

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÓDULOS  
FÓTOVOLTAICOS UTILIZANDO O MÉTODO DE NEWTON  
RAPHSON E ALGORITMOS GENÉTICOS**

**Laiz Rocha de Deus Reis**

Uberlândia - MG

2018



**Laiz Rocha de Deus Reis**

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÓDULOS  
FÓTOVOLTAICOS UTILIZANDO O MÉTODO DE NEWTON  
RAPHSON E ALGORITMOS GENÉTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Fontes Alternativas de Energia

Orientador: Prof. José Roberto Camacho, PhD

Uberlândia - MG

2018

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

---

R375d      Reis, Laiz Rocha de Deus, 1988-  
2018      Determinação de parâmetros de módulos fotovoltaicos utilizando o  
         método de Newton Raphson e algoritmos genéticos [recurso eletrônico]  
         / Laiz Rocha de Deus Reis. - 2018.

Orientador: José Roberto Camacho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1185>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. 2. Geração de energia fotovoltaica. 3.  
Algoritmos genéticos. 4. Newton-Raphson, Metodo. I. Camacho, José  
Roberto, (Orient.) II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

---

CDU: 621.3

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Ata da defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO junto ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico, número 685/2018/PPGEE

Data: 21 de junho de 2018

Discente: Laiz Rocha de Deus Reis

Número de matrícula: 11512EEL005

Título do Trabalho: Determinação de parâmetros de módulos fotovoltaicos utilizando o método de Newton Raphson e algoritmos genéticos

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Linha de pesquisa: Eletricidade Rural e Fontes Alternativas de Energia

As 13:00 horas do dia 21 de junho de 2018 na Sala de Defesas da Faculdade de Engenharia Elétrica, Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, reuniu-se a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

José Roberto Camacho

CPF: 212.428.446-00, orientador

Sebastião Camargo Guimarães Junior

CPF: 323.026.066-04

Henrique José Avelar

CPF: 549.718.106-68

Kleiber David Rodrigues

CPF: 303.202.246-00

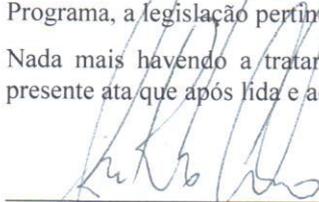
Iniciando os trabalhos o presidente da mesa Prof. Dr. José Roberto Camacho apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu a Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme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

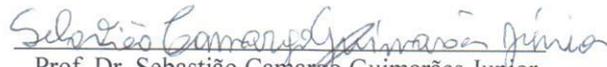
A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais.

Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata A provada.

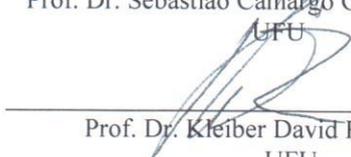
Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar, foram encerrados os trabalhos às 16 horas e 00 minutos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Roberto Camacho  
UFU

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sebastião Camargo Guimarães Junior  
UFU

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Henrique José Avelar  
CEFET

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Kleiber David Rodrigues  
UFU

*Dedico essa dissertação ao meu marido, Rafael, pelo apoio e Amor incondicional, ao meus pais e irmãos, por acreditarem em mim e me incentivarem a seguir em frente e a minha pequena Isadora, razão pela qual continuo sonhando.*

---

## AGRADECIMENTOS

A caminhada até aqui não foi fácil e, graças a Deus, também não foi sozinha. Tive a ajuda e apoio de várias pessoas que, de forma direta e indireta, colaboraram para a conclusão deste mestrado. Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos...

Primeiramente a Deus, pela sabedoria, por estar comigo em todos os momentos, me fazendo perseverar e me dando forças quando eu mais precisei para suportar as dificuldades.

Ao meu companheiro, marido e amigo Rafael que, por várias vezes, com suas palavras sábias, acalmou-me e incentivou-me a não desistir da caminhada, compartilhando comigo o seu amor por mim e pela vida. A minha pequena filha, Isadora, por vir ao mundo durante a execução do mestrado, enchendo minha vida de luz e, também com um amor que eu não tinha noção que existia. O Amor de ser Mãe.

Aos meus pais, José e Hélia, que são meus exemplos de vida e são a essência do meu existir. Aos meus irmãos, Lorena e Luiz, pelo companheirismo, cumplicidade, palpites e amizade de sempre. Aos meus sobrinhos Gabriel, Laura, Maria Paula e, meus cunhados Rodrigo e Thamillys, por alegrarem nossas reuniões em família, e tornar a vida sempre mais gostosa.

Ao meu orientador José Roberto Camacho pelo apoio técnico, o qual soube me guiar para que pudéssemos desenvolver um bom trabalho, sendo paciente e benevolente durante a nossa caminhada juntos.

Aos amigos que tenho, que conquistei durante a vida. Obrigada por me apoiarem e acreditarem que eu seria capaz e, me lembrar disso, quando eu precisei. Obrigada também pelas reuniões de descontração. Obrigada aos colegas de trabalho, do Colégio Àrcade de Ibiá e do IFTM. Que prazer trabalhar com vocês e dividir conhecimento. Aos meus queridos alunos, os quais sinto tanta saudade.

Aos colegas do Núcleo de Extensão e Pesquisa em Fontes Alternativas (NUPEA) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), pelas palavras amigas nas horas difíceis, pelo auxílio nos trabalhos e dificuldades e, principalmente, por estarem comigo nesta caminhada tornando-a mais fácil e agradável.



---

## RESUMO

REIS, L. R. D. **Determinação de Parâmetros de Módulos Fotovoltaicos Utilizando o Método de Newton Raphson e Algoritmos Genéticos.** 123 P. Dissertação – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

Esta pesquisa é justificada pela expansão da geração de energia elétrica através de usinas solares e pela adoção em larga escala de pequenos sistemas de geração de energia elétrica, especialmente, fotovoltaicos (PV) a semicondutores conectados à rede. Para analisar esses sistemas, é importante que os parâmetros da geração sejam confiáveis. O principal objetivo desse trabalho é estudar métodos matemáticos para obtenção de parâmetros de módulos fotovoltaicos para estudos estáticos e dinâmicos em sistemas de energia elétrica de média tensão. Dessa forma, é necessário fazer a modelagem usando equações que caracterizem esse tipo de geração de energia, e quando incorporados ao sistema elétrico, seus parâmetros possuem grande importância. A modelagem das células fotovoltaicas, componente unitário de cada módulo, é feita através de dois modelos: os modelos de um e de dois diodos. O de um diodo, extrai cinco parâmetros do módulo fotovoltaico e o modelo de dois diodos extrai sete parâmetros. Esses parâmetros são: corrente fotogerada, corrente de saturação reversa do diodo, fator de idealidade, resistência em série e resistência paralela. Tais parâmetros são de fundamental importância para a simulação do sistema de geração de energia e para a reconstrução de curvas I-V e P-V de sistemas fotovoltaicos em modelos de sistemas de potência. Neste trabalho, o primeiro método usado para a extração dos parâmetros foi o de Newton Raphson (NR), um método matemático rápido, amplamente usado em sistemas elétricos de energia e pode ser usado quando se tem uma ideia muito próxima da solução. Sua aplicação é feita no modelo de um diodo e nos casos em que há convergência. Também foi usado para extrair os parâmetros, um algoritmo Genético (AG), o qual tem alta capacidade de otimização e pode ser usado na solução de problemas não lineares aplicados à engenharia, para uma primeira aproximação, quando não se tem ideia da solução do problema. Nesse trabalho o AG é aplicado no modelo de um e dois diodos e apresenta bons resultados nos dois casos, sendo o modelo de dois diodos indicado em casos de baixa radiação solar e o de um diodo indicado para alta radiação solar. Finalmente, o AG é usado para obter o vetor de solução inicial no método NR, unindo os dois métodos para encontrar um ponto ótimo na solução do problema. Essa união viabiliza o uso do método de Newton Raphson em todos os casos na extração de parâmetros de módulos fotovoltaicos e obtém curvas I-V e P-V muito próximas da curva real.

**Palavras-Chave:** Algoritmos Genéticos. Extração de Parâmetros. Modelagem. Newton Raphson. Módulos Fotovoltaicos.



---

## ABSTRACT

REIS, L. R. D. **Parameters Determination of Photovoltaic Modules Using the Newton Raphson Method and Genetic Algorithms.** 123 P. Dissertation – School of Electrical Engineering, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

This research is justified by the expansion of electric power generation through solar plants and by the large-scale adoption of small electric power generation systems, especially photovoltaic (PV) systems using semiconductors connected to the grid. In order to analyze these systems, the reliability of the parameters of these generation systems is very important. The main objective of this work is to study mathematical methods to obtain parameters of photovoltaic modules for static and dynamic studies in medium voltage electric energy systems. Thus, it is necessary to do the mathematical modeling using equations that characterize this type of energy generation system, and when incorporated into the electrical system, its parameters are of great importance. The modeling of photovoltaic cells, the unit component of each module, is done through two models: the one and two diode models. The model with one diode extracts five parameters of the photovoltaic module and the model with two diodes extracts seven parameters. These parameters are: photocurrent, diode reverse saturation current, ideality factor, series and shunt resistances. These parameters are of fundamental importance for the simulation of the power generation system and for the reconstruction of I-V and P-V curves of photovoltaic systems in power system models. In this work, the first method used to extract the parameters was the Newton Raphson (NR), a fast-mathematical method, widely used in electric systems and can be used when one has a very close idea of the solution. Its application is made in the model of one diode and in cases where there is convergence. A Genetic Algorithm (GA) was also used to extract the parameters, which has high optimization capacity and can be used in the solution of nonlinear problems applied to engineering, for a first approximation, when one has no idea of the solution of the problem. In this work the AG is applied in the one and two diode models and has good results in both models, with the two diodes model being indicated in cases of low solar radiation and the model of one diode, indicated for high solar radiation. Finally, AG is used to obtain the initial solution vector for the NR method, joining the two methods to find an optimal point in the solution of the problem. This union allows the use of the Newton Raphson method in all cases in the extraction of parameters of photovoltaic modules and obtain I-V and P-V curves very close to the real curve.

**Keywords:** *Genetic Algorithms, Parameter Extraction, Modeling, Newton Raphson's Method, Photovoltaic Modules.*



---

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Estrutura de uma célula fotovoltaica (Adaptado de (CARNEIRO, 2010)).	33
Figura 2.2 - Curvas I-V e P-V de um módulo fotovoltaica.	34
Figura 2.3 - Influência da variação da irradiância nas curvas I-V e P-V de uma célula fotovoltaica com temperatura padrão, $T = 25^{\circ}\text{C}$ (CARNEIRO, 2010).	36
Figura 2.4 - Influência da temperatura nas curvas I-V e P-V de uma célula fotovoltaica com irradiância padrão $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ (CARNEIRO, 2010).	36
Figura 2.5 - Representação de um circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica ideal (adaptado de (CARNEIRO, 2010))	38
Figura 2.6 - Curva Característica corrente-tensão de uma célula de silício no escuro e iluminada	39
Figura 2.7 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica com um diodo.	41
Figura 2.8 - Circuito equivalente do modelo de dois diodos.	43
Figura 2.9 - Ilustração do Método Newton Raphson.	45
Figura 2.10 - <i>Crossover</i> representação binária.	50
Figura 3.1 – Curvas I-V reais obtidas do módulo fotovoltaico usado com irradiâncias e temperaturas distintas.	54
Figura 3.2 - Curvas P-V reais obtidas do módulo fotovoltaico usado com irradiâncias e temperaturas distintas.	54
Figura 3.3- Gráfico I-V da Curva 1, obtido dos dados reais.	55
Figura 3.4 - Gráfico I-V da Curva 2, obtido dos dados reais.	56
Figura 3.5 - Gráfico I-V da Curva 3, obtido dos dados reais.	56
Figura 3.6 - Gráfico I-V da Curva 4, obtido dos dados reais.	56
Figura 3.7 - Gráficos $V \times I$ destacando os sete pontos da Curva 1.	59
Figura 3.8 - Gráficos $V \times I$ destacando os sete pontos da Curva 2.	60
Figura 3.9 - Gráficos $V \times I$ destacando os sete pontos da Curva 3.	60
Figura 3.10 - Gráficos $V \times I$ destacando os sete pontos da Curva 4.	60
Figura 4.1 - Matriz Jacobiana	65
Figura 4.2 - Autovalores do primeiro caso da Curva 2.	71
Figura 4.3 - Autovalores do terceiro caso da Curva 2.	72
Figura 4.4 - Autovalores do terceiro caso da Curva 2 – 1ª Ampliação.	72
Figura 4.5 - Autovalores do terceiro caso da Curva 2 – 2ª Ampliação.	73
Figura 4.6 - Autovalores do quarto caso da Curva 2.	74
Figura 4.7 - Autovalores do quinto caso da Curva 3.	76
Figura 4.8 - Autovalores do primeiro exemplo da Curva 4.	77

Figura 4.9 - Autovalores do primeiro exemplo da Curva 4 ampliado. ....	78
Figura 4.10 - Autovalores do segundo exemplo da Curva 4. ....	78
Figura 4.11 - Curva I x V, T=25°C e G=225.0 W/m <sup>2</sup> . ....	80
Figura 4.12 - Curva I x V, T=35°C e G=596.8 W/m <sup>2</sup> . ....	80
Figura 4.13 - Curva P x V, T=25°C e G=225.0 W/m <sup>2</sup> . ....	81
Figura 4.14 - Curva P x V, T=35°C e G=596.8 W/m <sup>2</sup> . ....	81
Figura 5.1 - Fluxograma do AG implementado. ....	83
Figura 5.2 - Minimização da Função de Aptidão, Curva 1, AG Um Diodo.....	88
Figura 5.3 - Média da População, Curva 1, AG Um Diodo. ....	88
Figura 5.4 - Curva 1 VxI, utilizando AG no modelo de um diodo.....	89
Figura 5.5 - Curva 1 VxP, utilizando AG no modelo de um diodo.....	89
Figura 5.6 - Minimização da Função Aptidão, Curva 2, AG Um Diodo. ....	90
Figura 5.7 - Média da População, Curva 2, AG Um Diodo. ....	91
Figura 5.8 - Curva 2 VxI, utilizando AG no modelo de um diodo.....	91
Figura 5.9 - Curva 2 VxP, utilizando AG no modelo de um diodo.....	92
Figura 5.10 - Curva 3, VxI, utilizando AG no modelo de um diodo.....	93
Figura 5.11 - Curva 3 VxP, utilizando AG no modelo de um diodo.....	93
Figura 5.12 - Curva 4 VxI, utilizando AG no modelo de um diodo.....	94
Figura 5.13 - Curva 4 VxP, utilizando AG no modelo de um diodo.....	95
Figura 5.14 - Comparação dos métodos Newton Raphson e AG 1 diodo na curva 1 – VxI....	96
Figura 5.15 - Comparação dos métodos Newton Raphson e AG 1 diodo na curva 2 – VxI....	96
Figura 5.16 - Comparação dos métodos Newton Raphson e AG 1 diodo na curva 1 – VxP...97	97
Figura 5.17 - Comparação dos métodos Newton Raphson e AG 1 diodo na curva 2 – VxP...97	97
Figura 5.18 - Curva 1 VxI, utilizando AG no modelo de dois diodos.....	99
Figura 5.19 - Curva 1 VxP, utilizando AG no modelo de dois diodos.....	99
Figura 5.20 - Curva 1 VxI, comparando AG no modelo de um e dois diodos.....	100
Figura 5.21 - Curva 1 VxP, comparando AG no modelo de um e dois diodos. ....	100
Figura 5.22 - Curva 2 VxI, utilizando AG no modelo de dois diodos.....	101
Figura 5.23 - Curva 2 VxP, utilizando AG no modelo de dois diodos.....	102
Figura 5.24 - Curva 2 VxI, comparando AG no modelo de um e dois diodos.....	102
Figura 5.25 - Curva 2 VxP, comparando AG no modelo de um e dois diodos. ....	103
Figura 5.26 - Minimização da Função Aptidão, Curva 3, AG Dois Diodos. ....	104
Figura 5.27 - Média da População, Curva 3, AG Dois Diodos. ....	104
Figura 5.28 - Curva 3 VxI, utilizando AG no modelo de dois diodos.....	105
Figura 5.29 - Curva 3 VxP, utilizando AG no modelo de dois diodos.....	105

Figura 5.30 - Curva 3 VxI, comparando AG no modelo de um e dois diodos.....	106
Figura 5.31 - Curva 3 VxP, comparando AG no modelo de um e dois diodos. ....	106
Figura 5.32: Curva 4 VxI, utilizando AG no modelo de dois diodos.....	107
Figura 5.33 - Curva 4 VxP, utilizando AG no modelo de dois diodos.....	108
Figura 5.34 - Curva 4 VxI, comparando AG no modelo de um e dois diodos.....	108
Figura 5.35 - Curva 4 VxP, comparando AG no modelo de um e dois diodos. ....	109
Figura 5.36 - Curva 3 gerada NR utilizando “chute inicial” obtido em AG. ....	110
Figura 5.37 - Apresentação dos resultados da curva 3 utilizando de todos os métodos.....	111
Figura 5.38 - Apresentação dos resultados da curva 3 utilizando de todos os métodos – curva ampliada.....	111
Figura 5.39 - Curva 4 gerada NR utilizando “chute inicial” obtido em AG. ....	112
Figura 5.40 - Curva 4 - Apresentação dos resultados de todos os métodos. ....	113
Figura 5.41 - Curva 1 - Apresentação dos resultados de todos os métodos. ....	113
Figura 5.42 - Curva 2 - Apresentação dos resultados de todos os métodos. ....	114
Figura 5.43 – Curva 2 IxV ampliada próximo ao Pmp. ....	114



---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características do modulo PV .....	53
Tabela 3.2 - Dados das curvas utilizadas na pesquisa .....	53
Tabela 3.3 - Restrições dos parâmetros no modelo de um diodo. ....	58
Tabela 3.4 - Restrições dos parâmetros no modelo de dois diodos. ....	62
Tabela 4.1 – Parâmetros obtidos da Curva 1 .....	67
Tabela 4.2 – Dados obtidos quando $x_0 = [0,6; 2,5; 1,5; 2,0; 100]$ . ....	67
Tabela 4.3 – Dados obtidos quando $x_0 = [2,0; 1,0; 1,0; 1,0; 50]$ . ....	68
Tabela 4.4 – Dados obtidos quando $x_0 = [1,5; 1e-3; 1,5; 1,5; 100]$ . ....	68
Tabela 4.5 – Parâmetros obtidos da Curva 2 .....	68
Tabela 4.6 - Dados obtidos quando $x_0 = [1,5; 1,0; 1,5; 1,5; 100]$ . ....	70
Tabela 4.7 - Dados obtidos quando $x_0 = [1,5; 0,5; 1,0; 0,5; 50]$ . ....	71
Tabela 4.8 – Dados obtidos quando $x_0 = [2,0; 0,1; 1,0; 1,0; 100]$ . ....	73
Tabela 4.9 – Parâmetros obtidos da Curva 3. ....	74
Tabela 4.10 - Dados obtidos quando $x_0 = [1,5; 1,0; 1,5; 1,5; 100]$ . ....	75
Tabela 4.11 – Dados obtidos quando $x_0 = [2,0; 1,0; 1,0; 0,5; 50]$ . ....	75
Tabela 4.12 – Dados obtidos quando $x_0 = [2,0; 1,0; 1,0; 1,0; 50]$ . ....	76
Tabela 4.13 – Parâmetros obtidos da Curva 4. ....	77
Tabela 4.14 – Dados obtidos quando $x_0 = [3,0; 0,5; 1,0; 0,5; 50]$ . ....	77
Tabela 4.15 – Dados obtidos quando $x_0 = [1,5; 1,0; 1,5; 1,5; 100]$ . ....	78
Tabela 4.16 - Chutes Iniciais Utilizados. ....	79
Tabela 4.17 - Obtenção dos parâmetros da Curva 1 .....	79
Tabela 4.18 - Obtenção dos parâmetros da Curva 2 .....	79
Tabela 5.1 – Limites inferiores e superiores dos parâmetros buscados para o modelo de um diodo. ....	86
Tabela 5.2 - – Limites inferiores e superiores dos parâmetros buscados para o modelo de dois diodos. ....	86
Tabela 5.3 - Resultado das simulações da curva 1, AG com modelo de um diodo. ....	87
Tabela 5.4 - Resultado das simulações da curva 2, AG com modelo de um diodo. ....	90
Tabela 5.5 - Resultado das simulações da curva 3, AG com modelo de um diodo. ....	92
Tabela 5.6 - Resultado das simulações da curva 4, AG com modelo de um diodo. ....	94
Tabela 5.7 – Comparação dos Dados Obtidos entre NR e AG. ....	95
Tabela 5.8- Resultado das simulações da curva 1, AG com modelo de dois diodos .....	98
Tabela 5.9 - Resultado das simulações da curva 2, AG com modelo de dois diodos. ....	101
Tabela 5.10 - Resultado das simulações da curva 3, AG com modelo de dois diodos. ....	103

Tabela 5.11 - Resultado das simulações da curva 4, AG com modelo de dois diodos. .... 107

---

## LISTA DE SIGLAS

- AC** - Corrente Alternada;
- AE** - Algoritmo Evolucionário;
- AG** - Algoritmo Genético;
- DC** - Corrente Contínua;
- DDM** - Modelo de dois diodos (*double-diode model*);
- FF** - Fator de Forma;
- F<sub>A</sub>** - Função de Avaliação;
- I<sub>cc</sub>** - Corrente de Curto-Circuito;
- I<sub>D</sub>** - Corrente que flui através de um diodo
- I<sub>mp</sub>** - Corrente no Ponto de Máxima Potência;
- I<sub>ph</sub>** - Corrente Fotogerada;
- I<sub>D</sub>** - Corrente que flui através do Diodo;
- I<sub>s</sub>** - Corrente de saturação do diodo;
- J** - Matriz Jacobina;
- m** - Fator de idealidade;
- NR** - Newton Raphson
- P<sub>mp</sub>** - Ponto de Máxima Potência;
- PV** - Fotovoltaico / fotovoltaicos;
- R<sub>p</sub>** - Resistência em paralelo do módulo;
- R<sub>s</sub>** - Resistência série do módulo;
- SDM** - Modelo de um diodo (*single-diode model*);
- TDM** - Modelo de três diodos (*three-diode model*);
- V<sub>mp</sub>** - Tensão no Ponto de Máxima Potência;
- V<sub>oc</sub>** - Tensão de Circuito Aberto;
- N<sub>s</sub>** - Número de células solares associadas em série.



---

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>24</b>
1.1	Contextualização.....	24
1.2	Motivação .....	25
1.3	Objetivos.....	25
1.4	Estado da Arte.....	26
1.5	Organização do Trabalho.....	29
<b>2</b>	<b>TEORIA E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
2.1	Introdução .....	32
2.2	Módulo Fotovoltaico.....	32
2.2.1	Características das Células .....	33
2.2.2	Influência da Temperatura e da Radiação Solar na Curva Característica da Célula Fotovoltaica.....	35
2.2.3	Eficiência de Conversão.....	37
2.2.4	Circuito Equivalente Ideal.....	37
2.2.5	Circuito Equivalente Real .....	40
2.3	Método de Newton Raphson.....	43
2.3.1	Newton Raphson para Sistemas .....	45
2.4	Algoritmos Evolucionários .....	47
2.4.1	Algoritmos Genéticos.....	48
<b>3</b>	<b>FORMULAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>52</b>
3.1.	Introdução .....	52
3.2.	Dados Medidos e Curvas do Módulo.....	52
3.3	Formulação Matemática – Modelo de um diodo .....	55
3.4	Formulação Matemática – Modelo de dois diodos .....	59
<b>4</b>	<b>OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO UTILIZANDO O MÉTODO DE NEWTON RAPHSON.....</b>	<b>64</b>

4.1	Introdução .....	64
4.2.	Aplicação do Método Newton Raphson ao Problema Proposto.....	64
4.3	Dados obtidos utilizando o método de Newton Raphson (NR).....	66
4.3.1	Dados Obtidos aplicando NR à Curva 1 .....	66
4.3.2	Dados Obtidos aplicando NR à Curva 2 .....	68
4.3.3	Dados Obtidos aplicando NR à Curva 3 .....	74
4.3.4	Dados Obtidos aplicando NR à Curva 4 .....	76
4.4	Análise dos Resultados Válidos.....	79
<b>5</b>	<b>OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS.....</b>	<b>82</b>
5.1.	Introdução .....	82
5.2.	Fluxograma do Algoritmo Genético Desenvolvido .....	82
5.2.1.	Função de Aptidão e Restrições .....	85
5.3.	Aplicação de Algoritmos Genéticos no Modelo de Um Diodo .....	86
5.3.1.	Análise dos Resultados aplicando AG com o modelo de um diodo na Curva 1 .....	86
5.3.2	Análise dos Resultados aplicando AG com o modelo de um diodo na Curva 2 .....	89
5.3.3	Análise dos Resultados aplicando AG com o modelo de um diodo na Curva 3 .....	92
5.3.4	Análise dos Resultados aplicando AG com o modelo de um diodo na Curva 4 .....	94
5.4.	Comparação entre o Método Newton Raphson e Algoritmos Genéticos no Modelo de Um Diodo.....	95
5.5.	Aplicação de Algoritmos Genéticos no Modelo de Dois Diodos .....	97
5.5.1	Análise dos Resultados aplicando AG com o modelo de dois diodos na Curva 1 .....	98
5.5.2	Análise dos Resultados aplicando AG com o modelo de dois diodos na Curva 2 .....	100
5.5.3	Análise dos Resultados aplicando Algoritmos Genéticos com o Modelo de Dois Diodos na Curva 3 .....	103
5.5.4	Análise dos Resultados aplicando AG com o modelo de dois diodos na Curva 4 .....	106
5.6	Utilizando o Resultado obtido dos Algoritmos Genéticos para o Chute Inicial no Método de Newton Raphson .....	109

<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>116</b>
6.1 Considerações Finais .....	116
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros .....	118
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>120</b>



---

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A energia elétrica é fundamental para o desenvolvimento dos países e para a qualidade de vida das pessoas, quanto maior o crescimento da população mundial, maior é o consumo de energia. Para suprir esse aumento é necessário ampliar a capacidade de geração de energia elétrica, aumentar a eficiência das fontes convencionais e desenvolver novas fontes.

Hoje, existe uma grande diversidade de fontes de energia no mundo, mas grande parte da energia utilizada é proveniente de fontes não renováveis, sendo a maior percentagem derivada de combustíveis fósseis. Entretanto, o cenário do uso de energia muda constantemente, a parcela de fonte de energia renovável, utilizada na matriz energética cresce a cada ano.

As fontes alternativas de energia têm ganhado bastante destaque nos últimos anos, isso se deve a dois fatores: (1) A atual matriz energética mundial não conseguirá sozinha suprir as necessidades futuras de energia no mundo; (2) O impacto ambiental gerado por energias não renováveis está se agravando a cada dia, necessitando assim do urgente crescimento de fontes de energia limpa.

Entre todas as fontes renováveis de energia, a mais abundante é a energia solar. Esta energia chega até a terra através dos raios solares, na forma de ondas eletromagnéticas que transportam luz e calor, necessários para a vida terrestre. Todas as fontes de energia utilizadas pelo homem, com poucas exceções, se derivam da energia solar.

A energia da biomassa, ou da matéria orgânica, tem origem na energia captada do Sol através da fotossíntese, que é a conversão da energia da luz solar em energia química. A energia das águas dos rios, usada para mover turbinas de usinas hidroelétricas, tem origem na evaporação, nas chuvas e no degelo provocados pelo calor do Sol. A energia dos ventos tem origem nas diferenças de temperatura e pressão na atmosfera ocasionadas pelo aquecimento solar. Os combustíveis fósseis como o carvão, o gás natural, e o petróleo também têm origem na energia solar, pois são resultado da decomposição da matéria orgânica produzida há milhares de anos (VILLALVA e GAZOLI, 2013, p.15).

