

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
FÍSICA

Impactos da temperatura e irradiância em  
células solares de silício policristalino.

Davi Marcelo Fébba

Itajubá, 3 de julho de 2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
FÍSICA**

**Davi Marcelo Fébba**

**Impactos da temperatura e irradiância em  
células solares de silício policristalino.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Física como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Física.

**Área de Concentração: Matéria condensada**

**Orientador: Prof. Dr. Rero Marques Rubinger  
Coorientador: Prof. Dr. Adhimar Flávio Oliveira**

**3 de julho de 2018  
Itajubá**



Ministério da Educação  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de Abril de 2002.

# ANEXO I

## FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

### Programa de Pós-Graduação em Física

Título: "Impactos da temperatura e irradiância em células solares de silício policristalino"

Autor: Davi Marcelo Fébba

### JULGAMENTO

Examinadores	Conceito		Rubrica
	A = Aprovado	R = Reprovado	
1º	A		
2º	A		
3º	A		
4º			

#### Observações:

- (1) O trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.  
(2) O trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelo menos 2 (dois) conceitos R.  
**Este documento terá a validade de 30 (trinta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.**

Resultado Final: Conceito A, ou seja, Aprovado.

Observações: \_\_\_\_\_

Itajubá, 28 de junho de 2018.

Prof. Dr. Felipe Emanuel Chaves  
1º Examinador

Prof. Dr. Alan Bendasoli Pavan  
2º Examinador

Prof. Dr. Adhimar Flávio Oliveira  
3º Examinador (Coorientador)

Prof. Dr. Rero Marques Rubinger  
4º Examinador (Orientador)



Ministério da Educação  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de Abril de 2002.

**FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE  
MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

Eu, Prof. Dr. Rero Marques Rubinger, 4º Examinador (por videoconferência) da banca de Dissertação de Mestrado do aluno DAVI MARCELO FÉBBA, intitulada "**Impactos da temperatura e irradiância em células solares de silício policristalino**", após o julgamento da Dissertação, atribuo a seguinte nota:

**JULGAMENTO**

Examinadores	Conceito		Rubrica
	A = Aprovado	R = Reprovado	
4º	A		

Autorizo o Coorientador do candidato, Prof. Dr. Adhimar Flávio Oliveira, a assinar por mim a Ata de Defesa Pública de Dissertação de Mestrado.

ITAJUBÁ, 28 de junho de 2018.

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rero Marques Rubinger - UNIFEI

# Agradecimentos

Agradeço a Deus, por toda a motivação, força de vontade e persistência a mim concedidas.

Aos meus pais, por todo o amor e carinho que sempre me dedicaram, e por não medirem esforços para que eu chegasse até aqui.

Aos meus orientadores, profs. Dr. Rero Marques Rubinger e Adhimar Flávio Oliveira, por todo o apoio, por me ajudarem pacientemente durante todas as dificuldades que vivenciei durante a execução deste trabalho, e por todas as discussões que levaram ao meu engrandecimento como pesquisador.

Ao amigo Felipe, que foi fundamental para a execução da parte experimental deste trabalho, ao nos ajudar com a fabricação da plataforma de caracterização.

E por último, mas não menos importante, agradeço à Talita por todo o amor, paciência e carinho que sempre dedicou a mim.

*"But still try, for who knows what is possible..."*  
*(Michael Faraday)*

# Resumo

O conhecimento de como os parâmetros elétricos de células solares são afetados pela temperatura e irradiância é de fundamental importância tanto para a avaliação de desempenho de plantas fotovoltaicas quanto para o desenvolvimento de novos dispositivos. Embora muitos trabalhos tenham sido publicados na literatura sobre esse assunto, discrepâncias significativas podem ser encontradas entre eles. Assim, com o objetivo de esclarecê-las, os impactos da temperatura e irradiância em sete células solares de silício policristalino foram estudados através de um minucioso estudo experimental no intervalo  $600 - 1000 \text{ W/m}^2$  e  $25 - 55^\circ\text{C}$ , com a utilização de uma plataforma de caracterização de células solares equipada com controle de temperatura e mesa de vácuo, desenvolvida durante este trabalho, e posterior extração dos parâmetros do modelo de diodo único modificado através do emprego de um processo de otimização global por meio do algoritmo de Evolução Diferencial, resultando em baixos erros entre as curvas I-V experimentais e simuladas. Os resultados indicaram que os efeitos de temperatura são muito mais intensos para todos os parâmetros do modelo de diodo simples modificado, exceto para a fotocorrente. A resistência em série exibiu um decaimento exponencial conforme a temperatura aumentou, permanecendo praticamente constante para diferentes valores de irradiância. A resistência *shunt* mostrou um decaimento linear com o aumento da temperatura, e permaneceu praticamente constante conforme a irradiância aumentou. Já a corrente de saturação reversa do diodo exibiu um crescimento exponencial com o aumento de temperatura, não exibindo alterações significativas para diferentes irradiâncias. O fator de idealidade do diodo permaneceu praticamente constante tanto para variações de temperatura quanto irradiância. A fotocorrente exibiu um crescimento linear conforme a temperatura e irradiância aumentaram, sendo muito mais intenso nesse último caso. Foi observado ainda que as incertezas e os erros associados a esse procedimento de caracterização e extração de parâmetros foram pequenas, de modo que essa metodologia produziu resultados que podem ser considerados representantes confiáveis do real comportamento de células solares de silício policristalino sob as condições de temperatura e irradiância estudadas.

**Palavras-chaves:** Células Solares, Parâmetros elétricos, influência de temperatura, Irradiância, Evolução Diferencial, Silício Policristalino.

# Abstract

The accurate knowledge of the solar cells parameters dependence on irradiance and temperature is of vital importance for the performance assessment of photovoltaic modules and development of new devices. Many works have been published so far to understand the aforementioned dependence, but significant discrepancies have been found. Therefore, in order to clarify these discrepancies, the temperature and irradiance impacts on seven polycrystalline silicon solar cells were studied through a minutious experimental characterization in the range  $600 - 1000 \text{ W/m}^2$  and  $25 - 55^\circ\text{C}$ , using a solar cell characterization platform equipped with vacuum chamber and temperature control, developed during this work, and posterior computational extraction of the single diode parameters using the Differential Evolution optimization technique, resulting in a very low fitting error between experimental and simulated I-V curves. The results indicated that the temperature effects are stronger for all the single diode parameters except for the photocurrent. Series resistance was found to be better described by an exponential decrease with increasing temperature, remaining almost constant as irradiance changed. Shunt resistance showed a linear decrease for increasing temperature, and remained almost constant for different irradiances. The diode saturation current exhibited an exponential increase for higher temperature values and remained almost unchanged for increasing irradiance. The diode ideality factor remained almost unchanged for both temperature and irradiance changes. The photocurrent showed a linear increase for both temperature and irradiance increase, but it was much more accentuated for the latter. Also, it was observed that the errors and uncertainties associated with the characterization procedure and parameter extraction were small, so that the employed methodology produced results that can be regarded as reliable representatives of the real behavior of polycrystalline silicon solar cells under the temperature and irradiance range studied.

**Keywords:** Solar cells, Solar Cells parameters, Temperature dependence, Irradiance, Differential Evolution, Polycrystalline silicon.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Princípio da superposição . . . . .	17
Figura 2 – Modelo de diodo único . . . . .	17
Figura 3 – Modelo de diodo único . . . . .	18
Figura 4 – Espectro AM1.5 . . . . .	19
Figura 5 – Modelo de diodo único modificado . . . . .	19
Figura 6 – Efeitos da variação de $R_s$ , $R_{sh}$ , $n$ , $I_0$ e $I_{ph}$ nas características I-V . . . . .	20
Figura 7 – Células solares utilizadas . . . . .	28
Figura 8 – Mesa de vácuo . . . . .	29
Figura 9 – Plataforma de caracterização - inferior . . . . .	29
Figura 10 – Plataforma de caracterização - contatos elétricos . . . . .	30
Figura 11 – Plataforma de caracterização - sensor de temperatura no interior . . . . .	30
Figura 12 – Elemento Peltier e contatos elétricos . . . . .	31
Figura 13 – Controladores de temperatura . . . . .	31
Figura 14 – Imagem em infravermelho da plataforma da mesa de vácuo . . . . .	32
Figura 15 – Multímetro Keithley 2100 . . . . .	32
Figura 16 – Pontas de prova de tungstênio . . . . .	33
Figura 17 – Pontas de prova na montagem . . . . .	33
Figura 18 – Plataforma de caracterização com célula solar, pontas de prova e pi- ranômetro . . . . .	34
Figura 19 – Simulador solar . . . . .	34
Figura 20 – Piranômetro Kipp & Zonen CM4 . . . . .	35
Figura 21 – Relação entre a potência da lâmpada e irradiância . . . . .	36
Figura 22 – Perfil do ajuste da potência do simulador solar . . . . .	36
Figura 23 – Espectrômetro StellarNet BlackComet UV-VIS-NIR . . . . .	37
Figura 24 – Espectros da lâmpada do simulador solar . . . . .	37
Figura 25 – Comparação entre o espectro padrão e o do simulador solar utilizado . . . . .	38
Figura 26 – Keithley 2635A . . . . .	38
Figura 27 – Esquema de conexão 4 fios . . . . .	39
Figura 28 – Variação do RMSE em função dos parâmetros de controle do algoritmo de Evolução Diferencial . . . . .	42
Figura 29 – Melhor ajuste entre os dados experimentais e estimados fornecido pelo processo de otimização . . . . .	43
Figura 30 – Pior ajuste entre os dados experimentais e estimados fornecido pelo processo de otimização . . . . .	44
Figura 31 – Efeitos da variação da temperatura nas características I-V . . . . .	45
Figura 32 – Efeitos da variação irradiância nas características I-V . . . . .	45

Figura 33 – Variação da corrente de curto-circuito em função da temperatura . . . .	46
Figura 34 – Variação da corrente de curto-circuito em função da irradiância . . . .	48
Figura 35 – Variação da tensão de circuito aberto com a temperatura . . . . .	49
Figura 36 – Variação da tensão de circuito aberto com a irradiância . . . . .	51
Figura 37 – Variação da potência máxima com a temperatura . . . . .	51
Figura 38 – Variação da potência máxima com a irradiância . . . . .	53
Figura 39 – Variação do fator de preenchimento com a temperatura . . . . .	54
Figura 40 – Variação do fator de preenchimento com a irradiância . . . . .	54
Figura 41 – Variação da eficiência elétrica com a temperatura . . . . .	55
Figura 42 – Variação da eficiência elétrica com a irradiância . . . . .	56
Figura 43 – Variação da fotocorrente com a temperatura . . . . .	58
Figura 44 – Variação do fator de idealidade com a temperatura . . . . .	59
Figura 45 – Variação da corrente de saturação reversa com a temperatura . . . . .	59
Figura 46 – Variação da resistência em série com a temperatura . . . . .	60
Figura 47 – Variação da resistência <i>shunt</i> com a temperatura . . . . .	60
Figura 48 – Variação da corrente de curto-circuito e fotocorrente com a temperatura	61
Figura 49 – Variação da fotocorrente com a irradiância . . . . .	61
Figura 50 – Variação do fator de idealidade com a irradiância . . . . .	62
Figura 51 – Variação da corrente de saturação reversa com a irradiância . . . . .	62
Figura 52 – Variação da resistência em série com a irradiância . . . . .	62
Figura 53 – Variação da resistência <i>shunt</i> com a irradiância . . . . .	63

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Dependências dos parâmetros do modelo de diodo único modificado com relação à temperatura e irradiância encontradas na revisão bibliográfica . . . . .	24
Tabela 2 – Parâmetros nominais das células solares fornecidos pelo fabricante . . . . .	27
Tabela 3 – Valores programados no simulador solar para variar a irradiância entre $600 \text{ W/m}^2$ e $1000 \text{ W/m}^2$ . . . . .	36
Tabela 4 – Intervalos de busca . . . . .	41
Tabela 5 – Incertezas médias com relação a variação de temperatura para a corrente de curto-circuito e MAPE para o ajuste linear . . . . .	46
Tabela 6 – Coeficientes de temperatura para a corrente de curto-circuito . . . . .	47
Tabela 7 – Incertezas médias com relação a variação de irradiância para a corrente de curto-circuito e MAPE para o ajuste linear . . . . .	48
Tabela 8 – Coeficiente de intensidade solar para as sete células estudadas . . . . .	48
Tabela 9 – Incertezas médias e MAPE do ajuste linear para a tensão de circuito aberto com relação à variação de temperatura . . . . .	49
Tabela 10 – Coeficientes de temperatura para a tensão de circuito aberto . . . . .	50
Tabela 11 – Incertezas médias e MAPE do ajuste da Eq. 4.6 para a tensão de circuito aberto com relação à variação de irradiância . . . . .	51
Tabela 12 – Coeficientes de temperatura para a potência máxima produzida . . . . .	52
Tabela 13 – Incertezas médias e MAPE do ajuste linear para a potência máxima com relação à variação de temperatura . . . . .	52
Tabela 14 – Incertezas médias e MAPE do ajuste para a potência máxima com relação à variação de irradiância . . . . .	53
Tabela 15 – Incertezas médias e MAPE do ajuste linear para o fator de preenchimento com relação à variação de temperatura . . . . .	54
Tabela 16 – Incertezas médias e MAPE do ajuste linear para o fator de preenchimento com relação à variação de irradiância . . . . .	55
Tabela 17 – Incertezas médias e MAPE do ajuste para a eficiência com relação à variação de temperatura . . . . .	56
Tabela 18 – Incertezas médias e MAPE do ajuste para a eficiência com relação à variação de irradiância . . . . .	56
Tabela 19 – Parâmetros elétricos básicos para as células solares medidas . . . . .	57
Tabela 20 – Incerteza média para os parâmetros do modelo de diodo único modificado para as sete células medidas . . . . .	58
Tabela 21 – MAPE para os ajustes entre os pontos reais e os estimados pelos modelos considerados . . . . .	58

Tabela 22 – Incertezas médias para os parâmetros do modelo de diodo único modificado com relação à variação de irradiância . . . . .	63
Tabela 23 – MAPE entre os valores reais e os estimados por um ajuste linear para os parâmetros do modelo de diodo único modificado . . . . .	63

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Células solares</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Extração de parâmetros de células solares</b>	<b>21</b>
2.2.1	Revisão de trabalhos anteriores	22
2.2.2	O método da evolução diferencial	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Procedimentos experimentais</b>	<b>27</b>
3.1.1	Amostras	27
3.1.2	Plataforma de caracterização	28
<b>3.2</b>	<b>Simulador solar</b>	<b>32</b>
<b>3.3</b>	<b>Obtenção das características I-V</b>	<b>38</b>
<b>3.4</b>	<b>Ajuste dos parâmetros do algoritmo de Evolução Diferencial</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>43</b>
<b>4.1</b>	<b>Resultados da extração de parâmetros pelo algoritmo de Evolução Diferencial</b>	<b>43</b>
<b>4.2</b>	<b>Dependência dos parâmetros elétricos com a temperatura e irradiância</b>	<b>44</b>
4.2.1	Parâmetros elétricos básicos	45
4.2.1.1	Efeitos da temperatura e irradiância nas características I-V	45
4.2.1.2	Corrente de curto-circuito	46
4.2.1.3	Tensão de circuito aberto	48
4.2.1.4	Ponto de máxima potência	50
4.2.1.5	Fator de preenchimento e eficiência	53
4.2.1.6	Eficiência	54
4.2.1.7	Performance das células testadas em condições nominais	56
<b>4.3</b>	<b>Parâmetros elétricos do modelo de diodo único modificado</b>	<b>57</b>
4.3.1	Dependência com relação à temperatura	57
4.3.2	Dependência com relação à irradiância	61
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>65</b>

**REFERÊNCIAS** . . . . . 66

# 1 Introdução

A energia solar fotovoltaica é uma das melhores opções para um futuro sustentável em termos de energia [1, 2], sendo o mercado mais promissor no âmbito de energias renováveis e uma das indústrias que mais crescem no mundo [3], com o aumento das instalações fotovoltaicas sendo acompanhado pela queda dos custos de células solares [4].

Em 2011, o custo total de um módulo fotovoltaico era estimado em USD 1,30/Watt; em 2014, USD 0,50/Watt, uma redução de aproximadamente 60% em apenas 3 anos [5]. Para ilustrar o rápido crescimento dessa indústria, foi observado que no período 2004-2015, a capacidade fotovoltaica mundial saltou de 3.7 GW para 225 GW, e apenas em 2015 um investimento total de USD 161 bilhões e adicionais 59 GW (acréscimo de 35% com relação à 2014) levou à uma capacidade acumulada de 256 GW [5].

Células e módulos fotovoltaicos são em geral especificados por sua potência de pico nominal [6], medida sob condições padrão de testes (do inglês *Standard Test Conditions* - *STC*), definidas de acordo com a norma internacional IEC 61215, que estabelece uma irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$  para aferição das características elétricas desses dispositivos.

Porém, essas condições dificilmente são atingidas em situações reais de operação, e módulos fotovoltaicos são geralmente expostos à intervalos de temperatura entre  $15^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$  [7], além de sofrerem com variações espectrais e de irradiância devido às condições atmosféricas [8]. Nesse contexto, é essencial a compreensão de como células solares se comportam sob as mais diversas condições de temperatura e luminosidade, tanto para a concepção de novos dispositivos como para o monitoramento de grandes instalações fotovoltaicas.

Sendo o silício policristalino o semicondutor mais utilizado para a produção de células solares, respondendo por mais de 90% do mercado [3], conhecer como células solares dessa tecnologia se comportam sob várias condições possui grande importância também de mercado. Assim, através da caracterização experimental de células solares comerciais de silício policristalino, no Laboratório de Sensores e Dispositivos (LSD) da Universidade Federal de Itajubá (Unifei) e posterior análise computacional, esse trabalho se propõe a contribuir com a produção científica dessa área, ao proporcionar uma análise robusta da variação de todos os parâmetros elétricos desses dispositivos sob diversas condições de temperatura e luminosidade, além de possibilitar o início de uma linha de pesquisa em células solares no âmbito do programa em pós-graduação em Física da Universidade Federal de Itajubá.

## 2 Revisão teórica

Nesse capítulo serão apresentados os fundamentos necessários para uma completa compreensão deste trabalho, bem com uma seção será dedicada inteiramente à revisar os trabalhos presentes na literatura acerca do comportamento de células solares de silício policristalino sob várias condições de temperatura e irradiância.

### 2.1 Células solares

Com o objetivo de estudar como a energia solar fotovoltaica tem sido abordada na literatura entre 1996 e 2006, [3] constatou entre 74 artigos analisados que as definições dos autores para esse tema tem em comum palavras como "eletricidade", "radiação solar", "geração direta", e "conversão", e concluiu que uma definição adequada para a energia solar fotovoltaica é: *eletricidade obtida diretamente à partir da conversão da energia solar*.

A conversão direta da energia solar em energia elétrica ocorre em dispositivos conhecidos como "células solares" que, em sua maioria, são semicondutores contendo uma junção p-n que, ao ser exposta à luz gera uma diferença de potencial, o efeito fotovoltaico, realizando a conversão de energia luminosa em elétrica. Descoberto em 1839 por Edmund Becquerel ao observar que ação da luz em um eletrodo de platina revestido por prata e imerso em uma solução eletrolítica produzia uma corrente elétrica [9], o efeito fotovoltaico se dá quando fótons com energia suficiente criam pares elétron-buraco que são então dirigidos para um circuito externo devido à ação de uma diferença de potencial presente na junção p-n. Sem essa assimetria, os portadores de carga logo se recombinariam, e não haveria fluxo de corrente [9].

Quando expostas à luz, células solares geram uma corrente elétrica  $I_{ph}$ , denominada fotocorrente, e quando submetidas à uma diferença de potencial, células solares possuem um comportamento de diodo, permitindo a passagem de uma corrente elétrica muito maior quando submetidas à diferenças de potencial positivas do que negativas, devido à assimetria proveniente da sua junção p-n. Essa corrente, conhecida como corrente de escuro, em analogia à corrente que flui em células solares na ausência de luz [9], flui no sentido oposto ao da fotocorrente, é dada pela equação 2.1, deduzida pela primeira vez por William Shockley [10]:

$$I_d = -I_0 \left( e^{qV/kT} - 1 \right) \quad (2.1)$$

onde  $I_0$  é uma constante, conhecida como corrente de saturação reversa do diodo,  $q$  é a carga do elétron ( $1.602\,176\,62 \times 10^{-19}$  C),  $V$  é a diferença de potencial à qual a célula solar é submetida,  $k$  é a constante de Boltzmann ( $1.380\,648\,52 \times 10^{-23}$  J K<sup>-1</sup>) e  $T$  é a



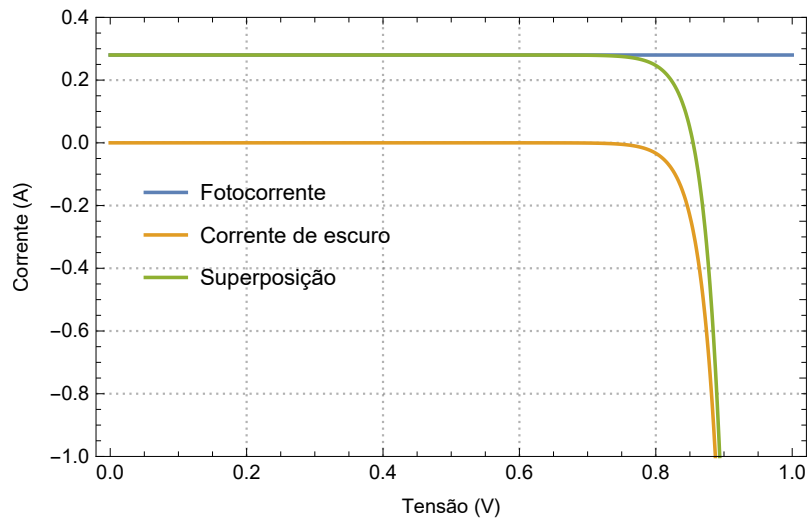


Figura 1 – Princípio da superposição

temperatura em Kelvin. Uma descrição mais completa e detalhada destes fenômenos não é do escopo deste trabalho, e podem ser encontradas em [9], [11] e [12].

