

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

LARA CRISTINA RESENDE SILVA COUTO

**ALGORITMOS GENÉTICOS PARA OBTENÇÃO DE
MODELO DE PARÂMETROS PARA MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS DE 1, 2 E 3 DIODOS**

UBERLÂNDIA
2023

LARA CRISTINA RESENDE SILVA COUTO

**ALGORITMOS GENÉTICOS PARA OBTENÇÃO DE
MODELO DE PARÂMETROS PARA MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS DE 1, 2 E 3 DIODOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, como exigência parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica com ênfase em Energia Renovável.

Orientador: Dr. José Roberto Camacho

UBERLÂNDIA

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU

Reitor: Valder Steffen Junior

Pró-Reitor de Graduação: Kárem Cristina de Sousa Ribeiro

Pró-Reitor de Pós-graduação: Carlos Henrique de Carvalho

Diretor da Faculdade de Engenharia Elétrica: Sérgio Ferreira de Paula Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica: Carlos Eduardo Tavares

LARA CRISTINA RESENDE SILVA COUTO

**ALGORÍTMOS GENÉTICOS PARA OBTENÇÃO DE
MODELO DE PARÂMETROS PARA MÓDULOS**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

C871a Couto, Lara Cristina Resende Silva, 1990-
2023 Algoritmos genéticos para obtenção de modelo de parâmetros para
 módulos fotovoltaicos de 1, 2 e 3 diodos [recurso eletrônico] / Lara
 Cristina Resende Silva Couto. - 2023.

Orientador: José Roberto Camacho.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.8075>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica. I. Camacho, José Roberto, 1954-, (Orient.).
II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

André Carlos Francisco
Bibliotecário - CRB-6/3408

FOTOVOLTAICOS DE 1, 2 E 3 DIODOS

Dissertação aprovada para a obtenção de título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia (MG) pela banca examinadora formada por:

Comissão examinadora:

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

Prof. Keiji Yamanaka, PhD – UFU/MG
(Examinador – UFU)

Prof. Igor Santos Peretta, Dr. – UFU/MG
(Examinador – UFU)

Prof. Jacson Hudson Inácio Ferreira, Dr. – IFTM/MG
(Examinador – IFTM)

Uberlândia, 30 de junho de 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 783, PPGEELT				
Data:	Trinta de junho de dois mil e vinte e três	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	10:00
Matrícula do Discente:	12022EEL008				
Nome do Discente:	Lara Cristina Resende Silva Couto				
Título do Trabalho:	Algoritmos Genéticos Para Obtenção de Modelo de Parâmetros para Módulos Fotovoltaicos de 1, 2 e 3 Diodos				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Título do projeto: Métodos matemáticos aplicados ao projeto e otimização de máquinas elétricas. Coordenador do projeto: José Roberto Camacho. Agência financiadora: Não há. Número do processo na agência financiadora: Não há. Vigência do projeto: Indefinido, em andamento.				

Reuniu-se na Sala Vermelha do Anexo Gilberto Carrijo, bloco 3N, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Keiji Yamanaka - FEELT/UFU; Igor Santos Peretta - FEELT/UFU; Jacson Hudson Inácio Ferreira - IFTM; José Roberto Camacho, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). José Roberto Camacho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **José Roberto Camacho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/06/2023, às 11:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jacson Hudson Inácio Ferreira, Usuário Externo**, em 30/06/2023, às 11:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Santos Peretta, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/06/2023, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Keiji Yamanaka, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/06/2023, às 14:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4596770** e o código CRC **83A7CCF4**.

“O senhor é minha força e o meu escudo; nele o meu coração confia, e nele recebo ajuda.
Meu coração exulta de alegria, e com meu cântico lhe daria graças.”
Salmos 28:7

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que é meu caminho, a verdade e a vida. Agradeço por ter a oportunidade de estudar e ser agente de transformação social.

Aos meus pais, José Antônio Couto da Silva e Dalva Alice de Paula Resende Silva, por toda ajuda em minha jornada estudantil, por serem suporte e incentivadores em todo o tempo da minha formação e por sempre acreditarem no meu potencial, de forma incondicional.

Agradeço ao meu marido, Fábio Augusto Branco Mello, pelo apoio em momentos difíceis e ajuda na motivação da busca pelo diploma, sendo parceiro em todas as horas.

Também agradeço às minhas irmãs: Larissa Cristiane Resende Couto, Layla Paola Resende Couto e Larissa Rodrigues Santiago por estarem comigo independente do momento com amor e carinho.

Às minhas tias Ana Maria de Paula Resende, Lucia de Paula Resende, ao tio Marcelo Couto da Silva, aos avós, Marieta Cândida de Resende, Maria José Couto e José Eli da Silva o meu muito obrigada pelo apoio.

Ao meu professor e orientador, José Roberto Camacho, por estar sempre disposto a ajudar e direcionar, sempre pronto e dedicado a profissão, obrigada pelas conversas e por ser um profissional exemplar como professor.

RESUMO

Dentre as técnicas computacionais, os algoritmos genéticos têm sido amplamente utilizados na otimização de sistemas e na modelagem de problemas. Este trabalho visa utilizar algoritmos genéticos para obter os parâmetros de modelos de 1, 2 e diodos para módulos fotovoltaicos. Esta pesquisa é motivada pela dificuldade em obter, através de métodos numéricos, os parâmetros de modelos de módulos fotovoltaicos com 2 e 3 diodos. Este modelo possui duas exponenciais em sua equação, o que dificulta a convergência do método iterativo, devido a sua expressão com características rígidas com um passo de solução numérica que atende as exponenciais duplas. Em trabalhos anteriores, o uso de métodos de região de confiança e algoritmos genéticos foi proposto com sucesso como condição inicial para o método de Newton Raphson obter parâmetros de modelo com 1 diodo de módulos fotovoltaicos. Nesta pesquisa, os modelos com 2 e 3 diodos não convergiram para o método de Newton Raphson devido às características especiais das equações dos modelos. Com o intuito de simplificar esta tarefa, a proposta é utilizar algoritmos genéticos para obtenção destes parâmetros, sem a necessidade de utilizar métodos numéricos específicos mais complexos citados na literatura que sejam adequados para convergência. Apesar dos algoritmos genéticos não convergirem para os mesmos resultados para cada solução do mesmo problema, observou-se que a diferença é muito pequena e não compromete a obtenção dos parâmetros para diferentes soluções. Uma das principais formas de melhorar a eficiência das células fotovoltaicas é ajustar seus parâmetros de funcionamento, como tensão, corrente e resistência elétrica. Isso pode ser feito por meio de técnicas de otimização, que buscam encontrar os valores ideais desses parâmetros para cada tipo de célula. No entanto, a busca por esses valores pode ser um processo demorado e complexo, pois envolve a avaliação de múltiplos parâmetros e sua interação com as propriedades dos materiais utilizados. Utilizando dados com curvas obtidas através de medições diretas realizadas em um módulo fotovoltaico e comparando com dados via Algoritmos Genéticos (AG) para obter parâmetros para 1, 2 e 3 diodos, concluiu-se que os parâmetros via AG podem ser utilizados, pois ficaram muito próximos das curvas reais. A dissertação descreve as equações para módulos com 1, 2 e 3 diodos e as simulações via parâmetros obtidos por AG e resultados de medição direta.

Palavras-chave: algoritmos genéticos, módulos fotovoltaicos, determinação de parâmetros.

ABSTRACT

Among computational techniques, genetic algorithms have been widely used in system optimization and problem modeling. This work aims to use genetic algorithms to obtain the parameters of models of 1, 2 and 3 diodes for photovoltaic modules. This research is motivated by the difficulty in obtaining, through numerical methods, the parameters of models of photovoltaic modules with 2 and 3 diodes. This model has two exponentials in its equation, which hinders the convergence of the iterative method, due to its expression with rigid characteristics with a numerical solution step that meets the double exponentials. In previous work, the use of trust region methods and genetic algorithms was successfully proposed as an initial condition for the Newton Raphson method to obtain model parameters with 1 diode of photovoltaic modules. In this research, the models with 2 and 3 diodes did not converge to the Newton Raphson method due to the special characteristics of the equations in the models. In order to simplify this task, the proposal is to use genetic algorithms to obtain these parameters, without the need to use more complex specific numerical methods cited in the literature that are suitable for convergence. Although the genetic algorithms do not converge to the same results for each solution of the same problem, it was observed that the difference is very small and does not compromise obtaining the parameters for different solutions. One of the main ways to improve the efficiency of photovoltaic cells is to adjust their operating parameters, such as voltage, current and electrical resistance. This can be done through optimization techniques, which seek to find the ideal values of these parameters for each type of cell. However, the search for these values can be a time-consuming and complex process, as it involves the evaluation of multiple parameters and their interaction with the properties of the materials used. Using data with curves obtained through direct measurements performed on a photovoltaic module and comparing with data via Genetic Algorithms (GA) to obtain parameters for 1, 2 and 3 diodes, it was concluded that the parameters via GA can be used, as they were very close to the real curves. The dissertation describes the equations for modules with 1, 2 and 3 diodes and the parameters obtained through GA and direct measurement results.

Keywords: genetic algorithms, photovoltaic modules, parameter determination.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz Elétrica Brasileira.	23
Figura 2 - Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil.	23
Figura 3 - Crescimento projetado Energia Solar no Brasil.	24
Figura 4 - Constituição interna de uma célula fotovoltaica de silício.	30
Figura 5 - Curvas I-V e P-V de um módulo fotovoltaica.	32
Figura 6 - Influência da variação da irradiância nas curvas V-I e P-V de uma célula fotovoltaica.....	34
Figura 7 - Influência da temperatura nas curvas V-I e P-V de uma célula fotovoltaica com irradiância 1000 W/m ²	34
Figura 8 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica ideal.....	37
Figura 9 - Curva Característica corrente-tensão de uma célula de silício no escuro e iluminada célula de silício no escuro e iluminada.	37
Figura 10 - Circuito equivalente - 1 diodo.	40
Figura 11 - Circuito equivalente com 2 diodos.	41
Figura 12 - Circuito equivalente com 3 diodos.	42
Figura 13 - Fluxograma para obtenção dos parâmetros utilizando AG.....	55
Figura 14 - Função de avaliação – 1 Diodo.	58
Figura 15 - Média da FA – 1 Diodo.	59
Figura 16 - Curva Real I-V x Curva Simulada I-V – 1 Diodo	59
Figura 17 - Curva Real P-V x Curva Simulada P-V. – 1 Diodo.....	60
Figura 18 - Média Função Avaliação – 2 Diodos.....	61
Figura 19 - Função Avaliação– 2 Diodos.....	61
Figura 20 - Curva Real I-V x Curva Simulada I-V -2 diodos.	62
Figura 21 – Curva Real P-V x Curva Simulada P-V- 2 diodos.	62
Figura 22 - Média da Função Avalia – 3 Diodos.....	63
Figura 23 - Função Avaliação - 3 Diodos.....	63
Figura 24 - Curva Real I-V x Curva Simulada I-V - 3 diodos.	64
Figura 25 - Curva Real P-V x Curva Simulada P-V - 3 diodos.	64
Figura 26 - Nova curva I-V. Real x Simulada - 3 diodos.	65
Figura 27 – Nova curva P-V. Real x Simulada - 3 diodos.....	66
Figura 28 - Curva Real P-V x Curva Simulada P-V - 1 Diodo.	67
Figura 29 – Curva Real I-V x Curva Simulada I-V - 1 Diodo.	67
Figura 30 - Curva Real I-V x Curva Simulada I-V - 2 Diodos.	68
Figura 31 - Curva Real VxP x Curva Simulada VxP - 2 diodos.	69
Figura 32 - Curva Real PxV x Curva Simulada - 3 diodos.	70
Figura 33 - Curva Real I-V x Curva Simulada I-V - 3 Diodos.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites inferiores e superiores dos parâmetros para o modelo de 1 diodo.	56
Tabela 2 - Limites inferiores e superiores dos parâmetros para o modelo de 2 diodos.	57
Tabela 3 - Limites inferiores e superiores dos parâmetros para o modelo de três diodos.	57
Tabela 4 - Resultado das simulações com modelo de 1 diodo em $G = 225 \text{ W/m}^2$ e 25° C	58
Tabela 5 - Resultado das simulações com modelo de 2 diodos em $G = 225 \text{ W/m}^2$ e 25° C	60
Tabela 6 - Simulações modelo 3 diodos.	62
Tabela 7 - Valores iniciais passado para o modelo.	65
Tabela 8 - Novos Valores iniciais passado para o modelo.	65
Tabela 9 - Simulações curva 52° C e $G = 860.2 \text{ W/m}^2$ - 1 Diodo.	66
Tabela 10 - Simulações curva 52° C e $G = 860.2 \text{ W/m}^2$ - 2 Diodos.	68
Tabela 11 - Simulações 52° C e $G = 860.2 \text{ W/m}^2$ - 3 diodos.	69

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Contextualização	21
1.2	Motivação	22
1.3	Objetivos	25
1.4	Estado da arte	25
2	TEORIA E MÉTODOS	29
2.1	Módulos fotovoltaicos	29
2.1.1	Estrutura da célula fotovoltaica de silício	30
2.1.2	Características das células	31
2.1.3	Influência da Temperatura e da Radiação Solar na Curva Característica da Célula Fotovoltaica	33
2.1.4	Eficiência de conversão	35
2.1.5	Circuito Equivalente Ideal	36
2.1.6	Circuito Equivalente Real	39
2.2	Algoritmos evolucionários	43
2.3	Algoritmos Genéticos	44
2.3.1	População inicial	45
2.3.2	Função de avaliação	45
2.3.3	Métodos de seleção	46
2.3.4	Operadores genéticos	47
3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	49
4	OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO COM 1, 2 E 3 DIODOS UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS	55
4.1	Função de avaliação	56
4.2	Análise dos resultados aplicando AG com modelo de 1 diodo em $G = 225 \text{ W/m}^2$ e 25° C	57
4.3	Análise dos resultados aplicando AG com modelo de 2 diodos em $G = 225 \text{ W/m}^2$ e 25° C	60
4.4	Análise dos resultados aplicando AG com modelo de 3 diodos em $G = 225 \text{ W/m}^2$ e 25° C	62
4.5	Análise dos resultados aplicando AG com modelo de 1 diodo em $G = 860.2 \text{ W/m}^2$ e 52° C	66
4.6	Análise dos resultados aplicando AG com modelo de 2 diodos em $G = 860.2 \text{ W/m}^2$ e 52° C	68
4.7	Análise dos resultados aplicando AG com modelo de 3 diodos em $G = 860.2 \text{ W/m}^2$ e 52° C	69

5	CONCLUSÕES	71
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A energia elétrica é um recurso vital para o progresso dos países e o bem-estar da população, no entanto, com o crescimento populacional, o consumo de energia também aumenta, o que demanda a ampliação da capacidade de geração de energia elétrica e o desenvolvimento de fontes mais eficientes e sustentáveis.

Não obstante existem diversas fontes de energia no mundo. Grande parte da energia utilizada é proveniente de fontes não renováveis, como os combustíveis fósseis. Porém, essa tendência tem mudado nos últimos anos, com o avanço das fontes renováveis na matriz energética mundial.

Entre as fontes renováveis de energia, a energia solar é a mais abundante. Através dos raios solares, que transportam luz e calor, é possível captar a energia solar de forma limpa e sustentável. Outras fontes de energia, como a biomassa, a energia hidráulica e eólica, também têm origem na energia solar.

A energia solar pode ser aproveitada através de diferentes sistemas, sendo os mais comuns os sistemas fotovoltaicos e heliotérmicos. Os sistemas fotovoltaicos convertem a irradiação solar diretamente em eletricidade, através de painéis solares de silício, enquanto os sistemas heliotérmicos geram eletricidade a partir do aquecimento de fluidos.

Os sistemas fotovoltaicos apresentam diversas vantagens em relação a outras fontes de energia. Têm baixa manutenção, são adequados para áreas remotas e de difícil acesso, possuem fácil instalação e têm vida útil economicamente viável.

Além disso, a energia solar é uma fonte de energia renovável e praticamente inesgotável, o que a torna uma opção cada vez mais atrativa para o suprimento das necessidades futuras de energia no mundo. A crescente demanda por energia limpa e sustentável tem incentivado o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e aprimoramento de sistemas existentes.

Além disso, a energia solar apresenta vantagens econômicas, pois a energia gerada pelo sistema fotovoltaico pode ser utilizada para o consumo próprio ou vendida à rede elétrica, gerando renda extra para o proprietário. Essa possibilidade de geração distribuída de energia elétrica contribui para a descentralização da produção de energia, colaborando para que as comunidades se tornem mais autossuficientes em termos energéticos.

Outra fonte renovável de energia que merece destaque é a energia eólica. A energia dos ventos é captada por meio de turbinas eólicas que convertem a energia cinética do vento em energia elétrica. A energia eólica apresenta vantagens semelhantes à energia solar, como a não poluição do meio ambiente, a fácil manutenção e a possibilidade de geração distribuída. Além disso, é uma fonte de energia que pode se tornar bastante previsível e confiável, uma vez que os ventos são mais intensos e regulares em determinadas áreas geográficas.