A energia solar é uma energia renovável e inesgotável. A transformação de energia solar pode ser aproveitada através de dois tipos diferentes de usinas: (i) fotovoltaica, que

consiste em painéis fotovoltaicos instalados em uma área relativamente grande, geralmente feitos de silício, capazes de converter a irradiação solar diretamente em eletricidade; e (ii) heliotérmica, voltada para a geração de eletricidade através do aquecimento de um fluido e funcionará de maneira semelhante a uma termelétrica convencional (PINHO E GALDINO, 2014).

Os sistemas fotovoltaicos não poluem o meio ambiente, possui baixa manutenção, pode ser usada em áreas remotas, permitindo assim o acesso de áreas isoladas à energia elétrica, possui fácil instalação e, além disso, vida útil elevada.

## **1.2 Motivação**

Tendo em vista a excelente capacidade de utilização da energia fotovoltaica, sua expansão é eminente, para isso, é necessário conhecer todas as características físicas e elétricas de um módulo fotovoltaico, conhecer como é seu funcionamento e quais fatores influenciam na geração de energia.

Esta pesquisa é justificada pela expansão dos sistemas elétricos fotovoltaicos, de pequeno e grande porte, conectados à rede ou que trabalham de forma autônoma. Para analisar e controlar tais sistemas, é necessário que os parâmetros do mesmo sejam confiáveis e obtidos com boa precisão.

## **1.3 Objetivos**

O algoritmo de controle de um sistema fotovoltaico é um software desenvolvido para controlar as variáveis de saída de acordo com as variáveis de entrada, buscando o ponto de operação de maior geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico.

Para trabalhar no desenvolvimento e melhoria do algoritmo de controle é necessário primeiro extrair os parâmetros do módulo, ou do sistema fotovoltaico que se deseja trabalhar. Portanto, a pesquisa pretende obter um método capaz de extrair esses parâmetros através de métodos rápidos, aplicados a problemas de engenharia, capazes de caracterizar o comportamento do módulo em condições de trabalho.

A ideia é aplicar um método numérico ao problema proposto. O primeiro método escolhido foi o Newton Raphson, iterativo, que consiste em estimar a raiz de uma dada função  $f(x)$ , a partir de um chute inicial. Esse método foi escolhido devido a sua simplicidade na aplicação.

Posteriormente, o uso de Algoritmos Evolucionários será testado, mais especificadamente o Algoritmo Genético. O AG é uma técnica de otimização e de busca baseado nos princípios de genética e seleção natural, permite que uma população seja composta de muitos indivíduos para evoluir sob uma regra específica de seleção. Esta evolução converge para um estado de maximização ou minimização de uma função objetivo, chamada de função *fitness*.

#### 1.4 Estado da Arte

Os módulos fotovoltaicos são amplamente estudados, devido à importância do crescimento da utilização da energia solar na Matriz Energética Mundial. Os modelos matemáticos utilizados, mais pesquisados, para a extração de parâmetros são dois: os modelos de um e dois diodos. Entretanto, existem também alguns pesquisadores que já estudam e desenvolvem pesquisas através do uso do modelo de três diodos.

Entre as numerosas abordagens de modelagem na literatura, o modelo mais utilizado é o modelo de um diodo, do inglês, *single-diode model* (SDM). O artigo “*Approximate Single-Diode Photovoltaic Model for Efficient I-V Characteristics Estimation*” faz uma aplicação do modelo de um diodo usando técnicas de aproximação matemática, através da abordagem de mínimos quadrados contínuos, para encontrar os seguintes parâmetros: fotocorrente gerada, corrente de saturação reversa do diodo e a resistência em paralelo. Para encontrar os parâmetros fator de idealidade e a resistência série, os autores utilizam o método de Newton (MA; MAN; TING; ZHANG; GUAN; WONG, 2013).

O artigo: “*Characterization of PV panel and global optimization of its model parameters using genetic algorithm*”, relata a pesquisa desenvolvida pelos autores na extração dos parâmetros, de um painel fotovoltaico, usando algoritmos genéticos, através de informações da folha de dados do fabricante, como base para o propósito de otimização. É utilizado também, um método numérico iterativo, Newton Raphson, para resolver a relação tensão-corrente do módulo fotovoltaico. Os resultados mais precisos, alcançando

o menor erro, foram obtidos usando o modelo de diodo único, com três parâmetros extraídos: fator de idealidade, resistência em série e resistência em paralelo. A corrente fotogerada e a corrente de saturação do modelo foram calculadas dependendo dos parâmetros otimamente extraídos (ISMAIL; MOGHAVVEMI; MAHLIA, 2013).

Entre as publicações mais novas, está o artigo “*A simple approach to extract the unknown parameters of PV modules*”. A ideia principal do método proposto é a formação de quatro equações baseadas nos dados de pontos notáveis, fornecidos pelo fabricante do módulo, como funções dos parâmetros desconhecidos. Por substituição, entre estas quatro equações, uma expressão de  $R_S$  é obtida e depois resolvida numericamente para diferentes valores do fator de idealidade ( $m$ ), produzindo um conjunto de curvas I - V. Estas curvas são comparadas com a curva de referência dado pelo fabricante e é selecionada a melhor curva. Um método iterativo usando Newton Raphson é usado para obter a raiz da função  $R_S$  e de forma matemática, posteriormente, os outros parâmetros são encontrados (HUSSEIN, 2017).

O modelo de dois diodos, do inglês *double-diode model* (DDM), é muito utilizado em aplicações que requeiram um equacionamento com baixa irradiância. Abaixo será abordado os artigos pesquisados sobre DDM.

No artigo “*Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules*”, os autores trabalharam com o modelo de dois diodos, porém não fizeram a extração dos sete parâmetros, pois, consideram iguais as correntes de saturação reversa dos diodos,  $I_{S1}$  e  $I_{S2}$ . Além disso, definem os fatores de idealidade  $m_1 = 1$  e  $m_2$  variável. Portanto, apenas quatro parâmetros são computados, são eles: a corrente fotogerada ( $I_{ph}$ ), a corrente de saturação reversa dos diodos ( $I_S$ ), resistência em paralelo ( $R_p$ ) e a resistência em série ( $R_S$ ). Destes, apenas  $R_p$  e  $R_S$  são calculados por método iterativo, mais especificadamente o método de Newton Raphson (ISHAQUE; SALAM; TAHERI, 2011).

O artigo “*On the Parameter Extraction of a Five-Parameter Double-Diode Model of Photovoltaic Cells and Modules*” mostra a extração de cinco parâmetros utilizando o modelo de dois diodos através do método de Newton Raphson. Para isso, foram considerados os fatores de idealidade  $m_1 = 1$  e  $m_2 = 2$ . Interessante ressaltar, que esse artigo relata que devido aos valores da corrente de saturação reversa do diodo serem muito

pequenas, a matriz jacobiana pode se aproximar da singularidade e, devido a isso, o método pode não convergir. Para contornar tal problema, os autores eliminaram das equações principais  $I_{S1}$  e  $I_{S2}$ , aplicando algumas manipulações matemáticas (HEJRI; MOKHTARI; AZIZIAN; GHANDHARI; SODER, 2014).

Entre os artigos analisados, o artigo “*Parameter extraction of solar photovoltaic modules using penalty-based differential evolution*” é o que mais se aproxima da pesquisa desenvolvida neste trabalho, mais especificadamente, quando aplicado os Algoritmos Evolucionários. Esse artigo propõe o uso da evolução diferencial baseada na penalidade (*P-DE*), para extrair os parâmetros de módulos fotovoltaicos, em diferentes condições ambientais, obtendo sete parâmetros:  $I_{ph}$ ,  $I_{S1}$ ,  $I_{S2}$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $R_s$ , e  $R_p$ . O método se mostrou muito eficiente, gerando as curvas I-V idênticas as curvas geradas pelos dados experimentais (ISHAQUE; SALAM; MEKHILEF; SHAMSUDIN, 2012). Entretanto, os dados experimentais foram obtidos das fichas técnicas dos fabricantes, e não relatam curvas considerando a deterioração gerada com o tempo de uso, como a que é proposta nessa dissertação.

No NUPEA, Núcleo de Pesquisa e Extensão em Energias Alternativas, da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, uma pesquisa parecida já foi desenvolvida em 2011 por Pollyana Rodrigues. O trabalho visa a extração de parâmetros, diretamente de curvas medidas, de módulos fotovoltaicos, aplicando o método iterativo da região de confiança, usando modelos elétricos com simples e dupla exponenciais. Da pesquisa desenvolvida foram publicados dois artigos: “*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 desenvolveu a pesquisa com o modelo de um diodo, extraíndo os cinco parâmetros, e também com o modelo de dois diodos, entretanto, no último, os fatores de idealidade foram considerados fixos, com  $m_1 = 1$  e  $m_2 = 2$  e extraídos cinco parâmetros,  $I_{ph}$ ,  $I_{S1}$ ,  $I_{S2}$ ,  $R_s$ , e  $R_p$ .

Já o modelo de três diodos, do inglês *three-diode model* (TDM), abordado no artigo “*Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit*

*model taking leakage current through periphery into consideration*”, trata das características elétricas das células solares multicristalina, que leva em consideração a influência dos limites de grãos e correntes de fuga através da periferia da célula fotovoltaica (NISHIOKA; SAKITANI; URAOKA; FUYUKI, 2007).

Grande parte das pesquisas encontradas, extraem a curva I-V do módulo fotovoltaico através de dados fornecidos pelo fabricante, como: tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), corrente de curto circuito ( $I_{cc}$ ), potência, tensão e corrente máxima de saída e os coeficientes de temperatura. Entretanto, essas pesquisas geram curvas dos módulos fotovoltaicos sem considerar as deteriorações sofridas causadas por fatores como: o tempo de uso, a queima de alguma célula, o sombreamento, entre outros. Logo, não conseguem demonstrar a curva real do módulo durante toda sua vida útil.

## **1.5 Organização do Trabalho**

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos, esta dissertação é estruturada da seguinte maneira:

### **Capítulo 1 - Introdução**

Este capítulo tem por objetivo apresentar inicialmente, as motivações e os objetivos da dissertação. Além disso, apresenta uma revisão bibliográfica contextualizando o trabalho.

### **Capítulo 2 - Teoria e Métodos**

No capítulo 2 é apresentada a teoria na qual o trabalho foi baseado, detalhando as características e modelos de equacionamento dos módulos fotovoltaicos, a descrição do método de Newton Raphson e a teoria de Algoritmos Genéticos.

### **Capítulo 3 - Formulação do Problema**

Este capítulo mostra a formulação do problema pesquisado, detalhando seu equacionamento para o modelo de um e dois diodos. Além disso, o capítulo traz os dados e as curvas do módulo fotovoltaico utilizado no trabalho.

### **Capítulo 4 - Obtenção de Parâmetros de um Módulo Fotovoltaico Utilizando o Método de Newton Raphson**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da aplicação do método de Newton Raphson na extração dos parâmetros das quatro curvas analisadas do módulo fotovoltaico

descrito no capítulo 3. Nele foi utilizado o modelo de equacionamento de um diodo. Foi usada nesse capítulo a teoria de Autovalores para explicar o comportamento da matriz Jacobiana, nas curvas fotovoltaicas consideradas.

### **Capítulo 5 - Obtenção de Parâmetros de um Módulo Fotovoltaico Utilizando Algoritmos Genéticos**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da aplicação de Algoritmos Genéticos na extração dos parâmetros das quatro curvas analisadas, para o modelo de um e de dois diodos. Ele mostra também a comparação entre o método de NR e AG no modelo de um diodo, a comparação entre AG de um e dois diodos e a aplicação do resultado de AG como chute inicial no método de Newton Raphson, mostrando também, a comparação desse último com os anteriores.

### **Capítulo 6 - Conclusões**

Neste capítulo são exibidas as considerações conclusivas sobre o trabalho, com o intuito de sumarizar as suas principais contribuições e apontar eventuais necessidades de investigações futuras na área de pesquisa em foco.

### **Referências**

Finalmente, é apresentado o material bibliográfico utilizado no desenvolvimento desta dissertação.



---

## 2 TEORIA E MÉTODOS

### 2.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo detalhar as teorias que serviram como base para o desenvolvimento do trabalho, trazendo conceitos e características importantes sobre módulos fotovoltaicos. No capítulo também são abordadas as descrições dos métodos de Newton Raphson e Algoritmos Genéticos, que serão aplicados na pesquisa em questão.

### 2.2 Módulo Fotovoltaico

A conversão direta da luz solar em energia elétrica é obtida através do uso da célula solar, por um processo chamado de efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico é um fenômeno físico que ocorre quando a radiação eletromagnética do Sol incide sobre uma célula composta de materiais semicondutores com características específicas (VILLALVA e GAZOLI, 2013). Os fótons, partículas de luz, tocam os elétrons livres dos átomos contidos nas células fotovoltaicas gerando um fluxo de eletricidade.

Atualmente, existem diversas tecnologias utilizadas na fabricação de módulos fotovoltaicos, a mais conhecida e utilizada ainda na fabricação em larga escala é o módulo fotovoltaico feito a partir do silício. Isso ocorre porque ele é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, ficando atrás apenas do oxigênio, tornando seu uso em larga escala mais viável financeiramente.

As células de silício são constituídas por duas camadas de material, sendo necessário que uma esteja carregada positivamente e outra negativamente, para tal, o silício é dopado com impurezas. Na camada superior é utilizado o fósforo, pois permite que o material possua elétrons extras, fazendo com que a camada fique carregada negativamente, na camada inferior é utilizado o boro, o que resulta em algumas lacunas e uma carga positiva. Dessa forma, cria-se na célula um campo elétrico que empurra os elétrons livres para as bases metálicas, superior e inferior da célula, quando da incidência da radiação da luz solar, gerando, desse modo, com o fechamento do circuito, uma corrente elétrica. Uma célula solar sozinha fornece pouca energia e apresenta uma tensão elétrica muito baixa.

Para obtenção de uma tensão adequada é necessário agrupar várias células para formar um módulo.

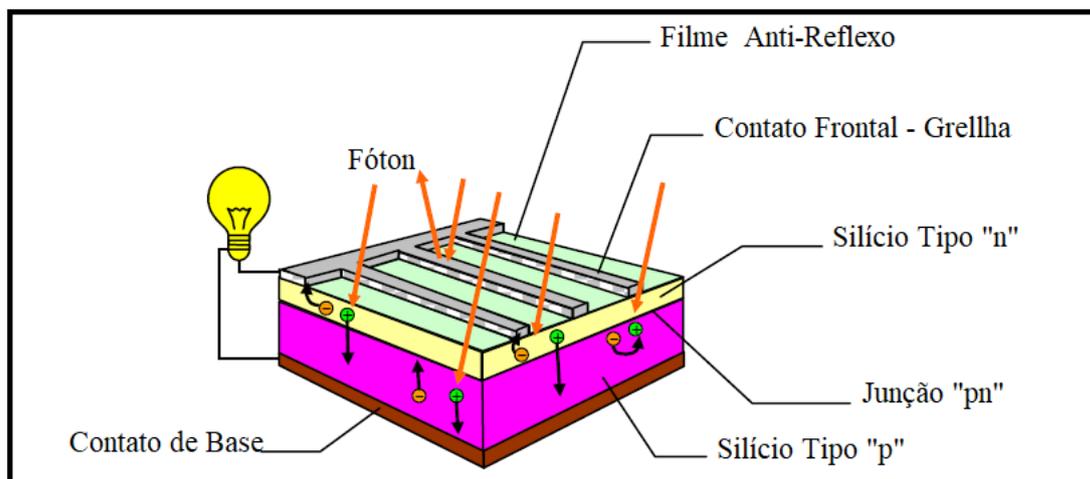


Figura 2.1 - Estrutura de uma célula fotovoltaica (Adaptado de (CARNEIRO, 2010)).

A Figura 2.1 mostra a estrutura interna de uma célula fotovoltaica padrão. Esta é feita por material semicondutor, composta por duas camadas de silício, uma tipo “P” e outra tipo “N”, uma grade de coletores metálicos superiores e uma base metálica situada na parte inferior da célula. A grade e a base metálica são os terminais elétricos que coletam a corrente elétrica gerada quando há absorção de energia luminosa. A parte superior precisa ser de material transparente, para absorver a luz incidente; por isso, os contatos elétricos superiores são construídos na forma de uma fina grade metálica impressa na célula. Além da estrutura mostrada, a maioria das células possui também uma camada de material antirreflexivo sobre a estrutura, utilizada para aumentar a absorção de luz.

A tensão nos terminais de uma célula fotovoltaica é muito baixa, aproximadamente 0,6 volts. Esse valor depende do material que é constituída a célula. Logo, a corrente fotogerada é baixa, da ordem de  $10^{-3}$  ampères. Assim sendo, para se conseguir um valor de potência maior, é necessário que as células sejam ligadas em série e/ou paralelo constituindo o que comumente é chamado de módulo.

### 2.2.1 Características das Células

Algumas características técnicas do módulo fotovoltaico são disponibilizadas pelo fabricante, são elas: a tensão de circuito aberto  $V_{OC}$  (*open circuit voltage*), obtida da

aferição da tensão no módulo quando não apresenta carga; a corrente do módulo quando o dispositivo encontra-se em curto circuito  $I_{SC}$  (*short circuit current*) e a máxima potência ( $P_{mp}$ ) de um módulo fotovoltaico, atingida quando se obtém a corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ ) e a tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ ) (RODRIGUES, 2012).

Para as células fotovoltaicas de uso terrestre sem concentração da energia solar, a curva I-V é medida em condições-padrão de ensaio: irradiância de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , espectro solar AM 1,5 e temperatura da célula fotovoltaica de  $25^\circ\text{C}$ . Para essa medição, geralmente, utiliza-se um simulador solar e um sistema de medição automatizado (PINHO E GALDINO, 2014, p. 118).

Para cada condição de carga acoplada aos terminais da célula, obtém-se um par de valores I-V. Unindo-se os pontos traça-se a curva I versus V. A potência gerada nos terminais de uma célula é produzida pelo produto da tensão versus corrente em cada ponto da curva. A Figura 2.2 ilustra as curvas típicas de uma módulo fotovoltaico, a corrente elétrica em função da diferença de potencial e a potência elétrica em função da diferença de potencial aplicada a uma célula de silício monocristalino.

Note que não há potência gerada quando a tensão ou a corrente são nulas ( $I_{cc}$  e  $V_{oc}$ ). Observando esta curva, verifica-se que existe um único valor de tensão e correspondente corrente para o qual a potência fornecida na saída do módulo é máxima. Os pontos de máxima potência ( $P_{MP}$ ), máxima corrente ( $I_{MP}$ ) e máxima tensão ( $V_{MP}$ ) são destacados na figura.

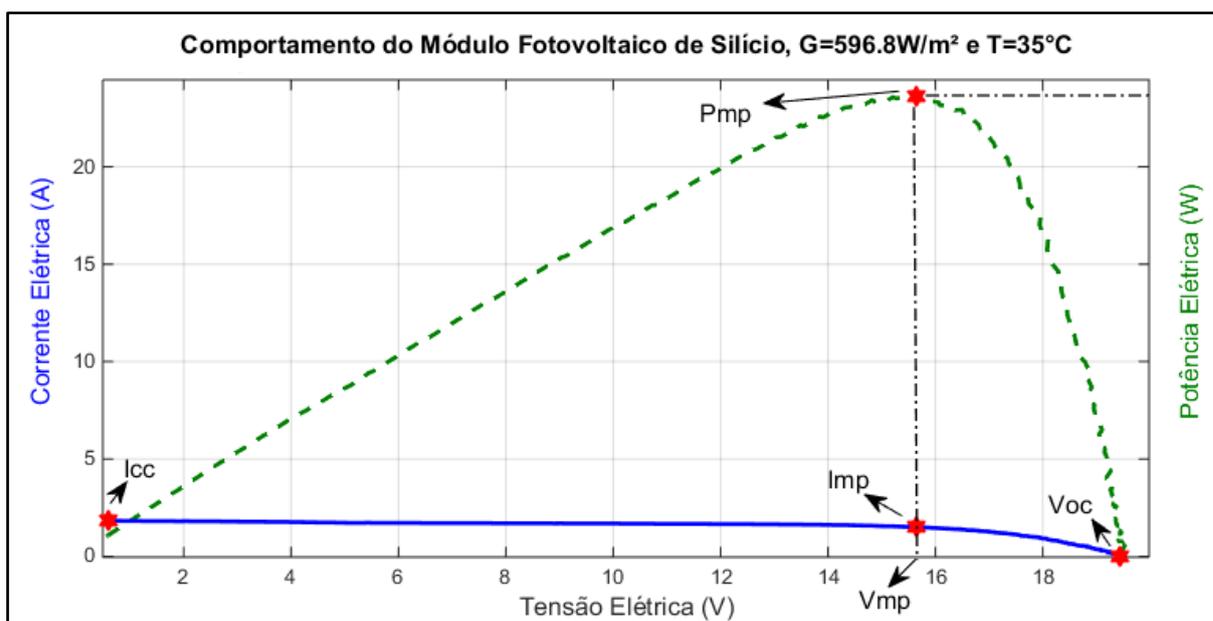


Figura 2.2 - Curvas I-V e P-V de um módulo fotovoltaico.

Para células fotovoltaicas, a característica mais significativa é a potência de pico medida em Watt-pico (Wp), essa é a potência máxima que a célula pode gerar em pleno funcionamento quando há carga acoplada em seus terminais. Para maximizar a potência de saída do módulo PV, é preciso monitorar continuamente a Corrente (I) e a Tensão (V) gerada pela placa, módulo, conseguindo, dessa forma, o controle da Potência fornecida à carga. Outras condições que influenciam diretamente na potência da placa são a temperatura local e a Irradiância direta na placa. Vale lembrar que a variação de temperatura ocorre de forma mais lenta, enquanto a irradiância pode apresentar mudanças bruscas em questões de segundos, como exemplo, o bloqueio do sol por uma nuvem no céu. Por conseguinte, é necessário ter um algoritmo que gere a curva do módulo continuamente para detectar as mudanças do ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico.

Um módulo fotovoltaico não apresenta uma tensão de saída constante nos seus terminais. A tensão depende da sua corrente e vice-versa. O valor de tensão e da corrente nos seus terminais depende da carga conectada a eles. Se conectarmos um aparelho que demanda muita corrente a tensão tenderá a cair, por outro lado, se conectarmos uma carga que demanda pouca corrente a tensão do módulo será mais elevada, tendendo à tensão de circuito aberto (VILLALVA, 2015).

### **2.2.2 Influência da Temperatura e da Radiação Solar na Curva Característica da Célula Fotovoltaica**

A corrente fotogerada depende diretamente da quantidade de fótons que chega à superfície da célula, nesse sentido, sua eficiência é proporcional à irradiância solar incidente. A Figura 2.3 mostra essa relação, quanto maior a radiação solar incidente no módulo fotovoltaico, maior será a corrente elétrica gerada e haverá também um aumento singular na tensão elétrica.

Vale ressaltar que a liberação do elétron da última camada do átomo depende da energia contida em cada fóton, caso seja insuficiente, o elétron não é liberado e o fóton serve apenas para aquecer a célula.

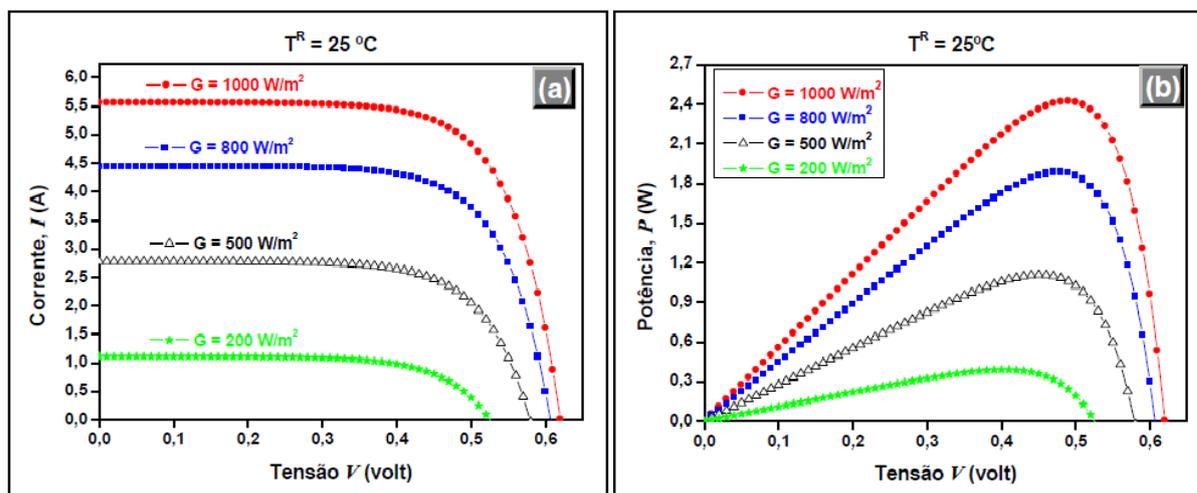


Figura 2.3 - Influência da variação da irradiância nas curvas I-V e P-V de uma célula fotovoltaica com temperatura padrão,  $T = 25^\circ\text{C}$  (CARNEIRO, 2010).

A temperatura local influencia também na geração de energia, entretanto, de forma negativa, pois com o aumento da temperatura diminui a tensão que o módulo fotovoltaico fornece. Isso ocorre, pois com o aumento da temperatura aumenta também a barreira de potencial que existe entre os materiais semicondutores tipo P e N, em cada célula, dificultando o deslocamento de elétrons livres. A Figura 2.4 ilustra a variação das curvas características I-V e P-V de um módulo para quatro temperaturas diferentes para uma mesma irradiância solar.

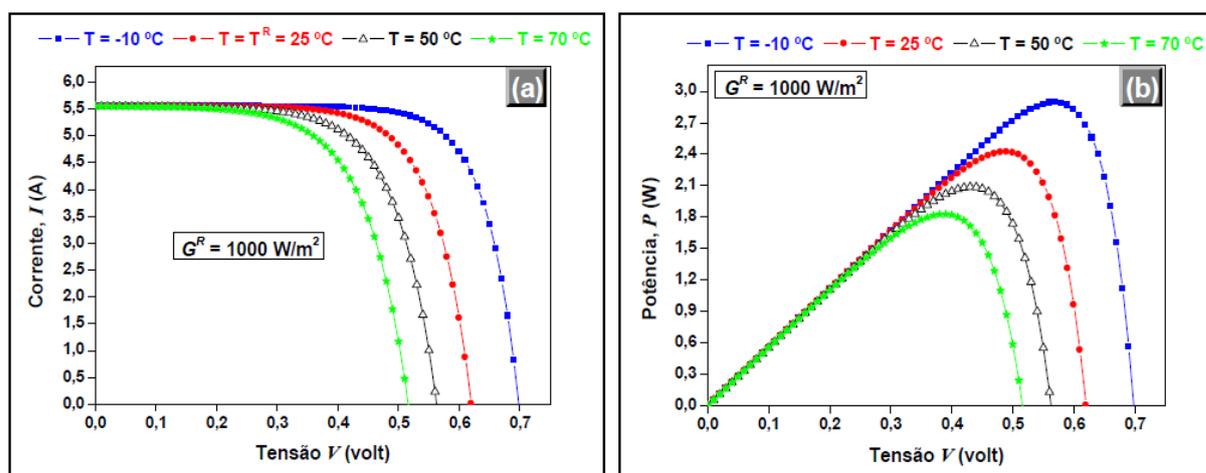


Figura 2.4 - Influência da temperatura nas curvas I-V e P-V de uma célula fotovoltaica com irradiância padrão  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  (CARNEIRO, 2010).