A resposta corrente-tensão de uma célula solar, ou suas características I-V (ou curva I-V), pode ser aproximada pela superposição entre a fotocorrente e a corrente de escuro, em um processo conhecido como princípio da superposição [9], ilustrado na figura 1, cuja equação resultante é

$$I = I_{ph} + I_d = I_{ph} - I_0 \left( e^{qV/kT} - 1 \right) \quad (2.2)$$

A equação 2.2 é conhecida como o modelo ideal de células solares [13], ou modelo de diodo único ideal [14], cujo circuito equivalente é dado pela figura 2.

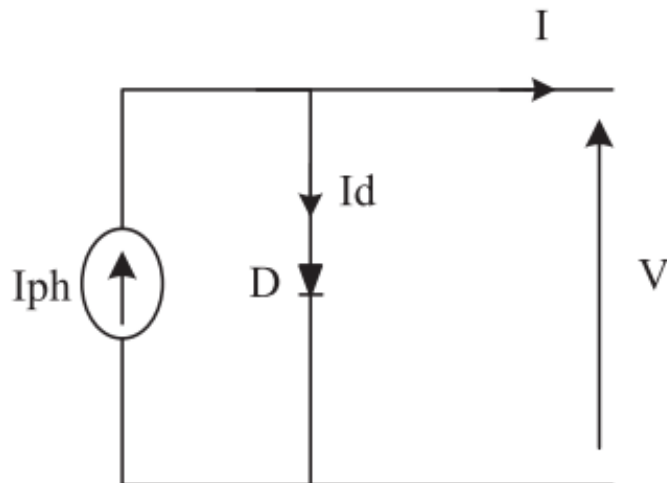


Figura 2 – Modelo ideal de células solares, ou de diodo único [14]

Na figura 3 são destacados os principais pontos das características I-V de uma célula solar: corrente de curto-circuito  $I_{sc}$  (corrente correspondente à tensão de 0 V) que pelo princípio da superposição pode ser aproximada como sendo a fotocorrente gerada [9], ponto de máxima potência  $P_{mpp}$  e tensão de circuito aberto  $V_{oc}$ .

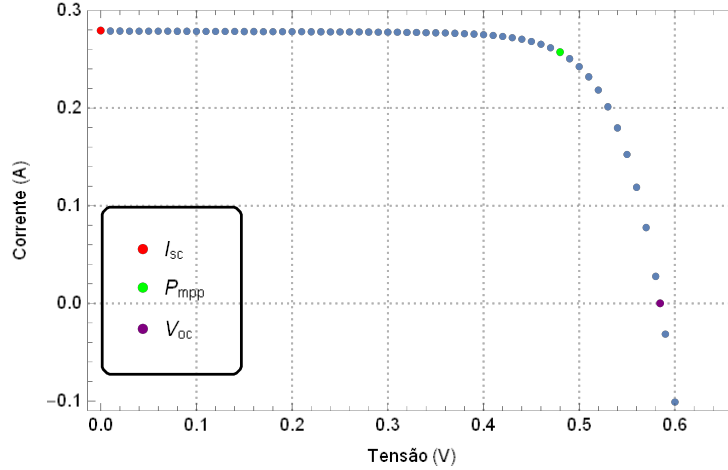


Figura 3 – Características I-V obtidas no LSD para uma das células solares medidas neste trabalho contendo os principais pontos de interesse

Aqui é importante ressaltar que a corrente de curto-circuito é diretamente proporcional ao fluxo de fótons absorvido pela célula solar. Considerando que a  $a(E)$  é a probabilidade de absorção de um fóton com energia  $E$ ,  $R(E)$  é a probabilidade da reflexão do fóton no dispositivo, e que  $\eta_e(E)$  é a probabilidade do elétron gerado ser coletado pelo circuito, a corrente de curto-circuito pode ser obtida por [9]

$$I_{sc} = qA \int_0^{\infty} \eta_e(E) (1 - R(E)) a(E) b_s(E) dE \quad (2.3)$$

onde  $A$  é a área da célula solar e  $b_s(E)$  é a densidade de fluxo espectral de fótons incidente. Portanto,  $I_{sc}$  é função também do espectro incidente na célula solar. Dessa forma, para definir as STC, um espectro padrão é necessário, e para isso é utilizado o espectro *Air Mass 1.5*, ou *AM1.5*, que corresponde ao espectro do Sol à uma elevação de  $42^\circ$ . Essa espessura atmosférica atenua o espectro solar para uma irradiância média em torno de  $900 \text{ W/m}^2$  na superfície terrestre, mas por conveniência o espectro padrão é definido como sendo o espectro padrão AM1.5 normalizado, correspondendo à uma irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  [9]. A figura 4 apresenta o espectro padrão AM1.5

No entanto, o modelo ideal descrito pela equação 2.2 não aborda as perdas ôhmicas e de fuga de corrente presentes em células solares reais, bem como representa o diodo como considerado um diodo ideal, o que não é o caso para dispositivos reais. Nesse contexto, é introduzido o modelo de diodo único modificado, ilustrado na figura 5 e cuja equação resultante é:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ e^{q(V+IR_s)/nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

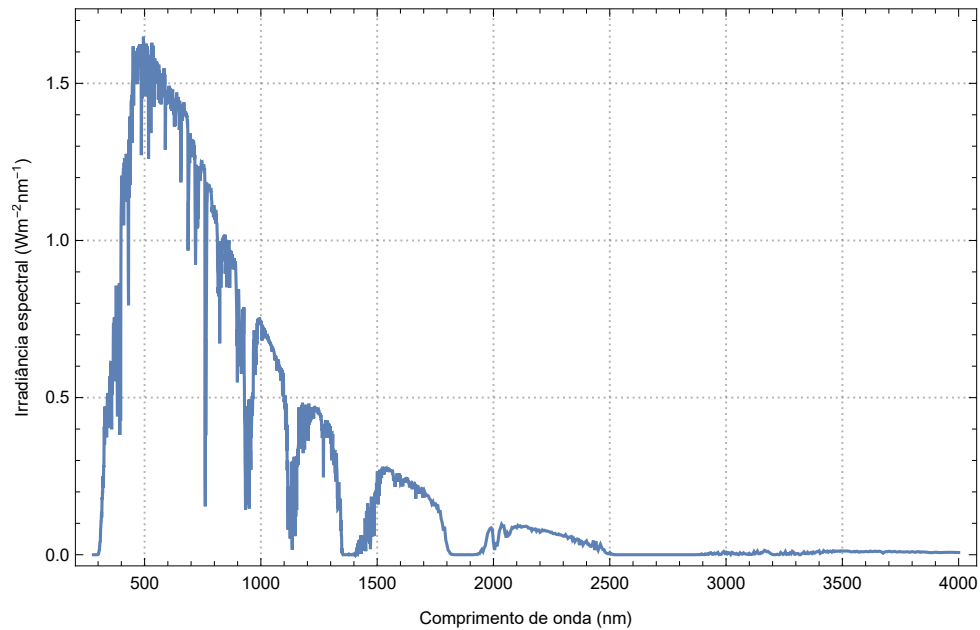


Figura 4 – Espectro padrão AM1.5

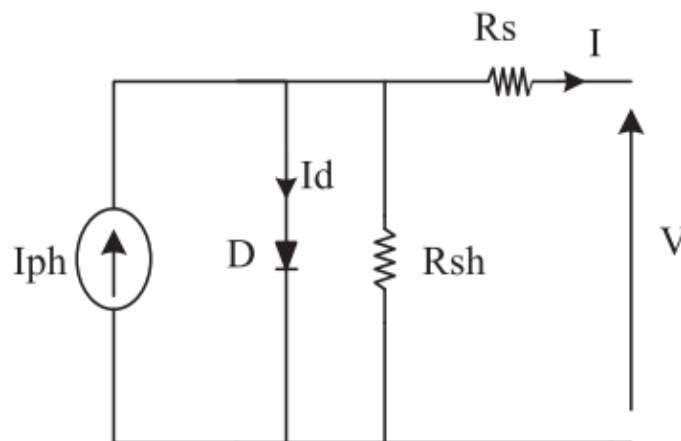


Figura 5 – Modelo de diodo único modificado [14]

Nesse modelo,  $n$  é o fator de idealidade do diodo, utilizado para representar as não-idealidades do diodo. Na teoria de Shockley,  $n = 1$ , mas em geral  $n > 1$  é mais apropriado, devido às imperfeições provenientes do processo de fabricação [15]. O fator de idealidade e a corrente de saturação reversa do diodo estão ligados aos mecanismos de recombinação nas regiões de carga espacial, superfície e *bulk* da célula solar [16], sendo a corrente de saturação reversa um indicativo da fuga ou recombinação de portadores minoritários através da junção p-n [15]. O parâmetro  $R_s$  é a resistência em série da célula solar, representando as perdas ôhmicas, sendo a soma das resistências de contato e das diversas camadas pelas quais fluem corrente [17].  $R_{sh}$  é a resistência *shunt*, e é um parâmetro utilizado para representar fugas de corrente através da junção p-n e das bordas da célula solar, devido às impurezas ou defeitos [15]. Os efeitos da variação desses cinco

parâmetros nas características I-V são mostrados na figura 6.

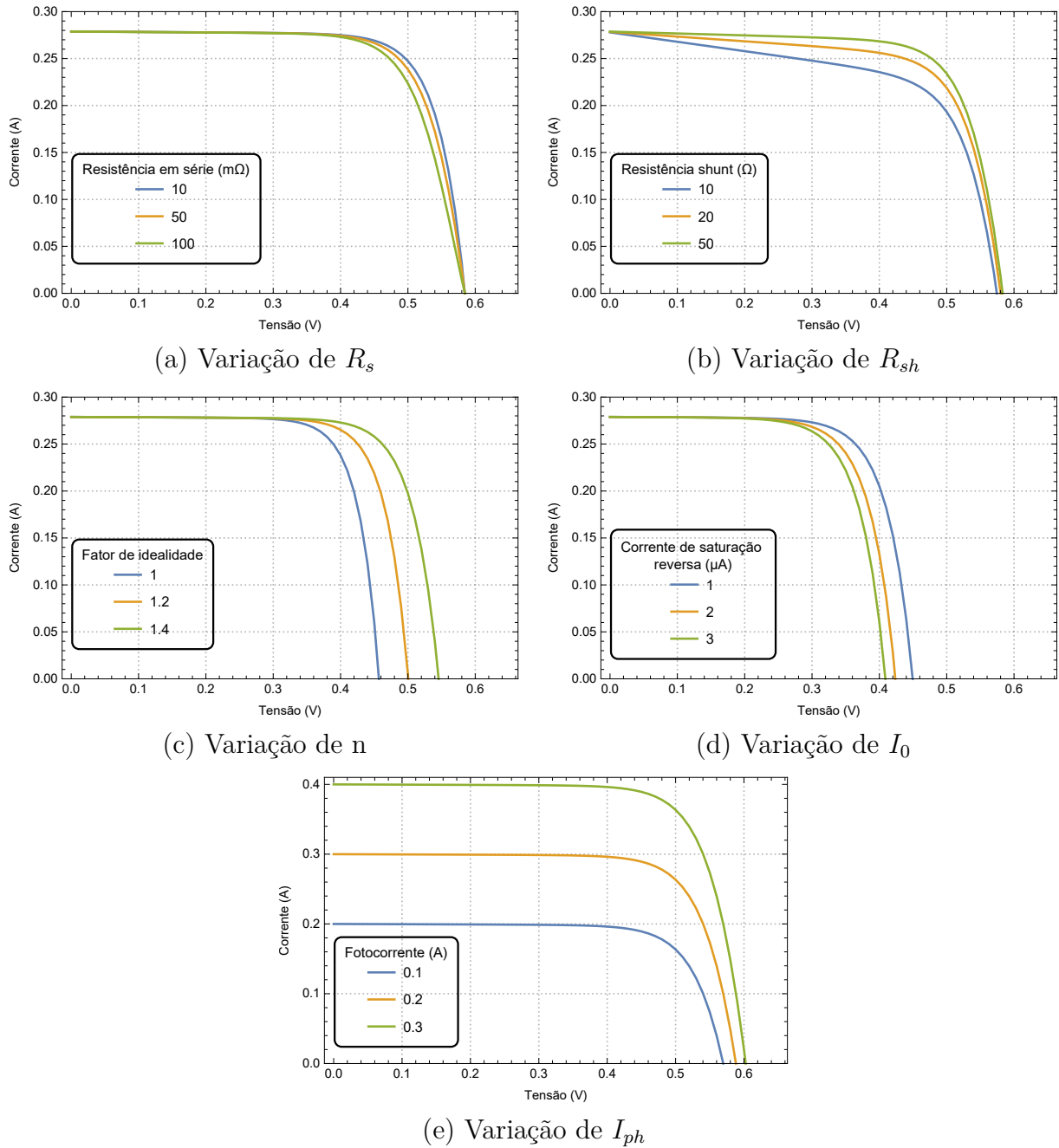


Figura 6 – Efeitos da variação de  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $n$ ,  $I_0$  e  $I_{ph}$  nas características I-V

Outros parâmetros indicadores da performance da célula solar são a eficiência  $\eta$ , e o *fill factor* FF, ou fator de preenchimento, que descreve a "quadratura" da curva I-V, e são definidos por:

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{P_{in}} = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \quad (2.5)$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.6)$$

onde  $I_m$  e  $V_m$  correspondem à corrente e tensão em ponto de potência máxima,  $P_{mpp}$  corresponde à potência máxima gerada e  $P_{in}$  à potência incidente na célula.  $I_{sc}$  é a corrente

de curto-circuito (corrente para a qual  $V = 0$ ) e  $V_{oc}$  a tensão de circuito aberto (tensão para a qual  $I = 0$ ) da célula solar. É possível ainda escrever a eficiência em termos do  $FF$  através da Equação 2.7:

$$\eta = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}} \quad (2.7)$$

Da figura 6, percebe-se que maiores valores para a resistência em série degradam a potência produzida pela célula solar, bem como menores valores de resistência paralela (*shunt*). Já mudanças no fator de idealidade e corrente de saturação reversa do diodo resultam em efeitos drásticos na tensão de circuito-aberto (tensão para a qual  $I = 0$ ), e mudanças na fotocorrente afetam drasticamente a corrente de curto-circuito (corrente para a qual  $V = 0$ ).

Existem ainda muitos outros modelos na literatura para descrever as características I-V de células solares, mas o modelo de diodo único modificado é o mais empregado, por oferecer um bom balanço entre simplicidade e precisão dos resultados obtidos [13, 18, 14, 19]. No entanto, nota-se que a equação 2.4 é não-linear e transcendental, o que torna muito complicado o problema de extrair os cinco parâmetros à partir de uma característica I-V, e para solucionar esse problema muitas metodologias tem sido propostas na literatura, sendo esse o assunto da próxima seção.

## 2.2 Extração de parâmetros de células solares

O problema da extração dos parâmetros elétricos dos modelos que descrevem a curva I-V de células solares pode ser classificado em três categorias principais, de acordo com a técnica empregada: analíticas, numéricas ou metaheurísticas [14, 13].

Técnicas analíticas requerem o conhecimento de vários pontos importantes da curva I-V, como os pontos de corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto e potência máxima, bem como derivadas das curvas nesses pontos para que, através da manipulação de equações, sejam fornecidas expressões fechadas para cada um dos parâmetros a serem extraídos. No entanto, essa abordagem depende fortemente das regiões selecionadas na curva I-V para a realização de ajustes e cálculos de derivadas e, considerando que esta é uma curva não-linear, uma escolha incorreta de pontos pode resultar em erros significativos [20, 21].

Métodos numéricos são baseados em certos algoritmos para realizar o ajuste de todos os pontos da curva I-V, como Newton-Rhaphson ou Levenberg-Marquardt e, por considerar a totalidade da curva, resultados melhores podem ser obtidos com essas técnicas. No entanto, essa abordagem depende muito do tipo de algoritmo escolhido para realizar o ajuste da curva ao modelo e dos valores iniciais dos parâmetros a serem extraídos, que dependem de condições ambientais [20].

Já técnicas de otimização global que fazem o uso de algoritmos metaheurísticos tem sido empregadas com sucesso na extração de parâmetros elétricos de células solares, proporcionando resultados melhores do que aqueles obtidos com técnicas analíticas e numéricas [22], devido à sua capacidade de busca global, por não requererem continuidade e diferenciabilidade de funções, e por serem muito efetivos independentemente das condições iniciais [20].

Entre os métodos metaheurísticos empregados na tarefa de extrair os parâmetros elétricos do modelo de diodo simples modificado, encontram-se os algoritmos evolutivos e, entre eles, o algoritmo de evolução diferencial (*Differential Evolution - DE*), que foi utilizado neste trabalho para realizar a extração dos parâmetros.

### 2.2.1 Revisão de trabalhos anteriores

Na literatura, um grande esforço de pesquisa tem sido feito para determinar como os parâmetros elétricos de células solares se comportam sob diferentes condições de temperatura e luminosidade [17, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 15, 16, 29, 30, 31, 32, 33, 7].

O trabalho em [17] estudou a dependência da resistência em série com relação à temperatura e irradiância utilizando curvas I-V obtidas na ausência e presença de luz, para o intervalo de temperatura entre  $-173-227^{\circ}\text{C}$ , e observou um crescimento da resistência em série com o aumento da temperatura e uma diminuição com o aumento da irradiância até dois sóis.

Já o trabalho em [23] investigou a dependência da resistência *shunt* com a temperatura, e encontrou tendências distintas para cada célula solar testada, atribuindo-as à diferenças no processo de fabricação. O trabalho [24] estudou a dependência dos cinco parâmetros do modelo de diodo único modificado para células solares de silício policristalino no intervalo  $160-1000\text{ W/m}^2$  e observou um crescimento linear para o fator de idealidade do diodo com o aumento da irradiância, uma resistência série praticamente constante e uma resistência *shunt* caindo linearmente com o aumento da irradiância.

O trabalho [25], empregando o método de [34] no intervalo  $15-60^{\circ}\text{C}$  e  $200-500\text{ W/m}^2$  para módulos fotovoltaicos de silício mono e policristalino, encontrou um decaimento linear para o fator de idealidade com o aumento de temperatura e irradiância, um decaimento linear para a resistência em série com o aumento da temperatura, e observou que a resistência *shunt* praticamente não variou com o aumento da irradiância. No trabalho [26] foi observado um decaimento linear para o fator de idealidade do diodo no intervalo  $10-50^{\circ}\text{C}$  para células solares de silício.

Em [27] uma expressão para a resistência em série em função da temperatura no intervalo  $20-70^{\circ}\text{C}$  para células solares de silício foi investigada, e um aumento exponencial desse parâmetro com a temperatura para uma irradiância de  $1000\text{ W/m}^2$  foi verificado.

Já [28], utilizando um método numérico, encontrou uma dependência crescente da resistência em série e decrescente da resistência *shunt* para valores crescentes da irradiância no intervalo 200–1000 W/m<sup>2</sup>.

Utilizando um método numérico, [15] estudou a dependência dos parâmetros do modelo de diodo único modificado no intervalo para uma célula solar de silício cristalino no 25–75 °C para uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, e encontrou que o fator de idealidade, a resistência *shunt* decrescem linearmente com o aumento de temperatura; que a corrente de saturação reversa do diodo cresce polinomialmente com a temperatura, e que a resistência em série cresce linearmente.

O trabalho [16] investigou os efeitos do aumento da irradiância no intervalo 150–1800 W/m<sup>2</sup> à temperatura de 25 °C para uma célula solar de silício, e encontrou que o fator de idealidade, a corrente de saturação reversa e a resistência em série caíram com o aumento da irradiância, enquanto a resistência *shunt* cresceu. Já [29], empregando um método analítico, estudou o comportamento dos parâmetros de diodo único modificado para uma célula solar de silício monocristalino no intervalo 10–18 W/cm<sup>2</sup> e 25–50 °C e observou que o fator de idealidade, resistência em série e *shunt* decaíram linearmente com o aumento da temperatura, e que a corrente de saturação reversa aumentou. No entanto, nesse estudo foi considerada a variação dos parâmetros extraídos com relação à diferentes métodos, e grandes discrepâncias foram encontradas.

Através de um método analítico, [30] estudou o comportamento dos parâmetros elétricos de células solares de silício cristalino sob condições de concentração de luz no intervalo 25–50 °C e, para uma dada iluminação, encontrou que para valores crescentes de temperatura, a resistência em série cai exponencialmente e a corrente de saturação reversa aumenta exponencialmente, e que a resistência *shunt* e o fator de idealidade caem linearmente.