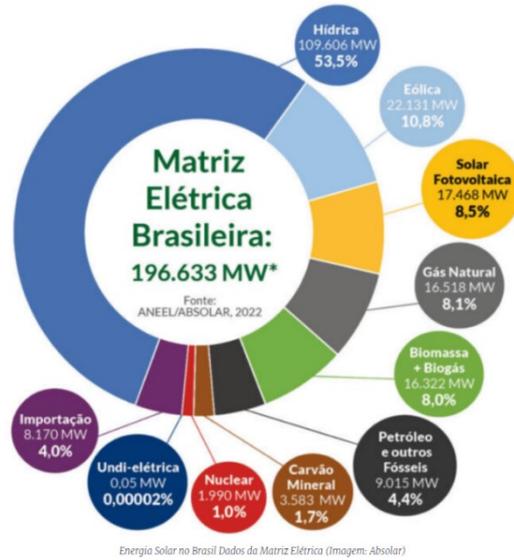
Como ainda, a energia hidrelétrica também é uma fonte renovável de energia e amplamente utilizada em todo o mundo, especialmente em países com grande potencial hidráulico, como o Brasil. Essa fonte de energia é gerada pela força das águas dos rios que movem turbinas hidráulicas e geram eletricidade. Embora apresente alguns impactos ambientais, como a alteração do fluxo dos rios e a construção de barragens, a energia hidrelétrica ainda é uma opção interessante, considerando a sua alta capacidade de geração de energia e a sua disponibilidade em longo prazo.

Por fim, a energia da biomassa também é uma fonte renovável importante, especialmente em regiões com grande potencial de produção de biomassa, como as áreas agrícolas e florestais. Essa fonte de energia é obtida a partir da combustão da matéria orgânica, que são os resíduos agrícolas, madeira, bagaço de cana-de-açúcar, entre outros. Embora possa apresentar emissão de gases poluentes, com os filtros de última geração, a energia da biomassa torna-se também uma alternativa interessante para a diversificação da matriz energética e para a valorização de resíduos que seriam descartados.

1.2 Motivação

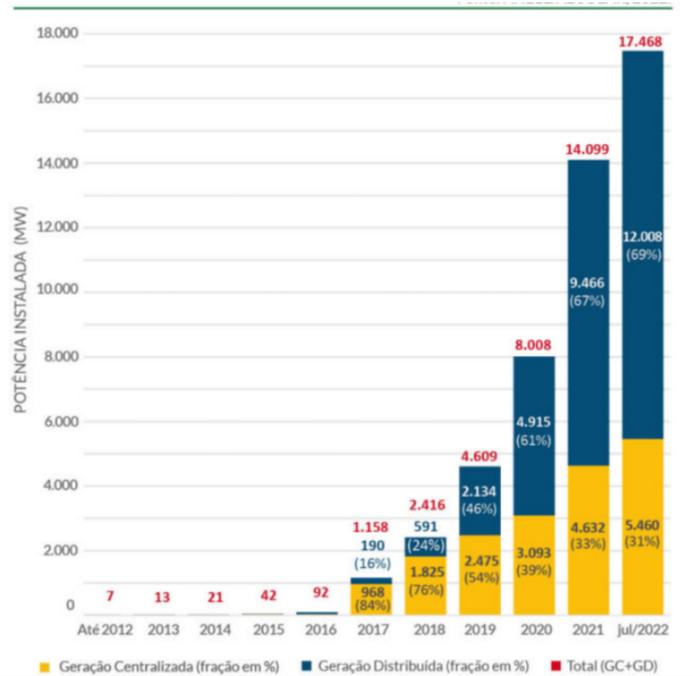
A energia fotovoltaica tem se tornado uma das principais fontes de energia renovável no mundo e no Brasil, e a sua expansão tem sido vertiginosa. Abaixo na figura 1, dados apresentados da ANEEL/ABSOLAR sendo a energia fotovoltaica a terceira do Brasil da matriz energética, figura 2 um crescimento de mais 10.000 MW de potência instalada de 2012 até 2022 e figura 3 uma projeção de crescimento de capacidade instalada em MW até 2031 podendo chegar a 35.000 MW.

Figura 1 - Matriz Elétrica Brasileira.



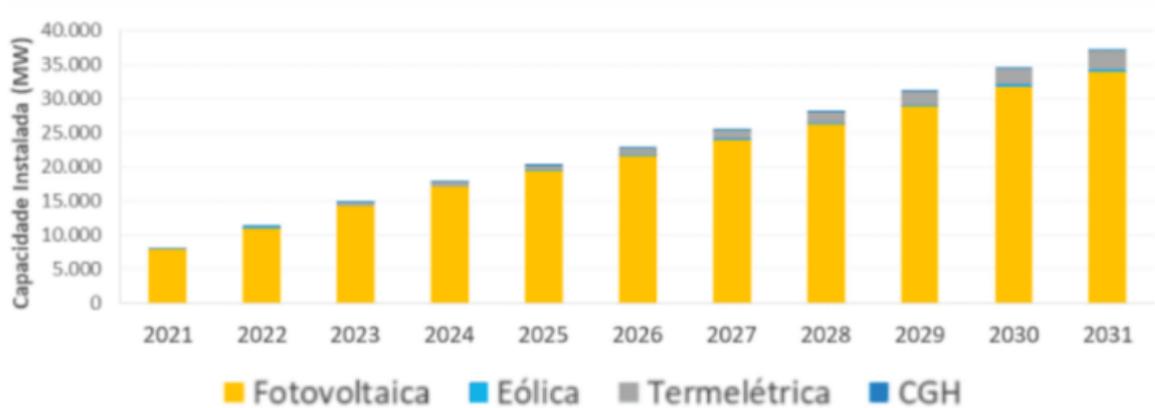
Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2022.

Figura 2 - Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil.



Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2022.

Figura 3 - Crescimento projetado Energia Solar no Brasil.



Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2022.

Com essa expansão acontecendo em tal velocidade e para que seja eficiente e confiável é fundamental conhecer rapidamente todas as características físicas e elétricas de um módulo fotovoltaico, bem como o seu funcionamento e os fatores que influenciam na geração de energia.

Nesse contexto, um dos principais desafios é a obtenção dos parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos de forma rápida, precisa e confiável. A determinação desses parâmetros é fundamental para o desenvolvimento de modelos matemáticos que consigam prever a produção de energia elétrica a partir destes sistemas.

Para resolver esse problema os algoritmos genéticos têm sido utilizados como ferramenta para a identificação dos parâmetros elétricos de um conjunto de células fotovoltaicas agrupadas em módulos. Essa técnica baseia-se na seleção natural e na teoria da evolução de Darwin, na qual indivíduos mais aptos são selecionados e passam seus genes para a próxima geração.

Assim, a utilização de algoritmos genéticos para a obtenção dos parâmetros elétricos de células fotovoltaicas pode trazer inúmeros benefícios, tais como a redução de custos e tempo de medição, maior precisão dos parâmetros obtidos e a possibilidade de otimização do desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo a obtenção dos parâmetros elétricos de módulos fotovoltaicos por meio da utilização de algoritmos genéticos, considerando os modelos com 1, 2 e 3 diodos. A importância desse estudo reside na sua contribuição para o avanço da tecnologia fotovoltaica, possibilitando o desenvolvimento de sistemas mais eficientes e confiáveis.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver e apresentar um método rápido de segundos de obtenção de parâmetros de células fotovoltaicas utilizando algoritmos genéticos para 1, 2 e 3 diodos. O método proposto será capaz de caracterizar o comportamento do módulo em condições de trabalho e extrair os parâmetros de forma rápida e precisa. Para isso, será realizada uma análise da literatura sobre algoritmos genéticos e sua aplicação na obtenção de parâmetros de células fotovoltaicas. Serão identificados os parâmetros a serem obtidos e os modelos matemáticos correspondentes.

Na sequência será desenvolvida uma metodologia para a implementação do algoritmo genético e serão realizados testes para avaliar sua eficiência na obtenção dos parâmetros. Serão comparados os resultados obtidos com os valores de referência para verificar a precisão do método.

Ao final, espera-se obter um método eficiente e confiável para a obtenção dos parâmetros de módulos fotovoltaicos utilizando algoritmos genéticos para 1, 2 e 3 diodos. Isso permitirá o desenvolvimento e melhoria do algoritmo de controle de um sistema fotovoltaico, com a busca do ponto de operação de maior geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico.

1.4 Estado da arte

A pesquisa em módulos fotovoltaicos tem sido amplamente explorada devido a crescente importância da energia solar na matriz energética global. Os modelos matemáticos mais comuns para a extração de parâmetros são os de 1 e 2 diodos, mas há um crescente interesse em pesquisas que utilizam o modelo de 3 diodos. Alguns pesquisadores já estão explorando e aprimorando a utilização desse modelo em seus estudos, buscando entender melhor o comportamento dos módulos e aprimorar as técnicas para extração de parâmetros. É importante, portanto, continuar investigando e avaliando o desempenho dos modelos existentes, bem como explorar novas possibilidades de modelagem para o avanço da tecnologia fotovoltaica.

O modelo de um diodo é amplamente utilizado na literatura para a modelagem de módulos fotovoltaicos. No artigo "*Approximate Single-Diode Photovoltaic Model for Efficient I-V Characteristics Estimation*", os autores (MA; MAN; TING; ZHANG; GUAN; WONG, 2013)

aplicam esse modelo por meio de técnicas de aproximação matemática, como mínimos quadrados contínuos para extrair a fotocorrente gerada, a corrente de saturação reversa do diodo e a resistência em paralelo. Além disso, os autores utilizam o método de Newton para encontrar os parâmetros de fator de idealidade e resistência série. Essas abordagens são importantes para o estudo de módulos fotovoltaicos e para a obtenção de parâmetros que possam ser utilizados em modelos de controle e otimização de sistemas fotovoltaicos.

O artigo *"Characterization of PV panel and global optimization of its model parameters using genetic algorithm"* os autores (M.S. Ismail, M. Moghavvemi, T.M.I. Mahlia, 2013) propõe um método para caracterizar painéis fotovoltaicos e otimizar seus parâmetros de modelo usando algoritmos genéticos (AG). O estudo foi realizado utilizando um modelo de 2 diodos e 2 resistores, e foram utilizados dados experimentais para ajustar os parâmetros do modelo. Os resultados mostraram que o uso de AG foi capaz de encontrar uma solução ótima para o ajuste dos parâmetros do modelo, além de obter uma boa precisão na previsão da curva característica corrente-tensão (I-V) do painel fotovoltaico. Esse método proposto pode ser útil para aprimorar a previsão de energia elétrica gerada por sistemas fotovoltaicos, além de melhorar a eficiência energética dos mesmos. O estudo destaca ainda a importância de utilizar métodos de otimização robustos para extrair parâmetros precisos de modelos fotovoltaicos e melhorar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

Outro artigo, intitulado *"Solar cell parameter extraction using genetic algorithms"* os autores (A Jervase, Hadj Bourdoucen and Ali Al-Lawati. 2001) apresentam uma metodologia para a extração de parâmetros de células solares usando algoritmos genéticos (AG). O objetivo do estudo é desenvolver um método de extração de parâmetros que possa ser aplicado a qualquer tipo de célula solar, independentemente de seu modelo matemático. Os autores utilizaram dados de tensão-corrente (V-I) medidos de uma célula solar comercial para validar a metodologia proposta. O modelo de célula solar usado para a extração de parâmetros foi o modelo de 2 diodos. Para realizar a extração de parâmetros, os autores utilizaram um algoritmo genético que busca os valores dos parâmetros que minimizam o erro entre os dados medidos e os dados simulados pelo modelo de célula solar. A eficácia do método proposto foi avaliada por comparação com o método de ajuste de curva convencional. Os resultados mostraram que o método proposto utilizando AG apresentou melhores resultados do que o método convencional em termos de precisão e tempo de execução. Como conclusão, o estudo apresenta uma metodologia eficiente e precisa para a extração de parâmetros de células solares usando algoritmos genéticos, o que pode ter aplicações práticas em projetos de sistemas fotovoltaicos, nos quais a precisão dos parâmetros é crucial para maximizar a geração de energia.

Em um seguinte artigo, "*A simple approach to extract the unknown parameters of PV modules*" de (HUSSEIN, 2017), foi apresentado um método simples e eficiente para extrair os parâmetros desconhecidos de módulos fotovoltaicos. O método proposto é baseado na resolução do modelo de circuito equivalente de um diodo e utiliza dados experimentais de corrente e tensão para calcular os parâmetros fotovoltaicos. Os autores realizaram experimentos em três diferentes tipos de módulos fotovoltaicos e compararam os resultados obtidos pelo método proposto com os valores fornecidos pelos fabricantes. Os resultados mostraram que os valores dos parâmetros extraídos pelo método proposto foram muito próximos dos valores fornecidos pelos fabricantes. Além disso, o artigo apresenta uma comparação do método proposto com outros métodos de extração de parâmetros, como o método de regressão linear e o método de mínimos quadrados ponderados. Os resultados mostraram que o método proposto apresentou uma precisão superior na extração dos parâmetros fotovoltaicos. Em resumo, o artigo propõe um método simples e eficiente para a extração de parâmetros de módulos fotovoltaicos, utilizando dados experimentais de corrente e tensão. Os resultados obtidos demonstram a eficácia do método proposto em relação a outros métodos de extração de parâmetros.

O modelo de 2 diodos (DDM), também conhecido como *double-diode model*, em inglês, é comumente utilizado em situações quando há baixa irradiância. A seguir, serão discutidos alguns artigos utilizados na pesquisa sobre esse modelo.

No artigo "*Parameter extraction of solar photovoltaic modules using penalty-based differential evolution*" os autores (Ishaque, Salam, Mekhilef e Shamsudin, 2012) apresentam uma abordagem promissora para a extração de parâmetros de módulos fotovoltaicos em diferentes condições ambientais, uma vez que utiliza o método de evolução diferencial baseado em penalidade. O método foi capaz de obter sete parâmetros, incluindo os parâmetros de 2 diodos, com grande precisão, gerando curvas V-I idênticas às curvas experimentais. No entanto, é importante notar que os dados experimentais utilizados foram obtidos das fichas técnicas dos fabricantes, não considerando a deterioração do desempenho dos módulos com o tempo de uso, e esse é um dos principais objetivos do trabalho aqui desenvolvido.

No Laboratório de Energias Alternativas e Proteção de Sistemas (LEAPSE) da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, uma pesquisa semelhante foi realizada em 2011 por Pollyana Rodrigues (MSc). O estudo teve como objetivo extrair os parâmetros de módulos fotovoltaicos a partir de curvas medidas, utilizando o método iterativo da região de confiança e modelos elétricos com simples e dupla exponenciais. Os resultados da pesquisa foram publicados em 2 artigos, são eles: "*The Application of Trust Region Method to*

Estimate the Parameters of Photovoltaic Modules through the Use of Single and Double Exponential Models" e *"The Trust Region Methods Applied to the Extraction of the Parameters for Photovoltaic Panels"* (RODRIGUES; CAMACHO; MATOS, 2011). A autora aplicou o modelo de um diodo para extrair os cinco parâmetros e também utilizou o modelo de 2 diodos, onde os fatores de idealidade foram considerados fixos em $m_1 = 1$ e $m_2 = 2$, extraindo cinco parâmetros, $I_{ph}, I_{s1}, I_{s2}, R_s$ e R_p .

Outro artigo analisado se intitula *"Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration"* nele é discutido o modelo de 3 diodos, que é usado para descrever as características elétricas das células solares multicristalinas. Este modelo é capaz de levar em consideração a influência dos limites de materiais e correntes de fuga através da periferia da célula fotovoltaica, o que o torna mais preciso para a análise desses tipos de células (NISHIOKA; SAKITANI; URAOKA; FUYUKI, 2007).

A falta de consideração da deterioração dos módulos fotovoltaicos ao longo do tempo de uso pode gerar problemas na previsão da geração de energia, visto que a curva real do módulo se altera ao longo do tempo. Além disso, fatores como sombreamento e a queima de células também podem impactar significativamente na curva V-I do módulo, sendo necessário considerá-los para uma análise mais precisa. Dessa forma, é importante desenvolver pesquisas que considerem esses fatores para obter uma curva V-I realista ao longo de toda a vida útil do módulo fotovoltaico.

2 TEORIA E MÉTODOS

O objetivo deste capítulo é apresentar as teorias fundamentais sobre módulos fotovoltaicos que são relevantes para o desenvolvimento do trabalho, assim como uma descrição detalhada dos Algoritmos Genéticos que serão utilizados na pesquisa. Diferentes métodos foram estudados, mas optou-se pelo uso exclusivo de Algoritmos Genéticos para a extração dos parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos, considerando as vantagens em lidar com problemas de otimização não lineares complexos.

2.1 Módulos fotovoltaicos

A obtenção de energia elétrica através do uso da célula solar por meio do efeito fotovoltaico, é um fenômeno físico que ocorre quando a radiação eletromagnética do Sol incide sobre materiais semicondutores específicos presentes na célula. Essa interação faz com que os elétrons livres dos átomos contidos nas células fotovoltaicas sejam excitados pelos fótons e pela diferença de potencial gerem um fluxo de eletricidade. O processo de conversão é direto e sem a emissão de quaisquer poluentes, sendo uma fonte de energia limpa e renovável. (VILLALVA e GAZOLI, 2013)

A tecnologia fotovoltaica tem sido amplamente estudada e aprimorada nos últimos anos. Este aprimoramento e produção de módulos em larga escala resultou em uma queda significativa nos custos de produção de energia solar. A conversão de energia solar em eletricidade é uma fonte de energia renovável e limpa que não emite gases de efeito estufa ou poluentes atmosféricos, e é uma das principais alternativas aos combustíveis fósseis para a geração de eletricidade. Além disso, as células fotovoltaicas podem ser integradas a uma variedade de dispositivos, desde pequenos carregadores de bateria para dispositivos móveis, até grandes sistemas de energia para residências e empresas. A pesquisa contínua em materiais semicondutores, processos de fabricação e sistemas de integração contribuem para o aprimoramento constante da tecnologia fotovoltaica, tornando-a cada vez mais acessível e eficiente.