### 2.2.3 Eficiência de Conversão

A eficiência de conversão de energia nas células fotovoltaicas é definida como a razão entre a máxima potência elétrica gerada pelo dispositivo e a potência nele incidente, que depende exclusivamente do espectro da luz incidente no plano da célula iluminada (ZILLES, MACÊDO, GALHARDO e OLIVEIRA, 2012). A Eficiência, assim como em qualquer outro tipo de gerador elétrico, permite ao comprador ou pesquisador avaliar a qualidade de uma célula fotovoltaica, é caracterizada pela Equação (2.1).

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

Sendo o FF, o Fator de Forma, do inglês *fill factor*, que caracteriza o desempenho do módulo fotovoltaico, fornecido pelos fabricantes. O fator de forma é utilizado para descrever o “*grau de proximidade*” entre os valores da tensão máxima ( $V_{máx}$ ) e da tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) também entre a corrente máxima ( $I_{máx}$ ) e corrente de curto circuito ( $I_{CC}$ ), quanto mais a curva característica se aproxima da forma retangular, melhor é a qualidade da célula. O FF pode ser obtido através da Equação (2.2).

$$FF = \frac{I_{máx} \times V_{máx}}{I_{CC} \times V_{OC}} \quad (2.2)$$

### 2.2.4 Circuito Equivalente Ideal

As curvas características de uma célula fotovoltaica podem ser obtidas a partir de um esquema simplificado, referente ao circuito elétrico equivalente da célula. A junção P-N do semicondutor, contida dentro da maioria das células solares comerciais utilizadas atualmente, pode ser representada em um circuito como um diodo que representa a junção “pn” em paralelo com uma fonte de corrente contínua, a Figura 2.5 representa tal esquema. A curva característica do diodo é conhecida e permite de forma confiável o equacionamento matemático das células fotovoltaicas.

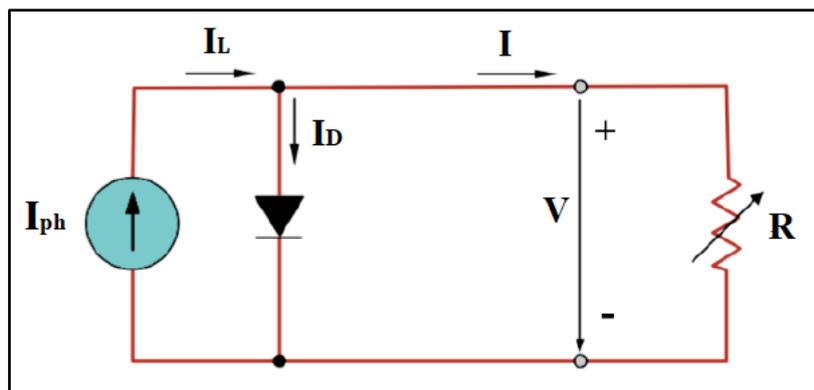


Figura 2.5 - Representação de um circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica ideal (adaptado de (CARNEIRO, 2010))

A curva I-V da célula fotovoltaica é obtida por meio da superposição da corrente fotogerada com a curva do diodo, levando em conta apenas o primeiro quadrante. No escuro, a célula possui características elétricas iguais a um diodo não polarizado, à medida que a célula é iluminada, sua curva se desloca para o quarto quadrante (quadrante de geração), pois o sentido da corrente agora é o inverso do caso em que a célula está no escuro. Quanto maior a radiação incidente na célula, maior será o deslocamento da curva. (ZILLES, MACÊDO, GALHARDO e OLIVEIRA, 2012). Por convenção, a curva padrão da célula iluminada é espelhada e mostrada sempre no primeiro quadrante. A Figura 2.6 apresenta as curvas e os esquemas elétricos da célula no escuro, pouco iluminada e bem iluminada, assim como a curva padrão da célula iluminada.

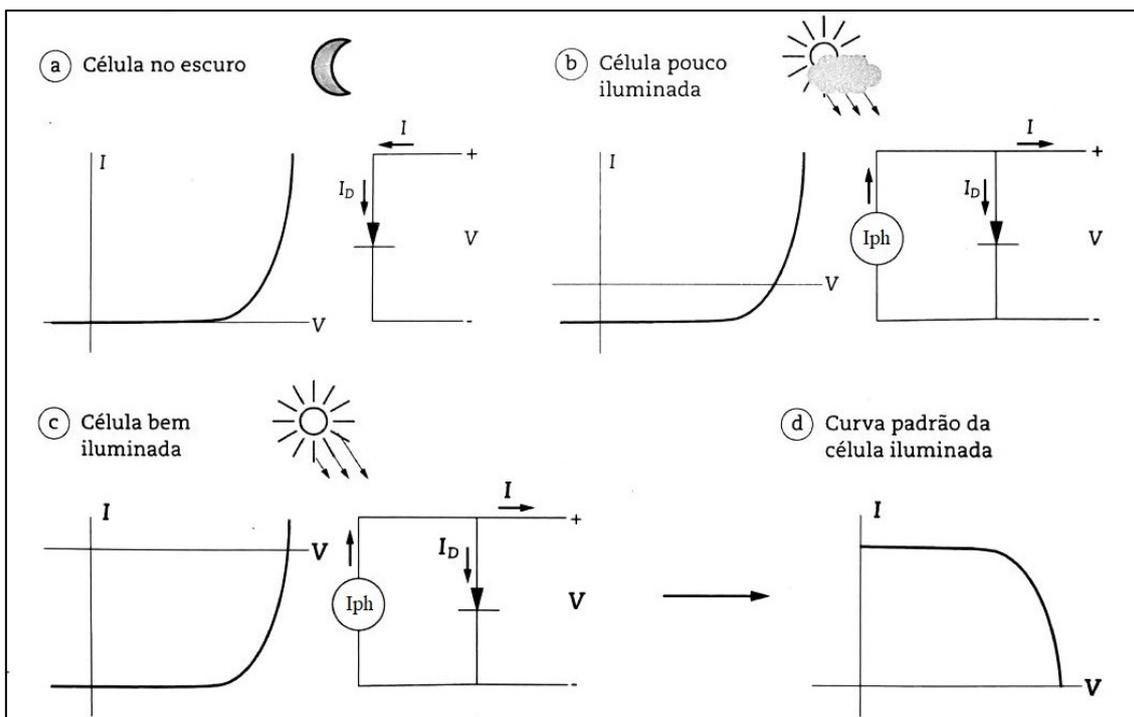


Figura 2.6 - Curva Característica corrente-tensão de uma célula de silício no escuro e iluminada (ZILLES, MACÊDO, GALHARDO e OLIVEIRA, 2012)

Analisando o circuito da Figura 2.6c, pode-se verificar que:

$$I = I_{ph} - I_D \quad (2.3)$$

onde a corrente que flui através de um diodo é igual a

$$I_D = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

Sendo:

$I$  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.

Logo, em um circuito equivalente ideal de uma célula fotovoltaica, seu equacionamento se torna:

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

A corrente de saturação reversa do diodo ( $I_s$ ) é produzida pelo componente quando a célula não está sob luz solar, no escuro. Essa corrente, chamada também de corrente de fuga, é gerada a partir do fluxo de portadores de carga minoritários na célula fotovoltaica que se opõem ao fluxo normal dos portadores majoritários, gerado por excitação térmica. Quanto maior a temperatura ambiente, maior será a corrente de fuga, logo essa corrente varia constantemente.

O fator de idealidade ( $m$ ) é um parâmetro importante usado para descrever se a junção P-N se comporta próxima ou afastada do caso ideal e depende da fabricação do diodo (tipo de material, dopagem, etc.), seu valor se encontra entre 1 e 2, quanto mais próximo de 1, mais ideal é o diodo. O fator de idealidade ( $m$ ) e a resistência série ( $R_s$ ), que será apresentada no item 2.2.5(a), afetam significativamente a forma das curvas I-V em torno do ponto de potência máxima ( $P_{MP}$ ), enquanto a resistência paralelo  $R_p$ , também descrita em 2.2.5(a), determina a inclinação da curva I-V perto do ponto  $I_{SC}$  (Jieming MA, Ka Lok MAN, T. O. TING, Nan ZHANG, Sheng-Uei GUAN and Prudence W. H. WONG, 2013).

### 2.2.5 Circuito Equivalente Real

A modelagem de um painel fotovoltaico se faz a partir da determinação de parâmetros que representam os fenômenos físicos verificados no equipamento. Para tanto, é preciso estabelecer inicialmente um modelo elétrico equivalente ao modelo real existente (RODRIGUES, 2012). No tópico anterior, apresentou-se o circuito equivalente ideal, porém esse não retrata o comportamento real de uma célula fotovoltaica, sendo necessário considerar ainda algumas variáveis.

### a) Modelo de Um Diodo, $R_s$ e $R_p$

Uma Célula fotovoltaica é simplesmente um semicondutor de junção P-N, que quando exposto à luz solar, uma corrente é gerada. Esta corrente varia proporcionalmente com a irradiância naquele momento (JACOB, JAYAKRISHNAN, UMASHANKAR e VIJAYAKUMAR, 2011). A Figura 2.7 mostra o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica com um diodo, considerando a resistência em série ( $R_s$ ) e a resistência em paralelo ( $R_p$ ).

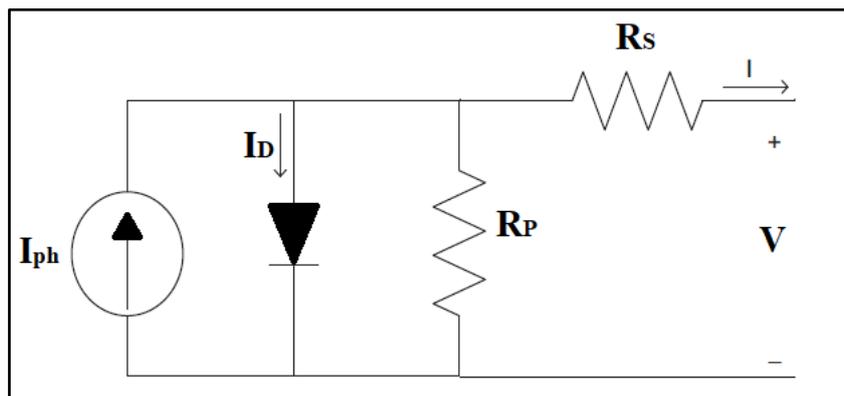


Figura 2.7 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica com um diodo.

A equação que descreve o circuito é dada por:

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{mKT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.6)$$

Sendo:

$I$  a corrente (A) da célula.

$I_{ph}$  a corrente (A) fotogerada.

$I_D$  - a corrente que flui através do diodo.

$I_s$  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.

$R_s$  a resistência ( $\Omega$ ) série da célula.

$R_p$  a resistência ( $\Omega$ ) paralelo da célula.

$V$  a tensão(V) de saída da célula.

No caso de módulos fotovoltaicos com várias células conectadas em série, a Equação 2.6 torna-se:

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{N_s m K T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.7)$$

Sendo  $N_s$  o número de células associadas em série.

As resistências série e paralelo apresentadas são responsáveis pelas dissipações internas na célula. A resistência série ( $R_s$ ) se origina na resistência do próprio material semicondutor, nos contatos metálicos e na junção metal-semicondutor. Caracterizando as perdas ôhmicas do material e contribui para reduzir a  $I_{SC}$  da célula, sem, no entanto, afetar sua  $V_{oc}$ .

Já a resistência em paralelo ( $R_p$ ) é causada por impurezas e defeitos na estrutura, principalmente próximo às bordas, que produzem um caminho interno para uma corrente de fuga, reduzindo assim a corrente efetivamente produzida pelo dispositivo, logo  $R_p$  consiste em reduzir  $V_{oc}$ , sem influenciar em  $I_{CC}$  (PINHO E GALDINO, 2014).

### **b) Modelo de Dois Diodos**

A razão preponderante para utilizar um modelo com dois diodos está no fato de que o modelo com um único diodo não representa bem o comportamento da célula em condições de baixa irradiância solar. Em alguns modelos com dois diodos considera-se o fator de idealidade do primeiro diodo igual a 1 (um), representando o fenômeno da difusão, enquanto o segundo tem valor igual a 2 (dois), representando o fenômeno da recombinação. Existem também autores que consideram o primeiro igual a 1(um) e o segundo variável e também, aqueles que consideram os dois variáveis (RODRIGUES, 2012).

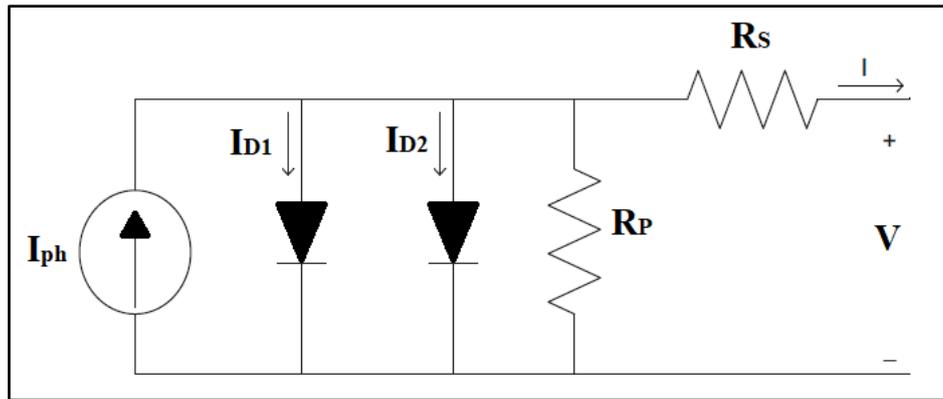


Figura 2.8 - Circuito equivalente do modelo de dois diodos.

Analisando o circuito da Figura 2.8, é possível obter a equação elétrica do modelo proposto, sendo:

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2.8)$$

Com

$$I_{D1} = I_{S1} \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{m_1 N_s K T}} - 1 \right) \quad (2.9)$$

e

$$I_{D2} = I_{S2} \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{m_2 N_s K T}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

Substituindo a Eq. 2.9 e a Eq. 2.10 na Eq. 2.8, tem-se a equação que caracteriza a corrente gerada no modelo de dois diodos:

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{m_1 N_s K T}} - 1 \right) - I_{S2} \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{m_2 N_s K T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.11)$$

Sendo:

$I_{S1}$  e  $I_{S2}$  as correntes (A) de saturação reversa dos diodos.

$m_1$  e  $m_2$  os fatores de idealidade dos diodos

### 2.3 Método de Newton Raphson

O método Newton Raphson é um método iterativo que consiste na estimativa da raiz de uma dada função  $f(x)$  com um único “chute inicial”. O método é obtido através da

expansão da série de Taylor em  $\mathbf{h} = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$ . Sendo  $\mathbf{h}$  um pequeno passo na direção  $\mathbf{x}$  (GRIFFITHS e SMITH, 1991).

$$f(\mathbf{x}_{n+1}) = f(\mathbf{x}_n + \mathbf{h}) = f(\mathbf{x}_n) + \mathbf{h}f'(\mathbf{x}_n) + \frac{\mathbf{h}^2}{2}f''(\mathbf{x}_n) + \dots \quad (2.12)$$

$$f(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}_0) + f'(\mathbf{x}_0)(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \frac{1}{2}f''(\mathbf{x}_0)(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^2 + \dots = \mathbf{0} \quad (2.13)$$

Suponha que o chute inicial esteja muito próximo da raiz real da equação. Então  $(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$  é pequeno o suficiente, e somente os primeiros termos são importantes para a estimar o valor da raiz. Dado  $\mathbf{x}_0$ , conseqüentemente  $\mathbf{x}_{n+1}$  é uma raiz, isto é,  $f(\mathbf{x}_n + \mathbf{h}) = \mathbf{0}$ . Truncando a série no segundo termo, temos:

$$f(\mathbf{x}_n) + \mathbf{h}f'(\mathbf{x}_n) = \mathbf{0} \quad (2.14)$$

ou

$$f(\mathbf{x}_n) + (\mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_n)f'(\mathbf{x}_n) = 0 \quad (2.15)$$

Portanto, dado  $\mathbf{x}_n$ , o ponto  $\mathbf{x}_{n+1}$  será obtido pela interseção da linha tangente em  $f(\mathbf{x})$  com  $\mathbf{x}_n$  com o eixo  $\mathbf{x}$ . Pode-se ilustrar matematicamente, de acordo com a eq. 2.16 e graficamente, de acordo com a Figura 2.9.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (2.16)$$

Sendo a eq. 2.17 a fórmula geral do método de Newton Raphson (SMITH,1998).

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (2.17)$$

A convergência do Método Newton Raphson é garantida para um determinado intervalo  $[a,b]$  contendo a raiz de  $f(x)$ , desde que  $f(x)$  e  $f'(x)$  sejam contínuas nesse intervalo e que  $f(a) \neq 0$ , em que  $a$  é a raiz de  $f(x)$  (COTA, BASTOS, SILVA e PEREIRA, 2012).

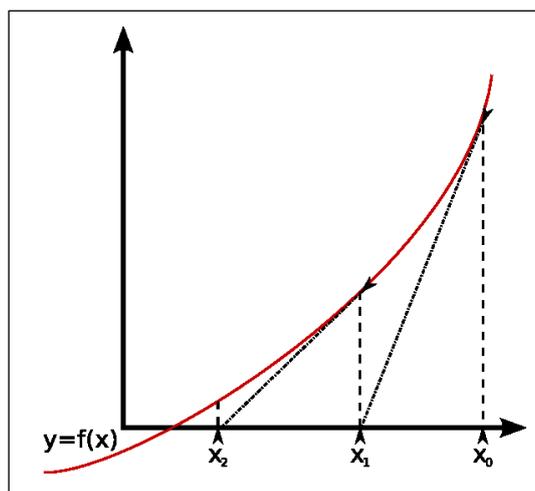


Figura 2.9 - Ilustração do Método Newton Raphson

Obviamente, isso tem uma simples interpretação gráfica mostrada na figura 2.9, a extrapolação é apenas tangencial na função no “chute inicial”  $x_0$ . A nova característica do método é a necessidade de calcular a derivada da função, e isso pode gerar dificuldades. Entretanto, para uma simples expressão algébrica a diferenciação é facilmente feita.

### 2.3.1 Newton Raphson para Sistemas

É baseado na expansão de Taylor com várias variáveis. Suponha que se faça um chute,  $(x_1^k, x_2^k)$  que esteja próximo de uma raiz  $(x_1^{k+1}, x_2^{k+1})$ . A expansão e Taylor é

$$f_1(x_1^{k+1}, x_2^{k+1}) = f_1(x_1^k, x_2^k) + (x_1^{k+1} - x_1^k) \frac{\partial f_1(x_1^k, x_2^k)}{\partial x_1} + (x_2^{k+1} - x_2^k) \frac{\partial f_1(x_1^k, x_2^k)}{\partial x_2} + \dots \quad (2.18)$$

$$f_2(x_1^{k+1}, x_2^{k+1}) = f_2(x_1^k, x_2^k) + (x_1^{k+1} - x_1^k) \frac{\partial f_2(x_1^k, x_2^k)}{\partial x_1} + (x_2^{k+1} - x_2^k) \frac{\partial f_2(x_1^k, x_2^k)}{\partial x_2} + \dots \quad (2.19)$$

Novamente, negligenciando as derivadas de ordem maior que a primeira, as Equações (2.18) e (2.19) se tornam uma estimativa melhor de uma raiz na forma:

$$(x_1^{k+1} - x_1^k) \frac{\partial f_1(x_1^k, x_2^k)}{\partial x_1} + (x_2^{k+1} - x_2^k) \frac{\partial f_1(x_1^k, x_2^k)}{\partial x_2} = -f_1(x_1^k, x_2^k) \quad (2.20)$$

$$(x_1^{k+1} - x_1^k) \frac{\partial f_2(x_1^k, x_2^k)}{\partial x_1} + (x_2^{k+1} - x_2^k) \frac{\partial f_2(x_1^k, x_2^k)}{\partial x_2} = -f_2(x_1^k, x_2^k) \quad (2.21)$$

Estas equações são facilmente expressas em função da alteração de  $x_1$  e  $x_2$

$$\Delta x_1 = x_1^{k+1} - x_1^k \quad (2.22)$$

e

$$\Delta x_2 = x_2^{k+1} - x_2^k \quad (2.23)$$

Então as Equações (2.20) e (2.21) se tornam

$$\Delta x_1 \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \Delta x_2 \frac{\partial f_1}{\partial x_2} = -f_1 \quad (2.24)$$

$$\Delta x_1 \frac{\partial f_2}{\partial x_1} + \Delta x_2 \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = -f_2 \quad (2.25)$$

ou

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1 \\ -f_2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Então para um sistema de N equações não lineares simultâneas, devem ser resolvidas N equações lineares para encontrar as alterações de  $\Delta x_1$  e  $\Delta x_2$  em cada iteração. A matriz do lado esquerdo da eqs. (2.26) é chamada de matriz Jacobiana J e é chamada simplesmente de “*Jacobiana*” (GRIFFITHS e SMITH, 1991).

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -f_1 \\ -f_2 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Claramente, se a Jacobiana for zero o processo falha, e se for muito próximo de zero uma convergência lenta é prevista. Para utilizar tal método é interessante desenvolver um programa computacional para que o processo de solução seja rápido e fácil de ser analisado. Para tal, o número de equações, um palpite inicial do vetor de solução, a tolerância de iteração e o número de iterações permitidas devem ser lidos pelo programa. Já as funções utilizadas e suas derivações devem estar contidas na sub-rotina do programa a ser desenvolvido.

## 2.4 Algoritmos Evolucionários

Os Algoritmos Evolucionários (AE) usam uma população de indivíduos, na qual cada indivíduo é referido como um cromossomo e cada característica do indivíduo é chamada de gene. Uma população de indivíduos representa um conjunto de possíveis soluções para o problema a ser otimizado. A cada geração, os indivíduos competem para produzir descendentes, os indivíduos mais aptos a sobrevivência tem maiores chances de se reproduzir. Vários tipos de AE foram desenvolvidos, são eles: Algoritmos Genéticos, Programação Genética, Programação Evolucionária, Estratégias Evolucionárias, Evolução Diferencial, Evolução Cultural e Coevolução.

Neste trabalho optou-se por usar AG por sua aplicabilidade em problemas de engenharia e facilidade de trabalhar na busca pela maximização e minimização da função de avaliação. Além disso, AG permite trabalhar com muitas variáveis ao mesmo tempo e com a otimização de variáveis com funções de avaliação complexas.

### 2.4.1 Algoritmos Genéticos

Algoritmos Genéticos AG são modelos computacionais que imitam os mecanismos da “*evolução natural*” para resolver problemas de otimização. (HOLLAND, 1975). São utilizados em diversas áreas de pesquisa, em problemas simples ou complexos, facilitando o estudo e viabilizando a solução de problemas de otimização que por métodos numéricos tradicionais eram inviáveis ou restritos.

A cada passo do processo de evolução uma nova geração é criada a partir da população anterior, e esta última é atualizada. Para que o processo de evolução possa ser considerado eficiente é necessário que cada geração nova tenda a ser melhor (mais adaptado) que suas anteriores (LUCAS, 2002).

A evolução de uma geração para a outra é feita em três fases: avaliação da aptidão, seleção dos mais aptos e reprodução. Os filhos são gerados a partir do processo de cruzamento (*crossover*) e podem sofrer mutação, quando alguma característica do indivíduo é modificada aleatoriamente. A força de sobrevivência de um indivíduo é medida usando uma função “*fitness*”, ou função de aptidão, que reflete os objetivos e restrições do problema a ser resolvido (ENGELBRECHT, 2007).

#### a) População Inicial

Em um programa de AG primeiramente é necessário gerar a população inicial, composta por  $N_{pop}$  cromossomos. Uma matriz representa a população com o número de colunas igual ao número de variáveis  $N_{var}$  e o número de linhas igual ao número de cromossomos, logo, a dimensão da matriz é  $N_{pop} \times N_{var}$  (HAUPT e HAUPT, 2004).

Todas as variáveis são normalizadas para ter valores no intervalo entre 0 e 1. Caso exista restrições para os parâmetros gerados, elas devem ser inseridas nos indivíduos. Considerando  $p_{min}$  o limite inferior,  $p_{máx}$ , o limite superior e  $p_{norm}$  o valor normalizado da variável. Ao gerar a população inicial, as restrições são inseridas da seguinte forma:

$$p = (p_{máx} - p_{min})p_{norm} + p_{min} \quad (2.29)$$

## b) Função de Avaliação

Nessa fase, cada indivíduo da população é avaliado para que seja determinado o seu grau de adaptação, é necessário aqui que o AG seja capaz de responder sobre quão boa uma resposta é para o problema proposto. Existem várias formas de avaliação: em casos de otimização de funções matemáticas, o próprio valor da função é usado, e em problemas com muitas restrições, funções baseadas em penalidades são mais comuns (LUCAS, 2002). A função de avaliação também é chamada de função objetivo, função de adaptação e função *fitness*.

$$\text{Função de Avaliação} = f(\text{cromossomo})$$

## c) Métodos de Seleção

Para fazer a seleção dos pais que serão usados posteriormente no cruzamento é necessário antes fazer a seleção destes. Existem vários métodos de seleção em AG, os mais utilizados são:

- **Seleção por Roleta:** Nesse método, cada indivíduo da população é representado na roleta proporcionalmente ao seu valor da função de avaliação. Portanto, para indivíduos com alta aptidão é dada uma porção maior da roleta, enquanto que para os indivíduos de aptidão mais baixa, é dada uma porção menor.
- **Seleção por Torneio:** Esse método inicialmente seleciona dois, três ou mais indivíduos de forma aleatória entre a população. Desse grupo, eles são testados e o mais apto integra a população de pais.
- **Seleção por Elitismo:** O Elitismo é usado para garantir que o melhor cromossomo de cada geração siga para as próximas etapas. Reduz o efeito aleatório do processo seletivo, garantindo a presença do melhor indivíduo na próxima geração.

## d) Operadores Genéticos

Os operadores genéticos atuam no processo de reprodução, são eles: cruzamento, mutação e inversão, esse último raramente utilizado.

- **Cruzamento**

O cruzamento é utilizado em todos os algoritmos genéticos implementados, ele tem como função fazer o cruzamento de dois indivíduos, os pais selecionados, com a finalidade de gerar filhos mantendo características genéticas de seus provedores. Quando a representação dos cromossomos utiliza parâmetros binários, a forma de cruzamento é feita através da troca de partes correspondentes dos cromossomos “pais” para produzirem os cromossomos filhos, um exemplo é mostrado na Figura 2.10, com um ponto de separação.

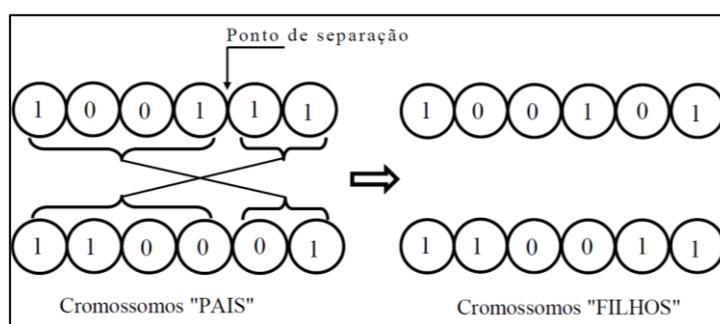


Figura 2.10 - *Crossover* representação binária

Quando a representação é feita utilizando parâmetros reais, o cruzamento também é feito utilizando dois pais para a geração dos filhos. Existem várias formas de executar tal cruzamento. O método mais simples consiste em escolher um ou mais pontos nos cromossomos do par de pais selecionados para marcar o local de cruzamento. Então as variáveis entre os pontos são trocadas. O problema com esse método de cruzamento de pontos é que nenhuma nova informação é introduzida (HAUPT e HAUPT, 2004).