O trabalho [31] encontrou uma queda acentuada da resistência em série com o aumento da irradiância no intervalo 100–1000 W/m<sup>2</sup>, e [32] estudou a dependência da resistência *shunt* com a irradiância para módulos fotovoltaicos de várias tecnologias no intervalo 75–1000 W/m<sup>2</sup> à uma temperatura fixa de 25 °C, e observou que uma dependência inversa desse parâmetro com o aumento da irradiância, utilizando o valor medido à condição STC de irradiância como referência, era mais apropriado. É importante notar que nesse estudo os módulos fotovoltaicos de silício apresentaram grande variabilidade para a resistência *shunt*, mesmo possuindo as mesmas características nominais de desempenho.

Utilizando um método analítico, [33] encontrou um decaimento linear para o fator de idealidade, resistência em série e *shunt* com o aumento da temperatura no intervalo 22–47 °C à uma irradiância fixa de 1000 W/m<sup>2</sup> para células solares de silício cristalino. E finalmente, [7] encontrou um aumento exponencial da corrente de saturação reversa com o crescimento da temperatura no intervalo 0–250 °C através de um método analítico, à

uma irradiância fixa de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Todos esses resultados anteriores estão sumarizados na tabela 1.

Em todos esses trabalhos anteriores, nenhum realizou o estudo da dependência dos parâmetros elétricos de células solares através de métodos metaheurísticos, talvez devido ao esforço computacional que esses métodos requerem, embora bons resultados possam ser obtidos. Deve-se notar também que na maioria desses trabalhos, poucas células (uma, em geral) foram utilizadas para extrair os parâmetros elétricos e estudar sua dependência com a temperatura e irradiância, e não há a discussão se a curva I-V simulada com os parâmetros extraídos se ajusta bem com a curva experimental.

É importante notar também que métodos distintos de extração de parâmetros podem gerar resultados diferentes [35], bem como diferentes tendências de comportamento, como apontou [36] em um estudo a respeito de como a temperatura influi na extração da resistência em série. Ainda, em um trabalho recente, [37] argumentou que vários conjuntos diferentes de parâmetros do modelo de diodo único modificado podem levar à curvas I-V idênticas ou muito próximas, o que faz a determinação dos parâmetros um tanto indefinida, e concluiu que os resultados anteriores obtidos na literatura foram talvez capazes de encontrar apenas uma entre as muitas soluções possíveis.

Tabela 1 – Dependências dos parâmetros do modelo de diodo único modificado com relação à temperatura e irradiância encontradas na revisão bibliográfica

Parâmetro	Aumento de temperatura	Aumento de irradiância	
$I_{ph}$	Sempre um aumento linear	Sempre um aumento linear	
$I_0$	Crescimento polinomial ([15])	Crescimento exponencial ([24]) Decrescimento ([16])	
	Crescimento exponencial ([30],[38])		
	Decrescimento ([16])		
	Crescimento ([29])		
n	Crescimento linear ([15],[30],[25],[33]), Decrescimento ([29],[26])	Crescimento linear ([24]) Linear decrease ([25]) Decrescimento ([16])	
	$R_s$	Crescimento linear ([15])	Invariante ([24]) Decrescimento ([16]) Crescimento linear ([28])
		Decrescimento linear ([25],[33])	
Crescimento ([17])			
Decrescimento ([29],[31])			
Decrescimento exponencial ([30]) Crescimento exponencial ([27])			
$R_{sh}$	Decrescimento linear ([15],[30],[25])	Decrescimento linear ([24],[25],[28]) Tendências distintas ([23]) Praticamente invariante ([25]) Decrescimento com o inverso da irradiância ([32])	



## 2.2.2 O método da evolução diferencial

Entre os métodos de otimização que fazem uso de algoritmos metaheurísticos para extrair os parâmetros de modelos de células solares, encontra-se o método conhecido como Evolução Diferencial (*Differential Evolution - DE*). Proposto por Storn e Price em 1997 [39], esse método possui três principais vantagens: capacidade de localizar o mínimo global independentemente das condições iniciais, convergência rápida e poucos parâmetros de controle por parte do usuário [40].

Como outros algoritmos de evolução, DE se baseia na geração inicial aleatória de  $N$  indivíduos candidatos à solução do problema, evoluindo-os por processos de seleção, mutação e recombinação ao longo de um número definido de iterações (gerações  $G$ ) [40], com o intuito de minimizar alguma função objetiva  $f$ , que geralmente corresponde ao erro entre os dados experimentais e os dados estimados por esse processo. Inicialmente, correspondendo à geração zero, um conjunto de  $N$  indivíduos é uniformemente inicializado de maneira aleatória dentro de um espaço de busca. Cada indivíduo é um vetor da forma:

$$X_i^G = X_{j,i}^G \quad (2.8)$$

sujeito aos limites  $[X_{j,min}, X_{j,max}]$  onde o índice  $j$  denota a componente do vetor ( $j = 1, \dots, 5$ ),  $i$  denota o  $i$ -ésimo indivíduo dentre os  $N$  inicialmente gerados ( $i = 1, \dots, N$ ) e o índice  $G$  denota a geração corrente do processo de evolução dos indivíduos ( $G = 0, \dots, G_{max}$ ).

Para cada geração, três vetores são aleatoriamente selecionados e uma perturbação conhecida como *mutação* é introduzida para formar um vetor *doador*:

$$D_i^G = X_1^G + F (X_2^G - X_3^G) \quad (2.9)$$

onde  $F \in [0, 2]$  é um parâmetro controlado pelo usuário, conhecido como fator de escala ou simplesmente fator de mutação. Um outro vetor, conhecido como *vetor alvo*, distinto dos vetores  $X_1, X_2$  e  $X_3$  é aleatoriamente selecionado e então o vetor doador e o vetor alvo são miscigenados de modo a ser criado um novo vetor teste  $U_i^G$ , em um processo conhecido como mutação:

$$U_{j,i}^G = \begin{cases} D_{j,i}^G & \text{se } \text{rand} \leq \text{CR} \\ X_{j,i}^G & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.10a)$$

$$(2.10b)$$

onde  $CR \in [0, 1]$  é conhecido como *taxa de recombinação*, ou simplesmente fator de mutação, e *rand* é uma variável gerada aleatoriamente com distribuição uniforme de probabilidade no intervalo  $[0, 1]$  para cada uma das componentes do vetor alvo. Em seguida, ocorre a seleção dos indivíduos para a próxima geração:

$$X_i^{G+1} = \begin{cases} U_i^G & \text{se } f(U_i^G) < f(X_i^G) \\ X_i^G & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.11a)$$

$$(2.11b)$$

Desse modo, se vetor teste proporciona um menor valor para a função objetiva, o vetor alvo da próxima geração é o vetor teste. Caso contrário, o vetor teste da próxima geração é igual ao da geração anterior. Assim, garante-se que ou a população mantém sua qualidade quanto ao valor da função objetiva, ou que sempre evolua para indivíduos melhores, ou seja, que fazem com que a função objetiva reduza de valor. Esse processo continua até que sejam atingidas as  $G$  gerações definidas pelo usuário no início do processo de otimização e, na última geração, extrai-se o indivíduo que proporciona um valor menor para a função objetiva.

No entanto, é importante notar que os parâmetros de controle, mutação e recombinação, possuem um profundo impacto no resultado do processo de otimização da função objetiva [41, 20], de modo que uma escolha ruim desses parâmetros pode fazer com que o processo de evolução fique preso em um mínimo local. Assim, é necessário realizar o ajuste desses parâmetros para garantir que soluções *quasi ótimas* sejam atingidas.

Uma das maneiras de se realizar esse ajuste é variando os parâmetros de controle em um intervalo definido e realizar as rotinas de otimização, de modo que, ao comparar os resultados obtidos para várias combinações de parâmetros, escolher como sendo a combinação mais adequada aquela que proporcionar o menor valor para a função objetiva ao final do processo de otimização, sendo essa a estratégia adotada nesse trabalho, cujos detalhes serão apresentados no próximo capítulo.

## 3 Metodologia

Neste capítulo serão apresentados os métodos experimentais e computacionais utilizados neste trabalho, bem como os equipamentos empregados.

### 3.1 Procedimentos experimentais

Com o objetivo de se compreender como os parâmetros elétricos de células solares de silício policristalino se comportam sob diferentes condições de temperatura e irradiância, sete células dessa tecnologia foram caracterizadas experimentalmente por meio da obtenção das características I-V para sete temperaturas diferentes, à partir de 25 °C até 50 °C com passo de 5 °C, e para cinco irradiâncias diferentes, de 600 W/m<sup>2</sup> até 1000 W/m<sup>2</sup> com passo de 100 W/m<sup>2</sup>.

#### 3.1.1 Amostras

Um lote de células solares de silício policristalino, de um mesmo fabricante, foi adquirido para servir como fonte de amostras, e desse lote sete células, exibidas na figura 7, serviram para a construção desse estudo. As características nominais dessas células são fornecidas pelo fabricante para as condições STC, e podem ser observadas na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros nominais das células solares fornecidos pelo fabricante

Parâmetro	Valor
Potência máxima (W)	0.167-0.172
Corrente de máxima potência (A)	0.320
Tensão de máxima potência (V)	0.512
Corrente de curto-circuito (A)	0.34
Tensão de circuito aberto (V)	0.564
Eficiência (%)	17.4
Dimensões (mm)	52 x 19 x 0.25

Na figura 7 é possível observar os contatos negativos, que correspondem às listras brancas, sendo a fita mais larga utilizada para soldar fitas metálicas para conectar as células em série e em paralelo para a montagem de painéis fotovoltaicos. A parte traseira das células corresponde ao terminal positivo.

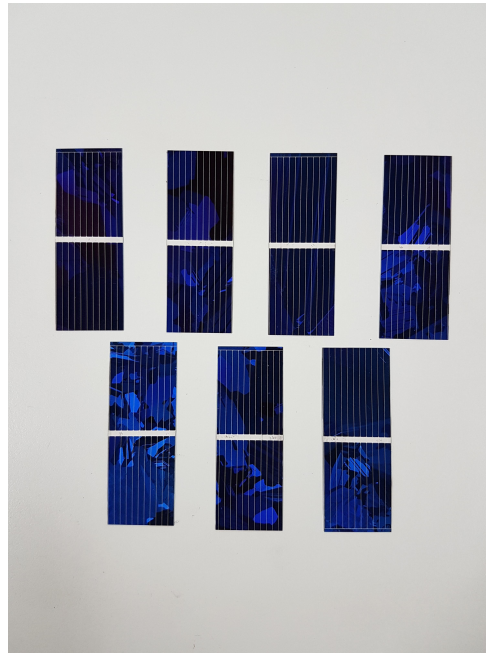


Figura 7 – Células solares utilizadas como amostras

### 3.1.2 Plataforma de caracterização

Inicialmente cada célula solar foi soldada à uma fita metálica para que pudesse ser estabelecida a conexão entre a célula e o instrumento de medida. No entanto, verificou-se que esse procedimento não era adequado, pois células solares sofrem com a degradação de potência e microfissuras produzidas pelo processo de soldagem [42, 43]. Ainda, como o procedimento de soldagem seria manual, não seria possível garantir condições idênticas para cada célula, uma vez que erros durante a soldagem são inerentes à esse processo. Ainda, a introdução de mais resistência em série através das soldas faria com que a extração desse parâmetro produzisse um valor que não seria confiável de ser interpretado como a resistência em série da célula solar.

Dessa forma, considerando que para estudar como células solares se comportam sob várias condições de temperatura e irradiância seria necessário realizar um controle preciso e eficaz da temperatura, e que os contatos elétricos entre a célula solar e o instrumento de medida deveriam ter a menor resistência elétrica possível, foi construída uma plataforma de caracterização elétrica de células solares, equipada com controle de temperatura e mesa de vácuo para realizar um contato elétrico de baixa resistência entre a superfície traseira da célula (terminal positivo) e o instrumento de medida.

Para medir a temperatura na plataforma de caracterização, inicialmente um termistor do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*) com precisão de  $\pm 0.3^\circ\text{C}$  foi posicionado no interior da plataforma. No entanto, verificou-se que existia um gradiente de temperatura de  $2^\circ\text{C}$  entre o NTC e a superfície da plataforma, onde se encontrava a

célula solar a ser caracterizada. Um segundo NTC foi então posicionado na superfície da plataforma, com contato térmico estabelecido por meio de pasta térmica. As figuras 8-11 exibem a plataforma de caracterização com os sensores de temperatura, mangueiras para vácuo e passagem de água, bloco de refrigeração, pelo qual circula água fria, e terminais para contato elétrico.

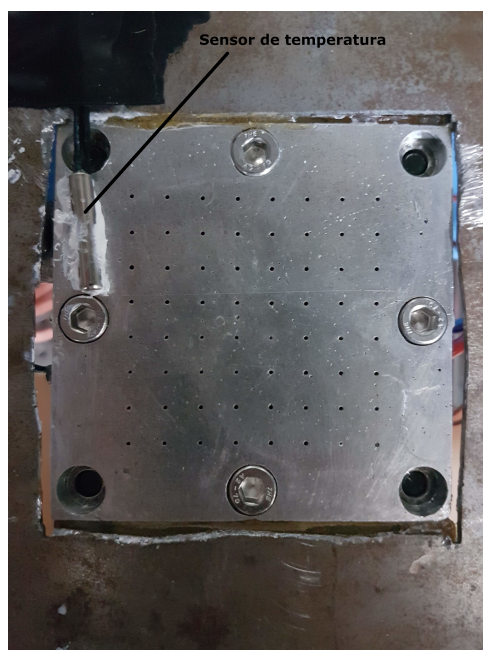


Figura 8 – Mesa de vácuo com sensor de temperatura do tipo NTC

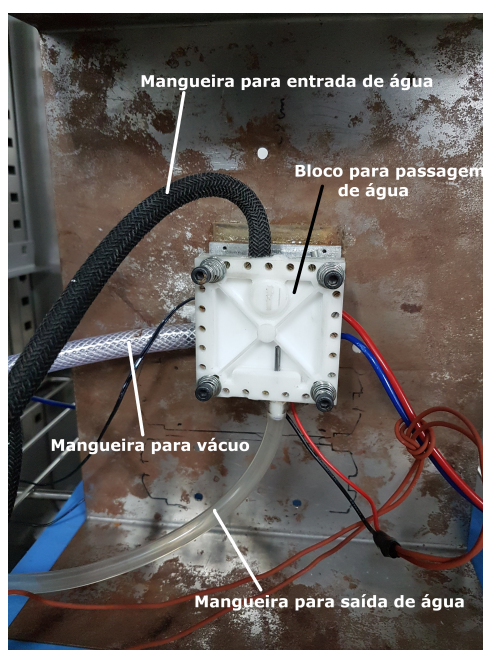


Figura 9 – Parte inferior da plataforma de caracterização, com sensor NTC e mangueiras para vácuo e refrigeração



Figura 10 – Plataforma de caracterização - contatos elétricos na mesa de vácuo

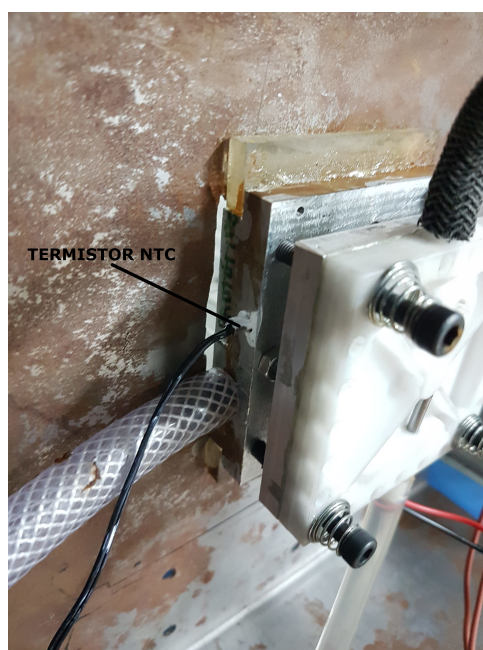


Figura 11 – Plataforma de caracterização - sensor de temperatura no interior

A variação da temperatura da célula durante as medidas se deu por meio de um elemento Peltier TEC1-12715, que foi conectado a um controlador de temperatura cujo sensor de temperatura era o NTC situado no interior da plataforma, e fixado entre a superfície inferior da mesa de vácuo e o bloco de refrigeração. Para melhorar o contato térmico do Peltier com a mesa de vácuo, foi utilizada pasta térmica. A figura 12 exibe o Peltier e os terminais de contato elétrico na superfície inferior da mesa de vácuo.

O segundo NTC, situado na superfície da mesa de vácuo, foi conectado a um outro

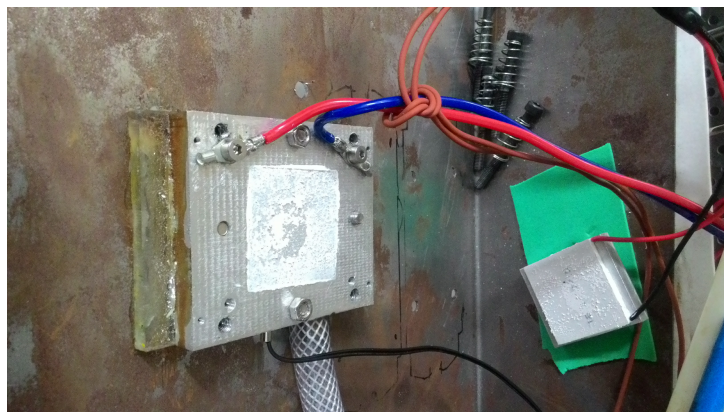


Figura 12 – Elemento Peltier e contatos elétricos na superfície inferior da mesa de vácuo controlador de temperatura para medir a temperatura da mesma, que foi considerada como sendo a temperatura da célula solar. Os controladores de temperatura podem ser observados na figura 13.

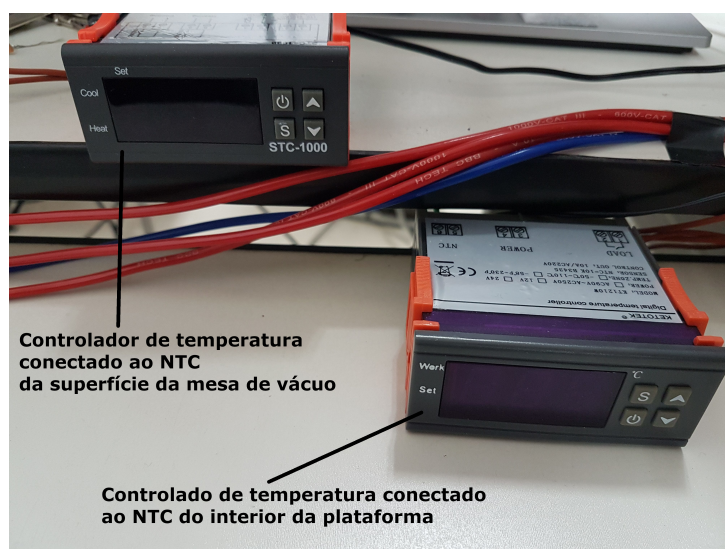


Figura 13 – Controladores de temperatura com resolução de  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  e precisão de  $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$

A consideração de que a temperatura medida pelo NTC da superfície da mesa de vácuo é a temperatura da própria célula solar foi possível pois a distribuição de temperatura na plataforma de caracterização foi medida com uma câmera de infravermelho FLIR AX Series. Para isso, a superfície da plataforma foi coberta com fita isolante de emissividade conhecida, pois a temperatura lida pela câmera depende da emissividade da superfície sendo medida. O resultado dessa medida pode ser visto na figura 14, onde é possível observar uma boa homogeneidade de temperatura entre os pontos medidos.

A resistência elétrica entre as superfícies superior e inferior da mesa de vácuo, onde foram soldados os terminais para contato elétrico, foi medida por um multímetro Keithley 2100 com  $6\frac{1}{2}$  dígitos, exibido na figura 15, com precisão de  $\pm(0.015\%+0.005\Omega)$  e resolução de  $100\ \mu\Omega$  para medidas entre 0 e  $100\Omega$ , através da técnica de medidas de quatro fios, na



Figura 14 – Imagem em infra-vermelho da superfície da mesa de vácuo

qual a queda de potencial devido à resistência dos fios é evitada, e resultou em um valor na ordem de erro do equipamento, sendo considerada portanto  $< 5 \text{ m}\Omega$ . Para os contatos na superfície frontal das células solares, foram utilizadas pontas de prova de tungstênio, exibidas na figura 16.

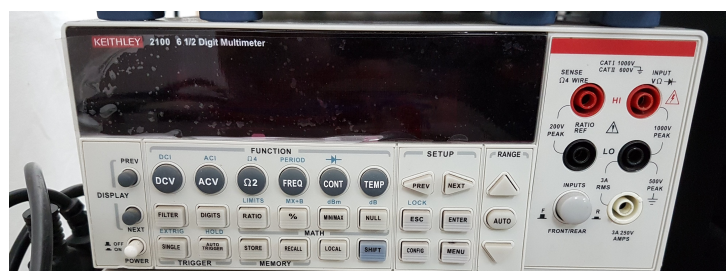


Figura 15 – Multímetro Keithley 2100

As pontas de prova foram então adaptadas às bases magnéticas que ficaram fixas sobre a chapa de aço na qual a plataforma de caracterização foi afixada, de modo a permitir um minucioso ajuste da pressão das pontas na superfície da célula solar. O contato entre as pontas e a superfície da célula foi monitorado por meio de um multímetro medindo a resistência entre as pontas de prova, de modo que quando as pontas tocavam a célula, este acusava uma resistência não-nula, indicando que o contato havia sido feito. O objetivo deste procedimento foi evitar que uma força excessiva fosse exercida sobre a célula durante o contato da ponta de prova.