A tecnologia mais comum e utilizada na fabricação de módulos fotovoltaicos é a baseada nos semicondutores silício e germânio, devido à abundância desses materiais na crosta terrestre. As células solares de silício e germânio podem ser dopadas com impurezas de fósforo e boro para criar camadas com carga negativa e positiva, respectivamente, criando um campo elétrico

que empurra os elétrons livres para as bases metálicas, gerando uma corrente elétrica quando a célula é exposta à luz solar. No entanto, uma célula solar individual produz pouca energia, e é necessário conectar várias células em série ou em paralelo para formar um módulo fotovoltaico que possa gerar uma quantidade significativa de energia. (Villalva, M. G., & Gazoli, J. R. 2013).

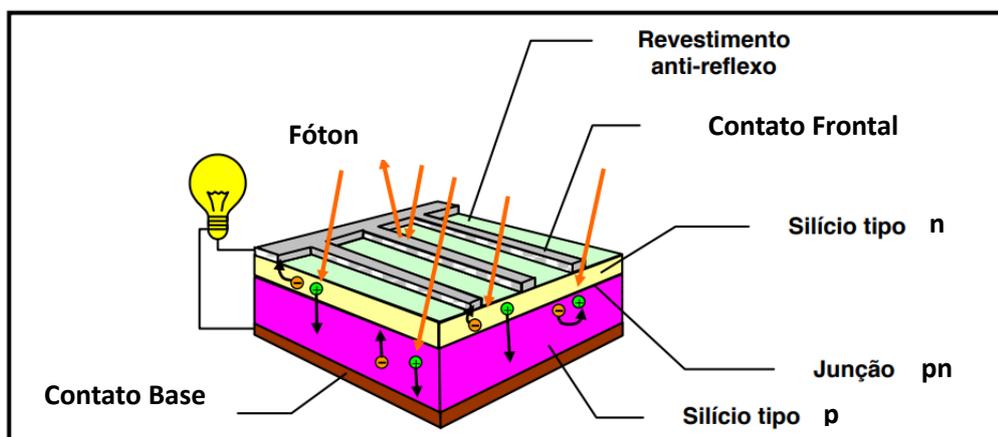
Além disso, existem outras tecnologias utilizadas na fabricação de módulos fotovoltaicos, como os módulos de filme fino, que são feitos a partir de materiais como o Telureto de Cádmio (CdTe) e o Cobre, Índio, Gálio, Selênio (CIGS). As células solares desse tipo são feitas de uma camada fina desses materiais em um substrato. Esses materiais apresentam alta eficiência na conversão da energia solar em eletricidade, além de serem mais leves e flexíveis que os módulos de silício. No entanto, esses materiais possuem limitações em relação à durabilidade e à estabilidade térmica.

É importante destacar que o processo de fabricação dos módulos fotovoltaicos requer uma grande quantidade de energia e recursos naturais, além de gerar emissões de gases do efeito estufa. Por isso, a busca por tecnologias mais sustentáveis e eficientes tem sido uma preocupação constante no desenvolvimento da energia solar.

2.1.1 Estrutura da célula fotovoltaica de silício

A figura 4, apresenta esquematicamente como é a constituição interna de uma célula fotovoltaica de silício.

Figura 4 - Constituição interna de uma célula fotovoltaica de silício.



Fonte: CARNEIRO, 2010.

Uma célula fotovoltaica de silício, como a apresentada na figura 1, geralmente é composta pelos seguintes elementos: contatos frontais que atuam como terminal negativo; um

revestimento antirreflexo que reduz a reflexão dos fótons incidentes; uma região tipo n dopada com fósforo, que contém um excesso de elétrons; uma região tipo p dopada com boro, que contém um excesso de lacunas; e um contato base, um terminal positivo localizado na parte inferior da célula. A camada tipo n tem cerca de 300 nm de espessura, enquanto a camada tipo p tem cerca de 250 μm de espessura. A presença desses elementos permite que a célula fotovoltaica converta a radiação solar em eletricidade. (Carneiro, 2010)

Além dos elementos descritos anteriormente, outras camadas e materiais podem ser adicionados para melhorar o desempenho das células fotovoltaicas, como, camadas de dióxido de titânio para aumentar a eficiência da absorção da luz eletromagnética ou camadas de silício amorfo para diminuir os custos de produção.

No entanto, apesar dos avanços tecnológicos, ainda existem desafios a serem superados na produção de células fotovoltaicas, como a redução dos custos de produção e a melhoria da eficiência energética. Porém, com o crescimento da demanda por fontes de energia renováveis e a consequente redução dos custos de produção, a energia fotovoltaica tem se tornado uma alternativa cada vez mais viável e promissora para a produção de energia limpa e renovável. (GREEN, M. A. et al. 2021).

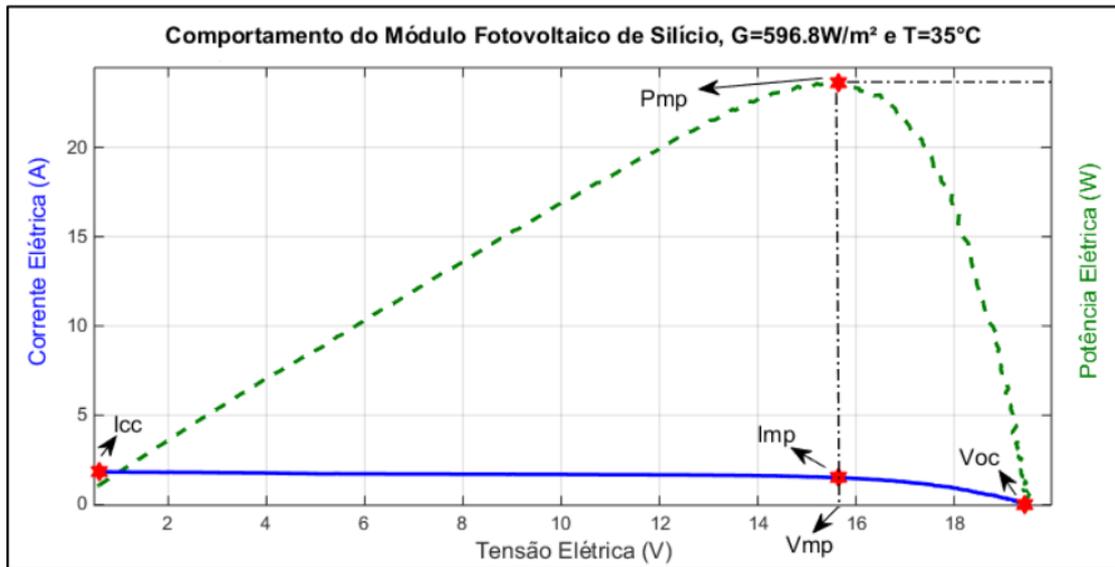
2.1.2 Características das células

O fabricante de um módulo fotovoltaico disponibiliza algumas informações técnicas sobre o produto, incluindo a tensão de circuito aberto (V_{oc}), que é a tensão medida quando o módulo não está conectado a nenhuma carga, a corrente de curto-circuito (I_{sc}), que é a corrente produzida quando o módulo está em curto-circuito, e a máxima potência (P_{max}) do módulo, que é alcançada quando a corrente de máxima potência (I_{mp}) e a tensão de máxima potência (V_{mp}) são obtidas (RODRIGUES, 2012).

Cada célula fotovoltaica possui uma curva característica que relaciona a corrente e a tensão elétrica produzidas em seus terminais, denominada curva V-I. Ao unir os pontos da curva, obtém-se a relação entre a potência gerada e a diferença de potencial aplicada. A figura 5 apresenta um exemplo típico da curva V-I de um módulo fotovoltaico de silício monocristalino, mostrando que a potência gerada é nula quando não há tensão ou corrente, representados pelos pontos I_{cc} e V_{oc} , respectivamente. O ponto de máxima potência (P_{mp}) é o valor de tensão e corrente em que a potência fornecida pelo módulo é máxima. Esses parâmetros, juntamente

com a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto são características técnicas fornecidas pelos fabricantes de módulos fotovoltaicos. (REIS, 2018).

Figura 5 - Curvas I-V e P-V de um módulo fotovoltaica.



Fonte: REIS, 2018.

A potência de pico medida em Watt-pico (W_p) é a característica mais significativa das células fotovoltaicas, representando a potência máxima que a célula pode gerar quando em pleno funcionamento com carga acoplada aos seus terminais. Para otimizar a potência de saída do módulo fotovoltaico é necessário monitorar continuamente a corrente (I) e a tensão (V) geradas pela placa, permitindo o controle da potência fornecida à carga.

No entanto, a potência da placa pode ser influenciada por outras condições, como a temperatura local e a Irradiância direta na placa. Enquanto a variação de temperatura ocorre de forma mais lenta, a Irradiância pode apresentar mudanças bruscas em questão de segundos, como o bloqueio do sol por uma nuvem no céu. Por esse motivo, é necessário um algoritmo capaz de gerar continuamente a curva do módulo para detectar as mudanças do ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico.

Vale destacar que um módulo fotovoltaico não apresenta uma tensão de saída constante em seus terminais, já que a tensão depende da corrente e vice-versa. O valor da tensão e da corrente nos terminais do módulo é influenciado pela carga conectada a eles. Quando conectamos um aparelho que demanda muita corrente, a tensão tende a cair, enquanto uma carga que demanda pouca corrente faz a tensão do módulo ser mais elevada, tendendo à tensão de circuito aberto. (VILLALVA, 2015)

Por isso, é fundamental entender que a potência de saída de um módulo fotovoltaico depende de diversos fatores, como a carga conectada, a temperatura e a Irradiância. Para maximizar a eficiência energética do sistema fotovoltaico é preciso monitorar continuamente os valores de corrente e tensão do módulo, permitindo o controle da potência fornecida à carga e a detecção de possíveis mudanças no ponto de máxima potência. Essas ações podem ser realizadas por algoritmos de controle e otimização, que permitem obter o máximo de energia possível a partir do sistema fotovoltaico. (VILLALVA, 2015)

2.1.3 Influência da Temperatura e da Radiação Solar na Curva Característica da Célula Fotovoltaica

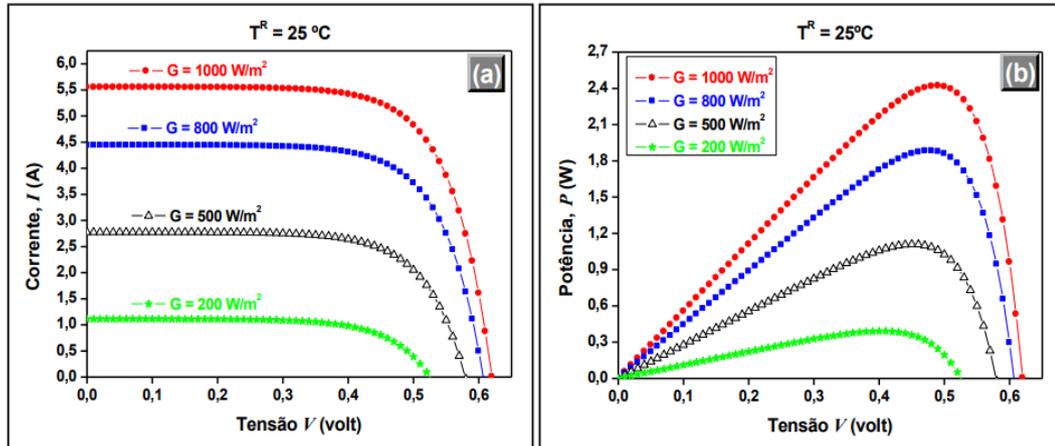
A temperatura e a radiação solar são dois fatores que influenciam diretamente na curva característica da célula fotovoltaica. Quando a temperatura da célula aumenta, a tensão de circuito aberto diminui, enquanto a corrente de curto-circuito aumenta. Por outro lado, quando a temperatura diminui, a tensão de circuito aberto aumenta e a corrente de curto-circuito diminui. Essas variações ocorrem devido às mudanças nas propriedades elétricas dos materiais semicondutores presentes na célula fotovoltaica com a temperatura.

Já a radiação solar direta é responsável pela quantidade de elétrons que são gerados dentro da célula fotovoltaica. Quanto maior a intensidade da radiação solar, maior será a quantidade de elétrons gerados, o que resulta em uma maior corrente elétrica na célula. Esse fenômeno é conhecido como efeito fotovoltaico e é responsável pela geração de energia elétrica a partir das células fotovoltaicas.

Assim, é importante destacar que a temperatura e a radiação solar são dois fatores que devem ser considerados na hora de projetar e dimensionar um sistema fotovoltaico. É necessário levar em conta as condições climáticas da região em que o sistema será instalado, a fim de garantir que o sistema forneça a quantidade de energia elétrica desejada ao longo do tempo.

O estudo da variação da irradiância é fundamental para compreender como as células fotovoltaicas respondem a diferentes condições de iluminação. Na figura 6 podemos notar que quando a temperatura é mantida constante em 25°C, é possível observar como as curvas V-I (tensão-corrente) e P-V (potência-tensão) se alteram de acordo com a variação da irradiância solar. Esse tipo de análise permite avaliar a eficiência energética do sistema fotovoltaico em diferentes situações e otimizá-lo para obter o máximo de energia possível.

Figura 6 - Influência da variação da irradiância nas curvas V-I e P-V de uma célula fotovoltaica.

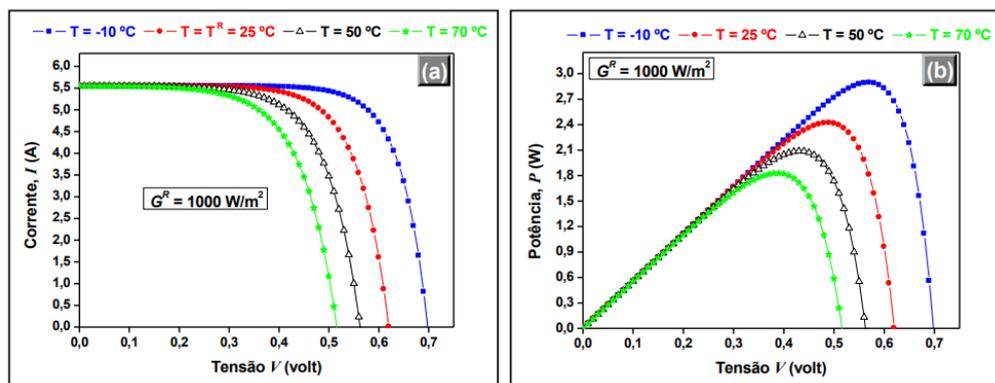


Fonte: CARNEIRO, 2010.

A pesquisa de Carneiro (2010) demonstra como a irradiância pode influenciar a geração de energia elétrica por células fotovoltaicas, fornecendo informações relevantes para a indústria e a pesquisa no campo da energia solar.

A temperatura é um dos principais fatores que afetam o desempenho de uma célula fotovoltaica, e sua influência pode ser observada nas curvas V-I e P-V conforme a figura 7 abaixo.

Figura 7 - Influência da temperatura nas curvas V-I e P-V de uma célula fotovoltaica com irradiância 1000 W/m^2 .



Fonte: CARNEIRO, 2010.

Dessa forma, é importante considerar a temperatura ambiente ao projetar sistemas fotovoltaicos, pois ela pode afetar significativamente a eficiência energética do sistema. É comum utilizar a temperatura padrão de 25°C para comparar o desempenho de diferentes células fotovoltaicas, mas é importante lembrar que a temperatura real pode variar consideravelmente de acordo com as condições ambientais e de operação do sistema.

Portanto, é importante considerar tanto a temperatura quanto a irradiância ao projetar sistemas fotovoltaicos e avaliar o desempenho das células fotovoltaicas. A combinação desses fatores pode resultar em curvas V-I e P-V bastante diferentes, e entender essas diferenças é fundamental para maximizar a eficiência energética do sistema.

2.1.4 Eficiência de conversão

O conceito de eficiência de conversão é fundamental no estudo de sistemas fotovoltaicos. A eficiência de conversão é definida como a razão entre a potência elétrica produzida pela célula fotovoltaica e a potência da energia solar incidente na célula. Em outras palavras, é a capacidade da célula em converter a energia solar em energia elétrica.

O conceito em questão pode ser visualizado na equação 2.1:

$$\eta = \frac{P_{Gerada}}{P_{incidente}} = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{SC}}{P_{incidente}} \quad (2.1)$$

O Fator de Forma (*FF*), também conhecido como *fill factor*, em inglês, é um parâmetro que representa o desempenho do módulo fotovoltaico e é fornecido pelos fabricantes. Ele indica o grau de proximidade entre os valores da tensão máxima (V_{max}) e da tensão de circuito aberto (V_{OC}), bem como entre a corrente máxima (I_{max}) e a corrente de curto-circuito (I_{CC}). Quanto mais a curva característica V-I da célula fotovoltaica se aproxima do formato retangular, melhor é a qualidade da célula e, conseqüentemente, maior é o seu fator de forma. Essa informação é importante para avaliar a eficiência do módulo fotovoltaico, pois um fator de forma elevado indica que a célula é capaz de converter uma maior proporção da energia solar incidente em energia elétrica utilizável. O livro citado, "Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica", aborda em detalhes o conceito de Fator de Forma abordando em detalhes os fatores que afetam a eficiência de conversão dos módulos fotovoltaicos (ZILLES, R., MACÊDO, W. N., GALHARDO, M. A. B. e OLIVEIRA S. H. F, 2012).

Entre esses fatores, destacam-se a composição do material semicondutor, o tipo de junção p-n utilizada na célula, o comprimento de onda da luz incidente e a temperatura.