Outra forma de gerar os filhos é atrás da combinação linear entre os pais. Para problemas de otimização com representação real, os métodos de cruzamento apresentados por Radcliff (1991) e Wright (1991) são os mais utilizados (MAMEDE, 2016).

- **Mutação**

A mutação introduz características novas que podem ser mais ou menos apropriadas à adaptação do indivíduo ao meio em que ele vive. No caso de ser mais apropriado, o indivíduo tende a se sobressair, aumentando suas chances de reproduzir-se e, conseqüentemente, transmitir esse material genético novo a um número maior de descendentes. No caso de ser menos apropriado, esse indivíduo pode ter uma vida breve,

limitando o efeito do novo material a um número pequeno de indivíduos. A longo prazo, pequenas mutações podem causar mudanças substanciais na população, incluindo a formação de novas espécies (OLIVEIRA, 2004).

O processo de mutação é controlado por um parâmetro fixo  $P_m$ , probabilidade de mutação, que é geralmente recomendada como 1% (BRAGA, 1998). Entretanto esse valor pode ser alterado, de acordo com a aplicação e com o resultado esperado, caso deseja-se aumentar a área de busca da população. Este operador tem um papel importante e necessário, no cruzamento pode perder algum material genético potencialmente útil.

#### **e) Critério de Parada**

O processo funciona até que o critério de parada seja alcançado. O critério de parada mais simples é o de limitar o número de gerações que o AE está autorizado a executar. Este limite, no entanto, deve ser suficiente para permitir que o AE explore o espaço de busca (ENGELBRECHT, 2007). Além disso, pode ser utilizado um critério de convergência para verificar se a população de soluções converge para uma solução específica (MAMEDE, 2016).

---

## 3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

### 3.1. Introdução

Um pesquisador, ao iniciar seus estudos de energia fotovoltaica, depara-se com um obstáculo, pois, como mostrado no capítulo 2, possui diversos modelos de equacionamento para uma célula fotovoltaica e os modelos apresentam diversas variáveis, umas conhecidas e outras não. As variáveis desconhecidas são os parâmetros do módulo fotovoltaico, são eles:

$I_{ph}$  = Corrente Fotogerada;

$I_s$  = Corrente de saturação do diodo;

$m$  = Fator de idealidade;

$R_s$  = Resistência série do módulo;

$R_p$  = Resistência em paralelo do módulo.

Os parâmetros serão obtidos através da equação característica da célula, utilizando leituras de tensão e corrente para uma determinada temperatura e irradiância solar. Inicialmente será utilizado o método de um diodo, obtendo 5(cinco) parâmetros e posteriormente, o método de dois diodos, obtendo 7(sete) parâmetros.

Os parâmetros do módulo variam com a temperatura e também com a irradiância; logo, é errôneo definir em um equacionamento que os parâmetros de um módulo fotovoltaico sejam fixos. Além disso, as células fotovoltaicas se deterioram com o tempo, assim suas características, como resistência em série, resistência em paralelo, corrente fotogerada, alteram-se, constantemente, daí a necessidade de gerar novos parâmetros das placas de tempos em tempos.

### 3.2. Dados Medidos e Curvas do Módulo

Os dados foram obtidos por meio de medições diretas realizadas em um módulo fotovoltaico, a partir do trabalho desenvolvido por Pollyanna Rodrigues no NUPEA (Núcleo de Pesquisa e Ecxtensão em Energias Alternativas) da Faculdade de Engenharia

Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia em 2012. As características técnicas do módulo utilizado são apresentadas na Tabela 3.1, nas condições padrões de teste, isto é, sob irradiação solar de  $1000\text{W/m}^2$  e temperatura da célula de  $25^\circ\text{C}$ .

Tabela 3.1 - Características do módulo PV

<b>Potência</b>	40 W
$V_{mp}$	16,6 V
$I_{mp}$	2,45 A
$V_{oc}$	20,5 V
$I_{cc}$	2,80 A
$N_s$	36
<b>Tipo do Material</b>	Silício Monocristalino

Os valores de tensão e corrente do módulo fotovoltaico foram obtidos através do medidor mini KLA da Ingenieurbüro Mencke & Tegtmeier. O medidor trabalha com uma faixa de temperatura de  $-20$  a  $70^\circ\text{C}$  e uma precisão de  $\pm 0,4\%$ . Além disso, o medidor fornece a temperatura interna do módulo e a irradiância solar ao qual está submetido. Vale ressaltar que a temperatura obtida no medidor é a temperatura interna do painel fotovoltaico. A temperatura externa da célula solar é menor que a interna

Foram realizados vários testes com o mesmo módulo fotovoltaico em horários distintos. Para o desenvolvimento desta pesquisa foram escolhidos quatro destes, que são apresentados na Tabela 3.2. Os testes foram escolhidos de forma a trabalhar com quatro irradiâncias e temperatura distintas, com valores baixos, medianos e altos. Através dessas curvas, é possível estudar como os métodos se comportaram em diferentes condições climáticas.

Tabela 3.2 - Dados das curvas utilizadas na pesquisa

Curva	Irradiância	Temp.
1	$225\text{W/m}^2$	$25^\circ\text{C}$
2	$596,8\text{ W/m}^2$	$35^\circ\text{C}$
3	$698\text{ W/m}^2$	$54^\circ\text{C}$
4	$860,2\text{ W/m}^2$	$52^\circ\text{C}$

De posse dos dados, foi desenvolvido um programa no Octave para gerar as curvas. A Figura 3.1 mostra as quatro curvas de corrente elétrica versus tensão. É possível observar

claramente a relação do aumento da corrente gerada com a incidência da radiação solar no módulo fotovoltaico. Quanto maior a irradiação, maior será a corrente fotogerada. A Figura 3.2 exibe a relação da tensão e potência elétricas das quatro curvas em questão. Nas duas figuras são evidenciados os pontos de máxima potência em cada curva.

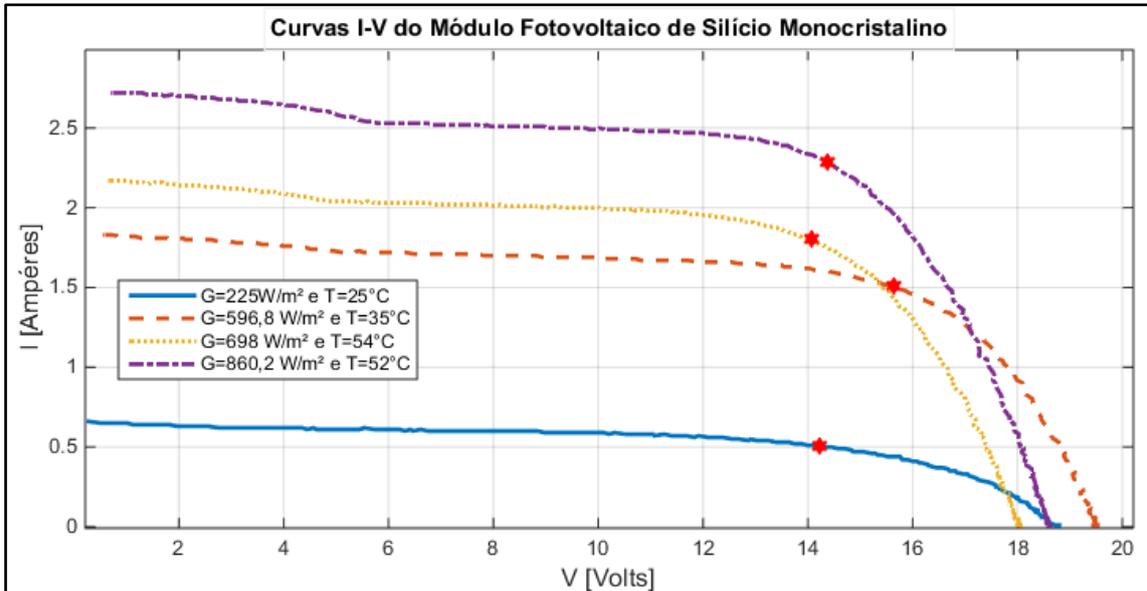


Figura 3.1 – Curvas I-V reais obtidas do módulo fotovoltaico usado com irradiações e temperaturas distintas.

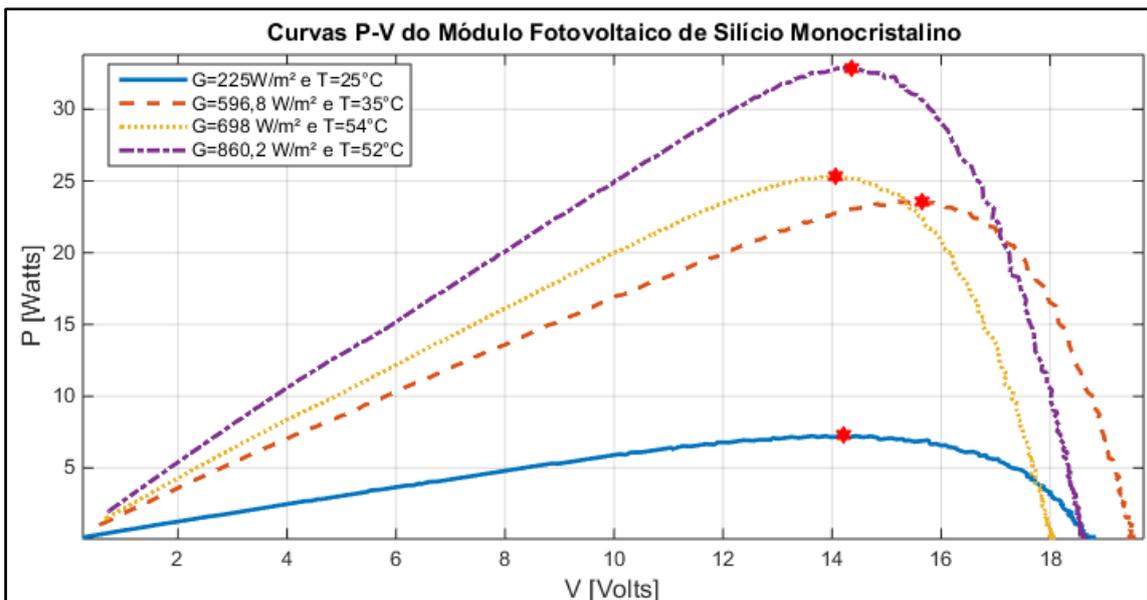


Figura 3.2 - Curvas P-V reais obtidas do módulo fotovoltaico usado com irradiações e temperaturas distintas.

### 3.3 Formulação Matemática – Modelo de um diodo

Para aplicar os métodos de resolução de equações não lineares, que serão apresentados nos capítulos 4 e 5, é necessário selecionar no problema proposto alguns pontos da curva amostrada. No caso do modelo de um diodo, é necessário extrair cinco parâmetros, e é essencial formular cinco equações para que a solução do problema se torne possível. Portanto, é necessário extrair da curva real cinco pontos que serão utilizados na resolução do problema.

As Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 mostram as quatro curvas  $V \times I$ , destacando em cada uma delas os cinco pontos usados no modelo de um diodo. Os pontos foram escolhidos de forma objetiva, para manter as principais características da curva, garantindo que a simulação obtida pelo método usado seja o mais próximo possível da curva real.

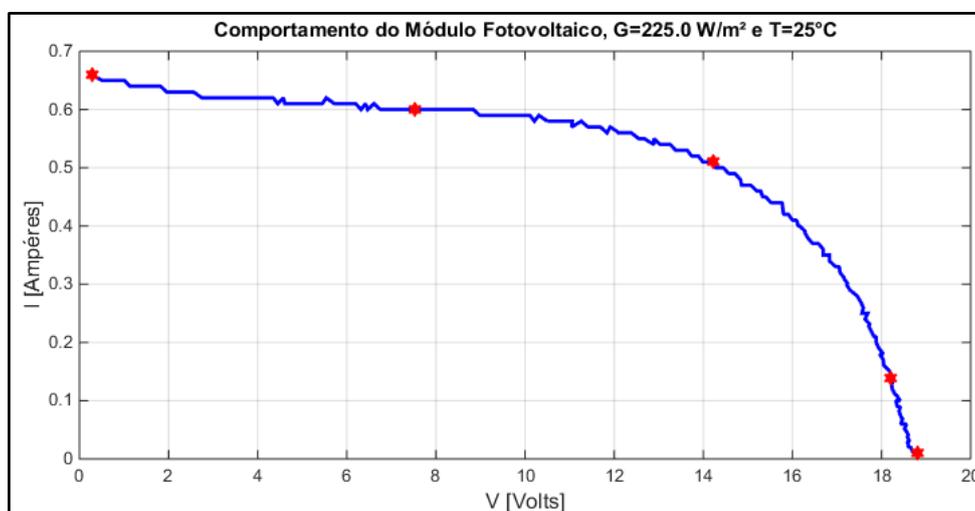


Figura 3.3- Gráfico I-V da Curva 1, obtido dos dados reais.

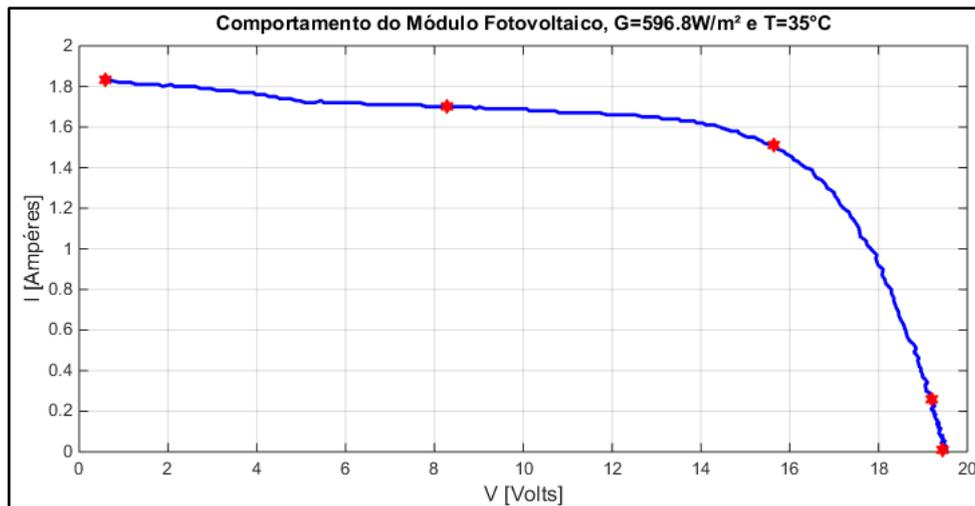


Figura 3.4 - Gráfico I-V da Curva 2, obtido dos dados reais.

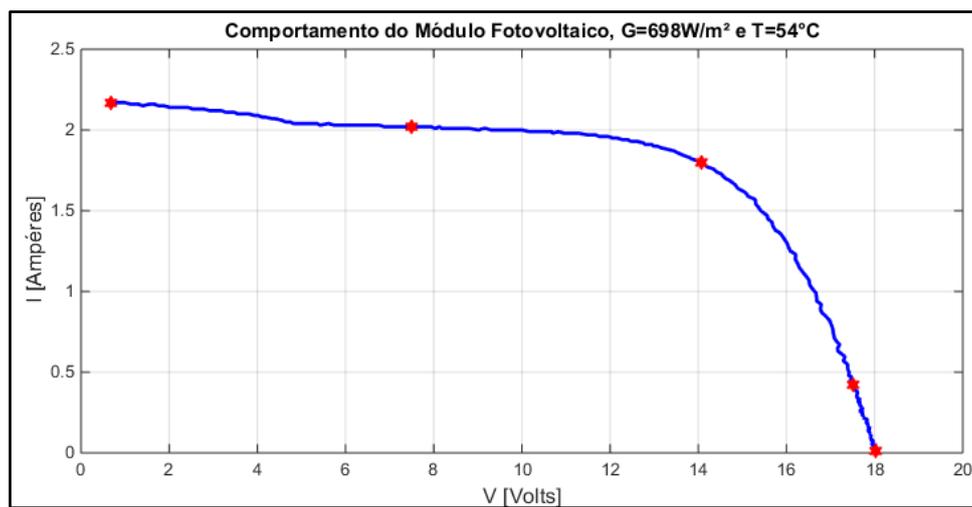


Figura 3.5 - Gráfico I-V da Curva 3, obtido dos dados reais.

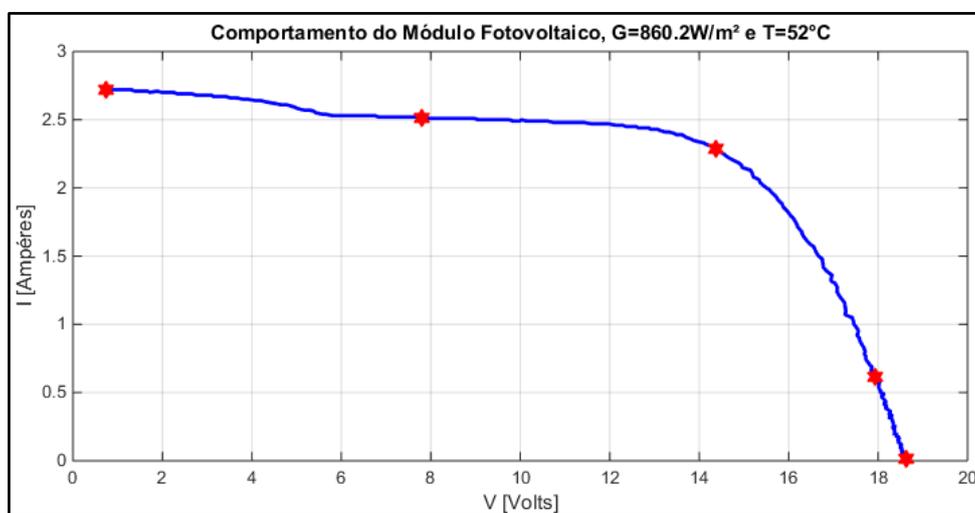


Figura 3.6 - Gráfico I-V da Curva 4, obtido dos dados reais.

O primeiro ponto corresponde ao ponto inicial da curva, sendo  $I_1$  próximo ao  $I_{CC}$ ; O terceiro corresponde ao ponto de potência máxima  $P_{mp}$ , com  $I_3 = I_{mp}$  e  $V_3 = V_{mp}$ ; O quinto corresponde ao último ponto amostrado da curva, sendo  $V_5$  próximo a  $V_{oc}$ . O segundo e o quarto ponto foram escolhidos arbitrariamente, considerando  $(I_2, V_2) = L/2$  e  $(I_4, V_4) = 3.L/2$ , de modo que  $L$  representa a posição numérica do ponto de máxima potência na curva real.

Os cinco pontos amostrados são destacados nas curvas VxI das Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6. Através da equação (2.7) é possível gerar um sistema com cinco equações utilizadas no sistema, como mostram as equações (3.1) e (3.2).

$$\begin{aligned}
 f_1(x) &= x_1 - 10^{-6} x_2 \left( e^{\frac{\lambda(V_1 + I_1 x_4)}{36 x_3}} - 1 \right) - \frac{(V_1 + I_1 x_4)}{x_5} - I_1 = 0 \\
 f_2(x) &= x_1 - 10^{-6} x_2 \left( e^{\frac{\lambda(V_2 + I_2 x_4)}{36 x_3}} - 1 \right) - \frac{(V_2 + I_2 x_4)}{x_5} - I_2 = 0 \\
 f_3(x) &= x_1 - 10^{-6} x_2 \left( e^{\frac{\lambda(V_3 + I_3 x_4)}{36 x_3}} - 1 \right) - \frac{(V_3 + I_3 x_4)}{x_5} - I_3 = 0 \\
 f_4(x) &= x_1 - 10^{-6} x_2 \left( e^{\frac{\lambda(V_4 + I_4 x_4)}{36 x_3}} - 1 \right) - \frac{(V_4 + I_4 x_4)}{x_5} - I_4 = 0 \\
 f_5(x) &= x_1 - 10^{-6} x_2 \left( e^{\frac{\lambda(V_5 + I_5 x_4)}{36 x_3}} - 1 \right) - \frac{(V_5 + I_5 x_4)}{x_5} - I_5 = 0
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

em que,

$$\lambda = \frac{q}{k.T} \quad e \quad \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ph} \\ I_S \\ m \\ R_s \\ R_p \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

Foi adicionado um multiplicador de  $10^{-6}$  no sistema de equações (3.1), isso foi necessário porque a corrente de saturação reversa do diodo ( $I_S$ ) apresenta valores de

ordem muito inferior às outras variáveis. Além disso, foi adicionado à equação o valor de  $N_s$ , número de células associadas em série, no módulo utilizado são 36.

Então, o sistema de equações dado pelas equações (3.1) é o conjunto de funções objetivo do problema, da qual se deseja encontrar as raízes. Entretanto, o sistema de equações possui algumas restrições, sendo os intervalos em que as variáveis em estudo se encontram. Essas restrições foram definidas tendo em vista valores fisicamente possíveis e típicos dessas variáveis.

O valor obtido da corrente fotogerada ( $I_{ph}$ ) deve ter um valor maior que 0,01A e menor que a corrente máxima obtida com o módulo, nesse caso, de acordo com a Tabela 3.1, o valor seria 2,45<sup>a</sup>. Entretanto, consideraremos 5A, para aumentar a faixa, a fim de que o programa possa ser usado em outro módulo.

A corrente de saturação reversa do diodo ( $I_s$ ) possui intensidade muito baixa, da ordem de microampères ( $\mu A$ ) para um diodo de silício. Como foi utilizado um multiplicador de  $10^{-6}$  para essa variável, será adotada a faixa de  $10^{-2}$  a 5, o que indica uma variação de 0,01 a  $5\mu A$ . Já o fator de idealidade do diodo apresenta o valor mínimo igual a 1 e valor máximo igual a 2.

A resistência série apresenta valores típicos na ordem de alguns miliohms ( $m\Omega$ ), assim será adotado o valor mínimo de  $10^{-4}$  e máximo de  $10\Omega$ . Já a resistência *shunt* (paralelo) apresenta valores típicos de centenas de ohms; desse modo, será adotado o valor mínimo de  $50\Omega$  e máximo de  $1k\Omega$  (RODRIGUES, 2012). A Tabela 3.3 mostra de forma sintetizada a relação das restrições utilizadas no modelo de um diodo.

Tabela 3.3 - Restrições dos parâmetros no modelo de um diodo.

Parâmetro	$I_{ph}$	$I_s(\mu)$	$m$	$R_s$	$R_p$
Limite Inferior	$10^{-2}$	$10^{-2}$	1	$10^{-4}$	50
Limite Superior	5	1	2	10	$10^3$

### 3.4 Formulação Matemática – Modelo de dois diodos

Ao utilizar o modelo de dois diodos, sete parâmetros serão extraídos das curvas reais analisadas, para tal é essencial formular um sistema com sete equações de forma que a solução do problema se torne possível. Portanto, é necessário extrair, da curva real, sete pontos que serão utilizados na resolução do problema.

Neste trabalho, os pontos utilizados foram: o primeiro corresponde ao ponto inicial da curva, sendo  $I_1$  próximo ao  $I_{CC}$ ; o quinto corresponde ao ponto de potência máxima  $P_{mp}$ , com  $I_5 = I_{mp}$  e  $V_5 = V_{mp}$ ; o sétimo corresponde ao último ponto amostrado da curva, sendo  $V_7$  próximo a  $V_{oc}$ . O segundo, o terceiro, o quarto e o sexto foram escolhidos arbitrariamente, considerando  $(I_2, V_2) = 0,1n$ ,  $(I_3, V_3) = 0,2.n$ ,  $(I_4, V_4) = 0,3.n$ , e  $(I_6, V_6) = 0,5.n$ , de modo que  $n$  representa o número total de pontos amostrados da curva real. Os pontos 2, 3 e 4 foram escolhidos, intencionalmente, para tentar representar da melhor forma possível a parte superior da curva, que é o intervalo mais crítico, pois apresenta uma curvatura não uniforme nas placas fotovoltaicas mais deterioradas com o tempo. A seleção dos sete pontos pode ser observada nas curvas V x I das Figuras 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10.

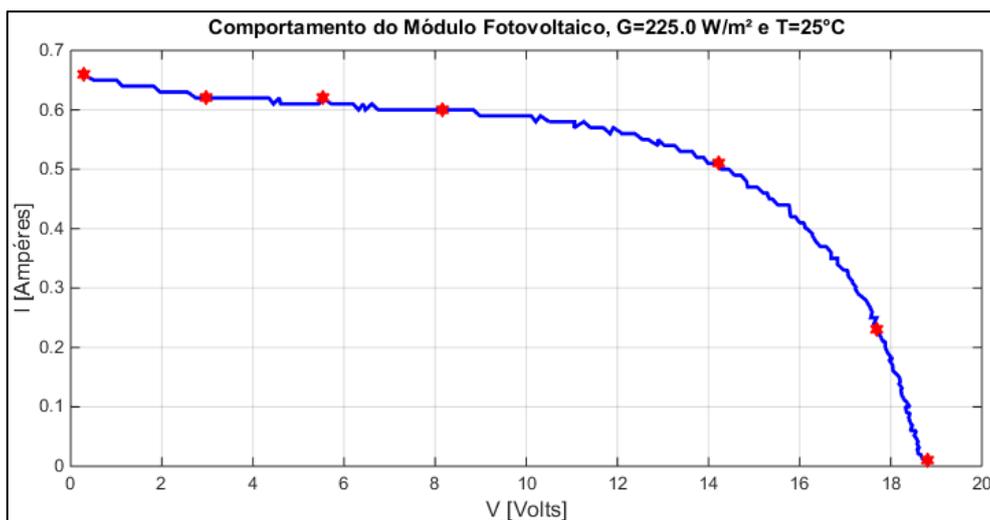


Figura 3.7 - Gráficos VxI destacando os sete pontos da Curva 1.

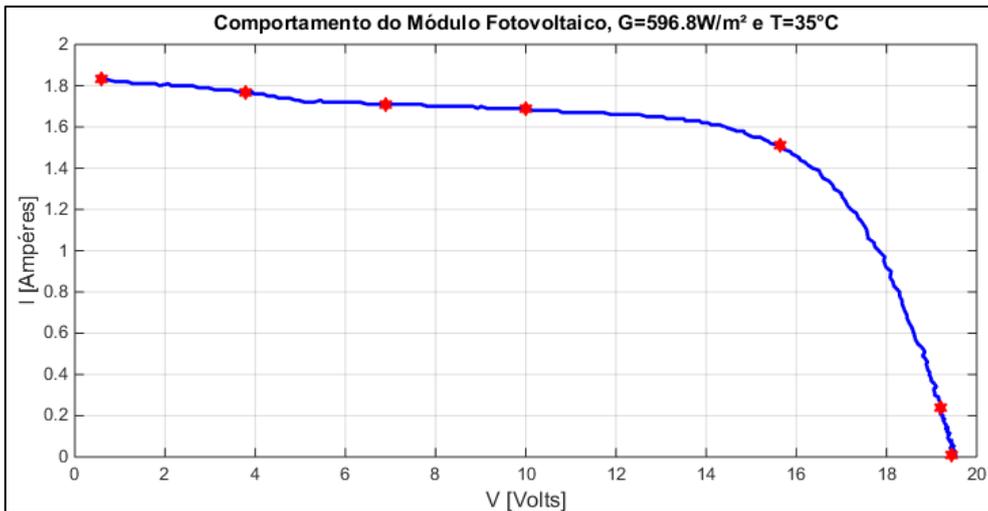


Figura 3.8 - Gráficos VxI destacando os sete pontos da Curva 2.