## 3.2 Simulador solar

Para a variação da irradiância nas células solares medidas foi utilizado um simulador solar Zundar ZTHSO61L (figura 19), que dispõe de uma lâmpada de Xenon de 2500 W





Figura 16 – Pontas de prova de tungstênio fabricadas pela Accuprobe

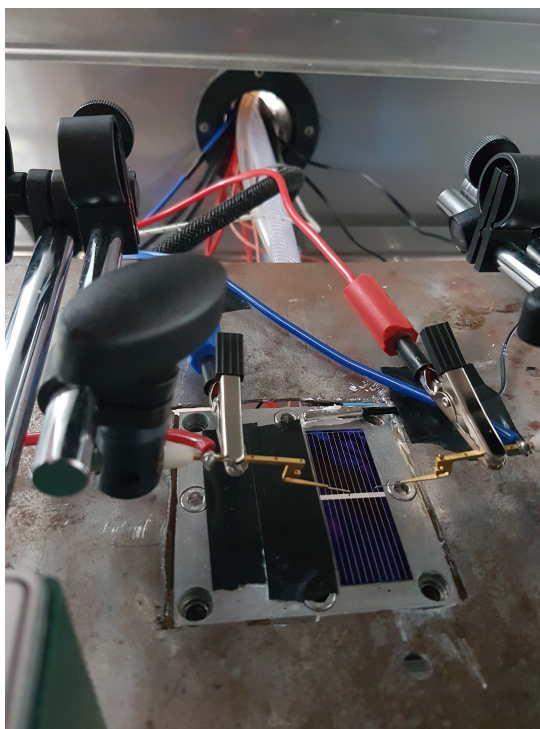


Figura 17 – Detalhes das pontas de prova sobre a célula solar. As duas garras jacaré foram conectadas a um multímetro para medida da resistência, como descrito no texto. A fita isolante foi utilizada para melhorar a pressão de vácuo.

e uma câmara com controle de temperatura.

O fabricante recomenda que a irradiância do simulador solar seja controlada por

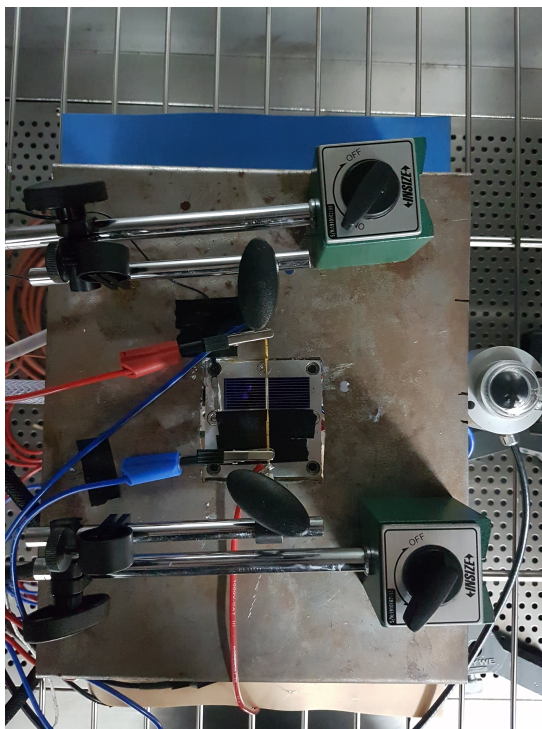


Figura 18 – Vista superior da plataforma de caracterização elétrica de células solares



Figura 19 – Simulador solar utilizado neste trabalho

meio da variação da potência da lâmpada ou através do painel de controle, para aumentar a vida útil e estabilizar a potência da lâmpada. Para a leitura da irradiância,

o simulador solar dispõe de um piranômetro Kipp & Zonen CM4, exibido na figura 20, com intervalo espectral de 300 nm à 2800 nm e sensibilidade de  $7 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ , cuja dependência com a temperatura é de 2% para o intervalo entre  $0^\circ\text{C}$  à  $100^\circ\text{C}$ . O piranômetro foi conectado a um outro multímetro Keithley 2100 (resolução de  $0.1 \mu\text{V}$  e precisão de  $\pm(0.0055\% + 0.004\text{mV})$  no *range* de 100 mV) que por sua vez foi conectado ao computador para aquisição automatizada dos valores de irradiância. Assim, uma diferença de potencial gerada pelo detector do piranômetro era lida pelo multímetro e dividida pela sensibilidade para fornecer o valor da irradiância em  $\text{W}/\text{m}^2$ .



Figura 20 – Piranômetro Kipp & Zonen CM4

A figura 18 mostra o piranômetro ao lado plataforma de caracterização. Como a irradiância medida depende da distância à fonte de luz, o detector do piranômetro foi posicionado na mesma altura da superfície da mesa de vácuo onde a célula a ser medida foi posicionada, como pode ser visto na figura 18.

Então, com o objetivo de se determinar a relação entre a potência da lâmpada, ajustada no simulador solar, e a irradiância lida pelo piranômetro, um gráfico Potência (%) x Irradiância foi gerado, sendo exibido na figura 21. Desse modo, foi possível obter qual a potência a ser inserida no painel de controle do simulador solar para que determinada irradiância chegasse à célula solar. Os valores programados de potência e a irradiância resultantes são exibidos na tabela 3.

Quando a potência desejada é programada no simulador solar, inicialmente a potência da lâmpada é ajustada em 100% da capacidade e depois cai para o valor desejado. A figura 22 exibe o perfil da irradiância medida pelo piranômetro enquanto o simulador solar ajusta a potência da lâmpada para a potência de 62%, correspondendo à  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$  no piranômetro.

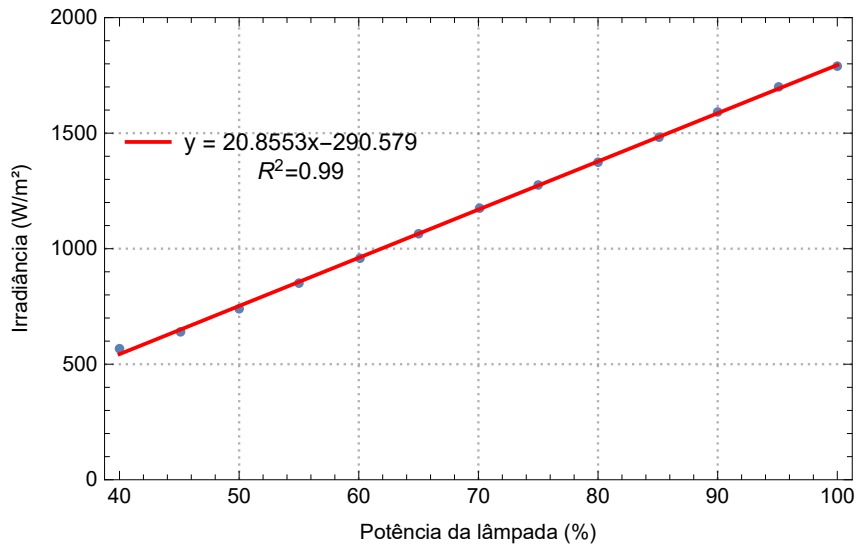


Figura 21 – Relação entre a potência da lâmpada programada no simulador solar e a irradiância lida pelo piranômetro

Tabela 3 – Valores programados no simulador solar para variar a irradiância entre 600 W/m² e 1000 W/m².

Potência da lâmpada (%)	Irradiância (W/m²)
42.7	600
47.5	700
52.3	800
57.0	900
62.0	1000

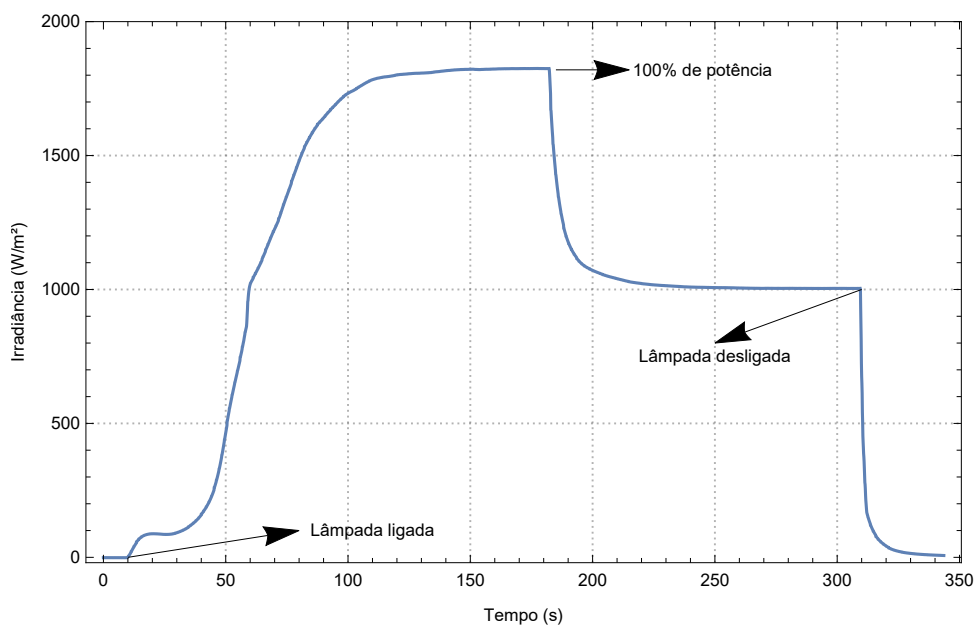


Figura 22 – Variação da irradiância lida pelo piranômetro enquanto o simulador solar ajusta a potência da lâmpada para o valor desejado

Com relação ao espectro da lâmpada utilizada, este foi obtido através de um espectrômetro StellarNet BlackComet UV-VIS-NIR, com intervalo cobrindo a faixa entre 200 nm e 1080 nm, exibido na Fig. 23. A Fig 24 exibe os espectros obtidos para as cinco irradiâncias lidas pelo piranômetro, exibidas na legenda do gráfico. Como pode ser visto na Fig. 25, para uma irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$ , o espectro da lâmpada do simulador solar é consideravelmente diferente do espectro padrão AM1.5.



Figura 23 – Espectrômetro StellarNet BlackComet UV-VIS-NIR

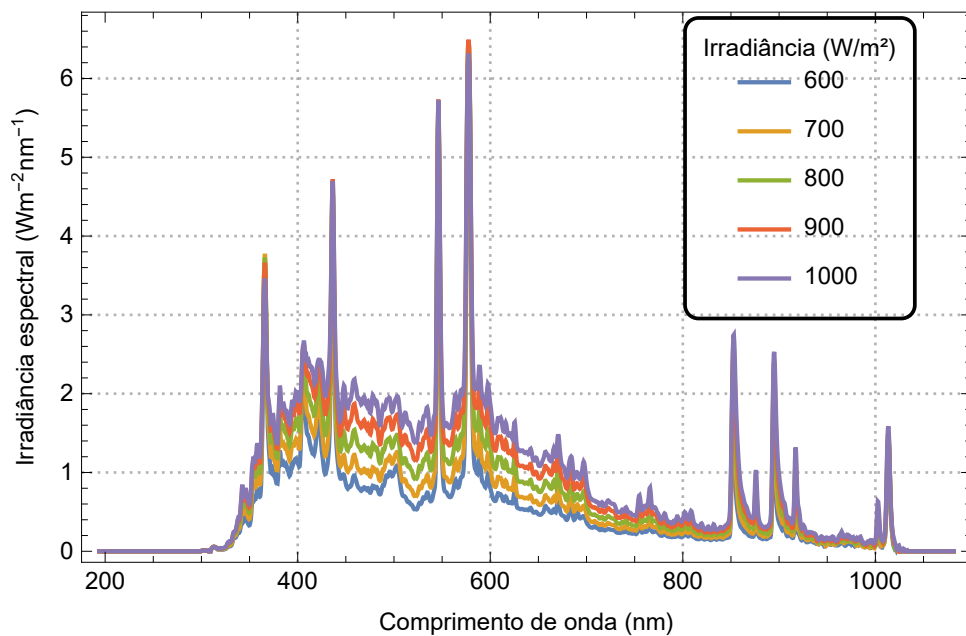


Figura 24 – Espectros da lâmpada do simulador solar para diferentes irradiâncias

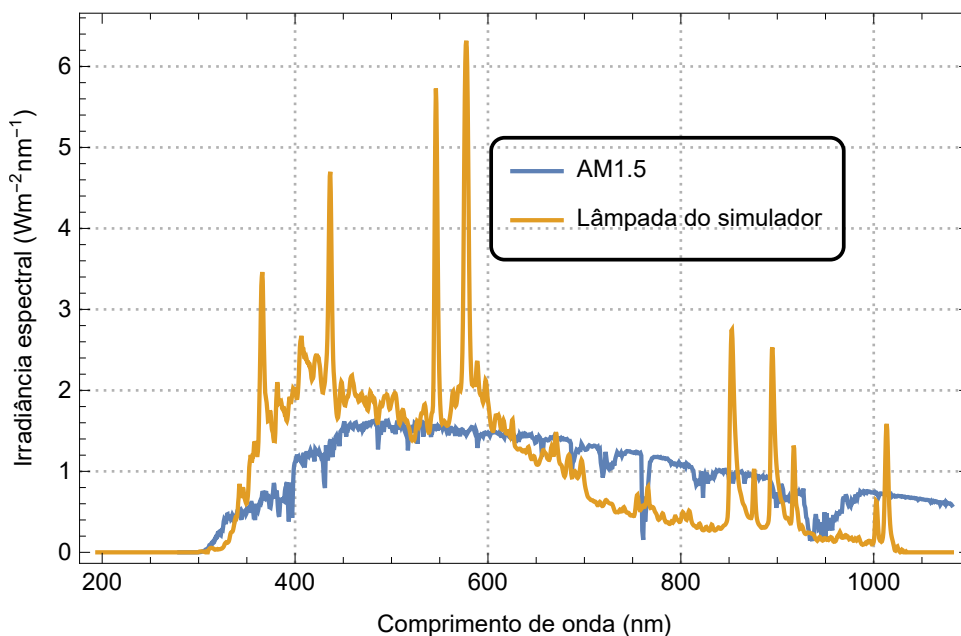


Figura 25 – Comparação entre o espectro padrão e o do simulador solar utilizado

### 3.3 Obtenção das características I-V

Após todo o aparato experimental ser devidamente montado, procedeu-se à obtenção das características I-V das sete amostras estudadas. Para isso, foi utilizada uma *Source Measuring Unit (SMU)* Keithley 2635A, exibida na figura 26, com precisão de  $\pm(0.03\% + 1.5 \text{ mA})$  para resolução de 5 dígitos no *range* de 1 A. O esquema de conexão entre a SMU e a célula solar é exibido na figura 27.



Figura 26 – SMU Keithley 2635A

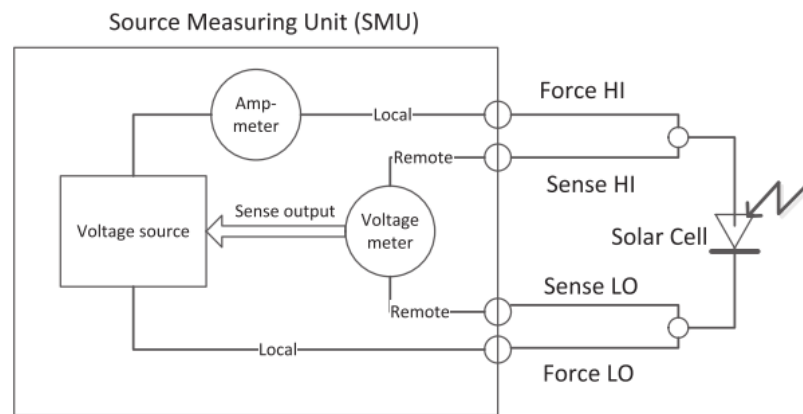


Figura 27 – Esquema de conexão entre a SMU e a célula solar [15]

Nesse esquema, uma das pontas na parte inferior atuou como *Force Hi* e a outra como *Sense Hi*, e na superfície frontal da célula, uma das pontas de prova atuou como *Sense LO* e a outra como *Force LO*. Caso fossem usadas apenas duas pontas de prova, tensão e corrente seriam medidos pelos mesmos fios, o que provocaria erros, pois a tensão programada na SMU não seria a mesma que chegaria na célula, pois haveriam quedas de tensão devido à resistência dos fios [15]. Com o esquema de 4 fios isso foi evitado, uma vez que os fios que medem a corrente produzida pela célula solar e os que medem a polarização da célula são diferentes, de modo que a SMU utiliza o retorno dos fios de *sense* para assegurar que a tensão programada chegue de fato à célula.

Cada célula solar foi então submetida à uma diferença de potencial entre 0 e 0.65 V, em passos de 0.01 V, e a corrente resultante foi medida. Para isso, foram desenvolvidos vários códigos baseados em LabView e em Python 3, e a versão final do código utilizado para realizar a aquisição das curvas I-V foi elaborada em Python 3 por meio do pacote PyVISA, que permite o controle de instrumentos de medida utilizando o padrão *VISA - Virtual Instrument Software Architecture*.

No entanto, foi observado que a velocidade com a qual a SMU realiza as medidas possuía uma grande influência na qualidade dos dados, uma vez que para velocidades maiores de medida o ruído nos dados experimentais era maior. A SMU utilizada possui um parâmetro de controle para a velocidade, que é função do tempo de integração, ou abertura de medida (período de tempo no qual o sinal é medido), que por sua vez é especificado em termos do número de ciclos da rede (*Number of power line cycles - NPLC*), onde 1 NPLC = 16.67 ms (1/60) para uma rede de 60 Hz, de acordo com o manual do equipamento. Ainda, a velocidade das medidas poderia ser variada entre 0.001 e 25 NPLC, sendo 1 NPLC a velocidade normal de medida da SMU.

No entanto, embora medidas mais lentas produziam dados de melhor qualidade, o tempo de medida era muito alto, ultrapassando em alguns casos 2 minutos para a obtenção

dos 65 pontos, o que acarretava um tempo total de medida muito alto para cada célula, uma vez que para cada célula solar sete condições diferentes de temperatura e cinco de irradiância eram aplicadas, o que era agravado pelo fato da lâmpada do simulador solar não permanecer ligada por tempo suficiente para esse tempo de medidas, devido à problemas de aquecimento.

Uma opção era reduzir o número de pontos experimentais, mas isso traria consequências futuras para o procedimento de modelagem, uma vez que menos pontos seriam usados para o ajuste do modelo. Dessa forma, um meio termo entre velocidade de medidas e nível de ruído foi encontrado ao fazer uso da função de filtro estático da SMU, onde cada ponto medido era a média aritmética de 100 pontos. Assim, diminuiu-se a velocidade para 0.05 NPLC e, em cada condição de temperatura e irradiância, 10 curvas I-V sequenciais foram obtidas, de modo que para cada condição de temperatura e irradiância, para cada célula medida, os parâmetros elétricos foram extraídos e então tomou-se a média. Dessa forma, assegurou-se que os dados obtidos possuíssem qualidade suficiente para serem analisados posteriormente.

Após todos os cuidados anteriores terem sido tomados, as sete células solares foram submetidas ao processo de obtenção das curvas I-V. Cada célula foi posicionada na superfície da mesa de vácuo e a potência do simulador solar foi ajustada de acordo com a tabela 3 para que a irradiância medida fosse de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Então, a temperatura foi ajustada no controlador conectado ao NTC do interior da plataforma para que a temperatura do NTC na superfície da mesa de vácuo indicasse  $25^\circ\text{C}$ .

A irradiância foi monitorada durante todo o processo de medida, e quando foi considerada estável em  $1000 \text{ W/m}^2$ , a extração das curvas I-V foi realizada. Então a temperatura era ajustada para o valor seguinte, e assim sucessivamente. Como segunda etapa do procedimento de medida, a temperatura da célula foi fixada em  $25^\circ\text{C}$  e a irradiância varrida entre  $600 \text{ W/m}^2$  e  $1000 \text{ W/m}^2$ . Para todas as células solares medidas, a variação da temperatura durante as medidas foi sempre menor que  $0.5^\circ\text{C}$ , e a instabilidade da irradiância sempre se situou entre 0.04 e 0.31%.

### 3.4 Ajuste dos parâmetros do algoritmo de Evolução Diferencial

Como mencionado no capítulo de revisão teórica, os parâmetros de controle do algoritmo de Evolução Diferencial possuem grande influência no resultado final do processo de otimização. Desse modo, deve-se encontrar a melhor combinação dos parâmetros de mutação e recombinação de modo que uma solução *quasi* ótima seja encontrada, ou seja, que o erro da função objetiva a ser minimizado seja mínimo.

A função objetiva empregada neste trabalho para minimização por meio do algoritmo de Evolução Diferencial foi a raiz do erro quadrático médio (*Root Mean Square*



*Error -RMSE*), que é a função objetiva mais empregada na literatura para avaliar processos de otimização que empregam algoritmos metaheurísticos [13]. O RMSE é definido por

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_{i,exp} - I_{i,est})^2}{N}} \quad (3.1)$$

onde  $I_{i,exp}$  é o  $i$ -ésimo ponto experimental de corrente e  $I_{i,est}$  é o  $i$ -ésimo ponto de corrente a ser estimado pelo algoritmo de otimização, sendo função dos cinco parâmetros do modelo de diodo único melhorado, e  $N$  é o número de pontos obtidos experimentalmente. O intervalo de busca para os cinco parâmetros do modelo de diodo único modificado é exibido na Tabela 4.