A eficiência de conversão das células fotovoltaicas tem sido aprimorada ao longo dos anos, com a utilização de novos materiais semicondutores e técnicas de fabricação mais avançadas. No entanto, mesmo as células fotovoltaicas mais eficientes ainda apresentam perdas de energia decorrentes de fenômenos físicos, como a reflexão da luz, a recombinação de cargas eletrônicas e a dissipação térmica.

A eficiência de conversão é uma das principais métricas utilizadas na avaliação do desempenho de um sistema fotovoltaico. No entanto, é importante lembrar que a eficiência não é a única métrica relevante na avaliação de um sistema fotovoltaico. Outros fatores como a durabilidade e a confiabilidade do sistema, também devem ser considerados na escolha e dimensionamento do sistema fotovoltaico mais adequado para cada aplicação.

2.1.5 Circuito Equivalente Ideal

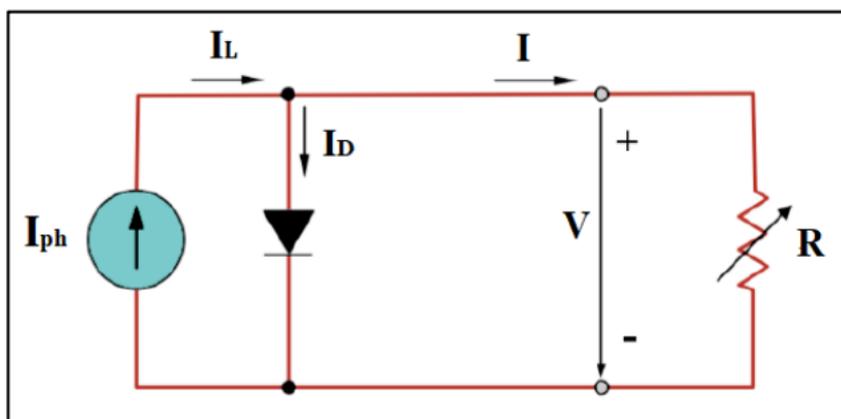
O circuito equivalente ideal é um modelo teórico utilizado para representar uma célula fotovoltaica. Ele é composto por uma fonte de corrente em paralelo com uma fonte de tensão e uma resistência interna em série. A fonte de corrente representa a corrente gerada pela célula fotovoltaica, enquanto a fonte de tensão representa a tensão gerada. A resistência interna representa a resistência do material da célula fotovoltaica e é responsável pela perda de energia devido a dissipação de calor.

O circuito equivalente ideal é importante porque permite analisar e prever o comportamento da célula fotovoltaica em diferentes condições de operação, como variações de irradiância e temperatura. Além disso, é utilizado em projetos de sistemas fotovoltaicos para dimensionar os componentes e maximizar a eficiência energética.

Vale ressaltar que, apesar de ser uma simplificação da realidade, o circuito equivalente ideal é uma ferramenta muito útil para a compreensão do funcionamento das células fotovoltaicas e para o projeto de sistemas fotovoltaicos.

A figura 8 representa um circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica ideal, adaptado do livro de Carneiro (2010).

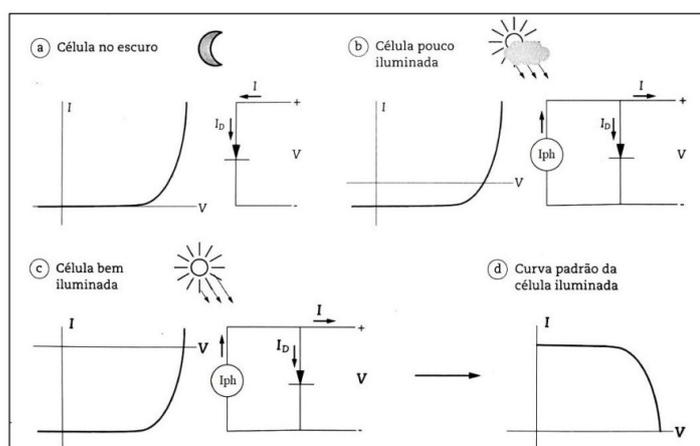
Figura 8 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica ideal.



Fonte: Carneiro, 2010.

A curva V-I de uma célula fotovoltaica é formada pela superposição da curva de corrente fotogerada com a curva do diodo. Quando a célula está no escuro, ela se comporta como um diodo não polarizado, e sua curva V-I fica restrita ao primeiro quadrante. No entanto, quando a célula é iluminada, sua curva V-I se desloca para o quarto quadrante, que é o quadrante de geração, e a corrente passa a ter sentido contrário ao que tinha no escuro. Quanto maior a radiação incidente na célula, maior será o deslocamento da curva. A curva V-I padrão da célula iluminada é espelhada e mostrada sempre no primeiro quadrante por convenção. A figura 9 apresenta as curvas e esquemas elétricos da célula no escuro, pouco iluminada e bem iluminada, bem como a curva V-I padrão da célula iluminada.

Figura 9 - Curva Característica corrente-tensão de uma célula de silício no escuro e iluminada célula de silício no escuro e iluminada.



Fonte: ZILLES, MACÊDO, GALHARDO e OLIVEIRA, 2012.

Do circuito na figura 9c, obtêm-se que:

$$I = I_{ph} - I_D \quad (2.2)$$

A equação 2.2 representa a corrente elétrica resultante na célula fotovoltaica quando está sendo iluminada. O termo I_{ph} representa a corrente foto gerada, ou seja, a corrente elétrica gerada pela absorção de fótons da radiação solar, enquanto o termo I_d representa a corrente elétrica do diodo presente no circuito equivalente da célula.

Quando a célula está no escuro, ou seja, não está sendo iluminada, a corrente fotogerada é zero e a corrente elétrica resultante é igual à corrente do diodo, ou seja, $I = -I_d$. Quando a célula é iluminada, a corrente fotogerada começa a aumentar e, como resultado, a corrente elétrica resultante aumenta até atingir um valor máximo I_{ph} . À medida que a radiação solar diminui, a corrente fotogerada diminui e a corrente elétrica resultante diminui também.

Portanto, a equação 2 é importante para entender a relação entre a corrente fotogerada e a corrente elétrica do diodo na célula fotovoltaica quando está sendo iluminada.

A corrente que flui através do diodo, pode ser definida como:

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{mKT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Sendo cada termo das equações (2.2) e (2.3) definidos abaixo:

I a corrente (A) da célula

I_{ph} a corrente (A) fotogerada.

I_s a corrente (A) de saturação reversa do diodo.

q a carga elementar de um elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ *Coulombs*).

K a constante de Boltzman ($1,381 \times 10^{-23}$ *J/K*)

T a temperatura (K) da célula

m fator de idealidade do diodo

V a tensão(V) de saída da célula.

Dadas as equações (2.2) e (2.3) conclui-se que em um circuito equivalente ideal de uma célula fotovoltaica, seu equacionamento em termos de circuito é dado por:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{mKT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

Quando a célula fotovoltaica não está exposta à luz solar, ou seja, no escuro, a corrente que flui pelo diodo é chamada de corrente de saturação reversa (I_s), também conhecida como corrente de fuga. Essa corrente é gerada pelos portadores de carga minoritários na célula, que se opõem ao fluxo normal dos portadores majoritários gerados por excitação térmica. Quanto maior a temperatura ambiente, maior será a corrente de fuga (ZILLES, R., MACÊDO, W. N., GALHARDO, M. A. B. e OLIVEIRA S. H. F, 2012.)

O fator de idealidade (m) é um parâmetro importante que indica o quão próximo o comportamento da junção PN se encontra em relação ao caso ideal, e é influenciado pelos aspectos relacionados à fabricação do diodo, como o tipo de material e a dopagem. Esse fator varia entre 1 e 2, sendo que quanto mais próximo de 1, mais ideal é o diodo.

2.1.6 Circuito Equivalente Real

O circuito equivalente real de uma célula fotovoltaica inclui componentes adicionais que não são considerados no modelo ideal. A resistência em série (R_s) e a resistência em paralelo (R_p) são incluídas para descrever as perdas de energia no circuito e os efeitos da resistência do material. A resistência série é usada para descrever as perdas devido ao fluxo de corrente na célula fotovoltaica, enquanto a resistência paralela é usada para descrever as perdas devido a correntes de fuga que fluem através do material.

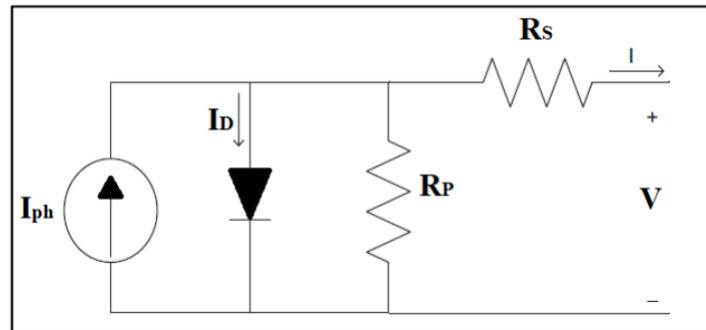
2.1.6.1 Módulo com 1 diodo, R_s e R_p

Para modelar o comportamento elétrico de um módulo fotovoltaico é necessário um circuito equivalente. O modelo de um diodo é o mais comum e simples para representar o módulo fotovoltaico. Ele é um circuito elétrico composto por um diodo em paralelo com uma fonte de corrente, uma resistência em paralelo e uma resistência em série com a carga. A Figura 10 mostra o modelo de um diodo para o circuito equivalente.

Obs. O fator de idealidade (m) e a resistência série (R_s) possuem influência significativa na forma das curvas V-I ao redor do ponto de máxima potência (PMP), enquanto a resistência

paralela R_P determina a inclinação da curva V-I próximo do ponto de corrente de curto-circuito (I_{SC}). Esses aspectos foram abordados em um estudo realizado por Jieming MA et al. (2013).

Figura 10 - Circuito equivalente - 1 diodo.



Fonte: REIS, 2018.

O diodo representa a junção p-n da célula fotovoltaica, a fonte de corrente representa a corrente foto gerada e os resistores representam as resistências ôhmicas paralela e em série da célula fotovoltaica. A corrente foto gerada depende da intensidade da luz incidente e das propriedades dos materiais semicondutores utilizados na célula fotovoltaica. As resistências ôhmicas paralela e série representam a resistência elétrica da célula fotovoltaica e é afetada pela geometria da célula, material semicondutor e condições de operação.

O circuito equivalente de 1 diodo é uma ferramenta útil para a análise e projeto de sistemas fotovoltaicos. Com ele é possível prever o comportamento de módulos fotovoltaicos em diferentes condições de operação, como intensidade de luz, temperatura e carga. Além disso, o modelo do diodo permite o desenvolvimento de algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), que é a condição de operação na qual a célula fotovoltaica gera a máxima potência elétrica possível.

O circuito apresentado na Figura 7 pode ser descrito pela seguinte equação:

$$I = I_{ph} - I_D \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{mKT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_P} \quad (2.5)$$

Onde: q é a carga do elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ Coulombs), K é a constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K), T é a temperatura do módulo.

Para o modelo de 1 diodo, temos 5 parâmetros a serem determinados, sendo eles:

I_{ph} : A corrente fotogerada, que depende da iluminação incidente no dispositivo.

I_D : A corrente do diodo no módulo.

I_R: Queda de tensão devido à corrente que flui através da resistência de série R_s.

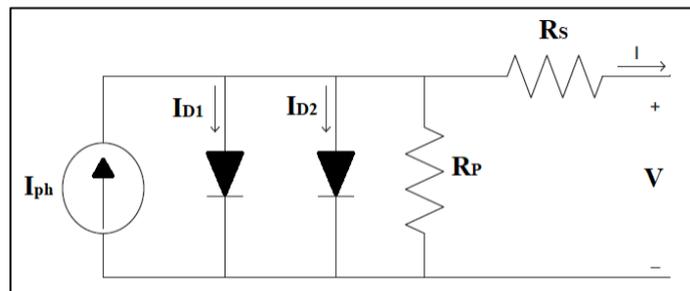
m: O fator de idealidade do diodo.

R_p: A resistência Paralela do circuito.

2.1.6.2 Módulo com 2 diodos

No modelo da figura 8, o módulo fotovoltaico é representado por 2 diodos em paralelo, cada um com uma corrente de saturação e um fator de idealidade diferente. O circuito equivalente também inclui uma resistência em série e uma em paralelo, além de uma fonte de luz, que representa a irradiação solar. Esse modelo supostamente descreve o módulo de forma mais precisa do que o modelo de 1 único diodo, pois leva em conta o fato de que a célula fotovoltaica tem duas camadas de semicondutores, com propriedades elétricas diferentes.

Figura 11 - Circuito equivalente com 2 diodos.



Fonte: REIS, 2018.

A principal justificativa para a utilização de um modelo com 2 diodos é que o modelo com apenas 1 diodo não consegue descrever adequadamente o comportamento da célula fotovoltaica sob baixa intensidade de radiação solar (REIS, L. R. D, 2018).

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{m_1 K_1 N_s T}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{m_2 K_2 N_s T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.6)$$

No qual: I_{s1} e I_{s2} são as correntes de saturação reversa dos diodos (A) e m_1 e m_2 são os fatores de idealidade dos diodos.

Onde: q é a carga do elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ Coulombs), K é a constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K), T é a temperatura do módulo.

Para o modelo de 2 diodos, temos 7 parâmetros a serem determinados, sendo eles:

I_{ph}: A corrente fotogerada, que depende da iluminação incidente no dispositivo.

I_{s1}: A corrente de saturação reversa do primeiro diodo.

I_{s2}: A corrente de saturação reversa do segundo diodo.

I.R_s: Queda de tensão devido à corrente que flui através da resistência de série R_s.

m₁: O fator de idealidade do primeiro diodo.

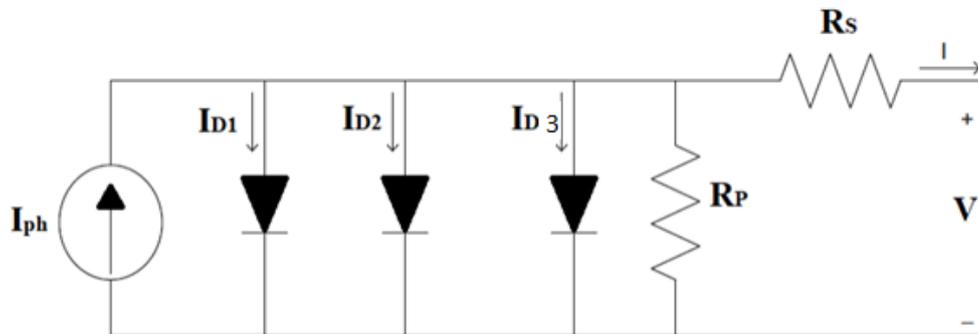
m₂: O fator de idealidade do segundo diodo.

R_p: A resistência paralela do circuito.

2.1.6.3 Módulo com 3 diodos

O modelo de 3 diodos é uma extensão do modelo de 2 diodos e inclui 1 diodo extra em paralelo com o segundo diodo, a fim de representar as perdas por recombinação de carga na camada de transição de espaço-carga.

Figura 12 - Circuito equivalente com 3 diodos.



Fonte: Desenho da autora.

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{m_1 K_1 N_s T}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{m_2 K_2 N_s T}} - 1 \right) - I_{s3} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{m_3 K_3 N_s T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.7)$$

No qual: I_{s1} , I_{s2} e I_{s3} são as correntes de saturação reversa dos diodos (A) e m_1 , m_2 e m_3 são os fatores de idealidade dos diodos.

Onde: q é a carga do elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ Coulombs), K é a constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K), T é a temperatura do módulo.

Para o modelo de 3 diodos, temos 9 parâmetros a serem determinados, sendo eles:

I_{ph} : A corrente fotogerada, que depende da iluminação incidente no dispositivo.

I_{s1} : A corrente de saturação reversa do primeiro diodo.

I_{s2} : A corrente de saturação reversa do segundo diodo.

I_{s3} : A corrente de saturação reversa do terceiro diodo.

$I.R_s$: Queda de tensão devido à corrente que flui através da resistência de série R_s .

m_1 : O fator de idealidade do primeiro diodo.

m_2 : O fator de idealidade do segundo diodo.

m_3 : O fator de idealidade do terceiro diodo.

R_p : A resistência em derivação do circuito.

2.2 Algoritmos evolucionários

Algoritmos evolucionários são técnicas computacionais que buscam soluções para problemas através da simulação do processo evolutivo natural. Esses algoritmos são baseados em algoritmos genéticos que se inspiram na seleção natural de Darwin, e em outros métodos evolutivos, como a estratégia evolutiva e a programação evolutiva.

Esses algoritmos partem de uma população inicial de soluções para um determinado problema, que são avaliadas de acordo com um critério de aptidão (*fitness*). A partir dessa avaliação, é selecionada uma parte da população para reprodução, de forma que os indivíduos mais aptos tenham uma maior chance de serem selecionados. Essa reprodução pode envolver a criação de novas soluções a partir da combinação de características das soluções selecionadas ou a modificação das soluções existentes.

Ao longo das gerações, a população foi submetida a mutações e a processos de seleção natural, que fazem com que as soluções mais aptas sobrevivam e se reproduzam, enquanto as menos aptas sejam eliminadas. Com o tempo, espera-se que a população evolua em direção a soluções cada vez melhores para o problema em questão.