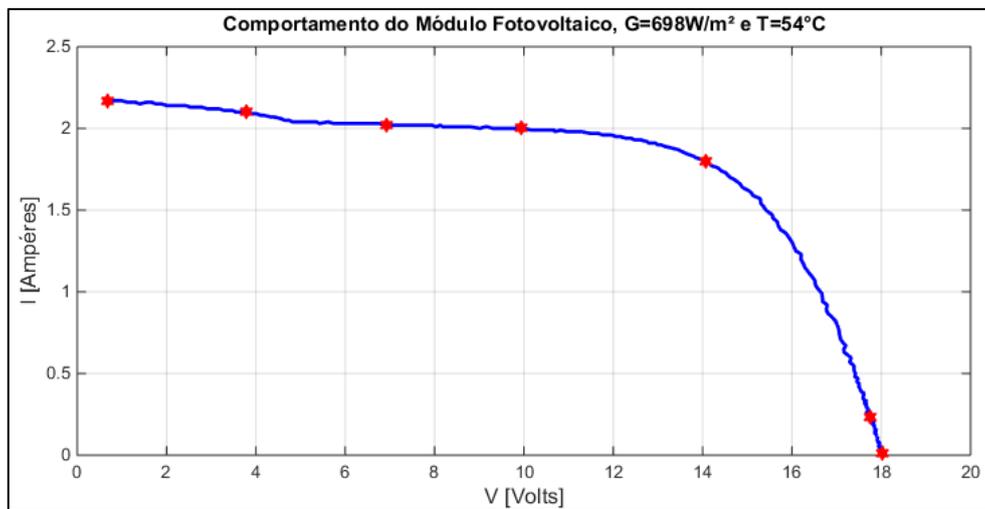


Figura 3.9 - Gráficos VxI destacando os sete pontos da Curva 3.

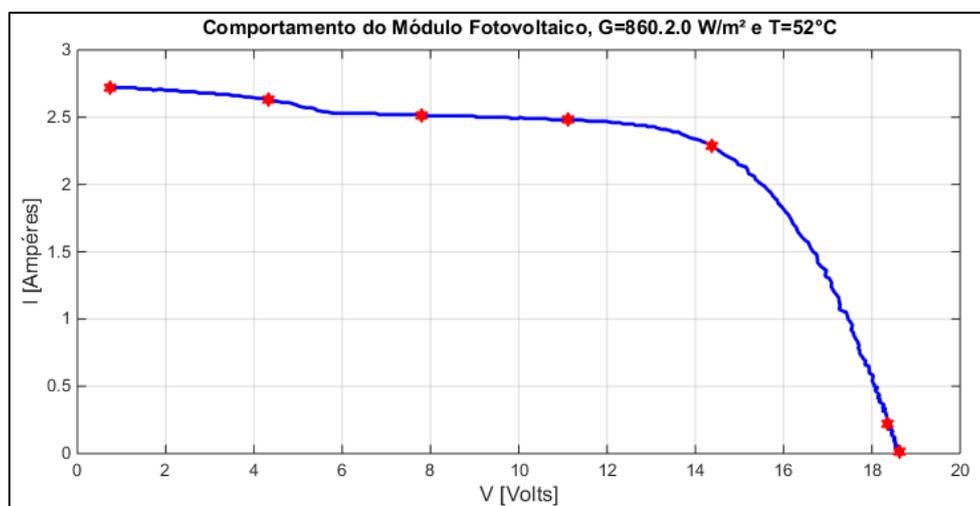


Figura 3.10 - Gráficos VxI destacando os sete pontos da Curva 4.

Através da equação (2.11) é possível gerar as sete equações utilizadas no sistema, como mostram as equações (3.3) e (3.4).

$$\begin{aligned}
f_1(x) &= x_1 - 10^{-6} x_2 \left( e^{\frac{\lambda(V_1 + I_1 x_4)}{36x_6}} - 1 \right) - 10^{-6} x_3 \left( e^{\frac{\lambda(V_1 + I_1 x_4)}{36x_7}} - 1 \right) - \frac{(V_1 + I_1 x_4)}{x_5} - I_1 = 0 \\
f_2(x) &= x_1 - 10^{-6} x_2 \left( e^{\frac{\lambda(V_2 + I_2 x_4)}{36x_6}} - 1 \right) - 10^{-6} x_3 \left( e^{\frac{\lambda(V_2 + I_2 x_4)}{36x_7}} - 1 \right) - \frac{(V_2 + I_2 x_4)}{x_5} - I_2 = 0 \\
f_3(x) &= x_1 - 10^{-6} x_2 \left( e^{\frac{\lambda(V_3 + I_3 x_4)}{36x_6}} - 1 \right) - 10^{-6} x_3 \left( e^{\frac{\lambda(V_3 + I_3 x_4)}{36x_7}} - 1 \right) - \frac{(V_3 + I_3 x_4)}{x_5} - I_3 = 0 \\
f_4(x) &= x_1 - 10^{-6} x_2 \left( e^{\frac{\lambda(V_4 + I_4 x_4)}{36x_6}} - 1 \right) - 10^{-6} x_3 \left( e^{\frac{\lambda(V_4 + I_4 x_4)}{36x_7}} - 1 \right) - \frac{(V_4 + I_4 x_4)}{x_5} - I_4 = 0 \\
f_5(x) &= x_1 - 10^{-6} x_2 \left( e^{\frac{\lambda(V_5 + I_5 x_4)}{36x_6}} - 1 \right) - 10^{-6} x_3 \left( e^{\frac{\lambda(V_5 + I_5 x_4)}{36x_7}} - 1 \right) - \frac{(V_5 + I_5 x_4)}{x_5} - I_5 = 0 \\
f_6(x) &= x_1 - 10^{-6} x_2 \left( e^{\frac{\lambda(V_6 + I_6 x_4)}{36x_6}} - 1 \right) - 10^{-6} x_3 \left( e^{\frac{\lambda(V_6 + I_6 x_4)}{36x_7}} - 1 \right) - \frac{(V_6 + I_6 x_4)}{x_5} - I_6 = 0 \\
f_7(x) &= x_1 - 10^{-6} x_2 \left( e^{\frac{\lambda(V_7 + I_7 x_4)}{36x_6}} - 1 \right) - 10^{-6} x_3 \left( e^{\frac{\lambda(V_7 + I_7 x_4)}{36x_7}} - 1 \right) - \frac{(V_7 + I_7 x_4)}{x_5} - I_7 = 0
\end{aligned} \tag{3.3}$$

em que,

$$\lambda = \frac{q}{k.T} \quad e \quad \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ph} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \\ R_s \\ R_p \\ m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

No Tópico 3.3, foi tratada a questão das restrições do problema no modelo de um diodo. A mesma abordagem é válida para o modelo de dois diodos. A Tabela 3.4 mostra as restrições de forma sintetizada para os sete parâmetros.

Tabela 3.4 - Restrições dos parâmetros no modelo de dois diodos.

Parâmetro	$I_{ph}$	$I_{S1}(\mu)$	$I_{S2}(\mu)$	$R_s$	$R_p$	$m_1$	$m_2$
Limite Inferior	$10^{-2}$	$10^{-2}$	$10^{-2}$	$10^{-4}$	50	1	1
Limite Superior	5	1	1	10	$10^3$	2	2

No próximo capítulo será mostrada a abordagem para obtenção dos parâmetros dos módulos fotovoltaicos no modelo de um diodo (a cinco parâmetros) utilizando o método de Newton Raphson. É bom salientar que da mesma forma podem ser obtidos os parâmetros dos módulos fotovoltaicos no modelo de dois diodos (a sete parâmetros).



---

## 4 OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO UTILIZANDO O MÉTODO DE NEWTON RAPHSON

### 4.1 Introdução

Um algoritmo foi desenvolvido no Octave aplicando o Método de Newton Raphson ao problema descrito. Para tal, é exigido pelo método a inserção de “chutes iniciais”, uma suposição dos valores reais, para satisfazer o método.

Para analisar o método desenvolvido, foram feitas várias simulações utilizando quatro curvas, com temperaturas e irradiâncias distintas. Entre os testes feitos, alguns desses foram colocados em tabelas mostradas neste capítulo e analisados utilizando a teoria de autovalores nas matrizes Jacobianas do problema proposto.

Ao usar o método de Newton Raphson é necessário ter um conhecimento do valor aproximado que se deseja obter e a suposição inicial deve estar suficientemente próxima da solução do problema; caso contrário, o método não é capaz de encontrar a solução. Este conhecimento é necessário, porque a matriz jacobiana calculada em cada iteração deve ser não singular, isto é, com o determinante diferente de zero.

### 4.2. Aplicação do Método Newton Raphson ao Problema Proposto

A partir das equações (2.1) e (2.2), mostradas no capítulo 2, é possível montar o sistema para resolver o problema com o modelo de um diodo através do método de Newton Raphson.

$$\begin{bmatrix} x_{1,k+1} \\ x_{2,k+1} \\ x_{3,k+1} \\ x_{4,k+1} \\ x_{5,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,k} \\ x_{2,k} \\ x_{3,k} \\ x_{4,k} \\ x_{5,k} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} & \frac{\partial f_1}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} & \frac{\partial f_2}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} & \frac{\partial f_3}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} & \frac{\partial f_4}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_5}{\partial x_1} & \frac{\partial f_5}{\partial x_2} & \frac{\partial f_5}{\partial x_3} & \frac{\partial f_5}{\partial x_4} & \frac{\partial f_5}{\partial x_5} \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} f_1(x_k) \\ f_2(x_k) \\ f_3(x_k) \\ f_4(x_k) \\ f_5(x_k) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

A equação (4.1) mostra o equacionamento por meio deste método e a Figura 4.1 mostra o a matriz Jacobiana ( $J$ ) utilizada no programa implementado no Octave.

$$J = \begin{bmatrix} 1 & -10^{-6} \left( e^{\frac{\lambda(V_1+I_1x_4)}{36x_3}} - 1 \right) & \frac{10^{-6} x_2 (V_1 + I_1 x_4) \lambda e^{\frac{\lambda(V_1+I_1x_4)}{36x_3}}}{36x_3^2} & \frac{10^{-6} I_1 x_2 \lambda e^{\frac{\lambda(V_1+I_1x_4)}{36x_3}}}{36x_3} & -\frac{I_1}{x_5} & \frac{V_1 + I_1 x_4}{x_5^2} \\ 1 & -10^{-6} \left( e^{\frac{\lambda(V_2+I_2x_4)}{36x_3}} - 1 \right) & \frac{10^{-6} x_2 (V_2 + I_2 x_4) \lambda e^{\frac{\lambda(V_2+I_2x_4)}{36x_3}}}{36x_3^2} & \frac{10^{-6} I_2 x_2 \lambda e^{\frac{\lambda(V_2+I_2x_4)}{36x_3}}}{36x_3} & -\frac{I_2}{x_5} & \frac{V_2 + I_2 x_4}{x_5^2} \\ 1 & -10^{-6} \left( e^{\frac{\lambda(V_3+I_3x_4)}{36x_3}} - 1 \right) & \frac{10^{-6} x_2 (V_3 + I_3 x_4) \lambda e^{\frac{\lambda(V_3+I_3x_4)}{36x_3}}}{36x_3^2} & \frac{10^{-6} I_3 x_2 \lambda e^{\frac{\lambda(V_3+I_3x_4)}{36x_3}}}{36x_3} & -\frac{I_3}{x_5} & \frac{V_3 + I_3 x_4}{x_5^2} \\ 1 & -10^{-6} \left( e^{\frac{\lambda(V_4+I_4x_4)}{36x_3}} - 1 \right) & \frac{10^{-6} x_2 (V_4 + I_4 x_4) \lambda e^{\frac{\lambda(V_4+I_4x_4)}{36x_3}}}{36x_3^2} & \frac{10^{-6} I_4 x_2 \lambda e^{\frac{\lambda(V_4+I_4x_4)}{36x_3}}}{36x_3} & -\frac{I_4}{x_5} & \frac{V_4 + I_4 x_4}{x_5^2} \\ 1 & -10^{-6} \left( e^{\frac{\lambda(V_5+I_5x_4)}{36x_3}} - 1 \right) & \frac{10^{-6} x_2 (V_5 + I_5 x_4) \lambda e^{\frac{\lambda(V_5+I_5x_4)}{36x_3}}}{36x_3^2} & \frac{10^{-6} I_5 x_2 \lambda e^{\frac{\lambda(V_5+I_5x_4)}{36x_3}}}{36x_3} & -\frac{I_5}{x_5} & \frac{V_5 + I_5 x_4}{x_5^2} \end{bmatrix}$$

Figura 4.1 - Matriz Jacobiana

Para obter a matriz Jacobiana, a partir das cinco equações do módulo fotovoltaico utilizando o modelo de um diodo, foi usado o *software* WxMaxima, as derivadas são feitas de forma fácil e rápida, facilitando a aplicação do método ao problema proposto. Os alunos do grupo PET Matemática da UFSM (2013, p.4) definem bem o programa em uma apostila desenvolvida por eles:

“O WxMaxima é um software livre disponível para a realização de cálculos matemáticos através da manipulação de expressões simbólicas e numéricas. Estas incluem diferenciação, integração, equações diferenciais ordinárias, sistemas de equações lineares, vetores, matrizes, entre outros. Além disso, o WxMaxima produz resultados de precisão elevada e pode traçar gráficos de funções em duas e três dimensões.”

### 4.3 Dados obtidos utilizando o método de Newton Raphson (NR)

Os dados foram relatados em 4(quatro) subtópicos que discutem os resultados obtidos dos testes realizados nas curvas trabalhadas. As tabelas mostram os resultados das simulações feitas utilizando o método de Newton Raphson na extração dos 5(cinco) parâmetros do módulo fotovoltaico analisado, sendo:  $I_{ph} = x_1$  a corrente fotogerada;  $I_s = x_2$  a corrente de saturação reversa do diodo;  $m = x_3$  o fator de idealidade;  $R_s = x_4$  a resistência série do módulo e  $R_p = x_5$  a resistência paralelo.

Como exposto, esse método precisa de que o usuário forneça o chute inicial. Tais chutes foram feitos baseados em um trabalho anterior desenvolvido no NUPEA, por Pollyanna Rodrigues em 2012. Em seu trabalho, ela usou técnicas da região de confiança para encontrar as raízes da função, trabalhou inicialmente com um ponto inicial único e posteriormente adequou o ponto inicial em cada curva utilizada para obter menos iterações (RODRIGUES, 2012). Além disso, os pontos iniciais utilizados obedecem algumas restrições técnicas das células fotovoltaicas que foram detalhadas na formulação matemática do modelo de um diodo.

#### 4.3.1 Dados Obtidos aplicando NR à Curva 1

A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos nos testes feitos utilizando dados da curva 1, mostrada na Figura 3.3. Vários testes foram feitos, com diferentes valores de “chute inicial”, baseando-se nos valores limites mostrados na Tabela 3.3. Observou-se que os parâmetros encontrados são idênticos em todas as simulações; além disso, quanto mais próximo o “chute inicial” estiver da raiz, menos iterações são necessárias para convergir para as raízes das funções que compõem o sistema.

Tabela 4.1 – Parâmetros obtidos da Curva 1

Caso	Chute Inicial	$I_{ph}$ (A)	$I_{s\mu}$ (A)	$m$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_p$ ( $\Omega$ )	n° Iter.
1	$x_0 = [1,5;1,0;1,5;1,5;100]$	0,6687	2,006	1,4288	1,1686	120,58	6
2	$x_0 = [1,5;1,0;1,5;1,0;100]$	0,6687	2,006	1,4288	1,1686	120,58	7
3	$x_0 = [2,0;0,1;1,0;0,5;50]$	0,6687	2,006	1,4288	1,1686	120,58	9
4	$x_0 = [2,0;0,1;1,0;1,0;100]$	0,6687	2,006	1,4288	1,1686	120,58	7
5	$x_0 = [2,0;1,0;1,0;1,0;100]$	0,6687	2,006	1,4288	1,1686	120,58	9
6	$x_0 = [2,0;1,0;1,0;1,0;50]$	0,6687	2,006	1,4288	1,1686	120,58	9
7	$x_0 = [1,5;1.10^{-3};1,5;1,5;100]$	-	-	-	-	-	-
8	$x_0 = [0,6;2,5;1,5;2,0;100]$	0,6687	2,006	1,4288	1,1686	120,58	4

Para uma melhor compreensão dos parâmetros obtidos, será mostrado, em detalhe, como foi o comportamento da resposta no programa, do vetor solução  $x_n$ , o número de iterações e o determinante da matriz Jacobiana, em 3(três) exemplos. No primeiro exemplo, caso 8, quando  $x_0 = [0,6; 2,5; 1,5; 2,0; 100]$ , um excelente “chute inicial”, pois o método permitiu que o sistema convergisse rapidamente para as raízes, gerando assim apenas 4(quatro) iterações, conforme mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados obtidos quando  $x_0 = [0,6; 2,5; 1,5; 2,0; 100]$ .

Iteração	Det.(J)	$x_1$	$x_2 \cdot 10^{-6}$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1ª	7,5249e-08	0,6644	3,0834	1,4740	0,6725	117,6656
2ª	8,9572e-08	0,6688	1,8439	1,4307	1,1643	120,5131
3ª	1,1367e-07	0,6687	2,0058	1,4287	1,1690	120,5848
4ª	1,4202e-07	0,6687	2,0060	1,4288	1,1686	120,5853

No segundo exemplo, caso 6, quando  $x_0 = [2,0; 1,0; 1,0; 1,0; 50]$ , foram necessárias nove iterações para que o método convergisse à solução do problema. Isso ocorreu, pois, o valor do “chute inicial” foi mais distante da solução do problema comparado com o primeiro caso. A Tabela 4.3 mostra o comportamento do determinante da matriz jacobiana e os valores de  $x$  em cada iteração até a solução do problema.

Tabela 4.3 – Dados obtidos quando  $x_0 = [2,0; 1,0; 1,0; 1,0; 50]$ .

Iteração	Det.(J)	$x_1$	$x_2 \cdot 10^{-6}$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1 <sup>a</sup>	1,4462	0,6676	0,1451	1,0076	0,9853	79,2025
2 <sup>a</sup>	0,0081	0,6668	0,1599	1,0662	0,8750	06,2887
3 <sup>a</sup>	2,9863e-04	0,6660	0,3194	1,1823	0,6995	18,9099
4 <sup>a</sup>	6,9443e-06	0,6656	0,9262	1,3735	0,5982	20,8724
5 <sup>a</sup>	1,0540e-07	0,6689	2,2578	1,4929	1,2095	120,5524
6 <sup>a</sup>	3,5995e-08	0,6685	1,7826	1,4020	1,1236	120,6063
7 <sup>a</sup>	2,2496e-07	0,6687	1,9825	1,4269	1,1594	120,5908
8 <sup>a</sup>	1,4460e-07	0,6687	2,0060	1,4289	1,1685	120,5854
9 <sup>a</sup>	1,4127e-07	0,6687	2,0060	1,4288	1,1686	120,5853

No terceiro exemplo, caso 7, mostrado na Tabela 4.4, o “chute inicial” foi  $x_0 = [1,5; 1e-3; 1,5; 1,5; 100]$ , um valor distante da solução, pois o segundo termo é bem menor que nos casos anteriores, impossibilitando dessa forma a convergência do método para a solução do problema.

Tabela 4.4 – Dados obtidos quando  $x_0 = [1,5; 1e-3; 1,5; 1,5; 100]$ .

Iteração	Det.(J)	$x_1$	$x_2 \cdot 10^{-6}$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1 <sup>a</sup>	1,4399e-13	-	-	-	-	-

### 4.3.2 Dados Obtidos aplicando NR à Curva 2

A Tabela 4.5 mostra os resultados obtidos nos testes feitos utilizando dados da utilizando dados da curva 2, mostrada na Figura 3.4. Alguns testes conseguiram encontrar a raiz do problema, outros não, para tal, assim como no tópico anterior, nesse caso serão expostos três exemplos de “chute inicial” para mostrar o comportamento do método na curva 2(dois).

Tabela 4.5 – Parâmetros obtidos da Curva 2

Caso	Chute Inicial	$I_{ph}$ (A)	$I_s \mu$ (A)	$m$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_p$ ( $\Omega$ )	nº Iter.
1	$x_0 = [1,5; 1,0; 1,5; 1,5; 100]$	-	-	-	-	-	-
2	$x_0 = [1,5; 1,0; 1,5; 1,0; 100]$	-	-	-	-	-	-
3	$x_0 = [1,5; 0,5; 1,0; 0,5; 50]$	1,8462	0,0441	1,0245	0,1979	58,92	5
4	$x_0 = [2,0; 0,1; 1,0; 1,0; 100]$	1,8462	0,0441	1,0245	0,1979	58,92	7
5	$x_0 = [2,0; 1,0; 1,0; 1,0; 100]$	1,8462	0,0441	1,0245	0,1979	58,92	8
6	$x_0 = [2,0; 1,0; 1,0; 1,0; 50]$	1,8462	0,0441	1,0245	0,1979	58,92	8
7	$x_0 = [1,5; 1 \cdot 10^{-3}; 1,5; 1,5; 100]$	-	-	-	-	-	-
8	$x_0 = [0,6; 2,5; 1,5; 2,0; 100]$	-	-	-	-	-	-

Neste t3pico, foi inclu3do ao programa o c3lculo dos autovalores da matriz Jacobiana. Os autovalores de uma dada matriz quadrada  $A$ , de dimens3o  $n \times n$ ,  $v$  s3o os  $n$  n3meros que resumem as propriedades essenciais daquela matriz representativa do sistema. Os valores obtidos na 3ltima itera3o s3o mostrados em um diagrama. Atrav3s deles, 3 poss3vel identificar se a matriz Jacobiana 3 singular ou n3o, por isso a escolha em incluir tal an3lise no trabalho.

Como a Matriz de autovalores representa a matriz  $A$ , logo, a multiplic3o de todos os autovalores resulta no determinante da matriz. Ent3o, se ao menos um autovalor for nulo, conclui-se que o determinante tamb3m 3 nulo e, portanto, a matriz  $A$  3 singular. Para melhor entender essa an3lise, 3 necess3rio definir e conhecer como s3o calculados os autovalores.

Os autovalores de uma matriz s3o definidos como sendo os valores de  $\lambda$  que satisfazem a solu3o n3o trivial ( $v \neq 0$ ) da equa3o (4.2):

$$A \cdot v = \lambda \cdot v \quad (4.2)$$

onde  $A$  3 uma matriz de dimens3o ( $n \times n$ ),  $v$  3 um vetor de dimens3o ( $n \times 1$ ) e  $\lambda$  3 um escalar.

Os  $n$  autovalores  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$  da matriz  $A$  podem ser calculados atrav3s da solu3o das ra3zes do seu polin3mio ou equa3o caracter3stica, que 3 definida por:

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (4.3)$$

onde  $I$  3 uma matriz identidade de dimens3o ( $n \times n$ ).

Os autovalores obtidos a partir do polin3mio caracter3stico na equa3o (4.3) podem ser reais ou complexos. Caso a matriz  $A$  seja real, os autovalores complexos aparecem sempre em pares conjugados. Por outro lado, caso a matriz  $A$  seja real e sim3trica, todos os autovalores e autovetores ser3o reais (KUNDUR, 1994 apud HENRIQUES, 2009).

Segundo Henriques (2009, p3g. 26), a decomposi3o de matrizes em autovalores permite um estudo mais localizado do comportamento do sistema, permitindo melhor identificar

o problema e suas causas através do desacoplamento e da análise isolada de seus componentes principais, os chamados modos.

De acordo com Nise (2014, pag. 214), os autovetores da matriz  $A$  são todos os vetores  $v_i \neq 0$ , que através da transformação  $A$  se tornam múltiplos deles próprios; isto é,

$$A \cdot v_i = \lambda_i \cdot v_i \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (4.4)$$

onde  $v_i$  é um vetor de dimensão  $(n \times 1)$ . Além disso,  $Av$  deve ser colinear ao vetor  $v$  depois da transformação, senão,  $v$  não é um autovetor.

Uma matriz quadrada  $A$  é singular se, e somente se,  $0$  é um autovalor de  $A$ . Esta é, aliás, a principal técnica utilizada para descobrir se uma matriz é singular e essa técnica é utilizada neste trabalho para demonstrar a singularidade da matriz Jacobiana quando a resposta não convergir a raiz da função. Logo, a Tabela 4.6 mostra o primeiro exemplo analisado, caso 1, quando  $x_0 = [1.5; 1.0; 1.5; 1.5; 100]$ .

Tabela 4.6 - Dados obtidos quando  $x_0 = [1.5; 1.0; 1.5; 1.5; 100]$ .

Iteração	Det.(J)	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
-	-	$I_{ph}$	$I_S$	$m$	$R_S$	$R_p$
1ª	1,3049e-07	1,6469	49,4065	6,5116	-11,0310	61,8081
2ª	-8,1761e-16	-	-	-	-	-

Na tentativa de solução através do método de Newton Raphson, os autovalores calculados na última iteração foram:

$$\gamma = \begin{bmatrix} 0,9639 \\ 0,0375 \\ -0,0008 \\ 0,0003 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0,9639 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0375 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,0008 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,0003 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0 \end{bmatrix}$$

$$\det(D) = -8,1761e - 16$$

Os valores dos autovalores das duas iterações são mostrados na Figura 4.2. Note que, na segunda iteração, eles se aproximam mais dos zeros, tanto na parte real, quanta na imaginaria. Portanto, analisando os dados obtidos, percebe-se que um dos autovalores da

matriz é nulo, o qual inviabiliza o cálculo da matriz inversa e impossibilita a solução do problema.

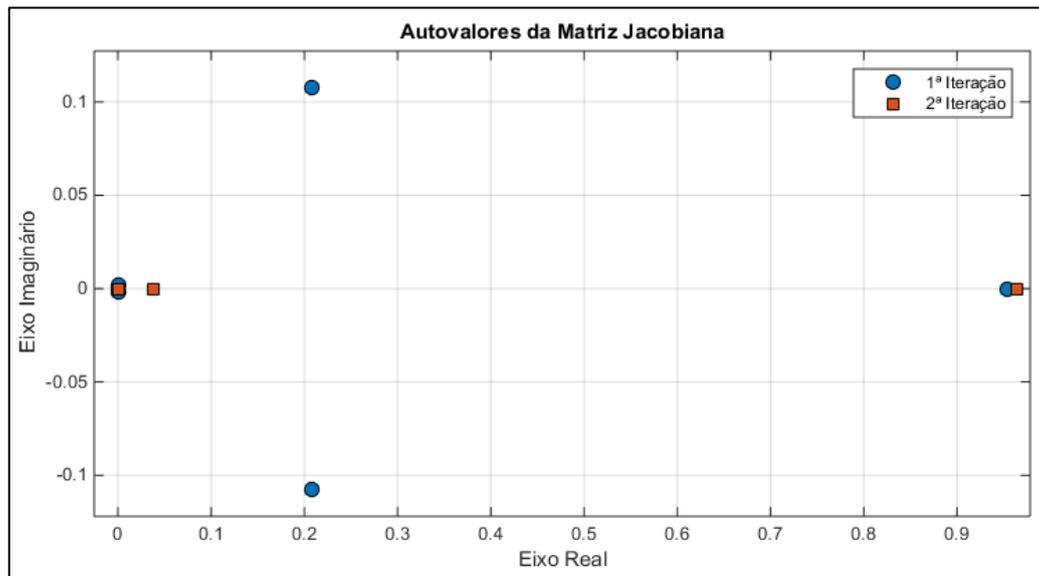


Figura 4.2 - Autovalores do primeiro caso da Curva 2.