Tabela 4 – Intervalos de busca

	$I_{ph}(A)$	$I_0(A)$	$n$	$R_s(\Omega)$	$R_{sh}(\Omega)$
Irradiância fixa em $1000 \text{ W/m}^2$					
Min	0.2	$10^{-12}$	1	0.001	1
Max	0.3	$10^{-1}$	2	0.1	1000
Temperatura fixa em $25 \text{ }^\circ\text{C}$					
Min	0.1	$10^{-12}$	1	0.001	1
Max	0.3	$10^{-1}$	2	0.1	1000

Antes do processo de otimização ser iniciado, foi observado que seria necessário reduzir ligeiramente o número de pontos na curva I-V, pois durante a extração das curvas I-V a SMU foi configurada para uma corrente limite de 1 A, para evitar que a célula solar sofresse danos por sobrecorrente. Assim, quando esse valor de corrente era atingido, a SMU entrava em modo de corrente constante, de modo que a partir da tensão que proporcionava uma corrente de 1 A, os valores lidos de corrente não correspondiam aos valores reais produzidos pela célula solar. Assim, para todas as curvas I-V, foram considerados pontos apenas entre  $-0.1 \text{ A}$  e  $0.3 \text{ A}$ , pois constatou-se que essa região era livre de erros desse tipo e apresentava pontos suficientes da curva I-V para que fossem submetidas aos processos de otimização.

Para cada curva I-V obtida, os parâmetros mutação e recombinação foram variados de 0 à 1 em passos de 0.1 unidades, de modo que para cada valor de mutação, 10 valores de recombinação foram utilizados. Dessa forma foram realizadas 100 rotinas de otimização para cada curva I-V, e o valor mínimo do RMSE dentre as 100 rotinas foi considerado como sendo a melhor solução, de modo que os parâmetros obtidos para esse RMSE mínimo foram considerados os parâmetros que melhor descrevem a curva I-V em questão. O comportamento do RMSE com relação à mutação e recombinação para uma das curvas obtidas pode ser observado na Figura 28.

Considerando que dez curvas I-V foram obtidas para cinco condições diferentes de irradiância e sete de temperatura, que para cada curva 100 rotinas de otimização foram

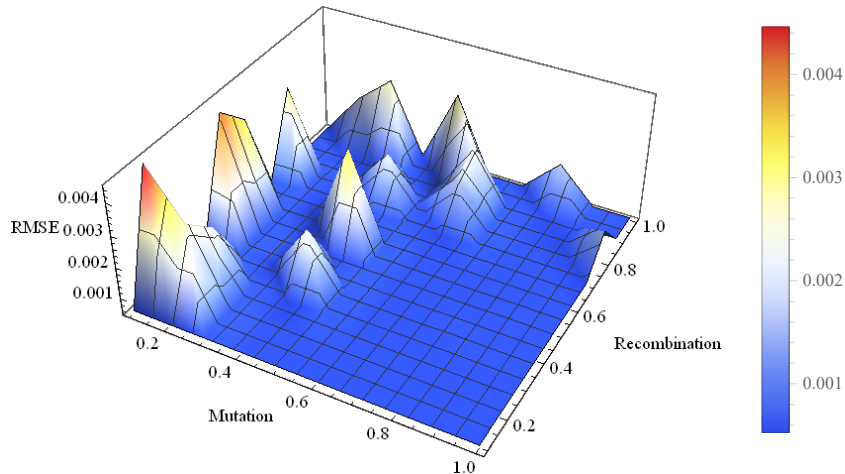


Figura 28 – Variação do RMSE em função dos parâmetros de controle do algoritmo de Evolução Diferencial. É possível perceber uma alta variabilidade no RMSE para determinadas combinações de parâmetros.

realizadas, e que sete células foram medidas, foram realizados ao todo 84000 processos de otimização. Devido ao alto poder computacional necessário para realizar todas essas rotinas em um tempo não muito alto, foi necessário utilizar o Cluster Giskard da Unifei, equipado com 40 processadores de 2.20 GHz e 94.57 GB de memória RAM. Para a implementação e execução dos códigos, foi utilizado o software *Mathematica*, onde foi necessário empregar funções de computação paralela para otimizar o tempo de processamento.

Então, considerando que para cada condição de temperatura e irradiância 10 curvas I-V foram obtidas, 10 conjuntos de parâmetros do modelo de diodo único modificado foram obtidos para cada condição, e a média para cada um dos parâmetros foi tomada, de modo a se obter apenas um valor para cada um dos parâmetros à cada condição de temperatura e irradiância.

## 4 Resultados e discussões

Nesta seção serão apresentados os resultados provenientes da análise das curvas I-V para as sete células solares estudadas.

### 4.1 Resultados da extração de parâmetros pelo algoritmo de Evolução Diferencial

Após todos os 84000 processos de otimização terem sido efetuados e os melhores valores para o RMSE terem sido encontrados para cada curva, foi encontrado que o menor valor entre os melhores RMSE foi de  $1.4 \times 10^{-4}$  e o maior,  $6.3 \times 10^{-4}$ . As Figuras 29 e 30 exibem o melhor e pior ajuste, dados por esses valores do RMSE. Considerando que mesmo para o pior ajuste o RMSE ainda foi pequeno, de modo que a curva ajustada representa muito bem a curva experimental, concluiu-se que todas as curvas foram muito bem ajustadas pelo processo de otimização, devido ao ajuste fino realizado na escolha dos parâmetros de controle, de modo que os parâmetros extraídos com o método de Evolução Diferencial representam muito bem a curva experimental.

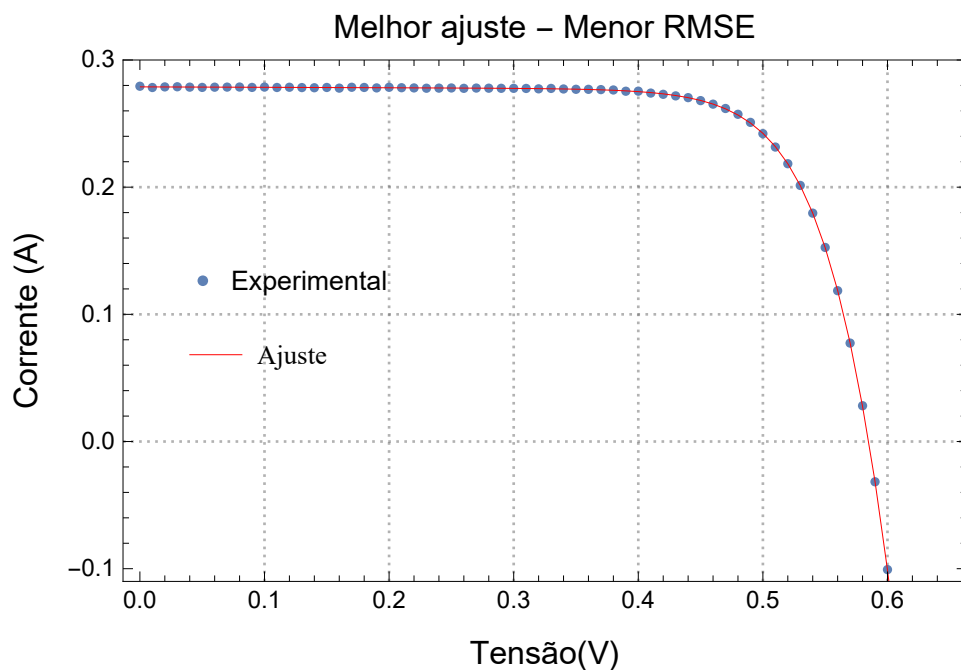


Figura 29 – Melhor ajuste entre os dados experimentais e estimados fornecido pelo processo de otimização

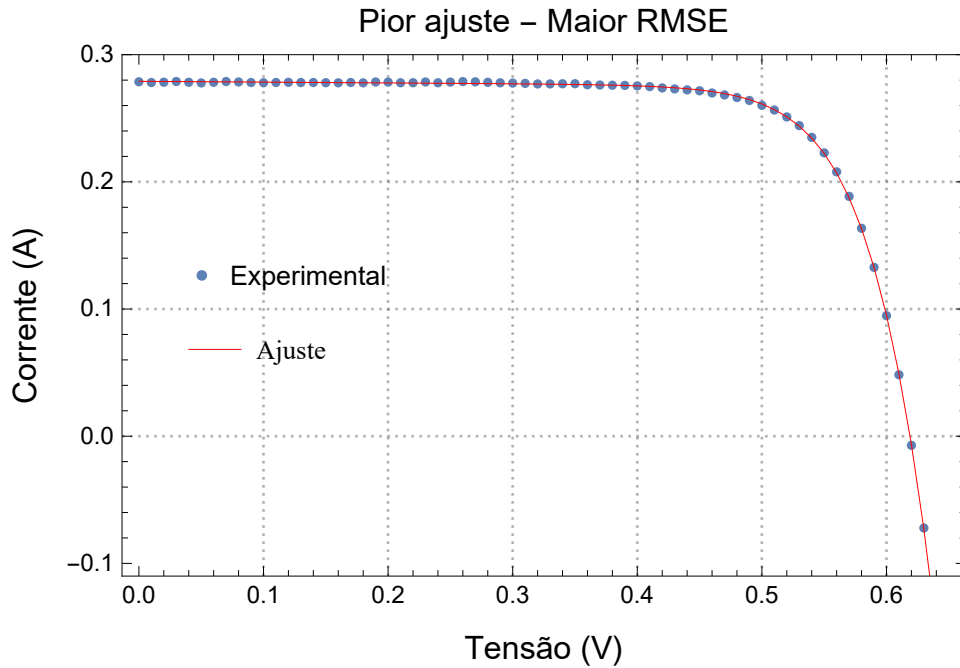


Figura 30 – Pior ajuste entre os dados experimentais e estimados fornecido pelo processo de otimização

## 4.2 Dependência dos parâmetros elétricos com a temperatura e irradiância

Nesta seção serão discutidos os efeitos provocados pela variação da temperatura e irradiância nas células solares estudadas. Os parâmetros elétricos serão divididos em dois tipos: os básicos, que são aqueles possíveis de serem obtidos diretamente dos pontos das curvas I-V, e os parâmetros do modelo de diodo simples modificado, que foram extraídos pelo método de otimização global. Entre os parâmetros básicos encontram-se a corrente de curto-circuito  $I_{sc}$ , a tensão de circuito aberto  $V_{oc}$ , o ponto de máxima potência  $P_{mpp}$ , a eficiência  $\eta$  e o fator de preenchimento, ou *fill factor*, FF.

Serão ainda realizados ajustes de alguns modelos aos pontos experimentais, como forma de contribuir para a tentativa de esclarecimento das discrepâncias observadas na tabela 1. Como serão comparados ajustes lineares e não-lineares e os parâmetros possuem escalas muito discrepantes, há que se utilizar uma medida de erro adequada. Assim, será utilizado o Erro Percentual Absoluto Médio *Mean Absolute Percentage Error - MAPE*, que é independente de escala e possui uma interpretação simples [44], sendo definido por

$$MAPE(\%) = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_{i,exp} - P_{i,est}}{P_{i,exp}} \right| \quad (4.1)$$

onde  $P$  é o parâmetro em consideração,  $P_{i,exp}$  representa o  $i$ -ésimo ponto experimental,  $P_{i,est}$  representa o  $i$ -ésimo ponto estimado e  $N$  é o número de pontos considerados.

## 4.2.1 Parâmetros elétricos básicos

### 4.2.1.1 Efeitos da temperatura e irradiância nas características I-V

As Figuras 31 e 32 representam curvas I-V obtidas para a célula n° 1 para diferentes condições. Nota-se que o aumento da temperatura provoca principalmente uma redução na tensão de circuito aberto, enquanto maiores valores de irradiância afetam principalmente a corrente de curto-circuito.

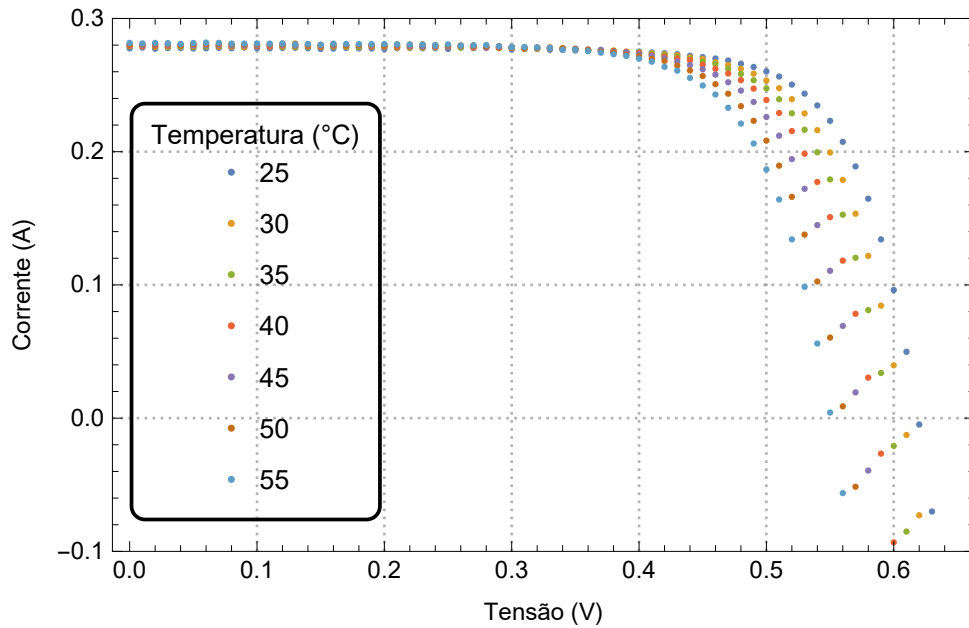


Figura 31 – Efeitos variação da temperatura nas características I-V para a célula n° 1

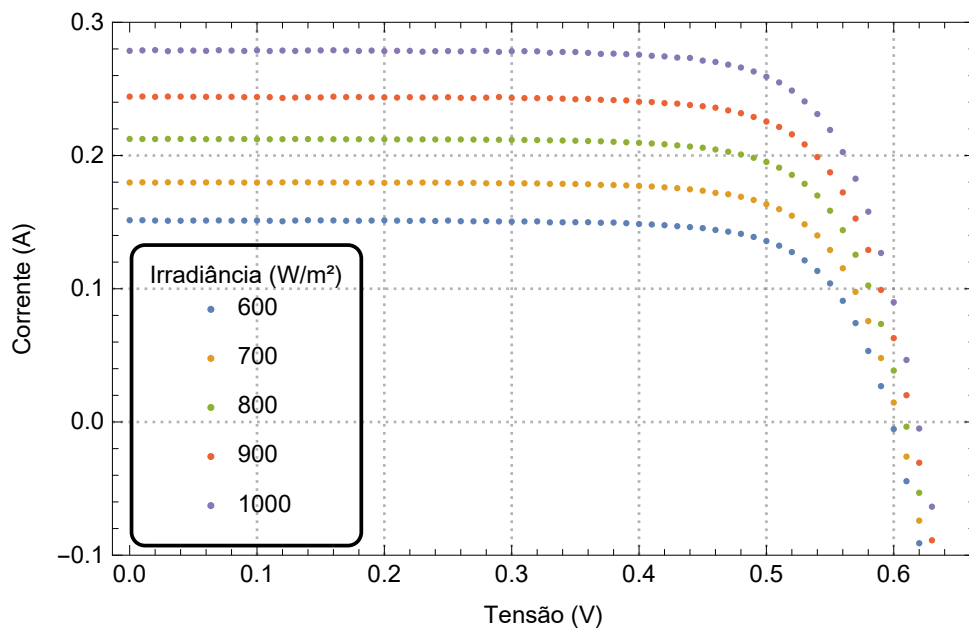


Figura 32 – Efeitos da variação da irradiância nas características I-V para a célula n° 1

## 4.2.1.2 Corrente de curto-circuito

A Figura 33 apresenta a dependência da corrente de curto circuito em função da temperatura, para cada célula solar estudada, onde cada ponto é a média de 10 medidas, e as linhas apresentam o melhor ajuste linear para os dados experimentais. Nota-se que a corrente de curto-circuito possui um crescimento linear com o aumento da temperatura, como pode ser observado pela qualidade dos ajustes através do baixíssimo MAPE obtido na Tabela 5. Como para a maioria dos semicondutores o *bandgap* decresce com a temperatura, a corrente de curto-circuito aumenta, pois com um menor *bandgap* mais portadores podem ser foto gerados [45].

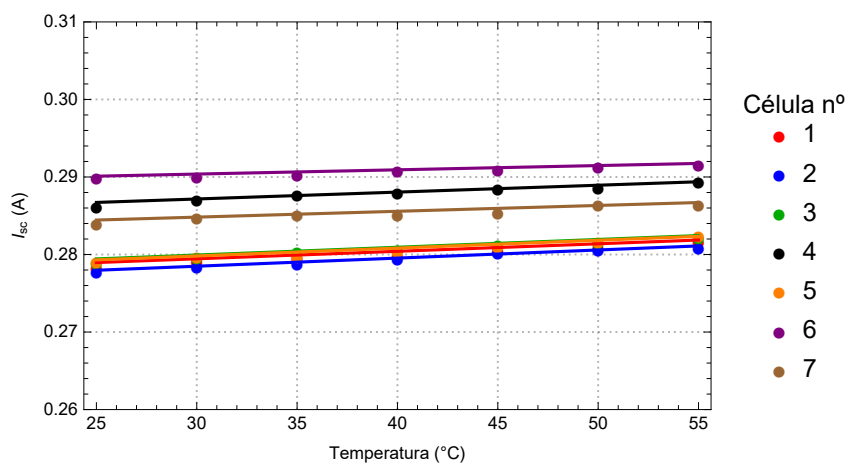


Figura 33 – Variação da corrente de curto-circuito em função da temperatura para as sete células estudadas

A tabela 5 exibe ainda as incertezas médias para cada célula solar, onde a incerteza para cada valor de temperatura foi calculada de acordo com a bem conhecida fórmula  $\sigma/\sqrt{N}$ , onde  $\sigma$  é o desvio padrão e  $N = 10$ . Cada valor de incerteza é a média das incertezas para as sete temperaturas consideradas.

Tabela 5 – Incertezas médias com relação a variação de temperatura para a corrente de curto-circuito e MAPE para o ajuste linear

Célula	Incerteza Média ( $\times 10^{-5}$ A)	MAPE ( $\times 10^{-2}$ %)
1	5.6	3.8
2	6.0	3.8
3	5.3	2.8
4	5.3	5.2
5	6.9	6.1
6	5.0	2.3
7	5.7	7.1

Os coeficientes de temperatura (*Temperature Coefficient - TC*) para a corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e potência máxima são definidos de acordo com

a norma internacional IEC 60891, e são indicados pelas letras gregas  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\delta$ , respectivamente. Para a corrente de curto-circuito:

$$\alpha(\text{A } ^\circ\text{C}^{-1}) = \frac{dI_{sc}}{dT} \quad (4.2)$$

Os TC para a corrente de curto-circuito obtidos para as sete células são exibidos na tabela 6.

Tabela 6 – Coeficientes de temperatura para a corrente de curto-circuito

Célula	$\alpha$
1	$1.0 \times 10^{-4}$
2	$1.1 \times 10^{-4}$
3	$1.0 \times 10^{-4}$
4	$9.5 \times 10^{-5}$
5	$1.1 \times 10^{-4}$
6	$5.7 \times 10^{-5}$
7	$8.0 \times 10^{-5}$
Média	$9.3 \times 10^{-5}$

No entanto, embora a irradiância produzida durante as medidas ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) seja a mesma densidade de potência do espectro padrão, a densidade de fluxo de fótons não é a mesma, fazendo com que o coeficiente de temperatura medido seja dependente da fonte de luz utilizada, o que explica as variações nesse parâmetro encontradas na literatura [45]. Variações maiores que 50% entre os coeficientes de temperatura da corrente de curto-circuito para mesmas amostras foram encontradas por diferentes laboratórios [46]. Desse modo, não é possível realizar comparações entre os resultados aqui obtidos e valores de referência, pois esse últimos não existem. Ainda, a norma IEC 60891 estabelece que os coeficientes de temperatura determinados valem **apenas** para a irradiância e espectro para os quais foram medidos.

A dependência da corrente de curto-circuito com a irradiância é exibida na Fig. 34. Percebe-se que a corrente de curto-circuito é muito mais afetada pelo aumento de irradiância do que pelo aumento de temperatura, possuindo um crescimento linear conforme a irradiância aumenta, conforme pode ser visto na Tabela 7 pelo baixo MAPE encontrado.