A premissa de um Algoritmo Evolutivo (*AE*) é bastante simples, desde que se esteja familiarizado com o processo de seleção natural. Um *AE* contém quatro etapas gerais: inicialização, seleção, operadores genéticos e terminação. Essas etapas correspondem, em geral,

a um aspecto específico da seleção natural e fornecem maneiras fáceis de modularizar as implementações dessa categoria de algoritmos. Em termos simples, em um *AE*, os membros mais aptos sobrevivem e proliferam, enquanto os membros menos aptos morrem e não contribuem para a reservatório (*pool*) genético de gerações futuras, assim como na seleção natural.

Os algoritmos evolucionários têm sido aplicados em diversas áreas, como otimização de sistemas, planejamento de rotas, controle de processos, aprendizado de máquina e design de circuitos eletrônicos, entre outras (REIS, L. R. D, 2018).

2.3 Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos (AGs) são uma classe de algoritmos de otimização baseados em princípios de seleção natural e genética. Eles foram desenvolvidos para resolver problemas complexos de otimização que não podem ser resolvidos facilmente por métodos convencionais. Os AGs são inspirados no processo evolutivo que ocorre na natureza e tentam simular esse processo em um ambiente computacional (MITCHELL, Melanie. 1998).

Os AGs operam em uma população de soluções candidatas (indivíduos) que são avaliadas em relação ao seu desempenho em uma função objetivo (*fitness*). Os indivíduos mais aptos têm uma maior probabilidade de serem selecionados para reprodução e cruzamento (*crossover*), resultando em uma nova população de indivíduos. Essa nova população é então submetida a uma mutação aleatória para introduzir variação genética e evitar que o algoritmo fique preso em mínimos locais (MITCHELL, Melanie. 1998).

Os AGs são amplamente utilizados em aplicações de otimização em engenharia, finanças, ciência da computação, biologia e outras áreas. Eles são particularmente úteis quando as soluções ótimas são desconhecidas ou quando a complexidade do problema é muito grande para ser resolvida por métodos convencionais.

No contexto de células fotovoltaicas, os AGs podem ser usados para ajustar os parâmetros do circuito equivalente de 1 ou mais diodos para maximizar a eficiência da célula. Esses parâmetros incluem a corrente de saturação dos diodos, o fator de idealidade, a resistência em série e a resistência em derivação. O uso de AGs pode levar a uma otimização mais eficiente do circuito equivalente em comparação com métodos convencionais de ajuste de parâmetros, resultando em uma melhoria na eficiência geral da célula.

2.3.1 População inicial

A população inicial refere-se ao conjunto de soluções iniciais que são geradas aleatoriamente para iniciar o processo de otimização. Essas soluções iniciais são geralmente geradas dentro do intervalo de valores possíveis para cada parâmetro a ser otimizado. A qualidade da população inicial é essencial para garantir uma boa convergência do algoritmo e para evitar ficar preso em mínimos locais (HOUCK, Christopher R.; JOINES, Jeff; KAY, Michael G., 1995).

O tamanho da população inicial depende do número de parâmetros a serem otimizados e da complexidade do problema. Em geral, uma população maior é mais vantajosa, pois aumenta a chance de encontrar uma solução ótima. No entanto, uma população muito grande pode aumentar o tempo de processamento e a complexidade do algoritmo.

Em um programa de Algoritmo Genético, a primeira etapa é a criação da população inicial, que é composta por um número definido de cromossomos, chamado de $Npop$. Essa população é representada por uma matriz em que o número de colunas é igual ao número de variáveis a serem otimizadas, chamado de $Nvar$, e o número de linhas é igual ao número de cromossomos, ou seja, a dimensão da matriz é $Npop \times Nvar$ (HAUPT e HAUPT, 2004).

Para garantir que todos os valores das variáveis estejam no intervalo entre 0 e 1, eles são normalizados. Caso haja restrições para esses valores, elas devem ser levadas em conta durante a geração dos indivíduos. Isso significa que se houver um limite inferior, chamado de p_{min} , e um limite superior, chamado de p_{max} , e um valor normalizado da variável, chamado de p_{norm} , as restrições serão inseridas da seguinte forma durante a criação da população inicial.

$$p = (p_{max} - p_{min})p_{norm} + p_{min} \quad (2.8)$$

2.3.2 Função de avaliação

A função de avaliação, também conhecida como função de avaliação (*fitness*), é um componente fundamental dos algoritmos genéticos. Essa função é responsável por avaliar o quão bem uma solução candidata (indivíduo) resolve o problema de otimização em questão (MITCHELL, Melanie. 1998).

A função de avaliação atribui uma pontuação ou valor numérico para cada indivíduo da população. Esse valor é baseado na medida de adequação da solução candidata em relação ao problema de otimização. Por exemplo, se o problema é maximizar uma função objetivo, então

a função de avaliação atribuirá valores mais altos para as soluções que apresentam um melhor desempenho nessa função (MITCHELL, Melanie. 1998).

A função de avaliação é fundamental para o sucesso dos algoritmos genéticos. Ela orienta a seleção e cruzamento dos indivíduos mais aptos, permitindo que a população evolua em direção a soluções melhores ao longo das gerações.

Uma função de avaliação bem projetada é crítica para o desempenho e eficiência do algoritmo genético. Ela deve ser capaz de avaliar a adequação de uma solução candidata de forma precisa e eficiente, para que o algoritmo possa convergir rapidamente para uma solução ótima ou próxima do ótimo.

$$\text{Função de avaliação} = f(\text{cromossomo}) \quad (2.9)$$

2.3.3 Métodos de seleção

Os métodos de seleção são uma parte fundamental dos algoritmos genéticos, responsáveis por determinar quais indivíduos serão escolhidos para cruzamento e reprodução na próxima geração. Existem diversos métodos de seleção, sendo alguns dos mais comuns:

Seleção por roleta: Nesse método, a seleção é feita de forma aleatória, mas com uma probabilidade proporcional ao valor de aptidão (*fitness*) de cada indivíduo. Ou seja, quanto maior o valor de aptidão (*fitness*) de um indivíduo, maior é a probabilidade de ele ser selecionado para reprodução.

Seleção por torneio: Nesse método, um número fixo de indivíduos (por exemplo, dois ou três) são selecionados aleatoriamente da população e competem entre si. O indivíduo com melhor valor de aptidão (*fitness*) é selecionado para reprodução.

Seleção por classificação: Nesse método, os indivíduos da população são classificados de acordo com seus valores de aptidão (*fitness*), e a seleção é feita com base nessa classificação. Por exemplo, os 10% melhores indivíduos da população podem ser selecionados para reprodução.

Seleção por elitismo: Nesse método, os indivíduos com os melhores valores de aptidão (*fitness*) são preservados na próxima geração, sem cruzamento ou mutação. Isso garante que as melhores soluções encontradas até o momento não sejam perdidas (GOLBERG, David. 1989).

Cada método de seleção possui vantagens e desvantagens, e a escolha do método mais adequado depende do problema específico que está sendo resolvido. Alguns métodos podem ser mais eficientes em determinadas situações, enquanto outros podem ser mais propensos a encontrar soluções subótimas ou cair em mínimos locais. Por isso, é importante avaliar cuidadosamente qual método de seleção utilizar em cada caso.

2.3.4 Operadores genéticos

Os operadores genéticos são uma parte essencial dos algoritmos genéticos, sendo responsáveis por criar novas soluções candidatas (indivíduos) a partir da combinação de indivíduos existentes na população. Os principais operadores genéticos são:

Crossover (cruzamento): Esse operador consiste em combinar partes dos cromossomos de dois indivíduos pais para gerar um novo indivíduo filho. O *crossover* pode ser feito de diversas maneiras, como corte único, corte duplo, corte uniforme, entre outros.

Mutação: Esse operador introduz aleatoriedade na população, alterando aleatoriamente o valor de um ou mais genes de um indivíduo. A mutação é importante para evitar que o algoritmo fique preso em mínimos locais e para aumentar a diversidade genética na população.

Seleção: Como mencionado anteriormente, a seleção é um operador que determina quais indivíduos serão escolhidos para reprodução na próxima geração. Existem diversos métodos de seleção, como seleção por roleta, seleção por torneio, seleção por classificação, entre outros.

Elitismo: Esse operador consiste em preservar os indivíduos com os melhores valores de aptidão (*fitness*) na próxima geração, sem cruzamento ou mutação. Isso garante que as melhores soluções encontradas até o momento não sejam perdidas.

A combinação desses operadores permite que o algoritmo genético explore o espaço de soluções de forma eficiente e encontre soluções ótimas ou próximas do ótimo. A escolha dos operadores mais adequados depende do problema específico que está sendo resolvido, e é importante ajustá-los de forma apropriada para cada caso. Por exemplo, o *crossover* pode ser mais ou menos agressivo, a taxa de mutação pode ser mais ou menos alta, entre outras configurações possíveis (HOLLAND, John H. 1992).

3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis tem sido objeto de intensa pesquisa nas últimas décadas. Entre as fontes renováveis, a energia solar se destaca como uma das mais promissoras, apresentando um grande potencial de crescimento no mundo todo. A célula fotovoltaica é um dos principais dispositivos utilizados atualmente para a conversão da energia solar em energia elétrica.

No entanto, a caracterização das células fotovoltaicas é uma tarefa desafiadora, pois envolve a obtenção de uma série de parâmetros elétricos que descrevem o seu comportamento. Esses parâmetros são necessários para modelar o desempenho do dispositivo e para avaliar a sua eficiência energética.

Dentre os modelos mais utilizados para caracterização de células fotovoltaicas, destacam-se os modelos de 1, 2 e 3 diodos. Esses modelos utilizam diferentes equações para descrever o comportamento da célula fotovoltaica, levando em consideração variáveis como a corrente de saturação, o fator de qualidade, a resistência em série, a resistência em derivação, entre outras.

A obtenção desses parâmetros pode ser realizada experimentalmente ou por meio de simulações computacionais. No entanto, ambas as abordagens apresentam desafios e limitações.

Na abordagem experimental, a caracterização da célula fotovoltaica é realizada por meio de testes em um ambiente controlado, onde são aplicados diferentes níveis de irradiância solar e temperatura. Os dados obtidos são utilizados para ajustar os parâmetros do modelo, por meio de técnicas de otimização.

No entanto, a obtenção dos parâmetros experimentais pode ser afetada por diversos fatores, como o envelhecimento da célula, a variação da temperatura ambiente e a não uniformidade da radiação solar. Além disso, a caracterização experimental pode ser um processo demorado e caro, exigindo equipamentos sofisticados e mão de obra especializada.

Por outro lado, a abordagem computacional permite a simulação do comportamento da célula fotovoltaica em diferentes condições de operação, sem a necessidade de experimentação. Essa abordagem é baseada na solução das equações matemáticas que descrevem o comportamento do dispositivo, por meio de técnicas de otimização.

No entanto, a simulação computacional também apresenta desafios, como a necessidade de modelar de forma precisa o comportamento da célula fotovoltaica, considerando as suas diversas não-linearidades e as limitações do modelo utilizado. Além disso, a obtenção dos

parâmetros por meio de simulação pode ser afetada por incertezas associadas aos dados de entrada, como a irradiância solar e a temperatura.

Diante dos desafios e limitações associados à caracterização de células fotovoltaicas, a pesquisa na área tem se concentrado no desenvolvimento de novas técnicas e abordagens para a obtenção dos parâmetros de forma mais precisa e eficiente.

Entre as técnicas mais recentes, destacam-se a análise de impedância, que permite a obtenção dos parâmetros elétricos por meio da medição da resposta da célula fotovoltaica a um sinal de excitação em diferentes frequências, e o uso de algoritmos de inteligência artificial, que permitem a otimização dos parâmetros.

Todavia, cabe ressaltar que a caracterização da célula fotovoltaica também é importante para garantir a qualidade e a eficiência dos módulos fotovoltaicos. Os fabricantes utilizam a caracterização para garantir que cada módulo produzido atenda aos padrões de qualidade e eficiência especificados. Por meio da caracterização é possível determinar a eficiência do módulo em diferentes condições de operação, como diferentes níveis de irradiação e temperatura.

Outro aspecto importante da caracterização da célula fotovoltaica é o estudo de suas limitações e potencialidades. Por meio da análise dos parâmetros elétricos da célula é possível identificar os fatores que limitam a eficiência da célula e, assim, propor soluções para melhorar sua performance. Além disso, a caracterização também permite identificar as potencialidades da célula em termos de aplicação em diferentes cenários, como em sistemas fotovoltaicos conectados à rede ou em sistemas isolados.

No entanto, a obtenção dos parâmetros elétricos de uma célula fotovoltaica não é uma tarefa trivial. Existem diferentes modelos de equacionamento para uma célula fotovoltaica e cada modelo apresenta diversas variáveis, umas conhecidas e outras não. As variáveis desconhecidas são os parâmetros do módulo fotovoltaico, tais como a corrente de saturação, a resistência série e a resistência de derivação, entre outros.

Para obter os parâmetros elétricos da célula fotovoltaica é necessário realizar experimentos em condições controladas de irradiação e temperatura. Esses experimentos são realizados em um equipamento chamado de analisador de curva I-V, que consiste em uma fonte de corrente contínua e um dispositivo capaz de medir a corrente e a tensão da célula fotovoltaica em diferentes pontos de operação.

A partir dos dados obtidos pelo analisador de curva I-V é possível plotar a curva característica da célula, que relaciona a corrente e a tensão da célula para diferentes níveis de

irradiação e temperatura. A partir dessa curva é possível determinar os parâmetros elétricos da célula, utilizando diferentes modelos matemáticos no equacionamento.

Entre os modelos mais utilizados para a caracterização de células fotovoltaicas, destacam-se o modelo de 1 diodo, o modelo de 2 diodos e o modelo de 3 diodos. O modelo de 1 diodo é o mais simples e considera a célula fotovoltaica como um dispositivo com 1 único diodo em série. Já o modelo de 2 diodos considera que a célula fotovoltaica é composta por 2 diodos em paralelo, cada um com uma corrente de saturação e um fator de idealidade diferente. Por fim, o modelo de 3 diodos é o mais complexo e considera que a célula fotovoltaica é composta por três diodos em paralelo, sendo um deles responsável pela geração de corrente fotovoltaica e os outros dois representando perdas devido à recombinação de portadores de carga.

Cada modelo apresenta vantagens e desvantagens em relação à precisão na obtenção dos parâmetros elétricos da célula fotovoltaica. O modelo de 1 diodo é o mais simples e rápido de ser aplicado, porém, apresenta menor precisão na determinação dos parâmetros.

Entretanto, com o avanço das pesquisas na área, foram desenvolvidos modelos mais complexos que levam em conta mais variáveis e que possuem maior precisão na obtenção dos parâmetros do módulo fotovoltaico. Um desses modelos mais complexos é o modelo de 2 diodos, que considera a presença de duas camadas semicondutoras na célula fotovoltaica e possui maior capacidade de predição da curva característica corrente-tensão.

Apesar da disponibilidade de modelos mais precisos, a obtenção dos parâmetros elétricos da célula fotovoltaica ainda é um problema desafiador, já que nem todas as variáveis do modelo são facilmente mensuráveis. Além disso, as condições de teste das células fotovoltaicas podem afetar os resultados obtidos na caracterização dos parâmetros.

Uma das principais dificuldades é a obtenção da corrente fotogerada, que é a corrente elétrica produzida pela célula fotovoltaica quando exposta à radiação solar. A corrente fotogerada é influenciada por diversos fatores, como a intensidade da radiação solar, a temperatura da célula fotovoltaica e as propriedades dos materiais semicondutores utilizados na célula.

Outro parâmetro importante é a resistência série equivalente (R_s), que representa a perda de tensão elétrica que ocorre no circuito da célula fotovoltaica devido a resistência dos materiais utilizados na fabricação do módulo. A resistência série equivalente é determinante para a eficiência da célula fotovoltaica, já que afeta diretamente a potência máxima, que pode ser obtida a partir da célula.

Além da resistência série, também é importante caracterizar a resistência shunt (R_p), que representa uma corrente de fuga que ocorre na célula fotovoltaica devido a defeitos na

fabricação ou na utilização da célula. A resistência *shunt* pode afetar a eficiência da célula fotovoltaica, já que diminui a tensão máxima que pode ser obtida a partir da célula.

A obtenção dos parâmetros elétricos da célula fotovoltaica é fundamental para o dimensionamento e a avaliação da eficiência dos sistemas fotovoltaicos, que são utilizados para a geração de energia elétrica a partir da radiação solar. A caracterização precisa dos parâmetros elétricos permite a modelagem e simulação do comportamento do sistema fotovoltaico em diferentes condições de operação, o que é importante para o dimensionamento adequado dos componentes do sistema e para a avaliação de sua eficiência energética.

Dessa forma, a caracterização dos parâmetros elétricos da célula fotovoltaica é uma etapa crucial para o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos eficientes e economicamente viáveis. Para isso, é necessário utilizar técnicas experimentais precisas e confiáveis, que permitam a obtenção dos parâmetros com a menor incerteza possível. Além disso, é importante considerar as condições ambientais em que a célula fotovoltaica será utilizada, a fim de avaliar sua eficiência sob diferentes níveis de radiação solar e temperatura.

Por fim, a caracterização dos parâmetros elétricos de uma célula fotovoltaica é fundamental para o dimensionamento e otimização de sistemas fotovoltaicos, bem como para o desenvolvimento de novas tecnologias. A escolha do modelo mais adequado dependerá da precisão requerida, da complexidade do modelo e do tempo disponível para a obtenção dos resultados. É importante ressaltar que a caracterização da célula fotovoltaica deve ser realizada em condições padronizadas de teste, de acordo com normas técnicas, a fim de garantir a comparabilidade dos resultados obtidos por diferentes pesquisadores e laboratórios.