O segundo teste foi realizado com um “chute inicial” mais próximo da raiz, sendo ele  $x_0 = [1,5; 0,5; 1,0; 0,5; 50]$ , 3º caso. Neste exemplo, o método convergiu para a solução do problema em cinco iterações, conforme mostra a Tabela 4.7. Seus autovalores são mostrados na Figura 4.3, ilustrando o comportamento dos autovalores nas cinco iterações. Note que, a cada iteração, seus valores se tornam mais próximos de zero, porém não são zero; como mostra as Figuras ampliadas 4.4 e 4.5, pois, se fossem, tornariam inviável a resolução do problema.

Tabela 4.7 - Dados obtidos quando  $x_0 = [1,5; 0,5; 1,0; 0,5; 50]$ .

Iteração	Det.(J)	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
-	-	$I_{ph}$	$I_S$	$m$	$R_S$	$R_p$
1ª	11,3969	1,8554	0,0507	1,0012	0,4915	57,3655
2ª	0,0207	1,8500	0,0507	1,0247	0,3247	58,7717
3ª	0,0044	1,8466	0,0483	1,0295	0,2123	58,9092
4ª	0,0026	1,8462	0,0441	1,0248	0,1978	58,9221
5ª	0,0027	1,8462	0,0441	1,0245	0,1979	58,9220

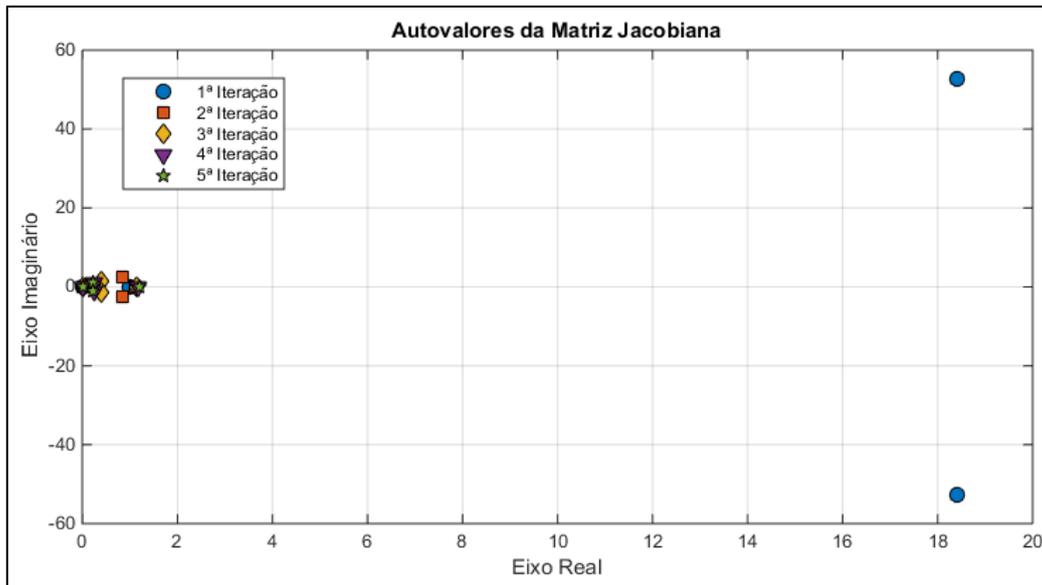


Figura 4.3 - Autovalores do terceiro caso da Curva 2.

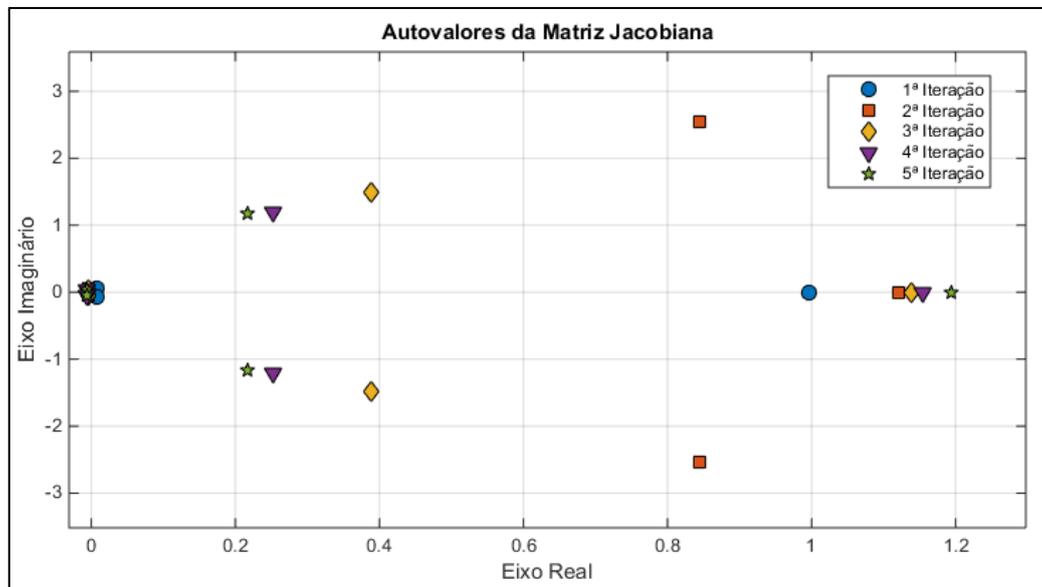


Figura 4.4 - Autovalores do terceiro caso da Curva 2 – 1ª Ampliação.

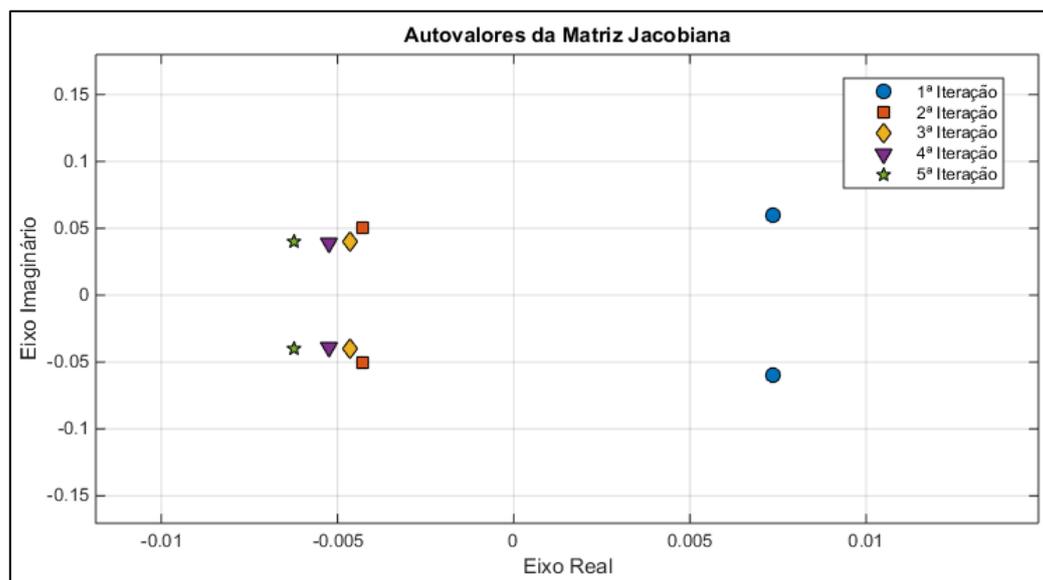


Figura 4.5 - Autovalores do terceiro caso da Curva 2 – 2ª Ampliação.

A Tabela 4.8 mostra o terceiro exemplo analisado da curva 2(dois), caso 4, mostrada na Figura 3.4, o “chute inicial” utilizado nesta simulação foi  $x_0 = [2,0; 0,1; 1,0; 1,0; 100]$ , o resultado converge após sete iterações às raízes da função. O número de iterações nesse caso foi maior que no anterior, isso ocorre devido ao fato de que no chute inicial usado,  $x_4$  e  $x_5$ , que representam  $R_S$  e  $R_P$  foram “chutes” mais distantes do que no caso anterior. Com relação aos autovalores, a Figura 4.6 mostra seus valores calculados em cada iteração, observe que a cada iteração, os autovalores se aproximam de zero, mas se mantém não nulos, garantindo a não singularidade da matriz Jacobiana e consequentemente sua inversibilidade.

Tabela 4.8 – Dados obtidos quando  $x_0 = [2,0; 0,1; 1,0; 1,0; 100]$ .

Iteração	Det.(J)	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
-	-	$I_{ph}$	$I_S$	$m$	$R_S$	$R_P$
1ª	0,0638	1,8677	0,1131	1,0472	0,7925	28,6243
2ª	0,0630	1,8432	0,1614	1,1003	0,4586	43,3820
3ª	0,0028	1,8428	0,1068	1,0840	0,1885	54,8865
4ª	0,0011	1,8461	0,0167	1,0237	0,1941	58,6445
5ª	4,1693e-04	1,8464	0,0441	1,0259	0,2040	58,9146
6ª	0,0026	1,8462	0,0441	1,0245	0,1977	58,9222
7ª	0,0028	1,8462	0,0441	1,0245	0,1979	58,9220

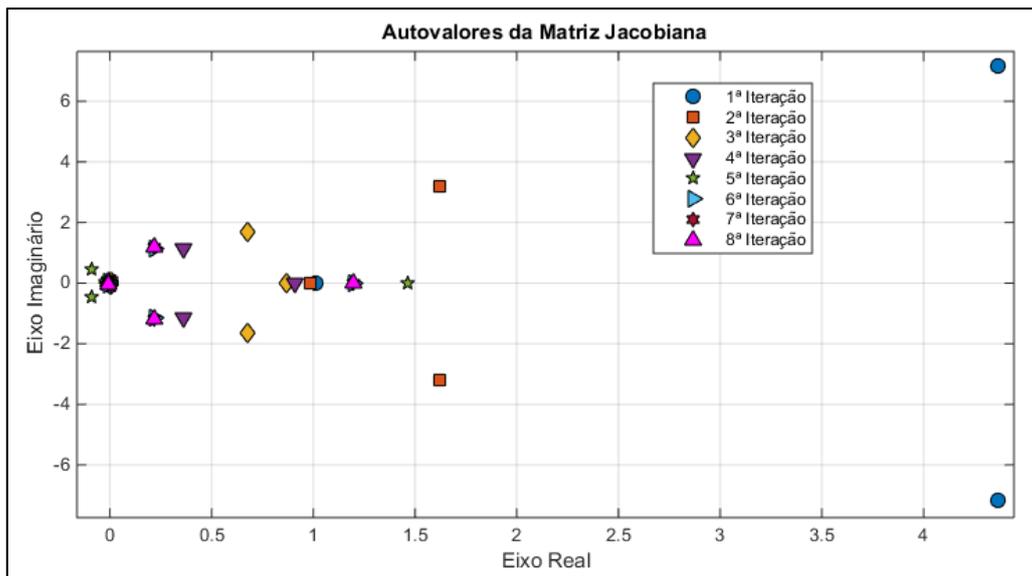


Figura 4.6 - Autovalores do quarto caso da Curva 2.

### 4.3.3 Dados Obtidos aplicando NR à Curva 3

A Tabela 4.9 mostra os resultados obtidos nos testes feito utilizando dados da curva 3(três), mostrada na Figura 3.5. Nesse caso, todas as simulações não convergiram para a raiz da função trabalhada. Para um melhor entendimento, vamos analisar três tentativas, observando a resposta do programa, o vetor solução  $x_n$ , o número de iterações e o determinante da matriz Jacobiana. Nesses casos o determinante da matriz Jacobiana tende a zero, a matriz torna-se singular, impossibilitando o cálculo da inversa e a continuidade para se obter a solução.

Tabela 4.9 – Parâmetros obtidos da Curva 3.

Caso	Chute Inicial	$I_{ph}$ (A)	$I_{s\mu}$ (A)	$m$	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	nº Iter.
1	$x_0 = [1,5;1,0;1,5;1,5;100]$	-	-	-	-	-	-
2	$x_0 = [1,5;1,0;1,5;1,0;100]$	-	-	-	-	-	-
3	$x_0 = [1,5;0,5;1,0;0,5;50]$	-	-	-	-	-	-
4	$x_0 = [2,0;0,1;1,0;1,0;100]$	-	-	-	-	-	-
5	$x_0 = [2,0;1,0;1,0;0,5;50]$	-	-	-	-	-	-
6	$x_0 = [2,0;1,0;1,0;1,0;50]$	-	-	-	-	-	-
7	$x_0 = [1,5;1.10^{-3};1,5;1,5;100]$	-	-	-	-	-	-
8	$x_0 = [0,6;2,5;1,5;2,0;100]$	-	-	-	-	-	-

A Tabela 4.10 mostra o resultado obtido do primeiro exemplo testado, quando  $x_0 = [1,5; 1,0; 1,5; 1,5; 100]$ , primeiro caso. Nota-se que houve apenas uma iteração, pois  $x_0$  não é

um valor adequado para o “chute inicial”, assim, já na segunda iteração o determinante da matriz Jacobina tende a zero.

Tabela 4.10 - Dados obtidos quando  $x_0 = [1.5; 1.0; 1.5; 1.5; 100]$ .

Iteração	Det.(J)	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
-	-	$I_{ph}$	$I_S$	$m$	$R_S$	$R_p$
1 <sup>a</sup>	2,0447e-09	1,3861	139,5833	16,3003	-36,8046	81,4385
2 <sup>a</sup>	3,9873e-18	-	-	-	-	-

A Tabela 4.11 mostra o resultado obtido do segundo exemplo testado, quando  $x_0 = [2,0; 1,0; 1,0; 0,5; 50]$ , quinto caso. Nota-se que houve 5(cinco) iterações. Alguns parâmetros tendem à raiz, porém  $x_2$  não converge e a partir da quarta iteração a diagonal da matriz Jacobiana irá se tornando mais fraca e a matriz tende a ser singular.

Tabela 4.11 – Dados obtidos quando  $x_0 = [2,0; 1,0; 1,0; 0,5; 50]$ .

Iteração	Det.(J)	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
-	-	$I_{ph}$	$I_S$	$m$	$R_S$	$R_p$
1 <sup>a</sup>	0,0117	2,2150	-1,5738	0,8776	0,6214	44,0068
2 <sup>a</sup>	32,4109	2,2153	-0,1186	0,8825	0,6167	44,7909
3 <sup>a</sup>	0,1311	2,2117	-0,1339	0,9566	0,5452	44,8725
4 <sup>a</sup>	0,0024	2,1940	-0,6837	1,3280	0,1828	45,1510
5 <sup>a</sup>	5,1722e-08	1,4906	-78,2486	16,0088	-14,3052	58,4433
6 <sup>a</sup>	6,6359e-18	-	-	-	-	-

Os Autovalores de cada iteração encontrados neste caso são mostrados na Figura 4.7. Note que na sexta iteração um dos autovalores adquire valor nulo, impossibilitando desta forma a continuidade da solução, pois a matriz Jacobiana se torna singular.

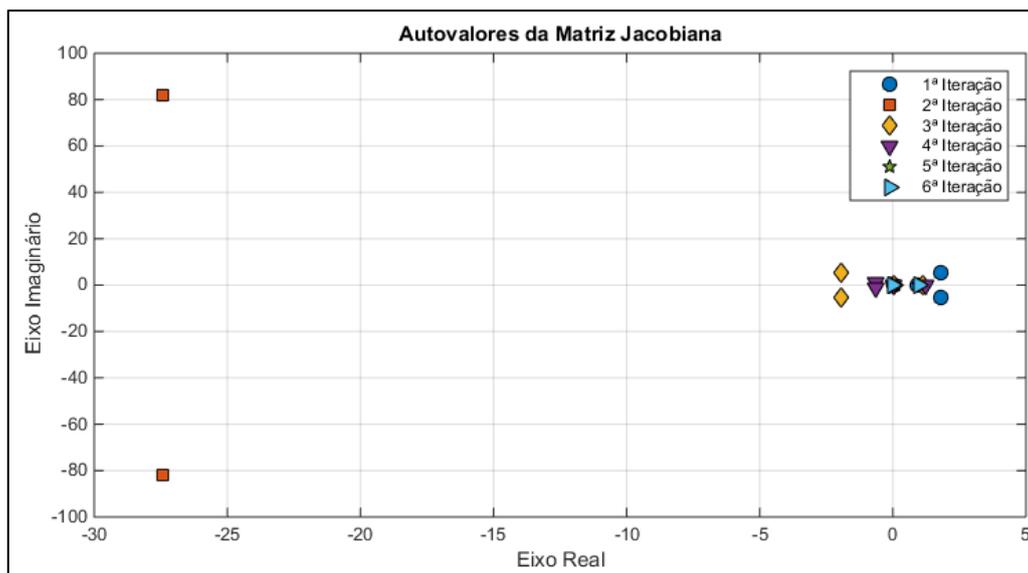


Figura 4.7 - Autovalores do quinto caso da Curva 3.

A Tabela 4.12 mostra o resultado obtido no terceiro exemplo analisado, quando  $x_0 = [2,0; 1,0; 1,0; 1,0; 50]$ , sexto caso. Nota-se que houve 4(quatro) iterações. Nesse caso,  $x_2$  se afasta da solução desde a primeira iteração e o restante dos parâmetros, divergem a cada iteração.

Tabela 4.12 – Dados obtidos quando  $x_0 = [2,0; 1,0; 1,0; 1,0; 50]$ .

Iteração	Det.(J)	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
-	-	$I_{ph}$	$I_S$	$m$	$R_S$	$R_p$
1ª	0,0304	2,2290	-0,0911	0,9729	0,8780	43,8057
2ª	9,6475e-04	2,2533	-0,3112	1,3258	1,3682	43,9678
3ª	1,0837e-09	0091,2	1768,7	-417,00	1740,5	-1599,3
4ª	1,3219e-22	-	-	-	-	-

Mesmo testando com um “chute inicial” bem próximo do valor desejado. Percebe-se que não houve convergência dos parâmetros na obtenção do resultado.

#### 4.3.4 Dados Obtidos aplicando NR à Curva 4

A Tabela 4.13 mostra os resultados obtidos nos testes feitos, utilizando dados da curva 4, mostrada na Figura 3.6. Note que após realizar vários testes, o método não encontrou as raízes das funções, portanto não houve convergência nessa curva utilizando o método de Newton Raphson.

Tabela 4.13 – Parâmetros obtidos da Curva 4.

Caso	Chute Inicial	$I_{ph}$ (A)	$I_S \mu$ (A)	$m$	$R_S$ ( $\Omega$ )	$R_P$ ( $\Omega$ )	nº Iter.
1	$x_0 = [1,5;1,0;1,5;1,5;100]$	-	-	-	-	-	-
2	$x_0 = [1,5;1,0;1,5;1,0;100]$	-	-	-	-	-	-
3	$x_0 = [1,5;0,5;1,0;0,5;50]$	-	-	-	-	-	-
4	$x_0 = [3,0;0,5;1,0;0,5;50]$	-	-	-	-	-	-
5	$x_0 = [2,0;1,0;1,0;0,5;50]$	-	-	-	-	-	-
6	$x_0 = [2,0;1,0;1,0;1,0;50]$	-	-	-	-	-	-
7	$x_0 = [1,5;1.10^{-3};1,5;1,5;100]$	-	-	-	-	-	-
8	$x_0 = [0,6;2,5;1,5;2,0;100]$	-	-	-	-	-	-

Para melhor entender o comportamento dos parâmetros nos testes feitos na curva 4, dois testes são detalhados aqui. O primeiro exemplo usado foi o quarto caso, quando o chute inicial é  $x_0 = [3,0; 0,5; 1,0; 0,5; 50]$ . Observe que houve 5 iterações até a divergência do método, isso ocorreu após a 5ª iteração, quando o determinante da matriz Jacobiana se tornou quase nulo e um dos autovalores da matriz J na última iteração foi zero, conforme mostram as Figuras 4.8 e 4.9.

Tabela 4.14 – Dados obtidos quando  $x_0 = [3,0; 0,5; 1,0; 0,5; 50]$ .

Iteração	Det.(J)	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
-	-	$I_{ph}$	$I_S$	$m$	$R_S$	$R_P$
1ª	0,0249	2,7960	-2,1711	0,7040	0,7159	23,4837
2ª	2,6065e+09	2,8017	-0,0019	0,7040	0,7159	30,1996
3ª	1,1833e+03	2,7995	-0,0019	0,7388	0,6925	32,6910
4ª	37,6383	2,7930	-0,0058	0,8555	0,6135	32,9811
5ª	0,0379	2,7303	-0,1236	1,9346	-0,1286	33,6597
6ª	1,3367e-11	-	-	-	-	-

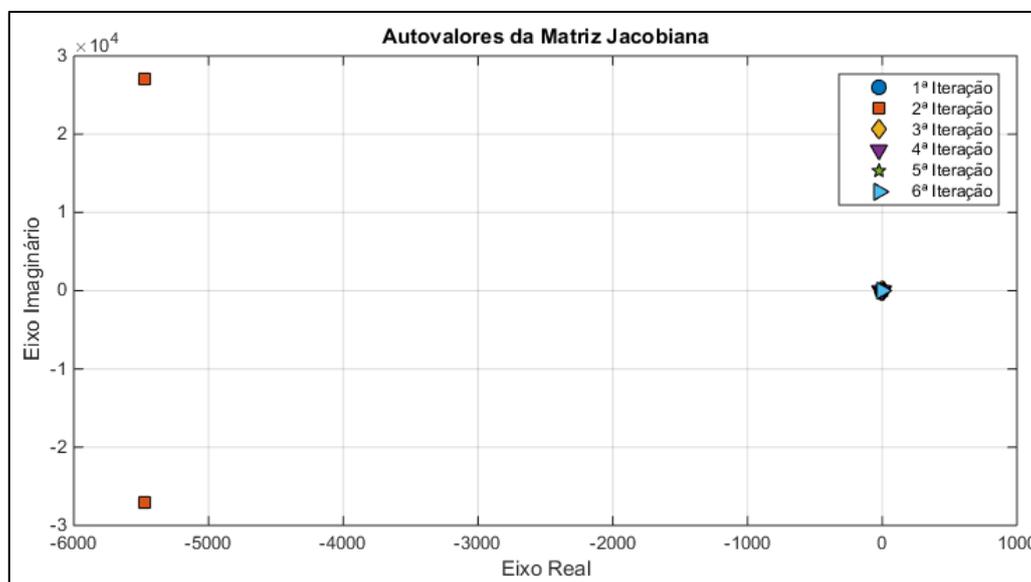


Figura 4.8 - Autovalores do primeiro exemplo da Curva 4.

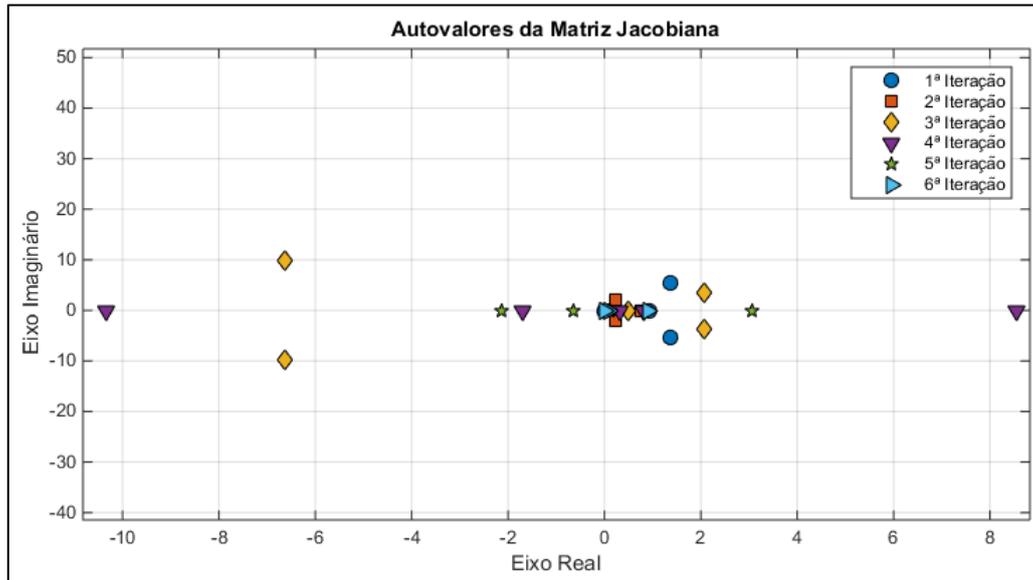


Figura 4.9 - Autovalores do primeiro exemplo da Curva 4 ampliado.

O segundo exemplo foi realizado com dados do primeiro caso, utilizando  $x_0 = [1,5; 1,0; 1,5; 1,5; 100]$ , neste houve apenas uma iteração, na segunda, a matriz Jacobiana se tornou singular e inviabilizou a continuação do programa, conforme mostram a Tabela 4.15 e a Figura 4.10.

Tabela 4.15 – Dados obtidos quando  $x_0 = [1,5; 1,0; 1,5; 1,5; 100]$ .

Iteração	Det.(J)	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
-	-	$I_{ph}$	$I_S$	$m$	$R_S$	$R_p$
1ª	1,2750e-08	1,9890	187,4862	22,6468	-28,2991	38,0128
2ª	-4,0504e-17	-	-	-	-	-

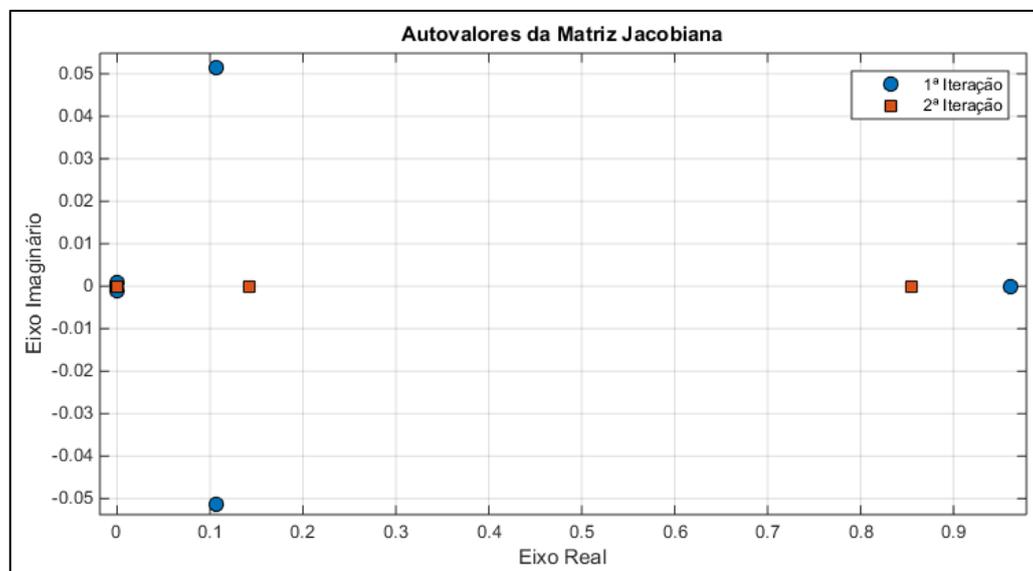


Figura 4.10 - Autovalores do segundo exemplo da Curva 4.

#### 4.4 Análise dos Resultados Válidos

A partir dos resultados obtidos nos tópicos 4.3.1 e 4.3.2, das curvas 1 e 2, foi possível gerar as curvas simuladas comparando com as curvas reais do módulo fotovoltaico utilizado.