Como a corrente de curto-circuito é produzida pelos pares elétrons gerados, o aumento do fluxo de fótons faz com que mais fótons com energia suficiente para gerar portadores cheguem à célula solar, provocando o aumento da corrente de curto-circuito. Na literatura, [25] definiu pela primeira vez o termo "Coeficiente de intensidade solar" (*Solar intensity coefficient* que, similar ao coeficiente de temperatura, denota a dependência da corrente de curto-circuito com a irradiância:

$$\mu = \frac{\text{Corrente}}{\text{Irradiância}} = \frac{\text{Am}^2}{\text{W}} \quad (4.3)$$

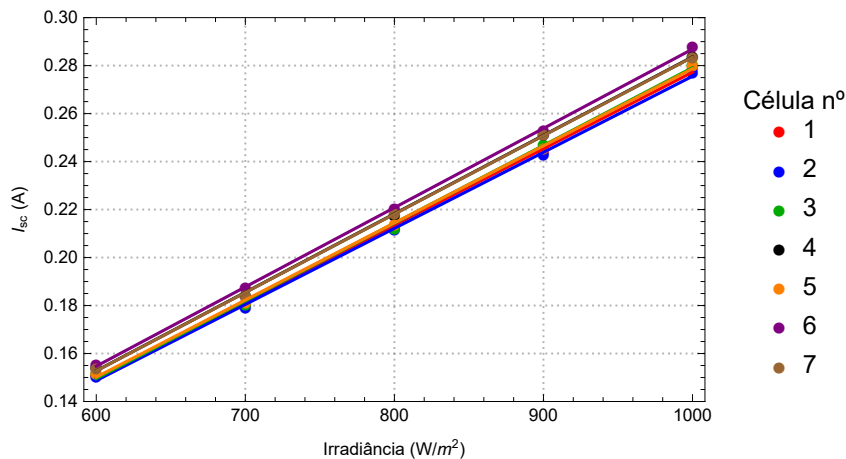


Figura 34 – Variação da corrente de curto-circuito em função da irradiância para as sete células estudadas

Tabela 7 – Incertezas médias com relação a variação de irradiância para a corrente de curto-circuito e MAPE para o ajuste linear

Célula	Incerteza Média ( $\times 10^{-5}$ A)	MAPE ( $\times 10^{-1}\%$ )
1	6.7	6.6
2	4.5	5.6
3	5.3	7.1
4	5.8	4.1
5	4.8	5.3
6	5.7	3.2
7	4.6	3.3

A tabela 8 exibe os coeficientes de intensidade solar obtidos para as células estudadas. Observa-se aqui que esses valores foram semelhantes aos encontrados por [25] para um módulo fotovoltaico de silício policristalino.

Tabela 8 – Coeficiente de intensidade solar para as sete células estudadas

Célula	$\mu (10^{-4} \text{ Am}^2/\text{W})$
1	3.2
2	3.2
3	3.2
4	3.3
5	3.2
6	3.3
7	3.3

#### 4.2.1.3 Tensão de circuito aberto

A tensão de circuito aberto é obtida quando a corrente fotogerada é igual à corrente de escuro. Desse modo, da Equação 2.2, podemos aproximar a tensão de circuito aberto



como sendo dada pela equação 4.4.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (4.4)$$

de modo que  $V_{oc}$  aumenta de maneira logarítmica com a irradiância. A Fig. 35 exibe a dependência de  $V_{oc}$  com a temperatura e a Tabela 9 exibe as incertezas médias e o MAPE.

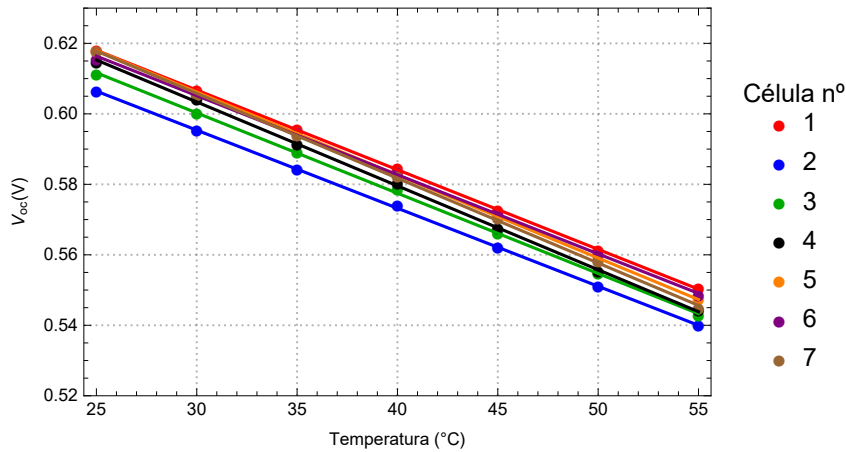


Figura 35 – Variação da tensão de circuito aberto com a temperatura

Tabela 9 – Incertezas médias e MAPE do ajuste linear para a tensão de circuito aberto com relação à variação de temperatura

Célula	Incerteza Média ( $\times 10^{-5}$ V)	MAPE ( $\times 10^{-2}\%$ )
1	7.3	2.6
2	7.5	3.1
3	1.0	5.7
4	9.8	8.6
5	9.3	6.1
6	8.5	9.4
7	6.6	7.0

Como a irradiância foi fixada em  $1000 \text{ W/m}^2$  durante a varredura da temperatura, a corrente de circuito sofreu ação apenas da temperatura e, como visto no item anterior, os efeitos da temperatura em  $I_{sc}$  são muito pequenos. Assim, de acordo com a equação 4.4, para entender o comportamento de  $V_{oc}$  com a temperatura, deve-se compreender o comportamento de  $I_0$ .

A corrente de saturação reversa do diodo é uma medida da fuga (ou recombinação) de portadores minoritários através da junção p-n em polarização reversa [15, 38], sendo resultado da recombinação de portadores nas regiões neutra ou laterais da junção, de modo que  $I_0$  controla primariamente o valor da tensão de circuito aberto [38]. Como os portadores minoritários são gerados termicamente,  $I_0$  é altamente sensível à temperatura [15, 38].

De fato, como será visto mais adiante neste trabalho, a  $I_0$  cresce exponencialmente com a temperatura, o que explica a rápida redução da tensão de circuito aberto com o aumento da temperatura. Para que uma célula solar possua um alto valor para a tensão de circuito aberto, é necessário que a corrente de saturação reversa, ou corrente de escuro, seja baixa.

Os coeficientes de temperatura obtidos para a tensão de circuito aberto são exibidos na Tabela 10. Como  $V_{oc}$  depende também da corrente de curto-circuito,  $\beta$  também é afetado pelo espectro, e é definido por

$$\beta(\text{V}^\circ\text{C}^{-1}) = \frac{dV_{oc}}{dT} \quad (4.5)$$

Tabela 10 – Coeficientes de temperatura para a tensão de circuito aberto

Célula	$\beta$ ( $\times 10^{-3} \text{V}^\circ\text{C}^{-1}$ )
1	-2.3
2	-2.2
3	-2.3
4	-2.4
5	-2.4
6	-2.2
7	-2.4
Média	-2.3

Da Eq. 2.2, pode-se extrair uma dependência aproximada da tensão de circuito aberto com a irradiância. Novamente, considerando que a  $I = 0$  no ponto de  $V_{oc}$ , e que o diodo é não-ideal:

$$V_{oc}(X) = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{XI_{sc}}{I_0} + 1 \right) \approx V_{oc}(1) + \frac{nkT}{q} \ln X \quad (4.6)$$

onde  $n$  é o fator de idealidade do diodo,  $X$  é o fator de concentração de luz, representando quantas vezes o fluxo de fótons incidente é aumentado ou atenuado, e  $V_{oc}(1)$  é a tensão de circuito aberto à irradiância de 1 Sol ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) [9]. A Figura 36 apresenta a dependência da tensão de circuito aberto com relação a irradiância, onde as linhas representam o ajuste dos dados experimentais com o modelo  $V_{oc} = V_{oc}(1) + a \cdot \ln(X)$ , onde  $a = nkT/q$ .

Percebe-se que o modelo proposto para prever a dependência de  $V_{oc}$  com a irradiância se ajusta bem aos dados experimentais, o que pode ser confirmado pela Tabela 11. Nota-se assim que a tensão de circuito aberto é muito mais afetada por variações de temperatura do que de irradiância.

#### 4.2.1.4 Ponto de máxima potência

O ponto de máxima potência representa a potência máxima gerada pela célula solar em análise para uma dada condição de temperatura e irradiância. A Fig. 37 apresenta

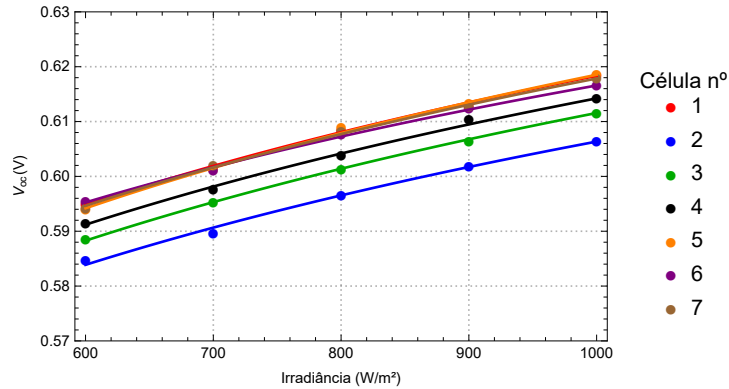


Figura 36 – Variação da tensão de circuito aberto com a irradiância

Tabela 11 – Incertezas médias e MAPE do ajuste da Eq. 4.6 para a tensão de circuito aberto com relação à variação de irradiância

Célula	Incerteza Média ( $\times 10^{-5}$ V)	MAPE ( $\times 10^{-2}\%$ )
1	4.6	4.8
2	3.6	6.7
3	7.6	2.7
4	5.6	6.7
5	11.0	5.7
6	3.7	4.4
7	7.3	5.5

a variação da potência máxima produzida pela célula solar para os diferentes valores de temperatura e, como nos gráficos anteriores, as linhas representam o melhor ajuste obtido. Nesse caso, foi considerado um modelo linear de decaimento.

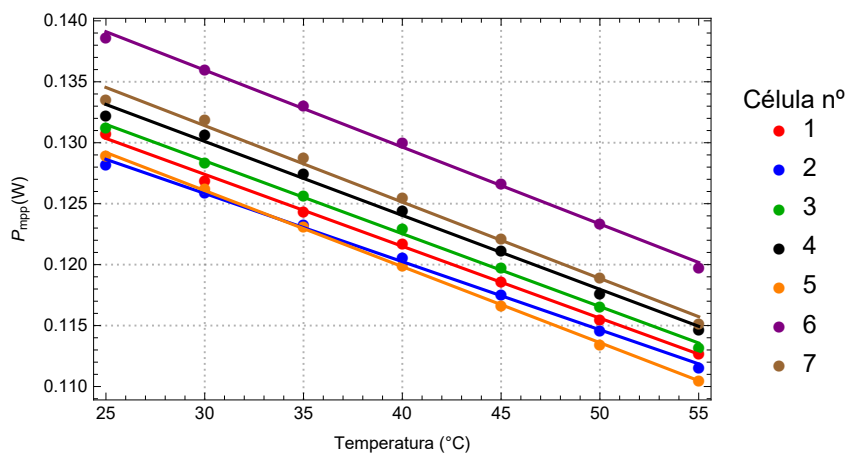


Figura 37 – Variação da potência máxima com a temperatura

Percebe-se que a potência produzida pela célula solar cai com o aumento de temperatura, devido à forte redução da tensão de curto circuito, que supera o aumento da fotocorrente, para valores maiores de temperatura. Desse modo, para que a célula solar não sofra uma degradação na potência máxima, é desejável que a temperatura de operação

seja reduzida.

O coeficiente de temperatura da potência máxima,  $\delta$ , obtido para as sete células solares estudadas, sendo definido por

$$\delta(\text{W } ^\circ\text{C}^{-1}) = \frac{dP_{mpp}}{dT} \quad (4.7)$$

é exibido na Tabela 12.

Tabela 12 – Coeficientes de temperatura para a potência máxima produzida

Célula	$\delta$ ( $\times 10^{-4} \text{W } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
1	-5.9
2	-5.6
3	-6.0
4	-6.1
5	-6.2
6	-6.3
7	-6.3
Média	-6.1

Já a Tabela 13 apresenta a incerteza média para cada célula solar com relação à variação da potência máxima com a temperatura, bem como exibe o MAPE entre os valores experimentais e ajustados por um decaimento linear.

Tabela 13 – Incertezas médias e MAPE do ajuste linear para a potência máxima com relação à variação de temperatura

Célula	Incerteza Média ( $\times 10^{-5}$ W)	MAPE ( $\times 10^{-1}\%$ )
1	4.7	1.6
2	4.0	1.8
3	4.2	1.8
4	5.4	3.4
5	5.6	1.0
6	3.9	1.9
7	3.7	3.6

Considerando que o fator de preenchimento permaneça constante para variações da irradiância (o que em condições reais não é garantido de acontecer), a potência máxima aumenta para irradiâncias maiores de acordo com o modelo [9]

$$X \left( 1 + \frac{mkT}{qV_{oc}(1)} \cdot \ln X \right) \quad (4.8)$$

Assim, os dados experimentais foram ajustados de acordo com o modelo, com a diferença de que a constante aditiva 1 foi substituída por um valor a ser ajustado, e em todos os casos resultou valores entre 0 e 1. Os dados experimentais e os ajustes são apresentados

na Fig. 38. Dessa análise, conclui-se que é desejável que a temperatura de operação da célula seja mínima e a irradiância máxima, de modo que a potência gerada pela célula seja maior.

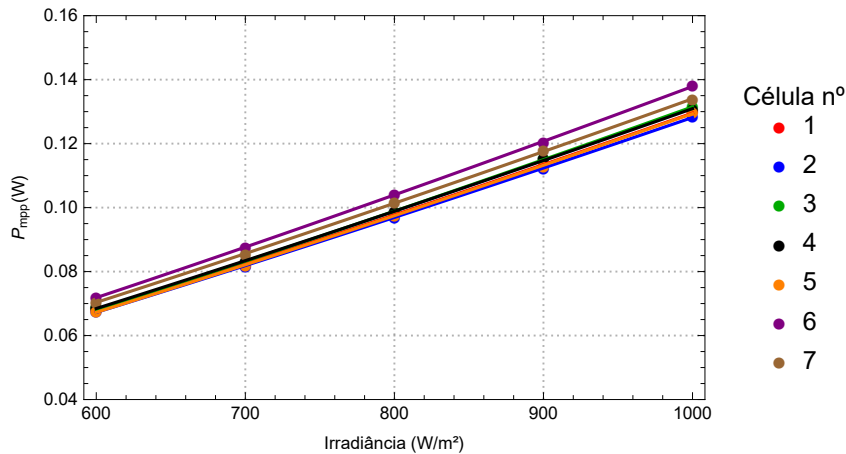


Figura 38 – Variação da potência máxima com a irradiância

A tabela 14 exibe a qualidade dos ajustes para a dependência da potência máxima com a irradiância e as incertezas médias. Verifica-se que com o aumento da irradiância o aumento da potência máxima foi bem descrito pelo modelo da equação 4.8 com a modificação realizada.

Tabela 14 – Incertezas médias e MAPE do ajuste para a potência máxima com relação à variação de irradiância

Célula	Incerteza Média ( $\times 10^{-5}$ W)	MAPE ( $\times 10^{-1}\%$ )
1	3.4	4.4
2	3.0	3.1
3	3.2	4.9
4	3.8	3.0
5	4.0	2.9
6	4.0	1.2
7	2.0	2.9

#### 4.2.1.5 Fator de preenchimento e eficiência

As Figs 39 e 40 exibem a dependência do fator de preenchimento com a temperatura e irradiância, respectivamente. Da Fig. 39 percebe-se um decaimento linear do fator de preenchimento com o aumento de temperatura, pois tanto a potência produzida como a tensão de circuito aberto caem da mesma forma para temperaturas mais altas. Já da Fig. 40, nota-se que o fator de preenchimento permaneceu praticamente constante para a maioria das células, exceto para a célula n°4 que apresentou uma queda em 900 W/m² pois, nesse ponto, essa célula apresentou uma tensão de circuito aberto ligeiramente mais

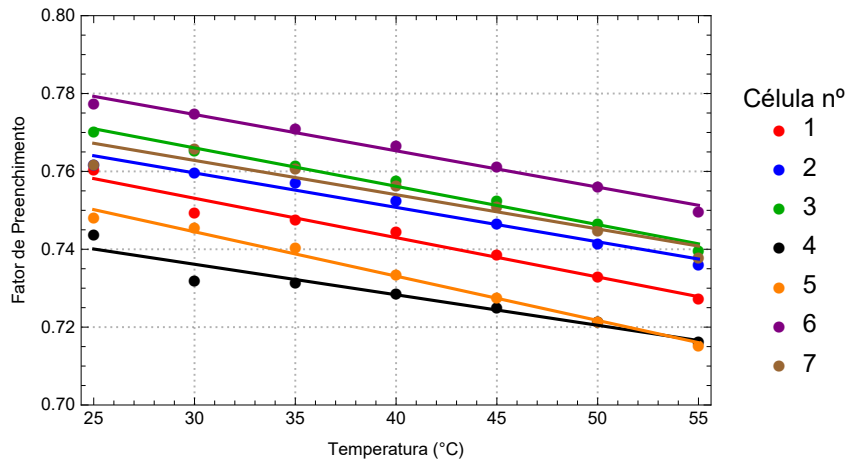


Figura 39 – Variação do fator de preenchimento com a temperatura

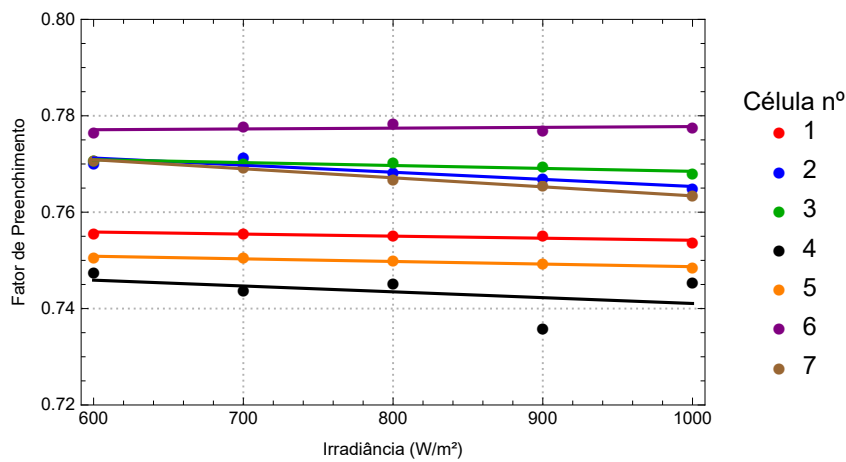


Figura 40 – Variação do fator de preenchimento com a irradiância

alta que o esperado, como pode ser visto na Fig. 36. As tabelas 15 e 16 exibem as incertezas médias e MAPE para os fatores de preenchimento obtidos.

Tabela 15 – Incertezas médias e MAPE do ajuste linear para o fator de preenchimento com relação à variação de temperatura

Célula	Incerteza Média ( $\times 10^{-4}$ )	MAPE ( $\times 10^{-1}\%$ )
1	3.0	1.7
2	2.7	1.6
3	2.5	1.3
4	3.3	2.1
5	2.6	1.2
6	2.5	1.3
7	2.3	3.4

#### 4.2.1.6 Eficiência

A eficiência representa o percentual da potência de luz incidente na célula convertido em potência elétrica. Com respeito ao aumento da temperatura, observou-se que a

Tabela 16 – Incertezas médias e MAPE do ajuste linear para o fator de preenchimento com relação à variação de irradiância

Célula	Incerteza Média ( $\times 10^{-4}$ )	MAPE ( $\times 10^{-2}\%$ )
1	2.3	3.7
2	1.7	8.6
3	2.5	4.4
4	4.0	4.0
5	2.6	3.2
6	3.2	7.2
7	2.4	2.5

eficiência apresenta um decrescimento linear, devido à queda também linear da potência elétrica produzida, como pode ser observado na Fig. 41.

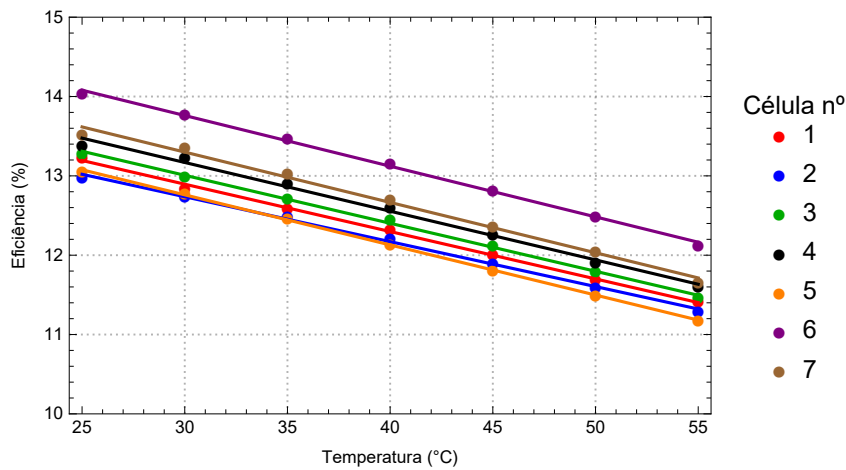


Figura 41 – Variação da eficiência elétrica com a temperatura

Com relação ao aumento da irradiância, a eficiência aumenta aproximadamente de acordo com o modelo (também considerando que o fator de preenchimento permaneça constante):

$$\left(1 + \frac{mkT}{qV_{oc}(1)} \cdot \ln X\right) \quad (4.9)$$

Da mesma forma que para a potência, a eficiência foi ajustada com esse modelo, com a diferença que a constante aditiva 1 foi substituída por um parâmetro a ser ajustado, pois a consideração de que o fator de idealidade permanece constante não é válida para as células estudadas. Os resultados obtidos são exibidos na Fig. 42. Nota-se que os dados experimentais foram muito bem ajustados pelos modelos propostos, o que pode ser confirmado pelas Tabelas 17 e 18.