Existem diferentes modelos para a caracterização e simulação do desempenho dos módulos fotovoltaicos, e cada modelo pode ter parâmetros específicos. Sendo os parâmetros comuns em três dos principais modelos utilizados:

Modelo de 1 Diodo:

I_{ph} : Corrente fotogerada (ou corrente de iluminação) [A]

I_s : Corrente de saturação do diodo [A]

I_{sc} : Corrente de curto-circuito (Short Circuit Current) [A]

R_s : Resistência de série do módulo [Ω]

R_{sh} : Resistência em derivação do módulo [Ω]

Modelo de 2 Diodos

I_{ph} : A corrente fotogerada, que depende da iluminação incidente no dispositivo.

I_{s1} : A corrente de saturação reversa do primeiro diodo.

I_{s2} : A corrente de saturação reversa do segundo diodo.

$I.R_s$: Queda de tensão devida à corrente que flui através da resistência em série R_s .

m_1 : O fator de idealidade do primeiro diodo.

m_2 : O fator de idealidade do segundo diodo.

R_{sh} : A resistência em derivação do circuito.

Modelo de 3 Diodos:

I_{ph} : A corrente fotogerada, que depende da iluminação incidente no dispositivo.

I_{s1}, I_{s2}, I_{s3} : As correntes de saturação dos diodos ou outros componentes semicondutores presentes no circuito.

$I.R_s$: Queda de tensão devida à corrente que flui através da resistência em série R_s .

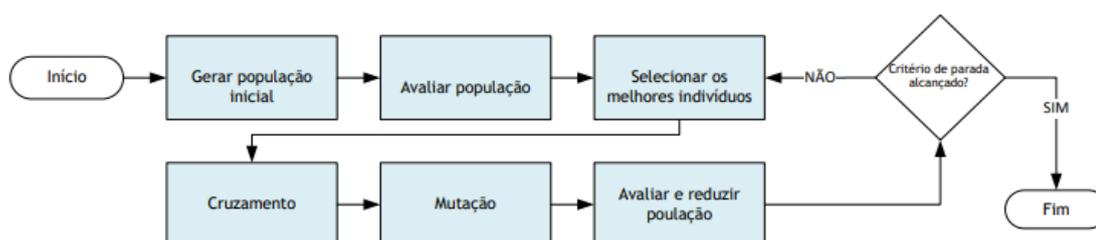
m_1, m_2, m_3 : Parâmetros relacionados aos fatores de idealidade dos diodos ou componentes semicondutores.

R_p : A resistência em derivação do circuito.

4 OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO COM 1, 2 E 3 DIODOS UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Para obtenção dos parâmetros foi utilizado algoritmo genético, conforme o fluxograma abaixo:

Figura 13 - Fluxograma para obtenção dos parâmetros utilizando AG.



Fonte: Desenho da autora.

Seleção dos melhores indivíduos: Nesta etapa do programa, são selecionados os indivíduos que serão utilizados como pais para a geração dos filhos no cruzamento. Para realizar essa seleção, o programa utiliza o método do torneio, no qual três cromossomos são escolhidos aleatoriamente da população e o mais apto dentre eles é selecionado como pai. Essa seleção é repetida várias vezes até que seja preenchido o número desejado de pais.

Cruzamento: Durante o processo de cruzamento, dois cromossomos são utilizados para gerar novos indivíduos, conhecidos como filhos. Para isso, o método de cruzamento adotado é o proposto por Wright (1991), que envolve operadores de combinação linear aritmética. De acordo com a Equação 4.1 apresentada, cada par de pais é capaz de gerar três filhos no processo de cruzamento.

$$\begin{aligned} 1^\circ \text{ filho} &= \text{Pai}(1) \times 0,5 + \text{Pai}(2) \times 0,5 \\ 2^\circ \text{ filho} &= \text{Pai}(1) \times 1,5 - \text{Pai}(2) \times 0,5 \\ 3^\circ \text{ filho} &= \text{Pai}(1) \times 0,5 - \text{Pai}(2) \times 1,5 \end{aligned} \quad (4.1)$$

4.1 Função de avaliação

A função de aptidão, também conhecida como função objetivo ou função *fitness*, é a função que deve ser minimizada ou maximizada pelo algoritmo genético para encontrar a solução desejada. No caso deste programa, a função de aptidão é descrita conforme abaixo:

$$F_A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N f(i_m, V_m, \Phi)^2} \quad (4.2)$$

O objetivo principal do método consiste em reduzir ao mínimo a função F_A , definida na equação (4.2). Idealmente, espera-se que o valor de F_A seja zero. No entanto, em algoritmos genéticos é difícil garantir que o valor seja exatamente zero, uma vez que os indivíduos são gerados de forma aleatória e cada execução do algoritmo pode levar a um valor diferente, que pode ou não estar próximo de zero, dependendo do critério de parada adotado.

As restrições são limites impostos aos parâmetros buscados pelo algoritmo genético, definidos por valores mínimos e máximos. Esses limites garantem que os indivíduos gerados estejam dentro de um espaço de busca viável e coerente com o problema em questão. No programa em questão, as restrições serão aplicadas durante a geração da população inicial, garantindo que todos os cromossomos estejam dentro do intervalo especificado.

As restrições para os modelos de 1, 2 e 3 diodos estão nas tabelas a seguir, seguindo as regras apresentadas por Laíz Rocha de Deus Reis (2018) - Determinação de parâmetros de módulos fotovoltaicos utilizando o método de Newton Raphson e algoritmos genéticos que através do trabalho foi testado inúmeras vezes sendo satisfatórios para seguirmos o trabalho:

Tabela 1 - Limites inferiores e superiores dos parâmetros para o modelo de 1 diodo.

	I_{ph}	I_s	m	R_s	R_p
Limite Inferior	10^{-2}	10^{-2}	1	10^{-4}	50
Limite Superior	5	1	2	10	10^3

Fonte: REIS, 2018.

Tabela 2 - Limites inferiores e superiores dos parâmetros para o modelo de 2 diodos.

	I_{ph}	I_{s1}	I_{s2}	R_s	R_p	m_1	m_2
Limite Inferior	10^{-2}	10^{-2}	1	10^{-4}	50	1	1
Limite Superior	5	1	2	10	10^3	2	2

Fonte: REIS, 2018.

Tabela 3 - Limites inferiores e superiores dos parâmetros para o modelo de três diodos.

	I_{ph}	I_{s1}	I_{s2}	I_{s3}	R_s	R_p	m_1	m_2	m_3
Limite Inferior	10^{-2}	10^{-2}	1	1	10^{-4}	50	1	1	1
Limite Superior	5	1	2	2	10	10^3	2	2	2

Fonte: REIS, 2018.

4.2 Análise dos resultados aplicando AG com modelo de 1 diodo em $G = 225 \text{ W/m}^2$ e 25° C

Para simulação da curva com 25° C e $G = 225 \text{ W/m}^2$, vários parâmetros foram testados conforme a tabela 4 abaixo

Tabela 4 - Resultado das simulações com modelo de 1 diodo em $G = 225 \text{ W/m}^2$ e 25° C .

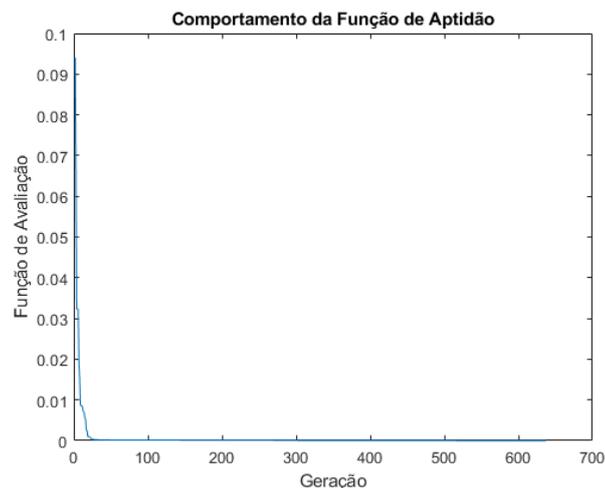
Simulações - Curva 1 ($T = 25^\circ \text{ C}$ e $G = 225 \text{ W/m}^2$)											
Teste	I _{ph} (A)	I _s (μA)	m	R _s (Ω)	R _p (Ω)	FA	Tempo (s)	N° Ger	Taxa Mut.	Taxa Cross.	Tam
1	0,6687	2,060	15,827	1,1686	120,5853	9,67E-08	1,3668	3000	0,1	0,8	250
2	0,6687	2,0063	1,3825	1,1685	120,5881	9,20E-07	1,7509	3000	0,1	0,8	250
3	0,6687	2,0044	1,3824	1,1688	120,5824	9,31E-07	2,0447	1000	0,2	0,8	250
4	0,6687	2,0079	1,3826	1,1684	120,5898	9,69E-07	5,6075	3000	0,1	0,7	250
5	0,6687	2,0052	1,3824	1,1687	120,5814	9,97E-07	1,4112	500	0,3	0,8	250
6	0,6687	2,0316	1,3839	1,1651	120,6602	1,36E-05	1,703	500	0,2	0,8	250
7	0,6685	2,0392	1,3843	1,165	120,6638	1,79E-05	3,2776	1000	0,05	0,7	250
8	0,6685	2,1915	1,3923	1,1458	121,0579	8,49E-05	9,1093	3000	0,05	0,7	250
9	0,6684	2,2193	1,3937	1,1423	121,1577	9,47E-05	3,1465	1000	0,1	0,8	250
10	0,6685	2,2793	1,3667	1,1385	121,0923	1,39E-04	1,6155	500	0,4	0,8	250
11	0,6682	2,4952	1,4069	1,1155	121,7249	2,01E-04	1,7329	500	0,05	0,7	250
12	0,6681	2,5616	1,4099	1,1058	121,8907	2,25E-04	1,8057	500	0,05	0,8	250
13	0,6694	1,5223	1,3528	1,2333	119,0904	2,51E-04	0,2755	65	0,1	0,8	250
14	0,6681	2,7005	1,416	1,0921	121,9904	2,77E-04	3,3491	1000	0,1	0,7	250
15	0,6695	1,4326	1,3464	1,2492	118,9146	3,05E-04	3,3853	1000	0,05	0,8	250

Fonte: Simulação via Octave.

Analisando a tabela podemos dizer que o melhor resultado foi obtido com taxa de mutação em 0.1 e taxa de *crossover* em 0.8 e com número de geração igual a 3000, com esses parâmetros foi obtida a raiz do valor quadrático médio, então obtivemos $9,67 \text{ e}^{-8}$.

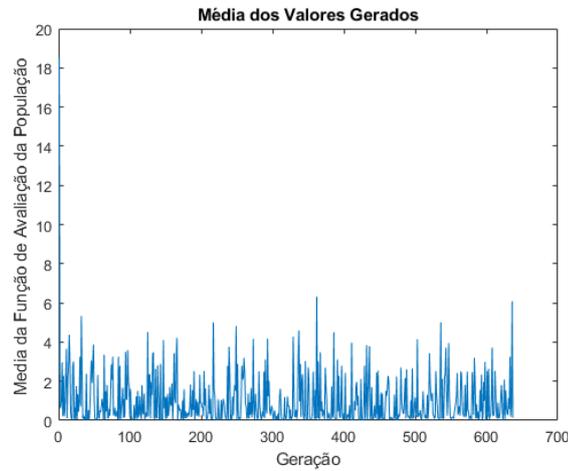
Nas figuras 14 e 15 podemos observar o comportamento da função de avaliação e a média da função de avaliação da população. A partir da análise dos gráficos podemos perceber que o valor da função de avaliação cai muito rapidamente.

Figura 14 - Função de avaliação – 1 Diodo.



Fonte: Simulação via Octave.

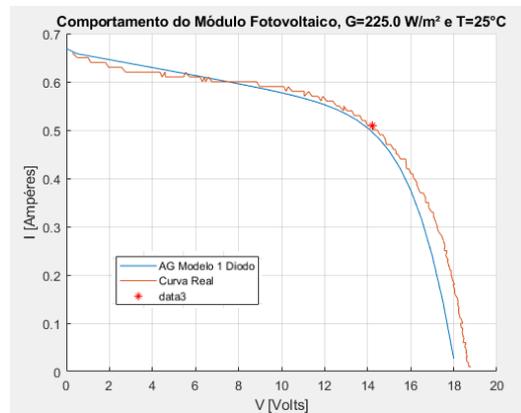
Figura 15 - Média da FA – 1 Diodo.



Fonte: Simulação via Octave.

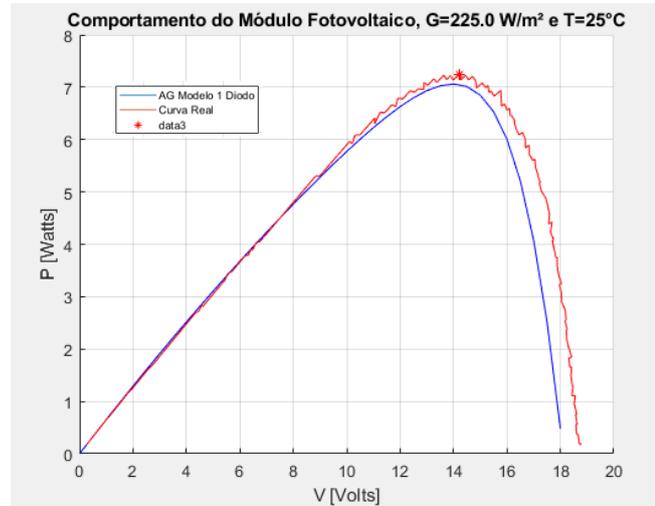
Com os valores obtidos no teste 1, o qual apresentou o melhor resultado de FA, podemos gerar a curva simulada de acordo com a fórmula 4.2 e a comparar com a curva real, a fim de se avaliar a eficiência do modelo gerado.

Figura 16 - Curva Real I-V x Curva Simulada I-V – 1 Diodo



Fonte: Simulação via Octave.

Figura 17 - Curva Real P-V x Curva Simulada P-V. – 1 Diodo



Fonte: Simulação via Octave.

Avaliando os gráficos da figura 16 e 17, podemos dizer que o comportamento da curva real está sendo bem modelado, mas com algum erro entre os valores reais e simulados.

4.3 Análise dos resultados aplicando AG com modelo de 2 diodos em $G = 225 \text{ W/m}^2$ e 25° C

Para simulação da curva com 25°C e $G = 225 \text{ W/m}^2$, vários parâmetros foram testados conforme representado na tabela 5 abaixo.

Tabela 5 - Resultado das simulações com modelo de 2 diodos em $G = 225 \text{ W/m}^2$ e 25° C .

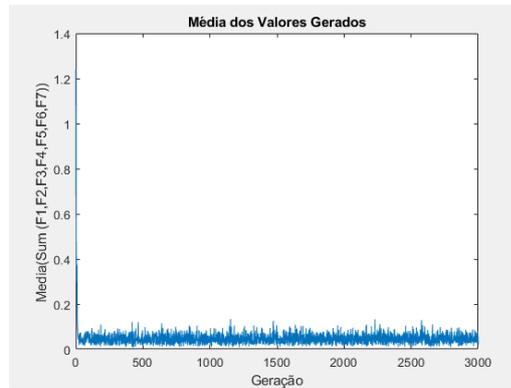
Simulações - Curva 1 (T = 25° C e G = 225 W/m²)													
Teste	Iph(A)	Is1(µA)	Is2(µA)	Rs(Ω)	Rsh(Ω)	m1	m2	FA	Tempo (s)	N° Ger	Taxa Mut.	Taxa Cross.	Tam
1	0,6626	1,000	0,991	1,2995	133,0034	1,4294	1,4231	6,60E-03	8,5894	3000	0,1	0,8	250
2	0,6625	1,000	1,000	1,2979	133,0886	1,4267	1,4267	6,60E-03	8,8881	3000	0,1	0,8	250
3	0,6625	1,000	1,000	1,2979	133,0886	1,4267	1,4267	6,60E-03	9,0347	3000	0,2	0,8	250
4	0,6628	1,000	1,000	1,3125	132,327	1,3899	1,4862	6,60E-03	2,9908	1000	0,1	0,8	250
5	0,6625	1,000	1,000	1,2979	133,0886	1,4267	1,4267	6,60E-03	12,5484	4000	0,2	0,8	250
6	0,6625	1,000	1,000	1,3015	133,3301	1,4408	1,4144	6,60E-03	1,9243	500	0,2	0,8	250
7	0,6625	1,000	1,000	1,2982	133,0535	1,4119	1,4441	6,60E-03	1,6376	500	0,05	0,8	250
8	0,663	1,000	1,000	1,326	131,6342	1,3799	1,5189	6,60E-03	1,0367	300	0,05	0,8	250

Fonte: Simulação via Octave.

Para o modelo de 2 diodos, vários parâmetros foram testados. Durante as simulações nota-se que não importando os valores dos parâmetros utilizados não haverá alteração no valor de FA, o que pode ser constatado analisando os resultados consolidados de algumas simulações na tabela 5.

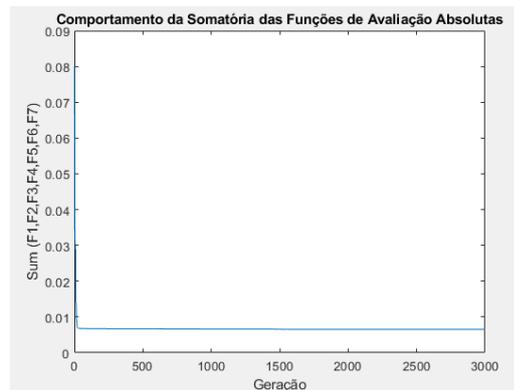
A partir da análise das figuras 18 e 19 podemos notar, assim como no caso do modelo de 2 diodos, um rápido decaimento no valor de FA, no qual a partir da figura 19 constatou-se não ser necessário um alto número de gerações, o que pode ser visto na tabela 5 também.