Tabela 4.16 - Chutes Iniciais Utilizados

CHUTE INICIAL	
1°	$x_0 = [1,5; 0,5; 1,0; 0,5; 50]$
2°	$x_0 = [2,0; 0,1; 1,0; 1,0; 100]$
3°	$x_0 = [2,0; 1,0; 1,0; 1,0; 100]$
4°	$x_0 = [2,0; 1,0; 1,0; 1,0; 50]$
5°	$x_0 = [0,6; 2,5; 1,5; 2,0; 100]$

Durante as simulações executadas, várias suposições, “chutes iniciais” foram utilizados, alguns deles convergiram para resolver o problema, outras não. Daqueles que convergiram, mostrados na Tabela 4.16, observou-se que os valores gerados eram idênticos. Além disso, observou-se, que com o chute inicial mais próximo da raiz, convergiam em menos iterações, como mostra as Tabelas 4.17 e 4.18.

Tabela 4.17 - Obtenção dos parâmetros da Curva 1

CURVA 1						
Chute Inicial	I <sub>ph</sub> (A)	I <sub>s</sub> (μA)	m	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>p</sub> (Ω)	Iters
1°	0,6687	2,006	1,4288	1,1686	120,58	9
2°	0,6687	2,006	1,4288	1,1686	120,58	7
3°	0,6687	2,006	1,4288	1,1686	120,58	9
4°	0,6687	2,006	1,4288	1,1686	120,58	9
5°	0,6687	2,006	1,4288	1,1686	120,58	4

Tabela 4.18 - Obtenção dos parâmetros da Curva 2

CURVA 2						
Chute Inicial	I <sub>ph</sub> (A)	I <sub>s</sub> (μA)	m	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>p</sub> (Ω)	Iters
1°	1,8462	0,0441	1,0245	0,1979	58,92	5
2°	1,8462	0,0441	1,0245	0,1979	58,92	7
3°	1,8462	0,0441	1,0245	0,1979	58,92	8
4°	1,8462	0,0441	1,0245	0,1979	58,92	8

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram uma relação de corrente e tensão, comparando uma curva real com uma curva simulada. É possível observar que as curvas simuladas passam pelos

cinco pontos utilizados na formulação do problema, obtendo assim uma boa aproximação da curva real.

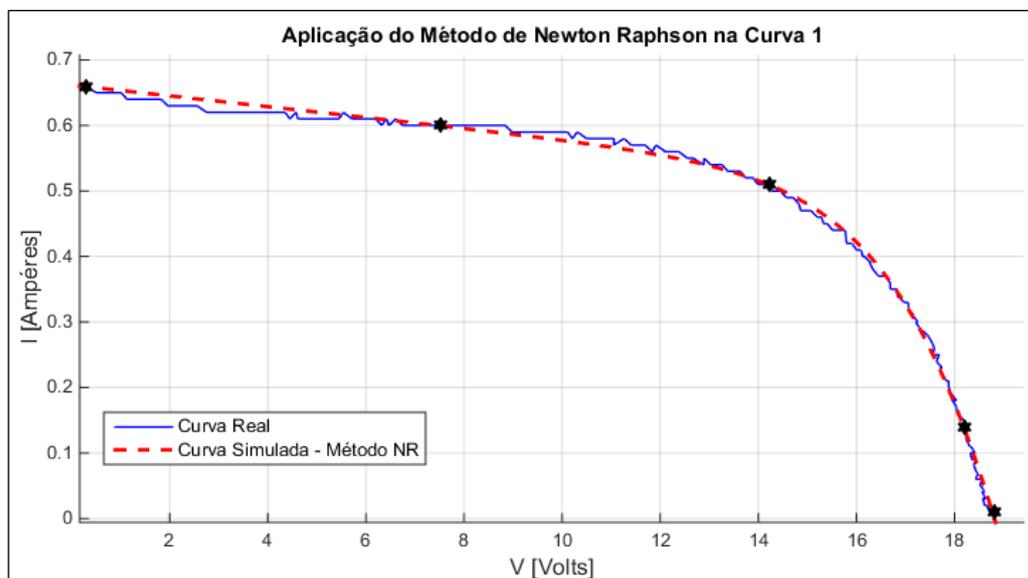


Figura 4.11- Curva I x V,  $T=25^{\circ}\text{C}$  e  $G=225.0\text{ W/m}^2$ .

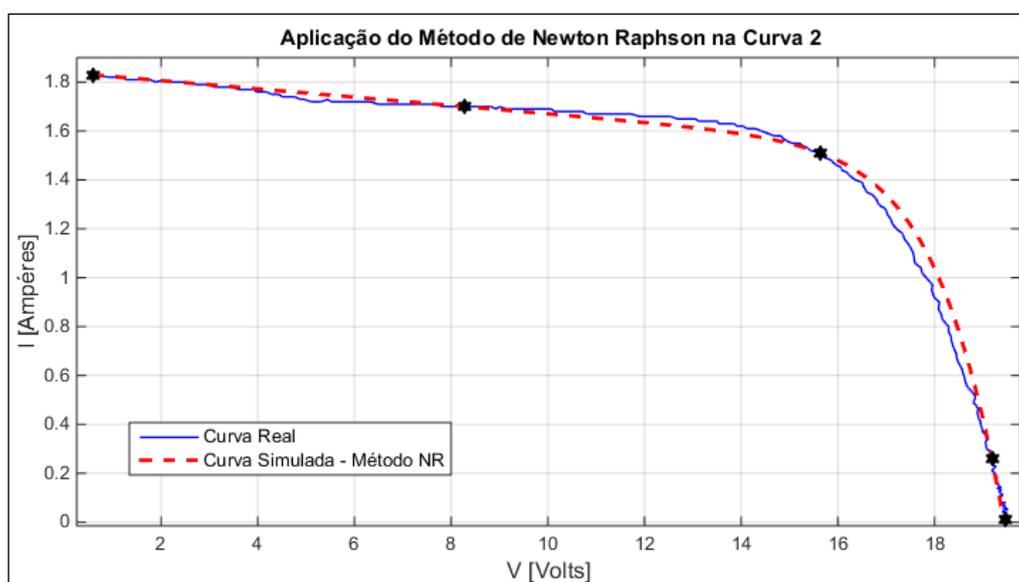


Figura 4.12 - Curva I x V,  $T=35^{\circ}\text{C}$  e  $G=596.8\text{ W/m}^2$ .

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram a relação de potência e tensão. É possível observar que as curvas simuladas foram capazes de atingir os pontos de máxima potência e que sua forma se aproxima satisfatoriamente da curva real.

Logo, apesar das limitações do método, citadas durante o capítulo, quando há convergência, o método é preciso e apresenta bons resultados comparando a simulação com a realidade.

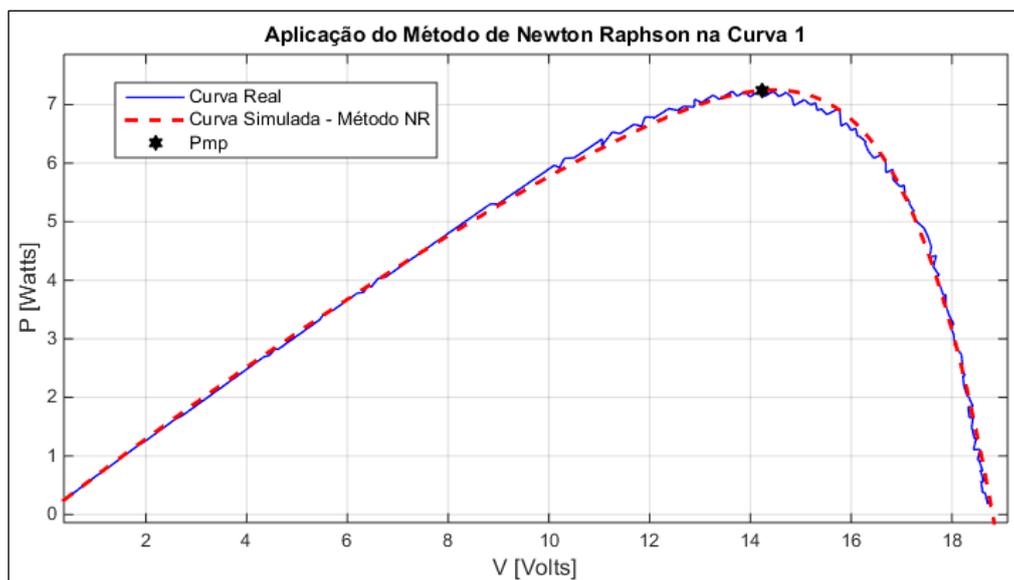


Figura 4.13 - Curva P x V,  $T=25^{\circ}\text{C}$  e  $G=225.0\text{ W/m}^2$ .

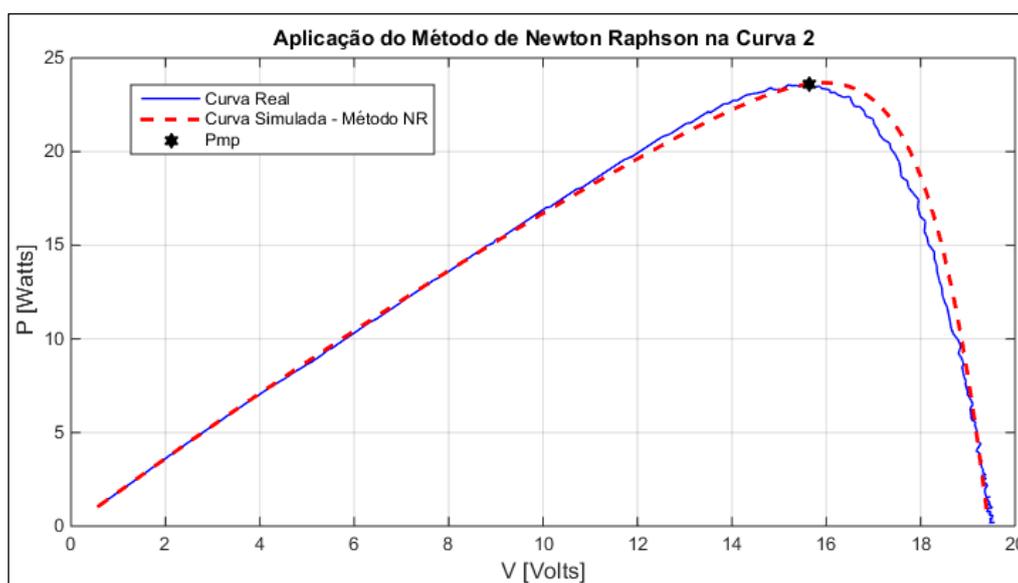


Figura 4.14 - Curva P x V,  $T=35^{\circ}\text{C}$  e  $G=596.8\text{ W/m}^2$ .

No capítulo a seguir descrevemos a obtenção de parâmetros de módulos fotovoltaicos através de Algoritmos Genéticos, esta abordagem é adotada quando não se tem nenhum conhecimento sobre os parâmetros dos módulos. Os AGs são recomendados para o cálculo em primeira aproximação destes parâmetros para depois, usando estes resultados como “chute inicial” para o método NR, se obter resultados mais condizentes com a precisão desejada.

---

## 5 OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

### 5.1. Introdução

No capítulo anterior, foi desenvolvido um programa que calcula os parâmetros de um módulo fotovoltaico utilizando o método de Newton Raphson. Entretanto, como visto, o método possui limitações, não podendo ser utilizado em todos os casos. Sendo assim, foi necessário encontrar outro método que seja capaz de extrair os parâmetros de um módulo fotovoltaico qualquer, a partir da curva atual de corrente e tensão.

Tendo em vista esta necessidade, o presente trabalho mostra o uso de Algoritmos Genéticos (AG) na extração de parâmetros de um módulo fotovoltaico usando inicialmente o modelo de um diodo e posteriormente o modelo de dois diodos. O AG pode se apresentar de duas formas, com parâmetros binários ou reais. Neste trabalho, serão utilizados parâmetros reais, são eles: a corrente gerada pelo módulo fotovoltaico ( $I_{ph}$ ), a corrente de saturação reversa do diodo ( $I_S$ ), o fator de idealidade ( $m$ ), a resistência série  $R_S$  e a resistência em paralelo ( $R_p$ ).

Conforme a teoria descrita no Capítulo 2, em um algoritmo genético, os cromossomos que representam as possíveis soluções do problema, é um vetor contendo os valores dos parâmetros procurados, sendo cada parâmetro considerado um gene. Logo, nesse programa cada cromossomo contém 5 genes para o modelo de um diodo e 7 genes para o modelo de dois diodos. Foi utilizado também o conceito de elitismo, que consiste em manter de uma geração para outra o melhor indivíduo.

No fim deste capítulo, foi utilizado no método de Newton Raphson, os parâmetros obtidos em Algoritmos Genéticos, viabilizando assim o uso de NR em todos os casos analisados.

### 5.2. Fluxograma do Algoritmo Genético Desenvolvido

Para aplicar o AG ao problema proposto, foi implementado um algoritmo no *software* Octave, uma plataforma de *software* livre para programação e análise numérica

computacional, este programa é gerado e funciona por etapas, como na evolução natural. O fluxograma do programa desenvolvido é apresentado detalhadamente na Figura 5.1.

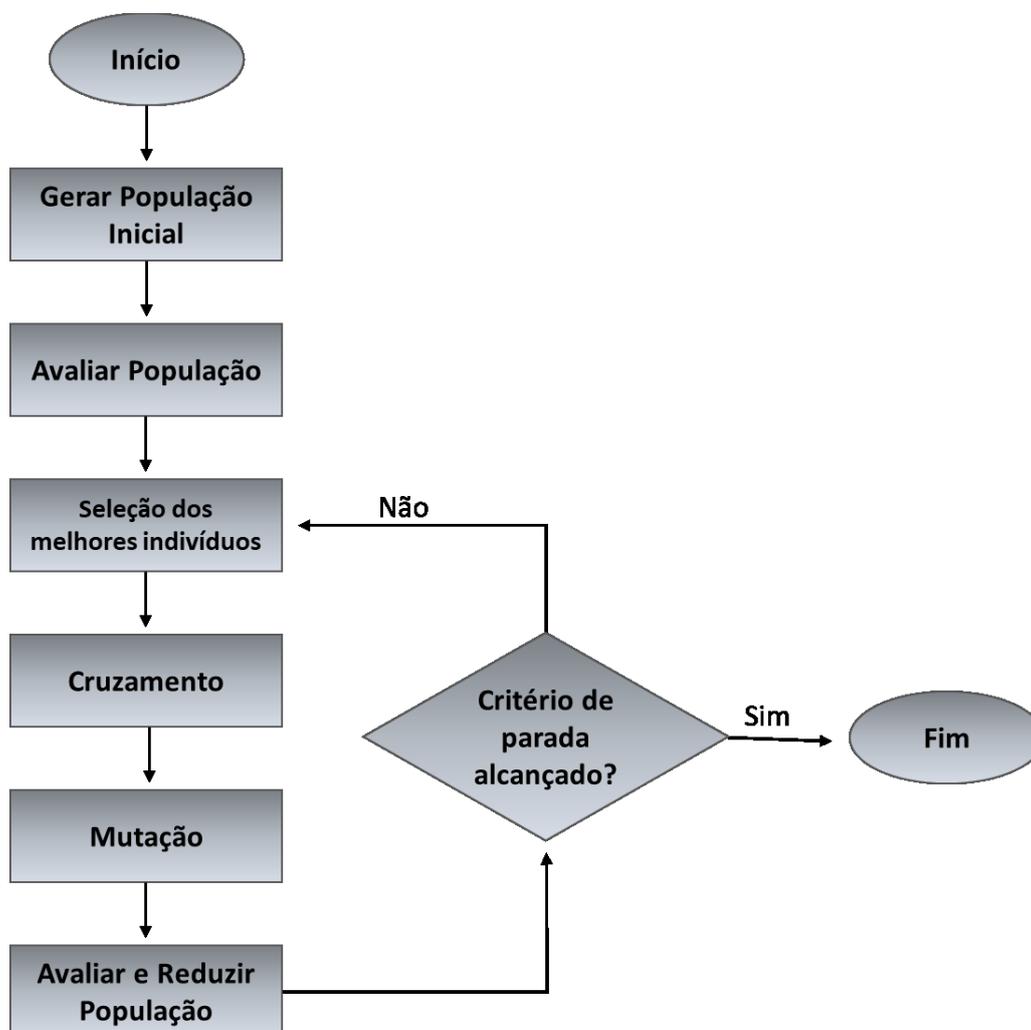


Figura 5.1 - Fluxograma do AG implementado.

**Gerar População Inicial:** Ao iniciar o programa será gerada uma população de indivíduos de tamanho definido pelo usuário, de forma randômica, respeitando o intervalo imposto pelas restrições, esse intervalo são valores mínimos e máximos dos parâmetros buscados pelo AG. Portanto, cada cromossomo gerado será um vetor de uma linha e cinco ou sete colunas, para o modelo de um diodo e de dois, respectivamente. O tamanho da população deve ser cuidadosamente pensado, ao passo que, quanto maior a população, mais preciso o resultado obtido porém maior será o tempo de execução do programa.

**Avaliar a População:** Nesta fase do programa, a população gerada é avaliada, todos os cromossomos são submetidos à função de aptidão, sendo essa a função objetivo a qual se deseja minimizar para encontrar os parâmetros buscados. Uma melhor descrição da função de avaliação, aptidão, ou fitness será abordada e detalhada no tópico 5.2.1.

**Seleção dos Melhores Indivíduos:** Essa parte do programa é utilizada para selecionar os pais que mais tarde sofrerão o cruzamento e gerarão os filhos. A seleção, nesse programa, utiliza o método do torneio, esse trabalha selecionando 3 (três) cromossomos do total estipulado pelo usuário, posteriormente, ele identifica qual é o mais apto e o seleciona para ser um pai, o programa executa esta tarefa  $n$  vezes até preencher o vetor de tamanho estipulado pelo usuário.

**Cruzamento (*Crossover*):** Nesta operação, dois cromossomos são combinados para formar novos indivíduos, os filhos. Neste trabalho, o método de cruzamento utilizado é o método proposto por Wright (1991), utilizaram-se operadores de cruzamento aritméticos com combinação linear, conforme apresentado na Equação 5.1, cada par de pais gera três filhos no cruzamento.

$$\begin{aligned} 1^\circ \text{ Filho} &= \text{Pai}(1) \times 0,5 + \text{Pai}(2) \times 0,5 \\ 2^\circ \text{ Filho} &= \text{Pai}(1) \times 1,5 - \text{Pai}(2) \times 0,5 \\ 3^\circ \text{ Filho} &= \text{Pai}(2) \times 1,5 - \text{Pai}(1) \times 0,5 \end{aligned} \quad (5.1)$$

**Mutação:** Primeiramente, é atribuído um valor à taxa de mutação, que define qual a porcentagem dos indivíduos pode ser mutada. Posteriormente, a população é percorrida, gerando um número randômico para cada indivíduo, que se menor que a taxa estipulada, este cromossomo sofrerá mutação. Além disso, deve-se escolher qual gene será mutado, esta escolha é feita também de forma randômica, o gene mutado será então substituído por um número aleatório gerado dentro do intervalo da variável.

**Avaliar e Reduzir População:** Nesta operação, a população é novamente avaliada a partir da função de aptidão. Como mostrado, no cruzamento a população gerada foi 50% maior que a população original, logo, nesta fase reduz-se a população, escolhendo os indivíduos mais aptos.

**Critério de Parada:** Ao fim, é analisado o critério de parada, esse define quando o programa é finalizado. O critério utilizado foi: o programa para função de avaliação for

menor que 1e-5, ou quando o número de gerações estipulada pelo usuário for alcançado. Caso nenhum destes critérios for alcançado, o programa retorna para a etapa de “Seleção” e continua sendo executado.

### 5.2.1. Função de Aptidão e Restrições

O desempenho da extração é avaliado usando a função de aptidão, ou avaliação,  $F_A$ . Nesse trabalho,  $J$  é formulado como a raiz do valor quadrático médio da equação do módulo fotovoltaico, conforme equação (5.2). Sendo  $N$  o número de equações utilizadas e, conseqüentemente, o número de parâmetros extraídos.

$$F_A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N f(I_m, V_m, \Phi)^2} \quad (5.2)$$

em que

$$f(I_m, V_m, \Phi) = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{N_s m K T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} - I \quad (5.3)$$

para o modelo de um diodo,  $\Phi = [I_{ph}, I_s, m, R_s, R_p]$ , os cinco parâmetros do módulo a ser extraído e

$$f(I_m, V_m, \Phi) = I_{ph} - I_{s1} \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{m_1 N_s K T}} - 1 \right) - I_{s2} \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{m_2 N_s K T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} - I \quad (5.4)$$

para o modelo de dois diodos e  $\Phi = [I_{ph}, I_{s1}, I_{s2}, m_1, m_2, R_s, R_p]$ , os sete parâmetros do módulo a ser extraído.

O objetivo do método é minimizar a função  $F_A$ , dada pela equação (5.2). Idealmente, o valor desejado de  $F_A$  é zero. Entretanto, em algoritmos genéticos, isso nem sempre é possível, pois os indivíduos são gerados aleatoriamente e a cada simulação um valor é obtido, podendo ser muito próximo de zero ou não, dependendo do critério de parada.

Os limites inferiores e superiores dos parâmetros buscados devem ser respeitados durante todo o programa, estes limites são detalhados nos tópicos 3.3 e 3.4 do Capítulo 3, sendo,

portanto, as Tabelas 5.1 e 5.2 as restrições dos parâmetros no modelo de um e dois diodos respectivamente.

Tabela 5.1 – Limites inferiores e superiores dos parâmetros buscados para o modelo de um diodo.

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

Tabela 5.2 - – Limites inferiores e superiores dos parâmetros buscados para o modelo de dois diodos.

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

### 5.3. Aplicação de Algoritmos Genéticos no Modelo de Um Diodo

Para aplicar AG com o modelo de 1(um) diodo ao problema estudado foi implementado um programa utilizando todas as etapas do algoritmo genético, sendo elas: geração da população inicial, avaliação da população, seleção dos melhores indivíduos, cruzamento, mutação, reavaliação e redução da população e por fim, análise do critério de parada. A função de avaliação utilizada é dada pelas equações (5.2) e (5.3) e as restrições dada pela Tabela 5.1. De posse do programa implementado, os dados foram obtidos e analisados conforme os tópicos seguintes.

#### 5.3.1. Análise dos Resultados aplicando AG com o modelo de um diodo na Curva 1

Dezenas de testes foram realizados para cada curva, variando a taxa de mutação, a taxa de cruzamento, o número máximo de gerações e o tamanho da população. A Tabela 5.3 mostra alguns destes testes. Em destaque se encontra o 9º teste, que obteve o melhor resultado entre os demais, alcançando a raiz do valor quadrático médio da equação do módulo fotovoltaico igual a  $8.8595 \times 10^{-6}$ , um valor ótimo e com parâmetros obtidos muito próximo do obtido pelo método Newton Raphson utilizado no capítulo 4.

Tabela 5.3 - Resultado das simulações da curva 1, AG com modelo de um diodo.

Simulações com AG - CURVA 1											
Teste	I <sub>ph</sub> (A)	I <sub>s</sub> (μA)	m	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>p</sub> (Ω)	Nº Ger.	Taxa Mut.	Taxa Cross.	F <sub>A</sub>	Tam.	Tempo (s)
1º	0,6681	2,6263	1,4601	1,1063	122,1653	3000	0,05	0,7	2,6377 e-04	250	45,33
2º	0,6688	1,9606	1,4262	1,1757	120,4971	3000	0,05	0,7	2,7432 e-05	250	52,06
3º	0,6678	2,8685	1,4707	1,0763	122,4772	1000	0,05	0,7	3,3083 e-04	250	12,13
4º	0,6693	1,6348	1,4060	1,2179	119,4636	1000	0,05	0,7	1,8341 e-04	250	13,71
5º	0,6687	1,9865	1,4277	1,1710	120,5223	910	0,05	0,8	9,9682 e-06	250	11,61
6º	0,6677	3,3012	1,4878	1,0396	123,1728	1000	0,05	0,8	4,7740 e-04	250	16,46
7º	0,6687	2,0199	1,4296	1,1673	120,6111	922	0,05	0,8	9,9810 e-06	250	12,80
6º	0,6692	0,0100	1,0034	2,0715	112,3608	1000	0,05	0,8	0,0053	150	8,72
8º	0,6680	2,7287	1,4648	1,0905	122,0877	1000	0,05	0,8	2,8790 e-04	150	9,54
9º	0,6687	1,9860	1,4277	1,1710	120,5316	67	0,1	0,8	9,8885 e-06	250	0,85
10º	0,6789	0,0100	1,0040	2,0885	103,3624	1000	0,2	0,8	0,0034	250	13,77
11º	0,6687	2,0241	1,4299	1,1665	120,6311	533	0,2	0,8	9,5014 e-06	250	6,87
12º	0,6687	2,0216	1,4297	1,1666	120,6130	330	0,2	0,8	9,9750 e-06	250	4,53
13º	0,6687	2,0208	1,4297	1,1670	120,6228	1000	0,4	0,8	8,8595 e-06	250	7,40
14º	0,6700	1,8561	1,4206	1,4681	124,9895	1000	0,7	0,8	0,0041	250	14,67
15º	0,6687	2,0244	1,4299	1,1668	120,6411	72	0,1	0,8	9,8230 e-06	250	0,93
16º	0,6687	2,0233	1,4298	1,1667	120,6336	61	0,1	0,8	9,1033 e-06	250	0,76

As Figuras 5.2 e 5.3 mostram o comportamento da minimização da função objetivo  $J$  e a média da população no 5º teste executado na curva 1. Observa-se que a minimização da função é obtida rapidamente, antes da geração de nº 50, logo não são necessárias tantas

gerações. Entretanto, optou-se por colocar um número grande de geração nos primeiros casos para uma melhor visualização do comportamento do programa.

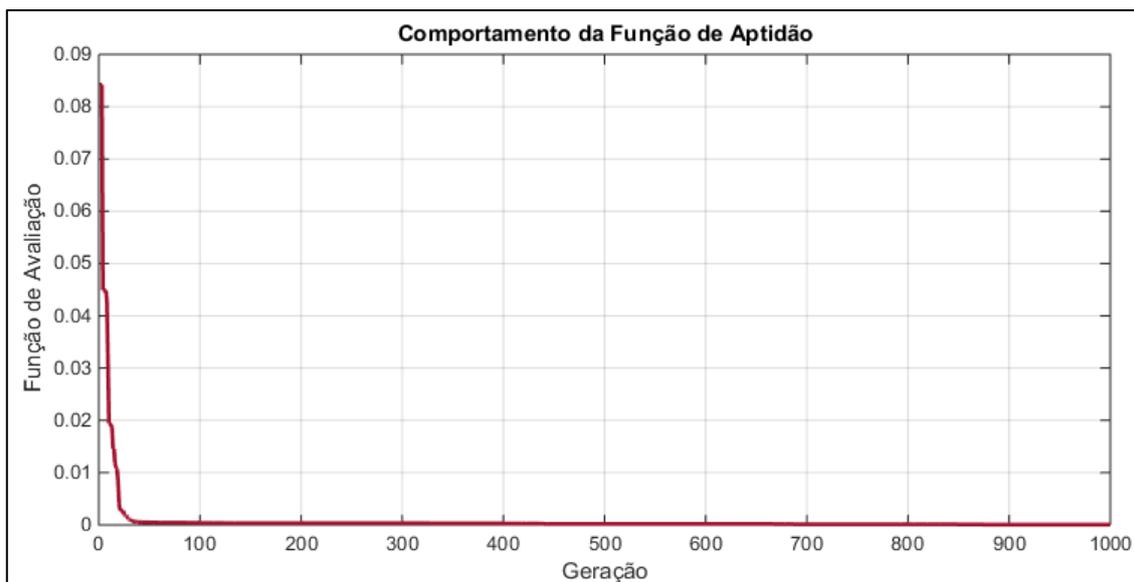


Figura 5.2 - Minimização da Função de Aptidão, Curva 1, AG Um Diodo.