Assim, verificou-se que a eficiência elétrica das células solares testadas foi altamente afetada pela temperatura, decaindo à medida que a temperatura subiu. Com relação ao aumento da irradiância, verificou-se que a eficiência aumenta de maneira logarítmica. Desse modo, dispositivos que aumentam a concentração de luz na célula solar com o

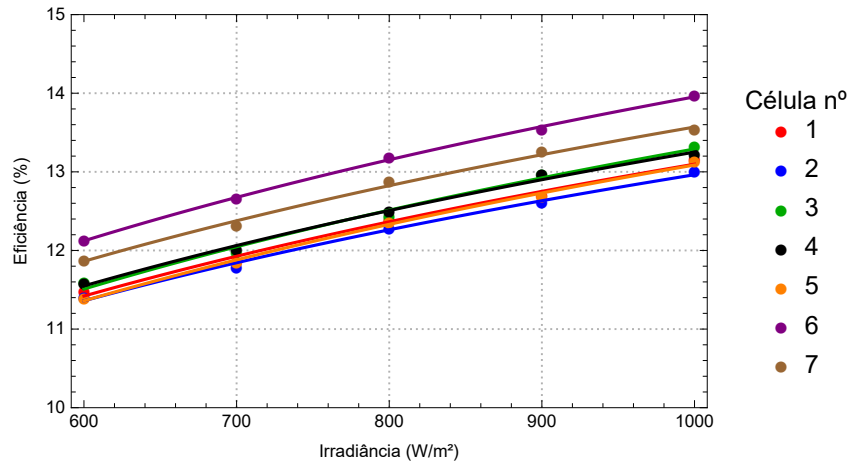


Figura 42 – Variação da eficiência elétrica com a irradiância

Tabela 17 – Incertezas médias e MAPE do ajuste para a eficiência com relação à variação de temperatura

Célula	Incerteza Média ( $\times 10^{-3}$ )	MAPE ( $\times 10^{-1}\%$ )
1	4.8	1.6
2	4.0	1.8
3	4.3	1.8
4	5.5	3.4
5	5.6	1.0
6	3.9	1.9
7	3.7	3.6

Tabela 18 – Incertezas médias e MAPE do ajuste para a eficiência com relação à variação de irradiância

Célula	Incerteza Média ( $\times 10^{-3}$ )	MAPE ( $\times 10^{-1}\%$ )
1	4.4	4.3
2	3.8	3.0
3	4.1	5.1
4	4.8	3.0
5	5.0	2.9
6	5.2	1.2
7	3.5	3.0

objetivo de aumentar o fluxo de fótons incidente, como lentes, espelhos, etc, permitem que a eficiência aumente. No entanto, nesses casos de concentração de luz, se a temperatura não for controlada, a eficiência cairá, pois o decréscimo da eficiência com a temperatura supera muito o acréscimo com a concentração.

#### 4.2.1.7 Performance das células testadas em condições nominais

Após toda essa análise, verificou-se que os dados de performance fornecidos pelo fabricante não foram encontrados experimentalmente. Essa diferença pode ser atribuída



às condições de teste das células, pois neste trabalho um espectro diferente do espectro padrão foi utilizado. Em resumo, os parâmetros elétricos básicos mais importantes das células solares testadas podem ser verificados na Tabela 19.

Tabela 19 – Parâmetros elétricos básicos para as células solares medidas

Célula	$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$P_{mpp}$ (W)	FF	$\eta$ (%)
1	0.278	0.618	0.131	0.761	13.23
2	0.278	0.606	0.128	0.762	12.98
3	0.279	0.611	0.131	0.77	13.29
4	0.286	0.615	0.132	0.744	13.38
5	0.279	0.618	0.129	0.748	13.05
6	0.290	0.615	0.139	0.777	14.03
7	0.284	0.618	0.134	0.762	13.52
Média	0.282	0.614	0.132	0.760	13.35
$\sigma$	0.005	0.004	0.003	0.012	0.38

### 4.3 Parâmetros elétricos do modelo de diodo único modificado

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para os parâmetros do modelo de diodo único modificado, extraídos pelo algoritmo de otimização. Pretende-se, com essa análise, contribuir para um melhor entendimento de como esses parâmetros variam sob diversas condições de temperatura e irradiância, de modo que seja possível contribuir para o esclarecimento das discrepâncias observadas na Tabela 1.

#### 4.3.1 Dependência com relação à temperatura

As Figuras 43 à 47 mostram a dependência de cada um dos cinco parâmetros do modelo de diodo único modificado com relação à variação da temperatura. Para as resistências em série e *shunt*, dois modelos foram utilizados para serem ajustados aos dados experimentais: um modelo linear e um exponencial. A Tabela 20 exibe as incertezas médias e a Tabela 21 o MAPE resultante dos modelos considerados.

A fotocorrente apresentou um pequeno crescimento linear com o aumento de temperatura, como pode ser observado na Fig. 43, com taxa de variação média de  $8.9 \times 10^{-5}$  A °C<sup>-1</sup>. A razão para esse comportamento é que para maiores temperaturas o número de portadores fotogerados é maior, já que o *band gap* do silício é reduzido com o aumento da temperatura [47, 48, 49, 50].

O fator de idealidade permaneceu praticamente constante para todas as células solares, como pode ser observado na Fig. 44 exibindo um modesto decréscimo linear médio de  $-5.7 \times 10^{-4}$  °C<sup>-1</sup>. Esse parâmetro reflete a recombinação de portadores nas regiões quase-neutras e na região de carga espacial da junção p-n [51], variando geralmente de

Tabela 20 – Incerteza média para os parâmetros do modelo de diodo único modificado para as sete células medidas

Parâmetros elétricos do modelo					
Célula	$I_{ph}$ (A)	$I_0$ (A)	$n$	$R_s(\Omega)$	$R_{sh}(\Omega)$
1	$5.4 \times 10^{-5}$	$3.7 \times 10^{-9}$	$2.0 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-4}$	3.1
2	$5.4 \times 10^{-5}$	$1.9 \times 10^{-9}$	$1.9 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-4}$	10
3	$5.2 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-9}$	$2.3 \times 10^{-3}$	$3.1 \times 10^{-4}$	5.5
4	$5.3 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-9}$	$2.0 \times 10^{-3}$	$2.9 \times 10^{-4}$	5.5
5	$6.3 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-8}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$3.4 \times 10^{-4}$	5.6
6	$4.8 \times 10^{-5}$	$5.4 \times 10^{-10}$	$2.0 \times 10^{-3}$	$2.8 \times 10^{-4}$	4.6
7	$5.9 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-9}$	$1.9 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-4}$	6.3

Tabela 21 – MAPE para os ajustes entre os pontos reais e os estimados pelos modelos considerados

Parâmetros elétricos do modelo										
	$I_{ph}$		$I_0$		$n$		$R_s$		$R_{sh}$	
Modelo	Linear	Exponencial a)	Linear	Linear	Exponencial b)	Linear	Exponencial b)	Linear	Exponencial b)	
Célula	MAPE (%)									
1	0.04	0.33	0.34	9.68	9.73	3.14	2.0			
2	0.05	0.10	0.15	7.29	1.31	4.19	3.74			
3	0.03	0.16	0.24	1.04	0.68	1.49	1.94			
4	0.05	0.15	0.15	14.61	0.93	2.68	2.65			
5	0.06	0.52	0.49	17.51	8.94	3.31	3.65			
6	0.02	0.15	0.18	4.42	0.82	1.67	1.68			
7	0.07	0.23	0.10	15.51	1.06	2.11	2.44			
Média	0.04	0.23	0.24	10.0	3.35	2.66	2.59			
$\sigma$	0.02	0.15	0.14	6.15	4.10	0.97	0.82			

Exponencial a):  $y = a \cdot \exp(x/b)$

Exponencial b):  $y = a + b \cdot \exp[-(x - c)/d]$

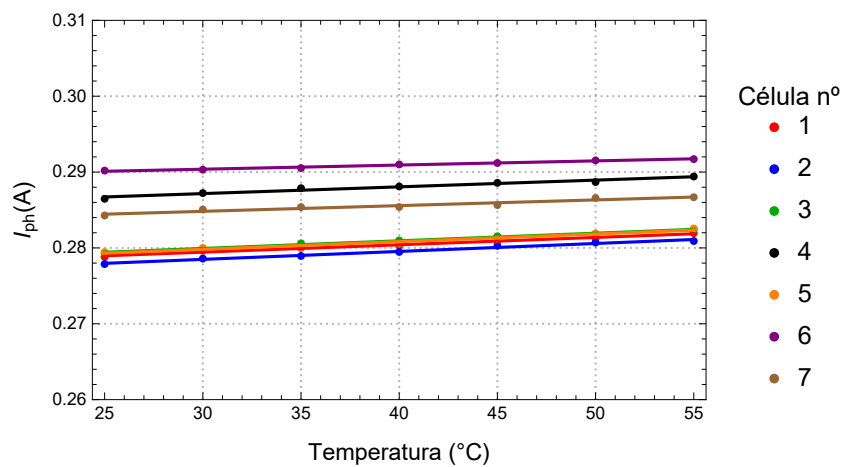


Figura 43 – Variação da fotocorrente com a temperatura

1 a 2, sendo também influenciado pelo processo de fabricação da célula solar [52]. Esse leve decaimento pode ser explicado por uma redução na recombinação superficial [26] de

portadores na célula solar, e pelo decaimento da resistência da região ativa da célula com o aumento de temperatura [25].

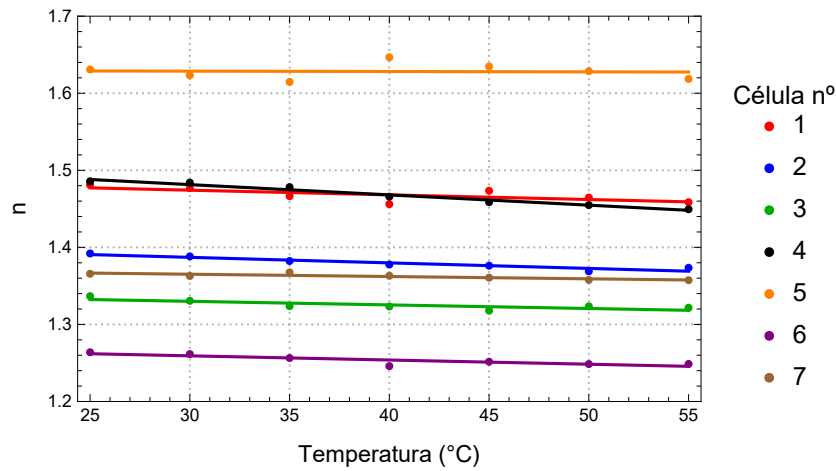


Figura 44 – Variação do fator de idealidade com a temperatura

O parâmetro mais afetado pela temperatura foi a corrente de saturação reversa do diodo, com um crescimento exponencial médio de 2209.5% entre 25 °C e 55 °C. Essa forte dependência com a temperatura é a razão por trás da queda da tensão de circuito aberto para maiores temperaturas, já que a fuga e recombinação de portadores minoritários através da junção p-n é maior [15], levando ao decaimento da eficiência elétrica conforme a temperatura aumenta. Essa tendência também foi observada por [30]. A dependência da corrente de saturação reversa com a temperatura é ilustrada na Fig. 45.

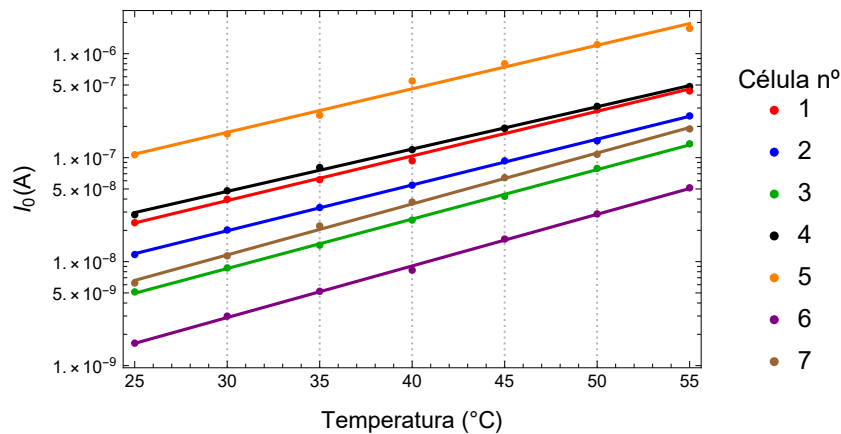


Figura 45 – Variação da corrente de saturação reversa com a temperatura

Como pode ser visto à partir da Tabela 21, a resistência em série é melhor descrita por um decaimento exponencial do que linear. Para a maioria das células solares, uma redução mais acentuada entre 25 °C e 40 °C foi observada. À partir de 40 °C a resistência em série permaneceu praticamente constante. Tendo em vista que esse parâmetro dá conta das perdas ôhmicas apresentadas pela célula solar devido às resistências de contato e às resistências à passagem de corrente pelo interior e superfície ativa da célula [17], o

decaimento observado pode ser explicado em termos da redução da resistência de contato e por um aumento na condutividade da camada ativa [30], permitindo que mais corrente flua na direção de polarização positiva.

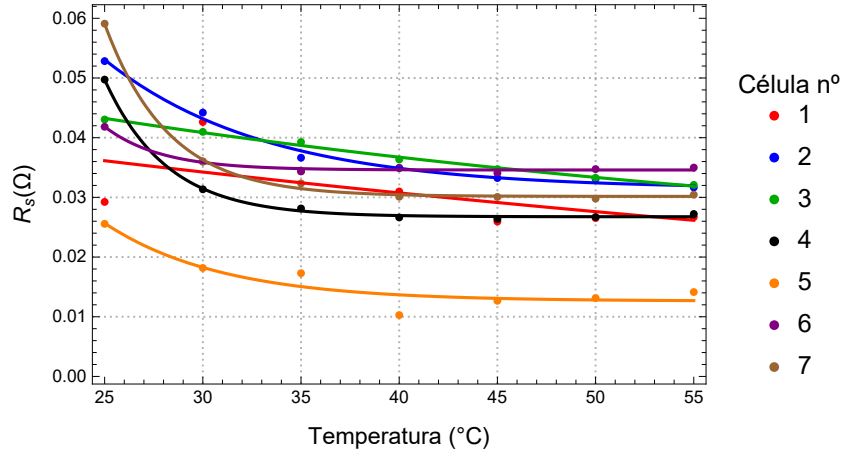


Figura 46 – Variação da resistência em série com a temperatura

A resistência *shunt* permaneceu praticamente constante para duas das células solares medidas, e foi melhor descrita por um decaimento linear com o aumento de temperatura, apresentando um decaimento médio de  $-1.8 \Omega \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Esse comportamento pode ser explicado em termos de um aumento do tunelamento e *trapping-detraping* de portadores através de *traps* na região de carga espacial [25], causando uma fuga de corrente através da junção p-n por meio de caminhos de alta condutividade [31].

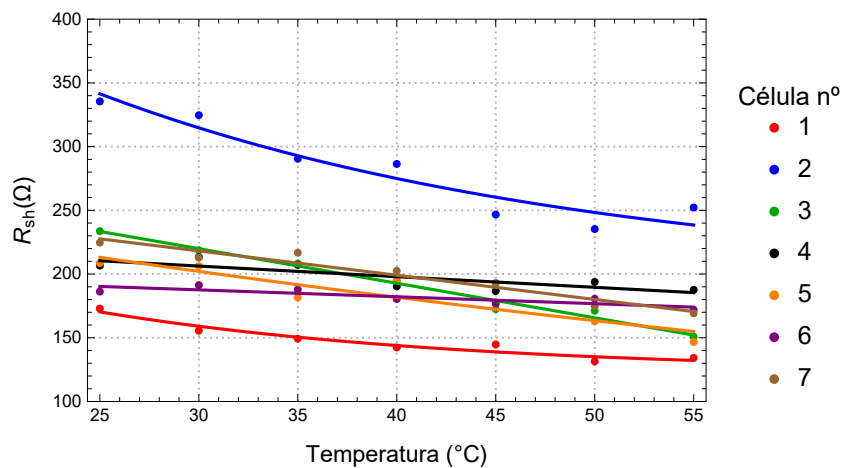


Figura 47 – Variação da resistência *shunt* com a temperatura

Para finalizar essa seção, da Fig. 48 nota-se que a fotocorrente é aproximadamente igual à corrente de curto-circuito:

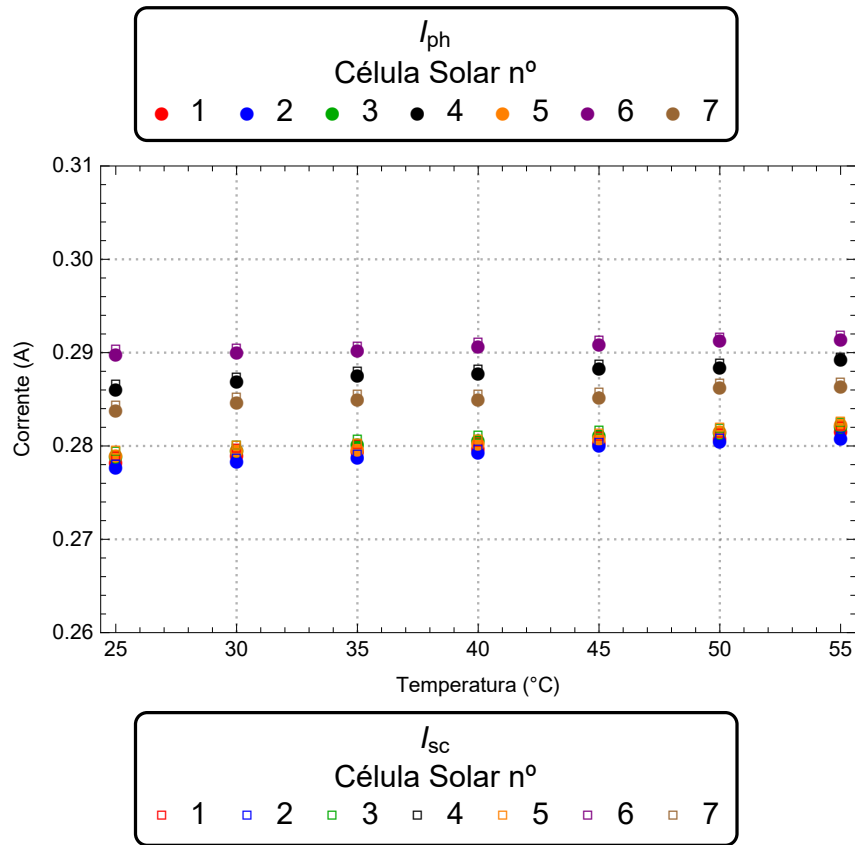


Figura 48 – Variação da corrente de curto-circuito e fotocorrente com a temperatura

### 4.3.2 Dependência com relação à irradiância

As Figs. 49 à 53 exibem a dependência dos parâmetros do modelo de diodo único modificado com relação à variação da irradiância. A Tabela 22 exhibe as incertezas médias para cada um dos parâmetros e a Tabela 23 o MAPE entre os valores estimados por um ajuste linear e os pontos reais obtidos pelos processos de otimização.