Figura 18 - Média Função Avaliação – 2 Diodos.



Fonte: Simulação via Octave.

Figura 19 - Função Avaliação – 2 Diodos.

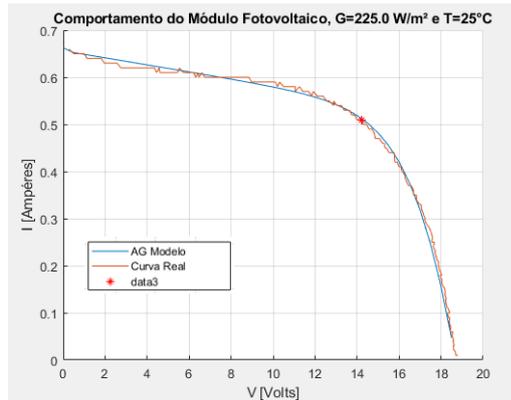


Fonte: Simulação via Octave.

Com os valores obtidos na simulação podemos avaliar a curva simulada versus a curva real, assim como fizemos anteriormente para o modelo com 1 diodo.

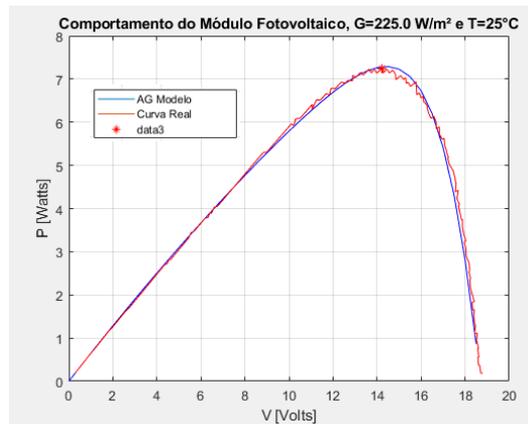
Avaliando os gráficos da figura 20 e 21 podemos perceber que as curvas simuladas utilizando modelos de 2 diodos ofereceram uma melhor aproximação da curva real.

Figura 20 - Curva Real I-V x Curva Simulada I-V -2 diodos.



Fonte: Simulação via Octave.

Figura 21 – Curva Real P-V x Curva Simulada P-V- 2 diodos.



Fonte: Simulação via Octave.

4.4 Análise dos resultados aplicando AG com modelo de 3 diodos em $G = 225 \text{ W/m}^2$ e 25° C

Para simulação da curva com 25° C e $G = 225 \text{ W/m}^2$ foram testados vários parâmetros, durante os testes, percebeu-se que não havia mudança no valor mínimo de FA (na grandeza do parâmetro) com a mudança dos parâmetros.

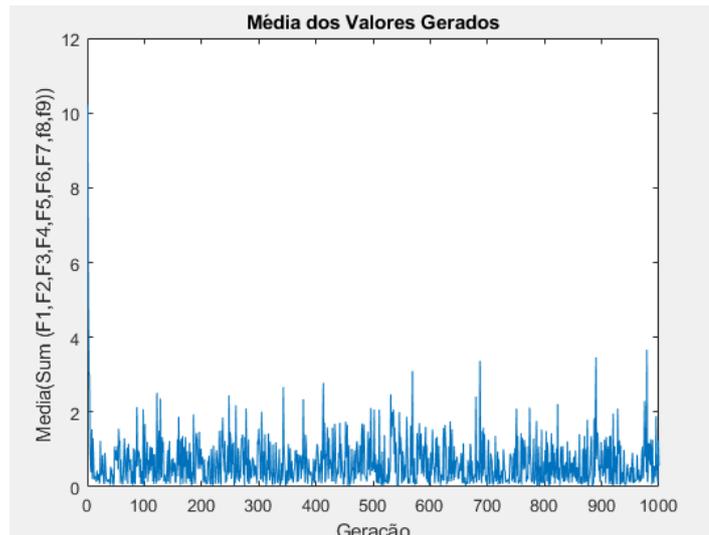
Tabela 6 - Simulações modelo 3 diodos.

Simulações - Curva 1 (T = 25° C e G = 225 W/m²)															
Teste	Iph(A)	Is1(μA)	Is2(μA)	Is3(μA)	Rs(Ω)	Rsh(Ω)	m1	m2	m3	FA	Tempo (s)	N° Ger	Taxa Mut.	Taxa Cross.	Tam
1	0,6692	1,000	1,000	1,000	0,5825	111,7798	1,7791	2,0000	1,5764	2,60E-03	3,086	1000	0,1	0,8	200
2	0,6637	1,000	1,000	1,000	0,0001	116,6221	1,6376	2	1,6376	1,80E-03	3,6983	1000	0,2	0,9	200

Fonte: Simulação via Octave.

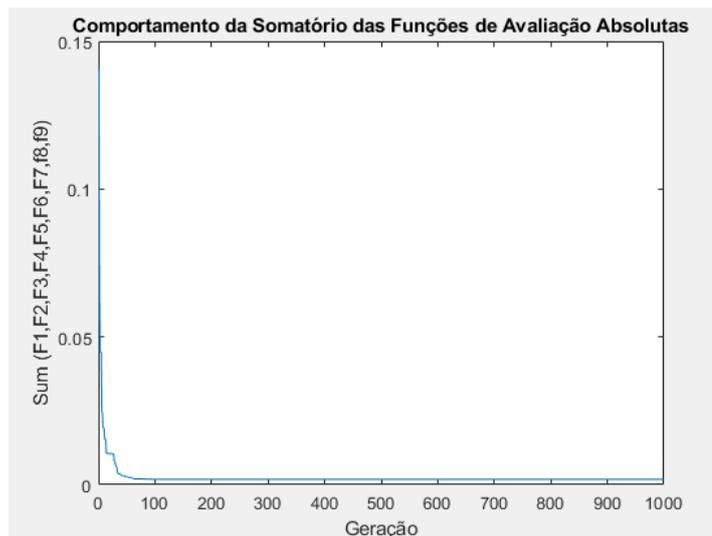
Nas figuras 22 e 23 podemos ver a evolução da média dos valores gerados e da função FA, que decaem em poucas gerações, mostrando mais uma vez serem necessárias poucas gerações para alcançar os parâmetros.

Figura 22 - Média da Função Avalia – 3 Diodos.



Fonte: Simulação via Octave.

Figura 23 - Função Avaliação - 3 Diodos.

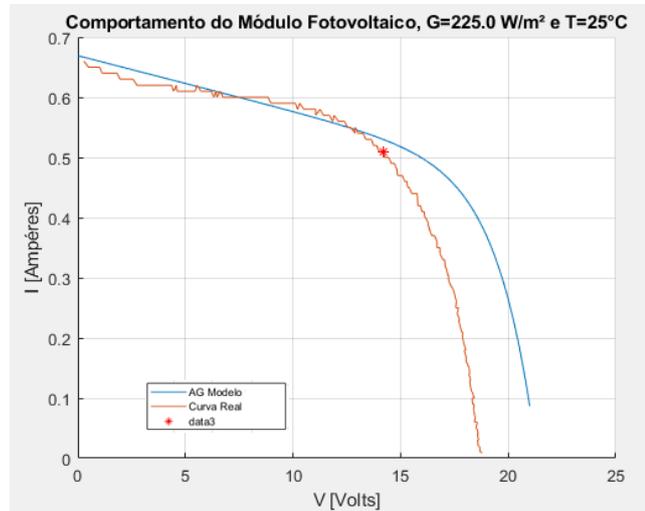


Fonte: Simulação via Octave.

Ao plotarmos a curva simulada versus a curva real notamos uma grande diferença entre elas, na qual podemos perceber que as curvas I-V e P-V, mostradas nas figuras 24 e 25, modelam

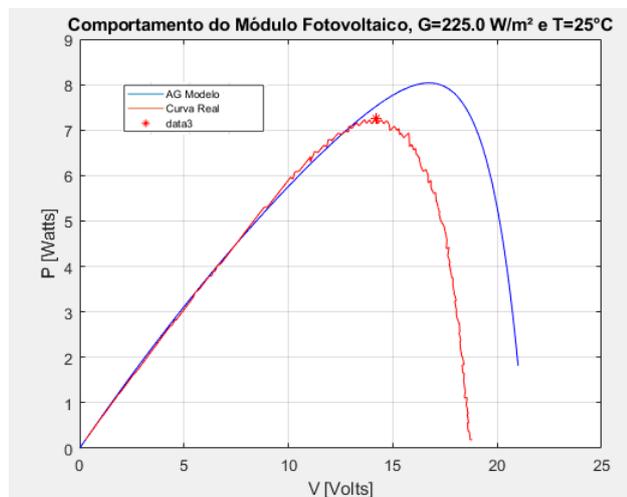
bem a curva real para valor de V menores que 14 V, para valores de V maiores que 14, a curva simulada diverge, não conseguindo acompanhar o ponto de inflexão da curva real.

Figura 24 - Curva Real I-V x Curva Simulada I-V - 3 diodos.



Fonte: Simulação via Octave.

Figura 25 - Curva Real P-V x Curva Simulada P-V - 3 diodos.



Fonte: Simulação via Octave.

Para tentar obter um melhor modelo, foi alterado a forma de escolha dos parâmetros iniciais de V e I para o algoritmo genético. Foram escolhidos 3 pontos em que a curva I-V é quase constante, 2 pontos no ponto de inflexão da curva e 4 pontos no qual o valor de I eram quase zero. Na tabela 7 temos os valores usados inicialmente, que geraram os resultados apresentados na tabela 6. Na tabela 8, através simulações por tentativa e erro, temos os novos valores de V-I utilizados como valores iniciais no algoritmo genético.

Tabela 7 - Valores iniciais passado para o modelo.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
V	0,28	3,52	7,53	11,58	14,22	15,52	16	17	18,8
I	0,66	0,63335	0,6	0,5607	0,51	0,4545	0,423215	0,328409	9,98E-03

Fonte: Simulação via Octave.

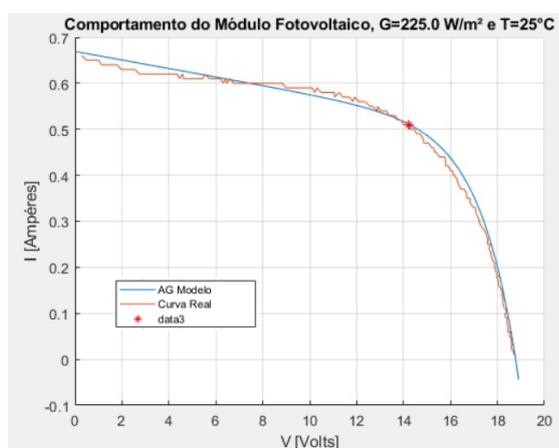
Tabela 8 - Novos Valores iniciais passado para o modelo.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
V	0,28	5,54	9,85	12,89	14,86	17,07	18,04	18,42	18,8
I	0,66	0,62	0,59	0,54	0,47	0,32	0,17	0,1	1,00E-02

Fonte: Simulação via Octave.

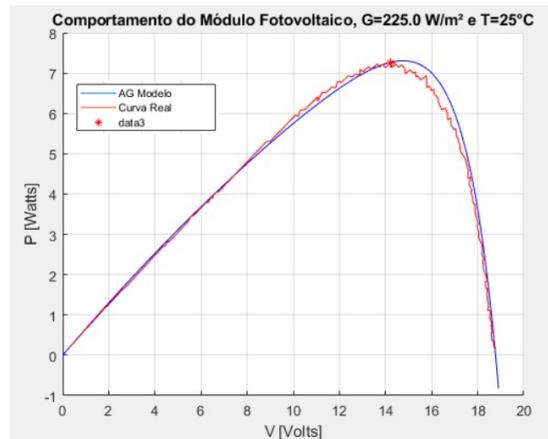
Nas figuras 26 e 27 podemos ver a comparação das curvas simuladas contra a curva real para I-V e P-V, percebemos que ao mudar os parâmetros iniciais passados para o algoritmo, os parâmetros obtidos modelaram melhor a curva real.

Figura 26 - Nova curva I-V. Real x Simulada - 3 diodos.



Fonte: Simulação via Octave.

Figura 27 – Nova curva P-V. Real x Simulada - 3 diodos.



Fonte: Simulação via Octave.

4.5 Análise dos resultados aplicando AG com modelo de 1 diodo em $G = 860.2 \text{ W/m}^2$ e 52°C

Para simulação da curva com 52°C e $G = 860.2 \text{ W/m}^2$, vários parâmetros foram testados conforme a tabela 9, logo abaixo:

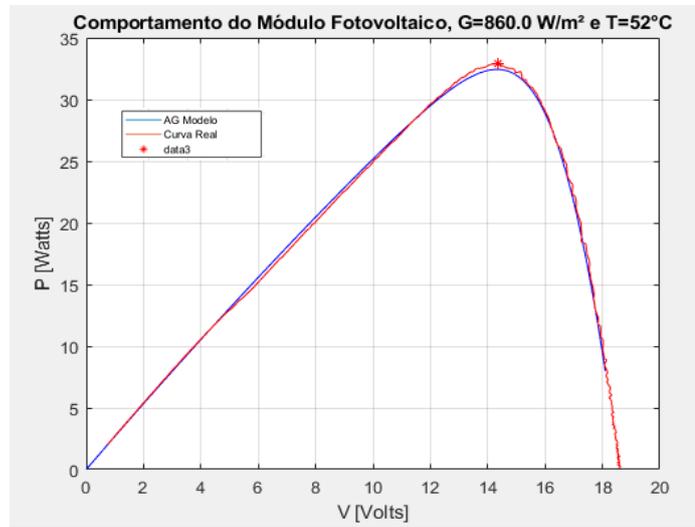
Tabela 9 - Simulações curva 52°C e $G = 860.2 \text{ W/m}^2$ - 1 Diodo.

Simulações - Curva 4 ($T = 52^\circ\text{C}$ e $G=860.2 \text{ W/m}^2$)											
Teste	I _{ph} (A)	I _s (μA)	m	R _s (Ω)	R _p (Ω)	FA	Tempo (s)	N° Ger	Taxa Mut.	Taxa Cross.	Tam
1	2,7547	0,0223	1	0,6475	46,3785	0,0238	9,818	4000	0,2	0,8	250
2	2,7547	0,0223	1	0,6475	46,3785	0,0238	9,9294	4000	0,1	0,8	250
3	2,7549	0,0223	1	0,6474	46,3124	0,0238	7,6602	3000	0,1	0,8	250
4	2,7337	0,374	1,1787	0,5576	55,2107	0,0328	2,7945	1000	0,1	0,8	250
5	2,7547	0,0223	1	0,6475	46,3785	0,0238	9,9367	4000	0,3	0,8	250
6	2,7547	0,0223	1	0,6475	46,3785	0,0238	10,1363	4000	0,2	0,7	250
7	2,744	0,0837	1,0767	0,6141	50,4294	0,0277	10,2378	4000	0,1	0,7	250
8	2,7547	0,0223	1	0,6475	46,3778	0,0238	8,7562	3500	0,2	0,7	250
9	2,7547	0,0223	1	0,6475	46,3785	0,0238	8,7384	3500	0,2	0,8	250
10	2,7547	0,0223	1	0,6475	46,3785	0,0238	7,5735	3100	0,2	0,8	250

Fonte: Simulação via Octave.

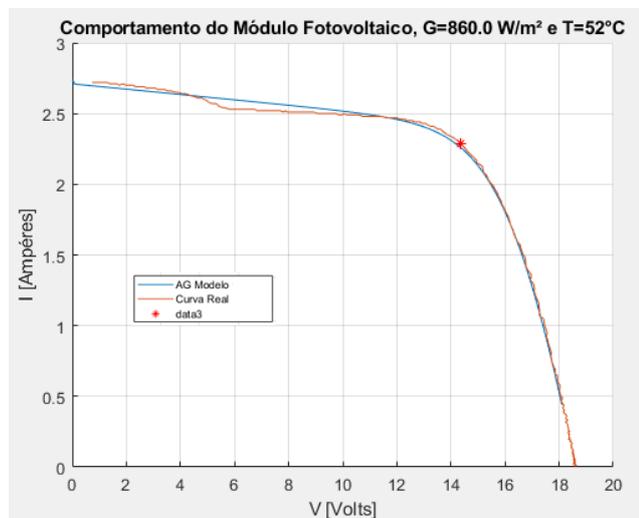
Pela tabela 9, pode-se notar pouca diferença obtida nos parâmetros com a variação das taxas de *crossover* e mutação. Para a plotagem das curvas foi selecionado os valores do nono teste, que podem ser observados nas figuras 28 e 29.

Figura 28 - Curva Real P-V x Curva Simulada P-V - 1 Diodo.



Fonte: Simulação via Octave.

Figura 29 – Curva Real I-V x Curva Simulada I-V - 1 Diodo.



Fonte: Simulação via Octave.

Pelos gráficos mostrados nas figuras 28 e 29 podemos ver uma boa aderência da curva simulada em relação à curva real, mostrando que para alta irradiância, o modelo de 1 diodo modela bem o problema.

4.6 Análise dos resultados aplicando AG com modelo de 2 diodos em $G = 860.2 \text{ W/m}^2$ e 52°C

Assim como ocorreu nas curvas anteriores, foram realizados diversos testes utilizando o programa implementado em Algoritmo Genético no modelo de 2 diodos para a curva 52°C e $G = 860.2 \text{ W/m}^2$. Alguns desses testes foram apresentados na Tabela 10 e os resultados indicaram que houve uma proximidade considerável nos valores da função objetivo nas simulações realizadas.

