "Accurate series resistance measurement of solar cells.," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 21.4, pp. 490-499, 2013.
- [37] D. T. Cotfas, P. Cotfas, D. Ursutiu, e C. Samoila, "The methods to determine the series resistance and the ideality factor of diode for solar cells-review.," *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012 13th International Conference on*, pp. 966-972, 2012.
- [38] S. Bowden e A. Rohatgi, "Rapid and accurate determination of series resistance and fill factor losses in industrial silicon solar cells.," *17th EU-PVSEC*, pp. 1802-1806, 2001.
- [39] P. H. Bueno, D. F. Costa, A. Eick, A. Carvalho, e D. W. L. Monteiro, ""The behavior of series resistance of a pn junction: the diode and the solar cell cases," em *SPIE OPTO*, 2016, pp. 97431F-97431F-9.
- [40] "Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5," American Society Testing and Materials (ASTM), <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/> Acessado em 13 de abril de 2016.
- [41] Solmetric, "Solmetric PVA-600 PV Analyzer, User's Guide," 2012.
- [42] M. Lal, S. N. Singh, e P. Singh, "A new method of determination of series and shunt resistances of silicon solar cells.," *Solar Energy Materials and Solar Cells* 91.2, pp. 137-142, 2007.
- [43] A. Ortiz-Code, D. Lugo-Munoz, e F. J. Garcia-Sanchez. (2012, April) "An Explicit Multiexponential Model as an Alternative to Traditional Solar Cell Models With Series and Shunt Resistances". *Photovoltaics, IEEE Journal of (Volume:2 , Issue: 3)*. 261 - 268.
- [44] S. Suckow, T. M. Pletzer, e H. Kurz, "Fast and reliable calculation of the two-diode model without simplifications," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 22, pp. 494-501, 2014.
- [45] S. Suckow. "2/3 Diode Fit." <https://nanohub.org/resources/14300> Acessado em 21 de fevereiro de 2016.

- [46] J. H. Mathews, "Numerical methods for computer science, engineering, and mathematics:" Prentice-Hall, Inc., 1986.
- [47] A. J. Bühler, F. P. Gasparin, e A. Krenzinger, "Post-processing data of measured I–V curves of photovoltaic devices," *Renewable Energy*, vol. 68, pp. 602-610, 2014.
- [48] A. L. C. Carvalho, "Metodologia Para Análise, Caracterização e Simulação de Células Fotovoltaicas," PPGEE-UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.
- [49] I. E. Commission, "IEC 60891, *Procedures for temperature and irradiance corrections to measured IV characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices.*" Ed, vol. 2, 2009.
- [50] I. Standard, "60904-1, *Photovoltaic Devices, Part 1: Measurement of Photovoltaic Current–Voltage Characteristics,*" *International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland*, 2006.
- [51] "Series 2600B System SourceMeter® Instrument, Reference Manual 2600BS-901-01," Keithley, Ed., ed, 2013.
- [52] F. Dkhichi, B. Oukarfi, A. Fakkar, e N. Belbounaguia, "Parameter identification of solar cell model using Levenberg–Marquardt algorithm combined with simulated annealing," *Solar Energy*, vol. 110, pp. 781-788, 2014.
- [53] T. Mueller, "Heterojunction solar cells (a-Si/c-Si): investigations on PECV deposited hydrogenated silicon alloys for use as high-quality surface passivation and emitter/BSF": Logos Verlag Berlin GmbH, 2009.
- [54] V. Lo Brano, A. Orioli, G. Ciulla, e A. Di Gangi, "An improved five-parameter model for photovoltaic modules," *Solar Energy Mater Solar Cells*, 94, pp. 1358-1370, 2010.
- [55] K. R. McIntosh e C. B. Honsberg, "The influence of edge recombination on a solar cell's IV curve," em *Proc. 16th PVSEC, Glasgow*, 2000, pp. 1651-1654.
- [56] O. Breitenstein, J. Bauer, A. Lotnyk, e J.-M. Wagner, "Defect induced non-ideal dark I–V characteristics of solar cells," *Superlattices and Microstructures*, vol. 45, pp. 182-189, 2009.
- [57] O. Breitenstein, P. Altermatt, K. Ramspeck, e A. Schenk, "The origin of ideality factors $n > 2$ of shunts and surfaces in the dark IV curves of Si solar cells," em *Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2006, pp. 625-628.
- [58] O. Breitenstein, "Understanding the current-voltage characteristics of industrial crystalline silicon solar cells by considering inhomogeneous current distributions," *Opto-Electronics Review*, vol. 21, pp. 259-282, 2013.
- [59] O. Breitenstein, P. Altermatt, K. Ramspeck, M. Green, J. Zhao, e A. Schenk, "Interpretation of the commonly observed IV characteristics of c-Si cells having ideality factor larger than two," em *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, 2006, pp. 879-884.

- [60] T. Markvart e L. Castaner, "*Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications.*" Oxford: Elsevier, 2003.
- [61] T. Markvart e L. Castaner, "*Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation.*" Oxford: Elsevier, 2004.
- [62] Célio Costa Vaz e N. Veissid, "Simulador Solar de Baixo Custo Para Testes de Células Solares (SOLSIM)," O. Engenharia, Ed., ed, 2015.
- [63] S. Swirhun, Y.-H. Kwark, e R. Swanson, "*Measurement of electron lifetime, electron mobility and band-gap narrowing in heavily doped p-type silicon,*" em *Electron Devices Meeting, 1986 International*, 1986, pp. 24-27.
- [64] P. P. Altermatt, A. Schenk, F. Geelhaar, e G. Heiser, "*Reassessment of the intrinsic carrier density in crystalline silicon in view of band-gap narrowing,*" *Journal of Applied Physics*, vol. 93, pp. 1598-1604, 2003.
- [65] J. J. Moré, "*The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory,*" em *Numerical Analysis: Proceedings of the Biennial Conference Held at Dundee, June 28–July 1, 1977*, G. A. Watson, Ed., ed Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1978, pp. 105-116.
- [66] D. W. Marquardt, "*An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters,*" *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 11, pp. 431-441, 1963.
- [67] R. F. Pierret, "*Semiconductor device fundamentals.*" Reading, MA: Addison-Wesley, 1996.
- [68] F. Khan, S.-H. Baek, e J. H. Kim, "*Intensity dependency of photovoltaic cell parameters under high illumination conditions: An analysis.,*" *Applied Energy* 133, pp. 356-362, 2014.
- [69] E. Lorenzo, "*Solar electricity: engineering of photovoltaic systems:*" Progensa, 1994.
- [70] Y. Yue, J. J. Liou, e A. Ortiz-Conde, "*High-level injection in quasi-neutral region of n/p junction devices: Numerical results and empirical model.,*" *Journal of applied physics* 77.4, pp. 1611-1615, 1995.
- [71] T. CECCHINI, "Otimização das regiões altamente dopadas de células solares fabricadas por processos térmicos rápidos," Porto Alegre, 2003.
- [72] K. D. Shetty, M. B. Boreland, V. Shanmugam, J. Cunnusamy, C. Wu, S. Iggo, *et al.* (2013) "*Lightly Doped Emitters for High Efficiency Silicon Wafer Solar Cells.*" *PV Asia Pacific Conference*. 70-75.
- [73] R. L. Boylestad e L. Nashelsky, "Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos." São Paulo: Prentice-Hall, 2004.