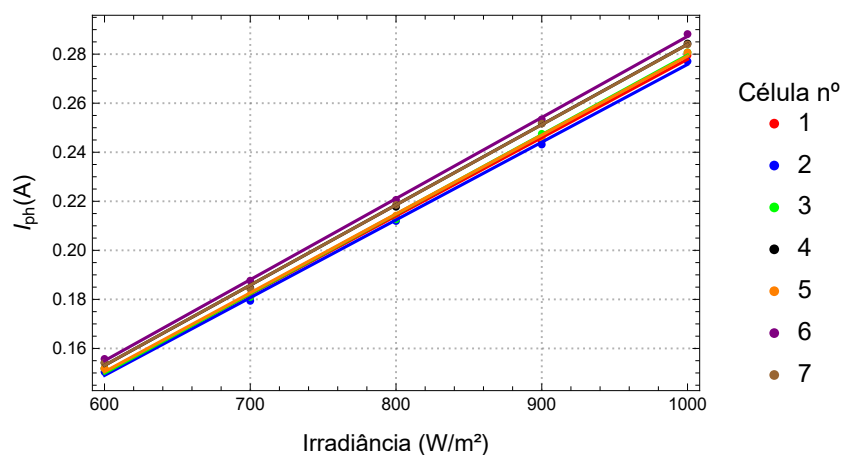


Figura 49 – Variação da fotocorrente com a irradiância

A fotocorrente foi o parâmetro mais afetado pela variação de irradiância, com

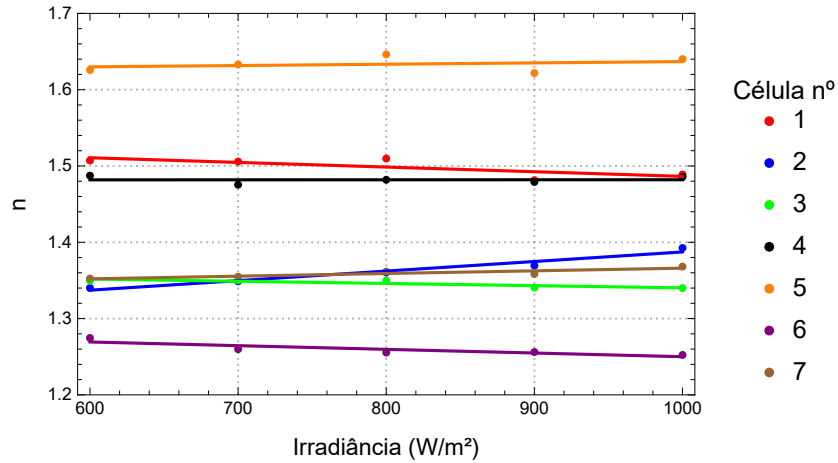


Figura 50 – Variação do fator de idealidade com a irradiância

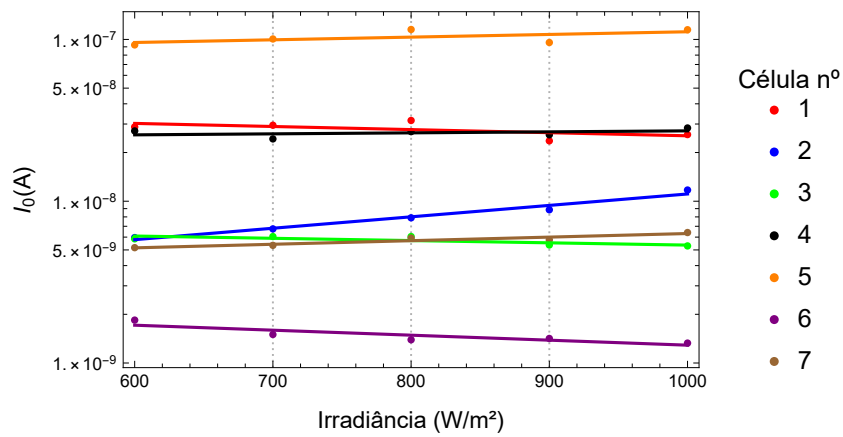


Figura 51 – Variação da corrente de saturação reversa com a irradiância

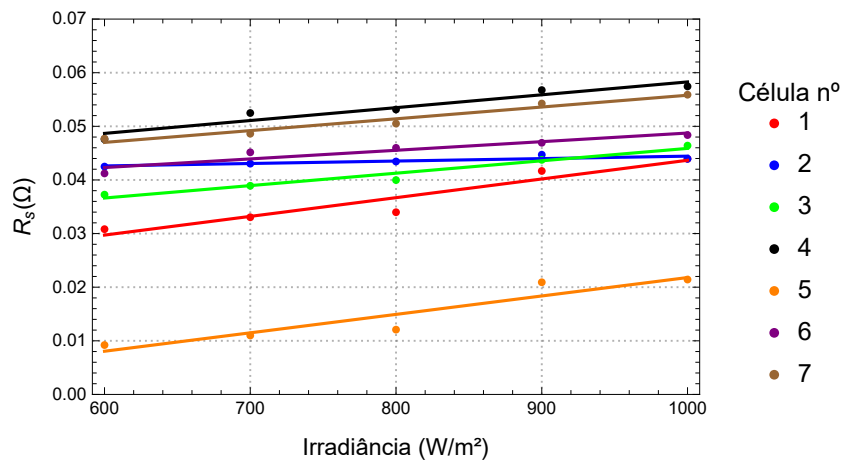


Figura 52 – Variação da resistência em série com a irradiância

uma taxa de variação média de  $3.2 \times 10^{-4} \text{ Am}^2/\text{W}$ . O fator de idealidade mostrou um pequeno acréscimo linear, mas permaneceu praticamente constante para todas as células, com uma taxa de variação média de  $5.7 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Ou seja, o efeito da variação da irradiância nesse parâmetro foi em torno de 100 vezes menor que o obtido para a variação

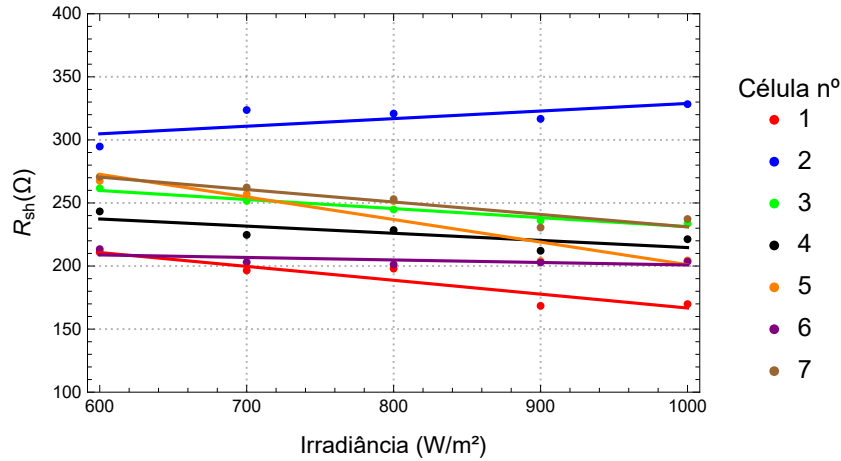


Figura 53 – Variação da resistência *shunt* com a irradiância

Tabela 22 – Incertezas médias para os parâmetros do modelo de diodo único modificado com relação à variação de irradiância

Parâmetros do modelo					
Célula	$I_{ph}$ (A)	$I_0$ (A)	$n$	$R_s(\Omega)$	$R_{sh}(\Omega)$
1	$6.4 \times 10^{-5}$	$5.3 \times 10^{-10}$	$1.8 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-4}$	4.3
2	$4.1 \times 10^{-5}$	$1.9 \times 10^{-10}$	$1.8 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-4}$	11
3	$5.5 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-10}$	$2.3 \times 10^{-3}$	$3.3 \times 10^{-4}$	7.6
4	$4.9 \times 10^{-5}$	$6.5 \times 10^{-10}$	$2.2 \times 10^{-3}$	$2.9 \times 10^{-4}$	5.9
5	$4.3 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^{-9}$	$3.0 \times 10^{-3}$	$5.1 \times 10^{-4}$	6.6
6	$5.5 \times 10^{-5}$	$4.8 \times 10^{-11}$	$2.1 \times 10^{-3}$	$3.3 \times 10^{-4}$	4.3
7	$4.0 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-10}$	$1.6 \times 10^{-3}$	$2.8 \times 10^{-4}$	5.5

Tabela 23 – MAPE entre os valores reais e os estimados por um ajuste linear para os parâmetros do modelo de diodo único modificado

Parâmetros do modelo						
	$I_{ph}$	$I_0$	$n$	$R_s$	$R_{sh}$	
Célula	MAPE (%)					
1	0.65	0.38	0.39	3.26	2.73	
2	0.55	0.18	0.24	0.66	2.15	
3	0.71	0.17	0.15	1.30	0.67	
4	0.41	0.26	0.25	1.73	2.70	
5	0.54	0.37	0.43	10.9	3.51	
6	0.32	0.25	0.28	1.52	1.42	
7	0.32	0.11	0.14	1.16	1.75	
Média	0.5	0.25	0.27	2.93	2.13	
$\sigma$	0.15	0.10	0.11	3.61	0.95	

da temperatura.

A corrente de saturação reversa do diodo permaneceu virtualmente constante, com uma taxa de variação média de  $1.7 \times 10^{-5} \text{ Am}^2\text{W}$ , com aumento médio de 14.5%. Dessa forma, a irradiância não afetou de maneira significativa esse parâmetro, diferentemente da temperatura. Já a resistência em série apresentou um pequeno acréscimo com relação ao aumento da irradiância, com taxa de variação média de  $2.3 \times 10^{-5} \Omega\text{m}^2/\text{W}$ .

E, finalmente, a resistência em série apresentou um decaimento linear muito pequeno com o aumento da irradiância, exceto para a célula número 2, com taxa de variação média de  $-6.8 \times 10^{-2} \Omega\text{m}^2\text{W}$ . Esse comportamento, isto é, um acréscimo de  $R_{sh}$  para valores menores de irradiância também foi encontrado por outros autores [24, 28, 32]. Dessa maneira, verificou-se que os efeitos da irradiância são muito menos intensos nos parâmetros do modelo de diodo único modificado do que os provocados pelo aumento de temperatura, exceto pela fotocorrente.



## 5 Conclusões

Este trabalho teve o objetivo de analisar como os parâmetros elétricos de células solares de silício policristalino se comportam sob as mais diversas condições de temperatura e irradiância, através da obtenção experimental de características I-V de sete células solares e posterior análise computacional através de um método de otimização global que fez uso do algoritmo de Evolução Diferencial.

Diferentemente de trabalhos anteriores na literatura, onde poucas células solares (uma, em geral) foram utilizadas e os erros entre as curvas I-V experimentais e simuladas não foram discutidos, este trabalho proporcionou uma extração de parâmetros robusta através do minucioso aparato experimental aliado a um alto esforço computacional, resultando em erros muito baixos entre as curvas simuladas e experimentais.

Observou-se que a fotocorrente apresentou um crescimento linear tanto para o aumento de irradiância quanto para o aumento de temperatura, sendo muito mais sensível à variações de irradiância. Já o fator de idealidade permaneceu praticamente constante para todas as células para as variações de temperatura e luminosidade estudadas. Observou-se ainda que a corrente de saturação reversa foi o parâmetro mais afetado pela temperatura, com um crescimento exponencial. Não foram observadas mudanças apreciáveis com relação ao aumento de luminosidade nesse parâmetro. Já a resistência em série foi melhor descrita por um decaimento exponencial com o aumento da temperatura, e apresentou um crescimento linear com o aumento da irradiância. E finalmente, a resistência *shunt* apresentou um decaimento linear para a maioria das células estudadas tanto para o aumento de irradiância quanto para o aumento de temperatura.

Assim, os resultados obtidos nesse trabalho podem ser considerados como representantes confiáveis do real comportamento de células solares de silício policristalino sob as faixas de temperatura e irradiância estudadas, contribuindo para um melhor entendimento de como os parâmetros elétricos do modelo de diodo único modificado se comportam sob variadas condições ambientais para esse tipo de tecnologia de célula solar.

Mas o trabalho não acaba aqui. Como projetos a serem realizados futuramente, pretende-se estudar outros modelos que descrevem as características elétricas de células solares, bem como diversos métodos de extração de parâmetros, para que seja possível estabelecer a melhor metodologia para uma modelagem mais precisa e confiável de células solares.

# Referências

- 1 RAZYKOV, T. M. et al. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, Elsevier Ltd, v. 85, n. 8, p. 1580–1608, 2011. ISSN 0038092X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002>>. 15
- 2 KANNAN, N.; VAKEESAN, D. Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 62, p. 1092–1105, 2016. ISSN 18790690. 15
- 3 SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renew and Sustain Energy Rev*, v. 74, n. June 2016, p. 590–601, 2017. ISSN 13640321. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117303076>>. 15, 16
- 4 PŁACZEK-POPKO, E. Top PV market solar cells 2016. *Opto-Electronics Review*, Association of Polish Electrical Engineers (SEP), v. 25, n. 2, p. 55–64, 2017. ISSN 12303402. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1896375717300209>>. 15
- 5 KABIR, E. et al. Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, n. October 2017, p. 894–900, 2018. ISSN 18790690. 15
- 6 HULD, T. et al. Data sets for energy rating of photovoltaic modules. *Solar Energy*, Elsevier Ltd, v. 93, p. 267–279, 2013. ISSN 0038092X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.014>>. 15
- 7 SINGH, P.; RAVINDRA, N. M. Analysis of series and shunt resistance in silicon solar cells using single and double exponential models. *Emerging Materials Research*, v. 1, n. 1, p. 33–38, 2012. ISSN 20460147. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1680/emr.11.00008>>. 15, 22, 23
- 8 EKE, R.; BETTS, T. R.; GOTTSCHALG, R. Spectral irradiance effects on the outdoor performance of photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 69, n. October 2016, p. 429–434, 2017. ISSN 18790690. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.062>>. 15
- 9 NELSON, J. *The physics of solar cells*. [S.l.]: World Scientific Publishing Company, 2003. 16, 17, 18, 50, 52
- 10 SHOCKLEY, W. The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors. *The Bell System Technical Journal*, v. 28, n. 3, p. 435 – 489, 1949. 16
- 11 WÜRFEL, P. *Physics of solar cells*. [S.l.]: Wiley-vch Weinheim, 2005. 17
- 12 LUQUE, A.; HEGEDUS, S. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. 17
- 13 JORDEHI, A. R. Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 61, p. 354–371, 2016. ISSN 18790690. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.049>>. 17, 21, 41

- 14 ABBASSI, R. et al. Identification of unknown parameters of solar cell models: A comprehensive overview of available approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 90, n. March, p. 453–474, 2018. [17](#), [19](#), [21](#)
- 15 GHANI, F. et al. On the influence of temperature on crystalline silicon solar cell characterisation parameters. *Solar Energy*, Elsevier Ltd, v. 112, p. 437–445, 2015. ISSN 0038092X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.12.018>. [19](#), [22](#), [23](#), [24](#), [39](#), [49](#), [59](#)
- 16 KHAN, F.; SINGH, S. N.; HUSAIN, M. Effect of illumination intensity on cell parameters of a silicon solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Elsevier, v. 94, n. 9, p. 1473–1476, 2010. ISSN 09270248. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.03.018>. [19](#), [22](#), [23](#), [24](#)
- 17 ARORA, J. D.; VERMA, A. V.; BHATNAGAR, M. Variation of series resistance with temperature and illumination level in diffused junction poly- and single-crystalline silicon solar cells. *Journal of Materials Science Letters*, v. 5, n. 12, p. 1210–1212, 1986. ISSN 02618028. [19](#), [22](#), [24](#), [59](#)
- 18 COTFAS, D. T.; COTFAS, P. A.; KAPLANIS, S. Methods to determine the dc parameters of solar cells: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 28, p. 588–596, 2013. ISSN 13640321. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.017>. [21](#)
- 19 PILLAI, D. S.; RAJASEKAR, N. Metaheuristic algorithms for PV parameter identification: A comprehensive review with an application to threshold setting for fault detection in PV systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, v. 82, n. October 2017, p. 3503–3525, 2018. ISSN 18790690. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.107>. [21](#)
- 20 ISHAQUE, K. et al. Parameter extraction of solar photovoltaic modules using penalty-based differential evolution. *Applied Energy*, Elsevier Ltd, v. 99, p. 297–308, 2012. ISSN 03062619. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.017>. [21](#), [22](#), [26](#)
- 21 BÜHLER, A. J.; GASPARIN, F. P.; KRENZINGER, A. Post-processing data of measured I-V curves of photovoltaic devices. *Renewable Energy*, Elsevier Ltd, v. 68, p. 602–610, 2014. ISSN 09601481. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.048>. [21](#)
- 22 LIN, P. et al. Parameters extraction of solar cell models using a modified simplified swarm optimization algorithm. *Solar Energy*, Elsevier Ltd, v. 144, p. 594–603, 2017. ISSN 0038092X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.064>. [22](#)
- 23 BANERJEE, S.; ANDERSON, W. A. Temperature dependence of shunt resistance in photovoltaic devices. *Applied Physics Letters*, v. 49, n. 1, p. 38–40, 1986. ISSN 00036951. [22](#), [24](#)
- 24 CHEGAAR, M. et al. Effect of illumination intensity on solar cells parameters. *Energy Procedia*, Elsevier B.V., v. 36, p. 722–729, 2013. ISSN 18766102. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.084>. [22](#), [24](#), [64](#)

- 25 CUCE, E.; CUCE, P. M.; BALI, T. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. *Applied Energy*, Elsevier Ltd, v. 111, p. 374–382, 2013. ISSN 03062619. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.025>>. 22, 24, 47, 48, 59, 60
- 26 DESHMUKH, M. P.; NAGARAJU, J. Measurement of silicon and GaAs/Ge solar cell device parameters. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 89, n. 4, p. 403–408, 2005. ISSN 09270248. 22, 24, 58
- 27 DING, J.; CHENG, X.; FU, T. Analysis of series resistance and P-T characteristics of the solar cell. *Vacuum*, v. 77, n. 2, p. 163–167, 2005. ISSN 0042207X. 22, 24
- 28 EIKELBOOM, J. A.; REINDERS, A. Determination of the irradiation dependent efficiency of multicrystalline Si PV modules on basis of IV curve fitting and its influence on the annual performance. *Measurement*, n. January, p. 2–5, 1997. Disponível em: <<ftp://kerntechnik.nl/pub/www/library/report/1997/rx97045.pdf>>. 22, 23, 24, 64
- 29 KHAN, F. et al. Extraction of diode parameters of silicon solar cells under high illumination conditions. *Energy Conversion and Management*, Elsevier Ltd, v. 76, p. 421–429, 2013. ISSN 01968904. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.054>>. 22, 23, 24
- 30 KHAN, F.; BAEK, S. H.; KIM, J. H. Wide range temperature dependence of analytical photovoltaic cell parameters for silicon solar cells under high illumination conditions. *Applied Energy*, 2016. ISSN 03062619. 22, 23, 24, 59, 60
- 31 Priyanka; LAL, M.; SINGH, S. N. A new method of determination of series and shunt resistances of silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 91, n. 2-3, p. 137–142, 2007. ISSN 09270248. 22, 23, 24, 60
- 32 RUSCHEL, C. S. et al. Assessment of PV modules shunt resistance dependence on solar irradiance. *Solar Energy*, Elsevier Ltd, v. 133, p. 35–43, 2016. ISSN 0038092X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.047>>. 22, 23, 24, 64
- 33 SINGH, P. et al. Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 92, n. 12, p. 1611–1616, 2008. ISSN 09270248. 22, 23, 24
- 34 BOUZIDI, K.; CHEGAAR, M.; BOUHEMADOU, A. Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 91, n. 18, p. 1647–1651, 2007. ISSN 09270248. 22
- 35 IBRAHIM, H.; ANANI, N. Evaluation of Analytical Methods for Parameter Extraction of PV modules. *Energy Procedia*, Elsevier B.V., v. 134, p. 69–78, 2017. ISSN 18766102. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.601>>. 24
- 36 SABRY, M.; GHITAS, A. E. Influence of Temperature on Methods for Determining Silicon Solar Cell Series Resistance. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 129, n. 3, p. 331, 2007. ISSN 01996231. 24
- 37 RHOUMA, M. B. et al. A simple method for extracting the parameters of the PV cell single-diode model. *Renewable Energy*, Elsevier Ltd, v. 113, p. 885–894, 2017. ISSN 18790682. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.064>>. 24

- 38 SINGH, P.; RAVINDRA, N. M. Temperature dependence of solar cell performance - An analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 101, p. 36–45, 2012. ISSN 09270248. [24](#), [49](#)
- 39 STORN, R.; PRICE, K. Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, v. 11, n. 4, p. 341–359, 1997. ISSN 1075-4946. [25](#)
- 40 ISHAQUE, K.; SALAM, Z. An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE). *Solar Energy*, Elsevier Ltd, v. 85, n. 9, p. 2349–2359, 2011. ISSN 0038092X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.025>. [25](#)
- 41 JIANG, L. L.; MASKELL, D. L.; PATRA, J. C. Parameter estimation of solar cells and modules using an improved adaptive differential evolution algorithm. *Applied Energy*, Elsevier Ltd, v. 112, p. 185–193, 2013. ISSN 03062619. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.004>. [26](#)
- 42 URBAN, T. et al. Analysis of Ohmic Losses Due to Solder and Pressure Interconnection and Related Interface Resistances for Solar Cells. *Energy Procedia*, Elsevier B.V., v. 77, p. 420–427, 2015. ISSN 18766102. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.059>. [28](#)
- 43 CAO, D.; YANG, H.; WANG, H. The effect of soldering process on solar module performance. *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014*, p. 2681–2684, 2014. [28](#)
- 44 KIM, S.; KIM, H. A new metric of absolute percentage error for intermittent demand forecasts. *International Journal of Forecasting*, Elsevier B.V., v. 32, n. 3, p. 669–679, 2016. ISSN 01692070. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijforecast.2015.12.003>. [44](#)
- 45 DUPRÉ, O.; VAILLON, R.; GREEN, M. A. Physics of the temperature coefficients of solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 140, p. 92–100, 2015. ISSN 09270248. [46](#), [47](#)
- 46 EMERY, K. et al. Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems. *Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1996*, p. 1275–1278, 1996. ISSN 0160-8371. [47](#)
- 47 BENSALÉM, S.; CHEGAAR, M.; HERGUTH, A. Band gap dependence with temperature of semiconductors from solar cells electrical parameters. *Current Applied Physics*, v. 17, n. 1, p. 55–59, 2017. ISSN 15671739. [57](#)
- 48 BERTHOD, C. et al. On the Variability of the Temperature Coefficients of mc-Si Solar Cells with Irradiance. *Energy Procedia*, v. 92, n. 1876, p. 2–9, 2016. ISSN 18766102. [57](#)
- 49 BLUDAU, W.; ONTON, A.; HEINKE, W. Temperature dependence of the band gap of silicon. *Journal of Applied Physics*, v. 45, n. 4, p. 1846–1848, 1974. ISSN 00218979. [57](#)
- 50 GENG, P. et al. A novel theoretical model for the temperature dependence of band gap energy in semiconductors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 50, n. 40, 2017. ISSN 13616463. [57](#)

- 51 CRAIN, D. J. et al. Comparison of D.C. and A.C. electro-analytical methods for measuring diode ideality factors and series resistances of silicon solar cells. *Current Applied Physics*, Elsevier B.V, v. 13, n. 9, p. 2087–2097, 2013. ISSN 15671739. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cap.2013.09.012>>. 57
- 52 HUMADA, A. M. et al. Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 56, p. 494–509, 2016. ISSN 18790690. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.051>>. 58