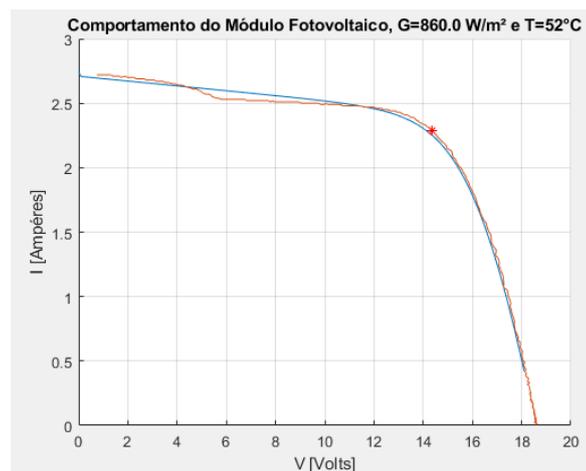
Tabela 10 - Simulações curva 52°C e $G = 860.2 \text{ W/m}^2$ - 2 Diodos.

Simulações - Curva 4 (T = 52° C e G = 860.2 W/m²)													
Teste	I _{ph} (A)	I _{s1} (μA)	I _{s2} (μA)	R _s (Ω)	R _{sh} (Ω)	m1	m2	FA	Tempo (s)	N° Ger	Taxa Mut.	Taxa Cross.	Tam
1	2,7391	0,348	0,001	0,5743	52,9594	1,0247	1,0000	3,56E-02	1,3527	400	0,05	0,8	250
2	2,7398	0,003	0,234	0,5956	52,8579	1,0000	1,0000	3,47E-02	8,5259	3000	0,1	0,8	250
3	2,7398	0,001	0,236	0,5956	52,8579	1,0000	1,0000	3,47E-02	8,5975	3000	0,2	0,8	250
4	2,7398	0,237	0,001	0,5956	52,858	1,0000	2,0000	3,47E-02	3,2824	1000	0,05	0,7	250
5	2,7398	0,236	0,001	0,5956	52,8579	1,0000	1,0000	3,47E-02	3,2624	1000	0,05	0,8	250
6	2,7398	0,236	0,001	0,5956	52,8579	1,0000	1,0000	3,47E-02	3,1413	100	0,1	1	250

Fonte: Simulação via Octave.

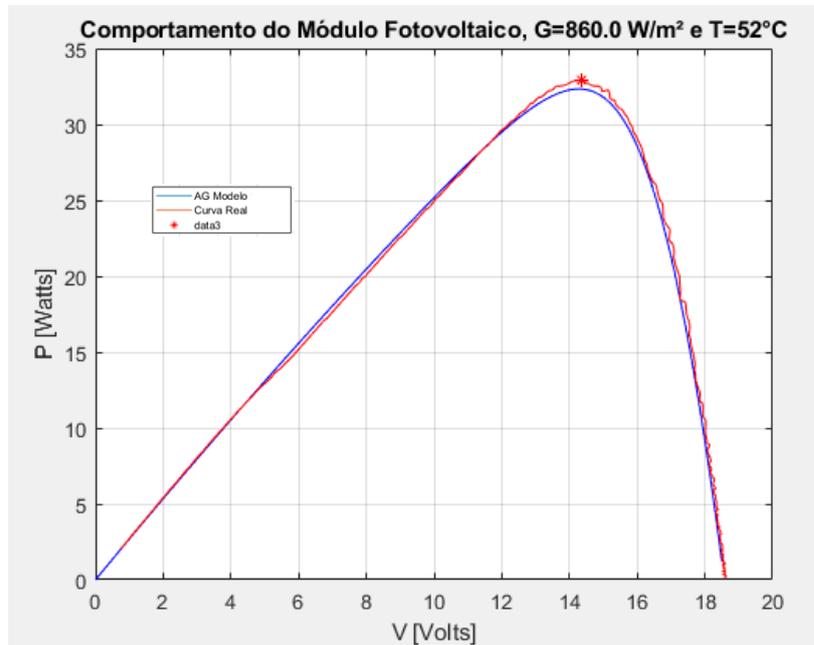
As curvas simuladas de tensão por corrente (VxI) e potência por tensão (VxP) foram plotadas e comparadas com a curva real, como mostrado nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 - Curva Real I-V x Curva Simulada I-V - 2 Diodos.



Fonte: Simulação via Octave.

Figura 31 - Curva Real VxP x Curva Simulada VxP - 2 diodos.



Fonte: Simulação via Octave.

4.7 Análise dos resultados aplicando AG com modelo de 3 diodos em $G = 860.2 \text{ W/m}^2$ e 52°C

Para o modelo de 3 diodos, os parâmetros ótimos foram obtidos, sendo eles mostrados na tabela 11 abaixo:

Tabela 11 - Simulações 52°C e $G = 860.2 \text{ W/m}^2$ – 3 diodos.

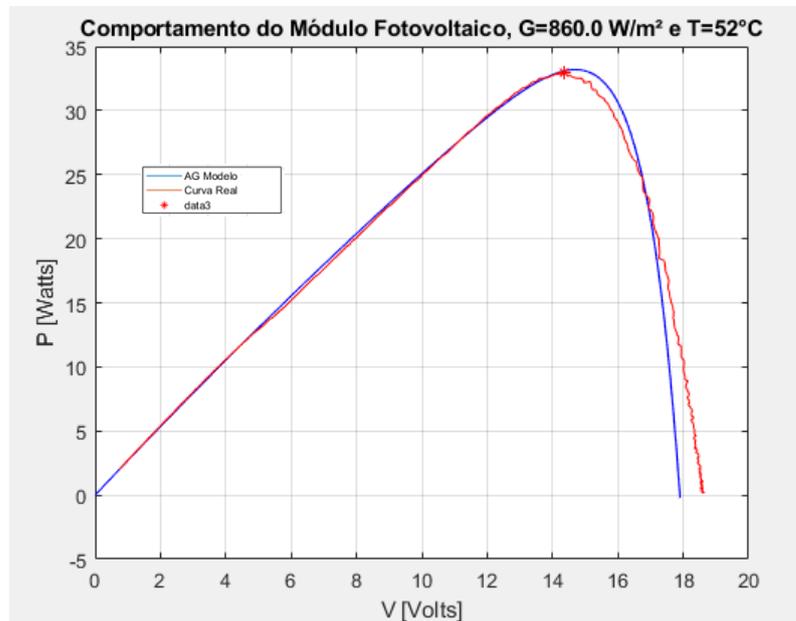
Simulações - Curva 4 (T = 52° C e G = 860 W/m²)															
Teste	Iph(A)	Is1(µA)	Is2(µA)	Is3(µA)	Rs(Ω)	Rsh(Ω)	m1	m2	m3	FA	Tempo (s)	N° Ger	Taxa Mut.	Taxa Cross.	Tam
1	2,7109	0,001	0,0344	0,6454	0,0001	50,0000	1,0000	1,2100	1,0264	3,02E-02	6,2469	2000	0,8	0,1	200
2	2,7109	0,001	0,0355	0,6454	0,0001	50	2	1,2739	1,0256	3,01E-02	7,316	2000	0,9	0,2	250

Fonte: Simulação via Octave.

Assim como em simulações anteriores, vários testes foram feitos, percebendo poucas variações no valor de FA. Para as curvas P-V e V-I, foram utilizados os parâmetros do teste 1.

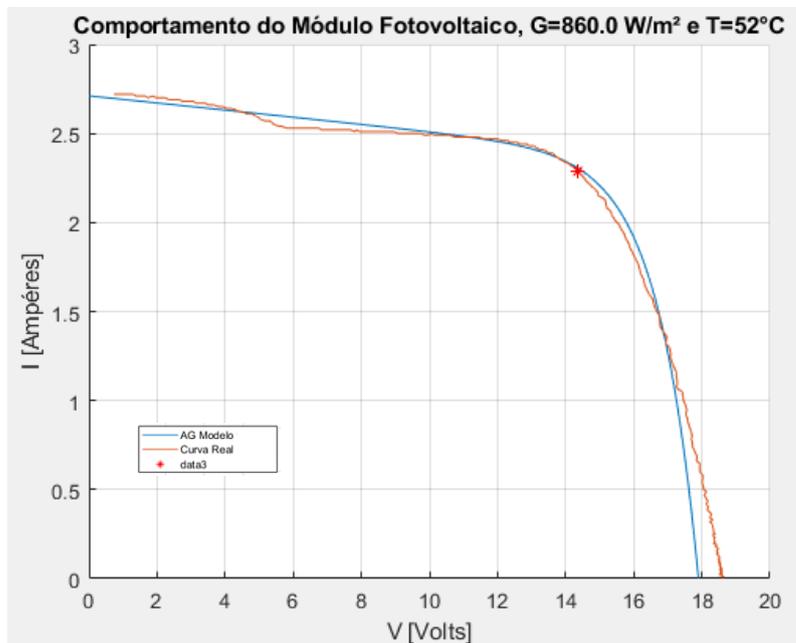
As figuras 32 e 33 mostram a curva simulada versus a curva real, mais uma vez podemos ver que o modelo de 3 diodos modela bem o problema.

Figura 32 - Curva Real PxV x Curva Simulada - 3 diodos.



Fonte: Simulação via Octave.

Figura 33 - Curva Real I-V x Curva Simulada I-V - 3 Diodos.



Fonte: Simulação via Octave.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados no Capítulo 4, pode-se concluir que o uso de Algoritmos Genéticos (AG) para a extração de parâmetros de módulos fotovoltaicos permite uma busca eficiente pelos valores ideais de parâmetros, dentro de um intervalo predefinido. Esse intervalo é definido pelas restrições impostas pela teoria de otimização e pelas condições físicas e técnicas do módulo fotovoltaico em questão.

Para o caso específico em que foram utilizadas duas irradiâncias distintas (225 W/m^2 e 860 W/m^2), observou-se que o modelo de 2 diodos gerou gráficos visualmente mais próximos da curva real na curva $G = 225 \text{ W/m}^2$ e 25° C , com irradiâncias menores. Já na curva $G = 860 \text{ W/m}^2$ e 52° C , com irradiâncias maiores, o modelo de 1 diodo apresentou melhor eficiência.

Portanto, conclui-se que a escolha entre o modelo de 1 ou 2 diodos deve levar em consideração a irradiância solar presente no ambiente em que o módulo fotovoltaico será instalado. Além disso, o uso de AG pode ser uma ferramenta valiosa na busca por parâmetros de módulos fotovoltaicos, desde que seja definido um intervalo de busca e que as restrições sejam respeitadas.

Além disso, os resultados obtidos a partir da análise de células fotovoltaicas com 1, 2 e 3 diodos indicaram que o modelo de 2 diodos apresentou desempenho superior em relação aos demais modelos, especialmente em situações de baixa irradiância solar. Isso demonstra que a utilização do modelo de 2 diodos é uma opção vantajosa para a caracterização de módulos fotovoltaicos, uma vez que esse modelo pode fornecer informações mais precisas sobre o desempenho elétrico do módulo em diferentes condições de irradiância.

Portanto, conclui-se que o uso de Algoritmos Genéticos em conjunto com o modelo de 2 diodos pode ser uma abordagem promissora para a otimização de parâmetros em módulos fotovoltaicos, possibilitando um melhor aproveitamento da energia solar e contribuindo para a expansão da geração distribuída de energia renovável.

No entanto, é importante observar que o modelo de 2 diodos pode ser mais complexo e exigir mais parâmetros para ajustar em comparação com 1 diodo, o que pode tornar a simulação mais desafiadora e aumentar o tempo de execução do código por possuímos mais parâmetros. Para o modelo de 1 diodo é obrigatório o uso de 5 parâmetros e para o modelo de 2 diodos, 7 parâmetros. O modelo de 2 diodos possui exponenciais duplas que o torna rígido. Portanto, é importante avaliar cuidadosamente as necessidades de projeto e as limitações do modelo antes de selecionar um modelo específico para simular módulos fotovoltaicos.

Para melhorar a precisão das simulações com AGs, uma abordagem é usar medições experimentais de corrente e tensão sob diferentes condições de temperatura e iluminação para

calibrar os modelos com 1, 2 ou 3 diodos. Além disso, é possível considerar outros fatores, como inclinação dos módulos e condições atmosféricas, que podem afetar a eficiência dos módulos fotovoltaicos. Com isso, será possível obter resultados mais precisos e confiáveis para o dimensionamento considerado.

Concluiu-se que o resultado real versus a simulação é muito próximo, apresentando boa concordância, podendo os AGs serem utilizados para o estudo de determinação de parâmetro.

Para trabalhos futuros, a bibliografia recomenda o uso dos métodos BDF (*Back Differentiation Formula*) e Newton-Krylov para obter convergência de equações não lineares com mais de uma exponencial, como é o caso da equação do modelo de 2 e 3 diodos. Já o método de Newton-Raphson não apresenta convergência para modelos com mais de 1 diodo pois as expressões possuem mais de 1 exponencial sendo expressões rígidas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

“BACK, Thomas. **Evolutionary algorithms in theory and practice: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms**. Oxford University Press, 1996. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195099713.003.0007>”

“CARNEIRO, J. **Semicondutores – Modelo Matemático da Célula Fotovoltaica**. Universidade do Minho, Campus de Azurém, Guimarães: 2010.”

“EIBEN, Agoston E.; SMITH, James E. **Introduction to evolutionary computing**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44874-8>”

“GOLBERG, David E. **Algoritmos genéticos em busca, otimização e aprendizado de máquina**. Addison Wesley, v. 1989, n. 102, pág. 36, 1989.”

“GREEN, Martin et al. **Solar cell efficiency tables (version 57)**. Progress in photovoltaics: research and applications, v. 29, n. 1, p. 3-15, 2021. <https://doi.org/10.1002/pip.3371>”

“HARRAG, Abdelghani; MESSALTI, Sabir. **Extraction of solar cell parameters using genetic algorithm**. In: 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE). IEEE, 2015. p. 1-5. <https://doi.org/10.1109/INTEE.2015.7416775>”

“HAUPT, Randy L.; HAUPT, Sue Ellen. **Algoritmos genéticos práticos**. John Wiley & Sons, 2004.”

“HOLLAND, John H. **Adaptação em sistemas naturais e artificiais: uma análise introdutória com aplicações em biologia, controle e inteligência artificial**. Imprensa do MIT, 1992.”

“HOUCK, Christopher R.; JOINES, Jeff; KAY, Michael G. **Um algoritmo genético para otimização de funções: uma implementação em Octave**. Ncsu-ie tr, v. 95, n. 09, pág. 1-10, 1995.”

“HUSSEIN, A. **A simple approach to extract the unknown parameters of PV modules**. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, TUBITAK. Turkey, 2017. <https://doi.org/10.3906/elk-1703-14>”

“ISMAIL, M.S.; MOGHAVVEMI, M. and MAHLIA, T.M.I. **Characterization of PV panel and global optimization of its model parameters using genetic algorithm**. Energy Conversion and Management 73 (2013) 10–25. ELSEVIER, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.033>”

“JERVASE, Joseph A.; BOURDOUCEN, Hadj; AL-LAWATI, Ali. **Solar cell parameter extraction using genetic algorithms**. Measurement science and technology, v. 12, n. 11, p. 1922, 2001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/11/322>”

“JIEMING, MA, Ka Lok MAN, T. O. TING, Nan ZHANG, Sheng-Uei GUAN e Prudence w. h. WONG. **Approximate Single-Diode Photovoltaic Model for Efficient IV Characteristics Estimation**. Scientific World Journal. 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/230471>”

“JORDEHI, A. MITCHELL, Melanie. **Uma introdução aos algoritmos genéticos**. Imprensa do MIT, 1998.

“K. Ishaque, Z. Salam and H. Taheri, “**Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules**”, in Proc. Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 95,2011, pp. 586–594. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.09.023>”

“NISHIOKA, K.; SAKITANI, N.; URAOKA, Y. and FUYUKI, T. **Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration**. Sol. Energy Mater. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.04.009>”

“PINHO, João Tavares et al. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, v. 1, p. 47-499, 2014.”

“R. Zilles, WN Macêdo, MAB Galhardo e S. H. F. Oliveira, “**Sistemas fotovoltaicos conectados à rede**”. Textos Oficina, 2012, 208 p.”

“REIS, Laiz Rocha de Deus. **Determinação de parâmetros de módulos fotovoltaicos utilizando o método de Newton Raphson e algoritmos genéticos**. 2018. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.”

“RODRIGUES, P. **Extração dos Parâmetros de Módulos Fotovoltaicos a partir da solução de um sistema de equações não lineares utilizando técnicas da região de confiança**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012, 117. ”

“RODRIGUES, P.; CAMACHO, J. R.; MATOS, F. B. **The application of trust region method to estimate the parameters of photovoltaic modules through the use of single and double exponential models**. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11). Las Palmas de Gran Canaria (Spain), Vol.1, No.9, May 2011. <https://doi.org/10.24084/repqj09.380>”

“VILLALVA, M. G. e GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica**. São Paulo: Érica, 2013. 224p.”

“WRIGHT, S. **Evolution in Mendelian population**. Genetics, Maryland, v. 16, n. 2, p. 97-159, 1931. <https://doi.org/10.1093/genetics/16.2.97>”

“YE, Meiyong; WANG, Xiaodong; XU, Yousheng. **Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization**. Journal of Applied Physics, v. 105, n. 9, p. 094502, 2009. <https://doi.org/10.1063/1.3122082>”