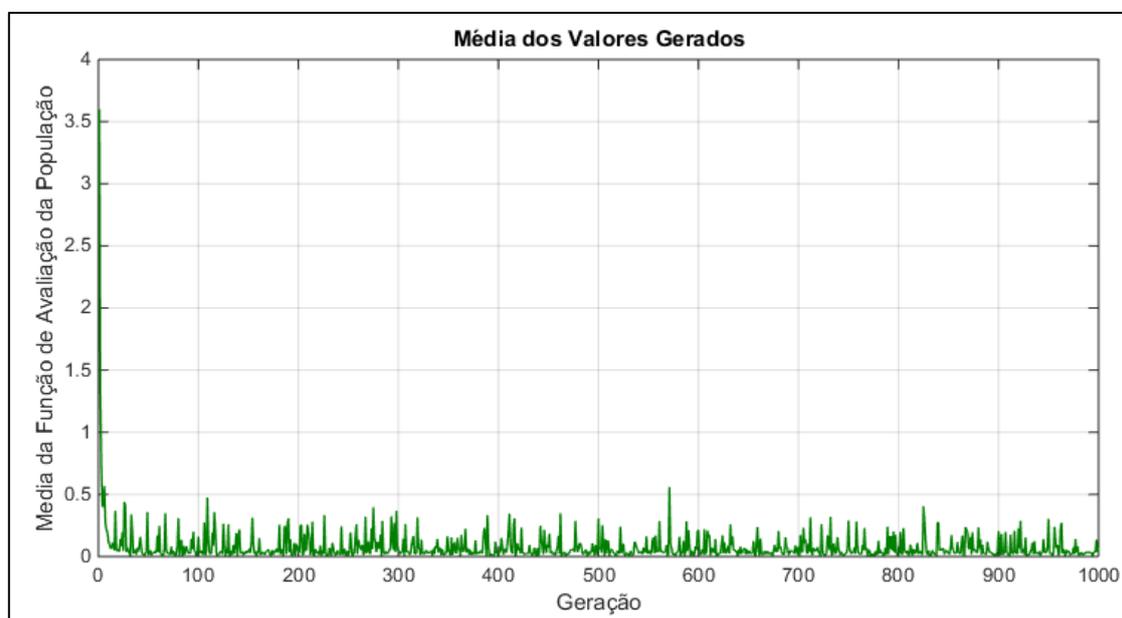


Figura 5.3 - Média da População, Curva 1, AG Um Diodo.

A partir dos dados obtidos é possível gerar, portanto, a curva simulada e confrontar com a curva real, para isso, utilizou-se aleatoriamente o resultado do 13º caso por ter o resultado da função de avaliação ( $F_A$ ) muito pequeno, próximo de zero. As Figuras 5.4 e 5.5 mostram a comparação das curvas gerada e real, extraída do módulo fotovoltaico.

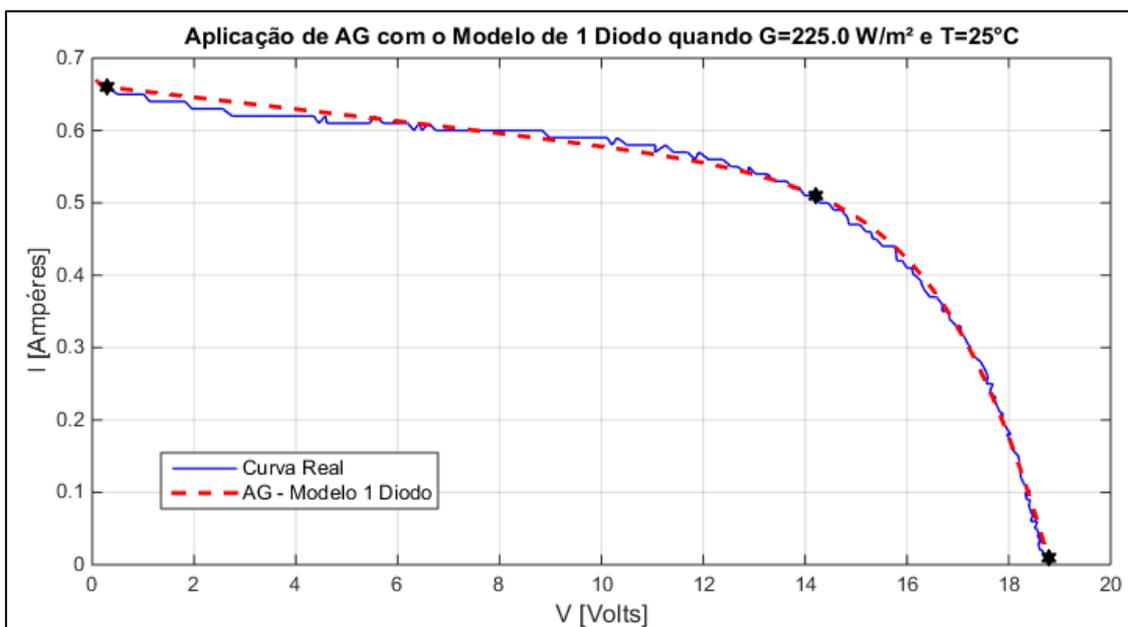


Figura 5.4 - Curva 1  $V \times I$ , utilizando AG no modelo de um diodo.

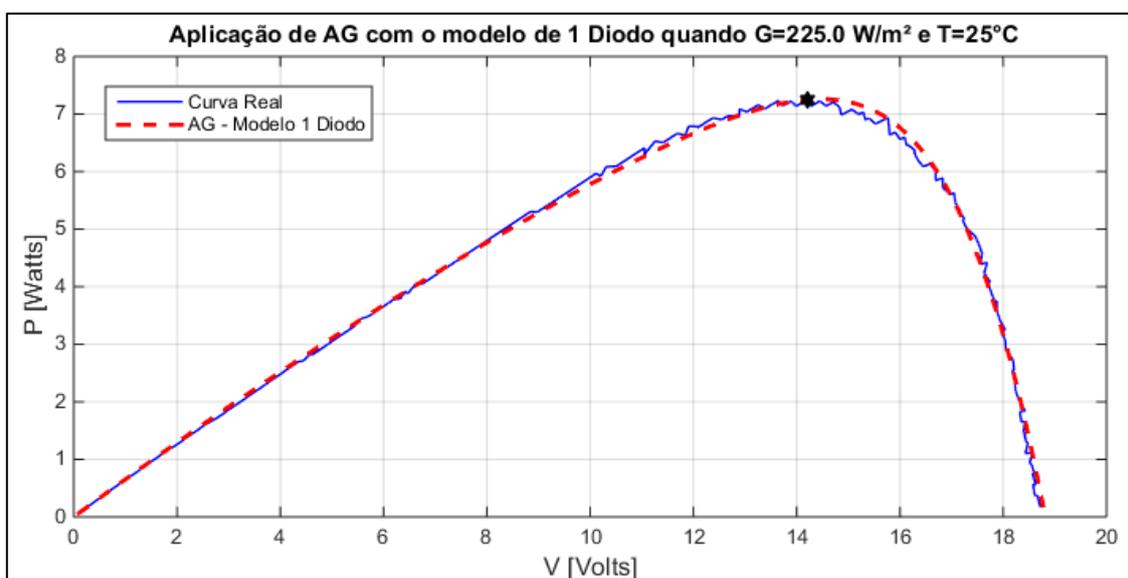


Figura 5.5 - Curva 1  $V \times P$ , utilizando AG no modelo de um diodo.

### 5.3.2 Análise dos Resultados aplicando AG com o modelo de um diodo na Curva 2

Da mesma forma que na curva 1, várias simulações foram feitas, variando as taxas de mutação e cruzamento, o tamanho da população e o número de gerações. A partir desses dados, alguns casos foram expostos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Resultado das simulações da curva 2, AG com modelo de um diodo.

Simulações com AG - CURVA 2											
Teste	I <sub>ph</sub> (A)	I <sub>s</sub> ( $\mu$ A)	m	R <sub>s</sub> ( $\Omega$ )	R <sub>sh</sub> ( $\Omega$ )	N <sup>o</sup> Ger.	Taxa Mut.	Taxa Cross.	F <sub>A</sub>	Tam.	Tempo(s)
1 <sup>o</sup>	1,8381	0,5555	1,1985	0,0596	64,2745	1000	0,1	0,8	0,0047	250	12,03
2 <sup>o</sup>	1,8373	0,4963	1,1894	0,0761	64,9915	1000	0,1	0,8	0,0044	250	12,92
3 <sup>o</sup>	1,8270	4,8857	1,4017	0,0010	78,9781	1000	0,1	0,8	0,0124	100	6,03
4 <sup>o</sup>	1,8446	0,0726	1,0547	0,1759	59,8983	3000	0,1	0,8	8,0717 e-04	250	35,67
5 <sup>o</sup>	1,8429	0,1161	1,0847	0,1534	61,0199	3000	0,1	0,8	0,0016	250	38,60
6 <sup>o</sup>	1,8429	0,1115	1,0820	0,1543	60,8766	3000	0,1	0,8	0,0015	250	38,94
7 <sup>o</sup>	1,8370	0,5140	1,1922	0,0702	64,9724	3000	0,01	0,8	0,0045	250	48,12
8 <sup>o</sup>	1,8396	0,2626	1,1411	0,1100	63,1017	3000	0,05	0,8	0,0031	250	44,62
9 <sup>o</sup>	1,8386	0,3524	1,1630	0,0973	63,9355	3000	0,05	0,8	0,0037	250	38,95
10 <sup>o</sup>	1,8367	0,5524	1,1979	0,0712	65,4563	2000	0,1	0,7	0,0047	250	24,62
11 <sup>o</sup>	1,8395	0,3112	1,1537	0,1025	63,3965	2000	0,15	0,7	0,0035	250	28,23

Para exemplificar, as Figuras 5.6 e 5.7 mostram o comportamento da função de avaliação e a média das populações durante as 3000 gerações no 4<sup>o</sup> teste realizado.

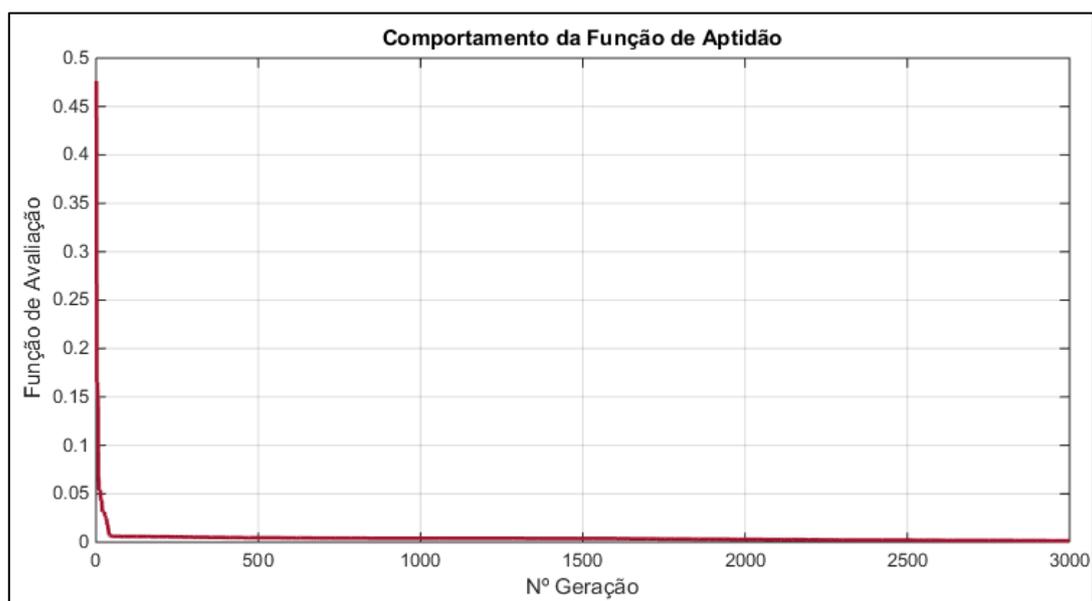


Figura 5.6 - Minimização da Função Aptidão, Curva 2, AG Um Diodo.

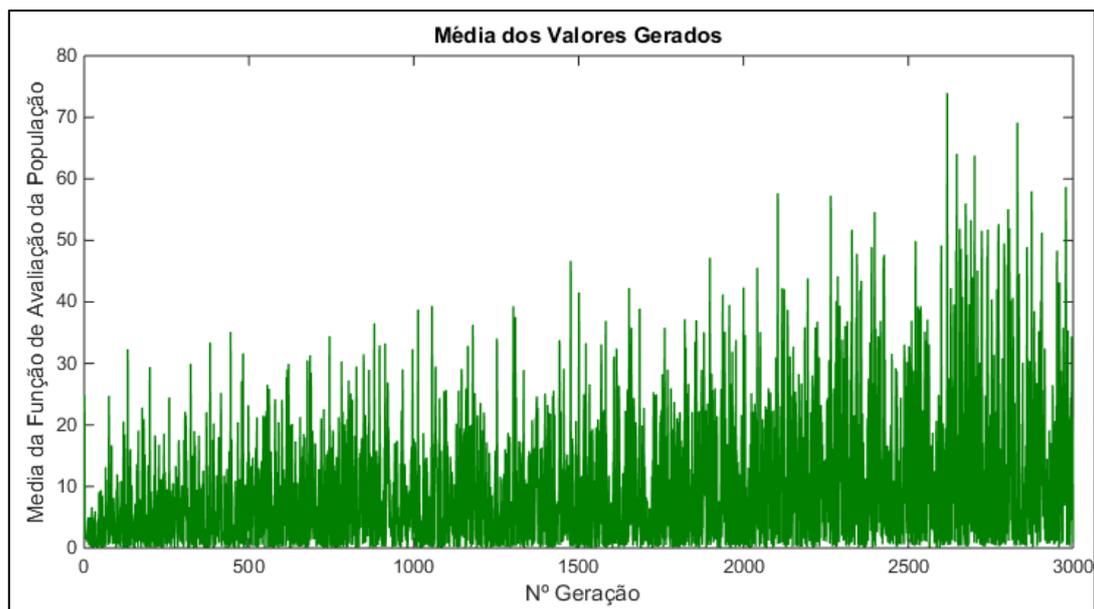


Figura 5.7 - Média da População, Curva 2, AG Um Diodo.

Entre os testes feitos, o 4º foi que obteve uma melhor resposta, a raiz do valor quadrático médio da equação do módulo fotovoltaico igual  $8.0717e-04$ , utilizando 250 indivíduos, taxa de mutação de 0,8 e de cruzamento 0,1, resultado obtido com 3000 gerações. De posse desses parâmetros, as curvas  $V_{xI}$  e  $P_{xV}$  foram geradas nas Figuras 5.8 e 5.9, comparando a curva simulada com a curva real.

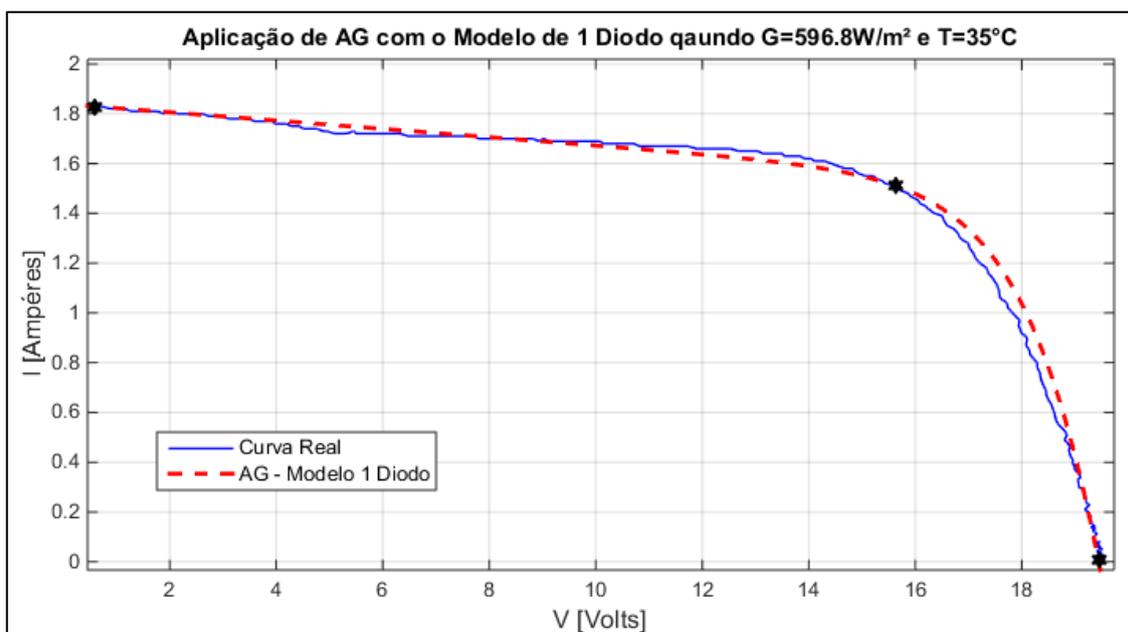


Figura 5.8 - Curva 2  $V_{xI}$ , utilizando AG no modelo de um diodo.

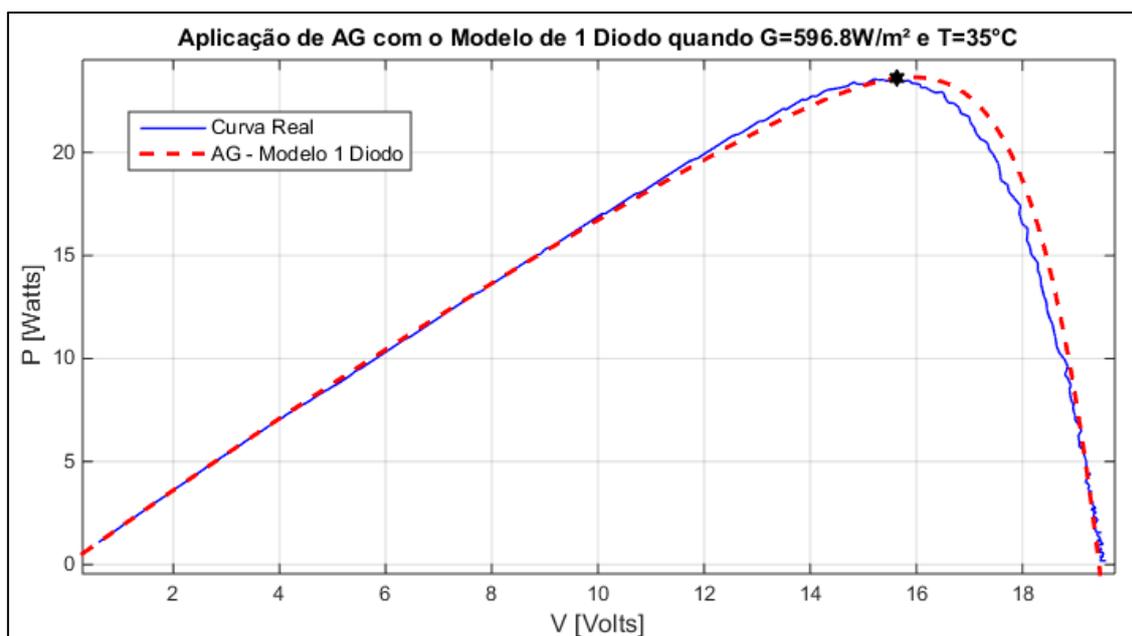


Figura 5.9 - Curva 2 VxP, utilizando AG no modelo de um diodo.

### 5.3.3 Análise dos Resultados aplicando AG com o modelo de um diodo na Curva 3

Na curva 3, vários testes também foram feitos e alguns destes resultados são apresentados na Tabela 5.5. Observe que quanto mais gerações forem utilizadas, maior é o tempo de execução do programa, este tempo também pode ser diminuído pelo número de indivíduos usados, entretanto, a precisão da resposta será reduzida.

Tabela 5.5 - Resultado das simulações da curva 3, AG com modelo de um diodo.

Simulações com AG - CURVA 3											
Teste	I <sub>ph</sub> (A)	I <sub>s</sub> ( $\mu$ A)	m	R <sub>s</sub> ( $\Omega$ )	R <sub>sh</sub> ( $\Omega$ )	N <sup>o</sup> Ger.	Taxa Mut.	Taxa Cross.	F <sub>A</sub>	Tam.	Tempo(s)
1 <sup>o</sup>	2,1807	1,8176	1,1194	0,4967	67,1143	1000	0,1	0,8	0,0199	100	5,69
2 <sup>o</sup>	2,1699	3,2857	1,1687	0,4650	74,1402	1000	0,1	0,8	0,0222	100	7,10
3 <sup>o</sup>	2,1913	0,3421	1,0000	0,5834	59,4829	3000	0,1	0,8	0,0146	250	36,39
4 <sup>o</sup>	2,1913	0,3421	1,0000	0,5834	59,4829	3000	0,05	0,8	0,0146	250	34,72
5 <sup>o</sup>	2,1913	0,3421	1,0000	0,5834	59,4829	3000	0,05	0,8	0,0146	250	37,72
6 <sup>o</sup>	2,1725	4,2430	1,1915	0,4430	73,3696	2000	0,05	0,7	0,0230	250	27,32
7 <sup>o</sup>	2,1862	0,9473	1,0697	0,5299	63,0416	3000	0,05	0,7	0,0178	200	38,71
8 <sup>o</sup>	2,1780	2,5047	1,1452	0,4953	72,5273	2500	0,5	0,7	0,0213	250	30,84
9 <sup>o</sup>	2,1605	4,1158	1,1880	0,4786	85,5639	2500	0,8	0,7	0,0241	250	33,01
10 <sup>o</sup>	2,1887	0,9932	1,0732	0,5312	62,3609	1000	0,1	0,7	0,0180	250	12,65

As Figuras 5.10 e 5.11 mostram a comparação da curva real com a curva simulada utilizando os parâmetros encontrados no 5º teste feito, o qual apresentou o menor valor da função objetivo através da minimização utilizando algoritmos genéticos para o modelo de um diodo.

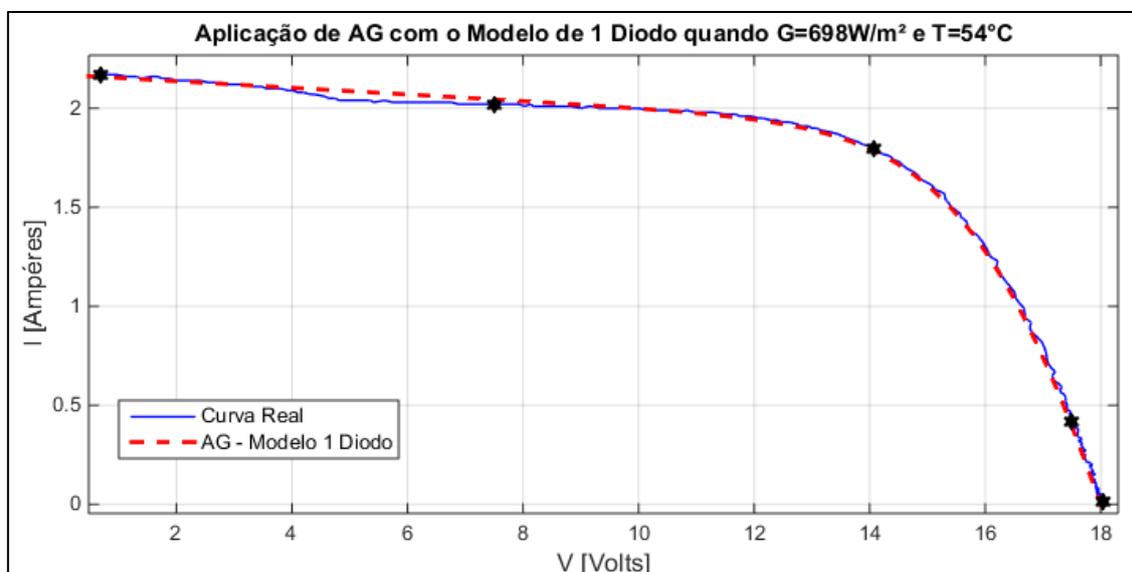


Figura 5.10 - Curva 3,  $V \times I$ , utilizando AG no modelo de um diodo.

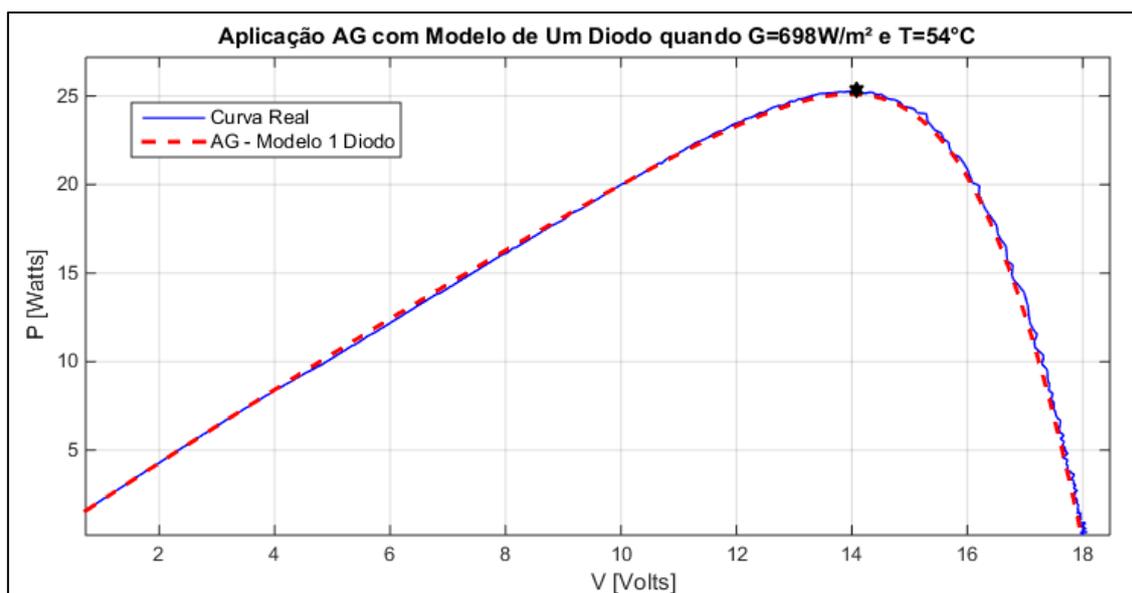


Figura 5.11 - Curva 3  $V \times P$ , utilizando AG no modelo de um diodo.

### 5.3.4 Análise dos Resultados aplicando AG com o modelo de um diodo na Curva 4

Do mesmo modo, na curva 4 foram executados dezenas de testes e alguns deles foram colocados na Tabela 5.6 para uma melhor visualização dos resultados obtidos, variando as taxas de mutação e cruzamento, o número de gerações e a quantidade de indivíduos.

Tabela 5.6 - Resultado das simulações da curva 4, AG com modelo de um diodo.

Simulações com AG - CURVA 4											
Teste	I <sub>ph</sub> (A)	I <sub>s</sub> (μA)	m	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>sh</sub> (Ω)	Nº Ger.	Taxa Mut.	Taxa Cross.	F <sub>A</sub>	Tam.	Tempo(s)
1º	2,7349	0,8459	1,0860	0,5270	55,9980	2000	0,05	0,7	0,0304	250	21,03
2º	2,7269	0,6798	1,0701	0,5320	57,4546	2000	0,05	0,7	0,0297	250	19,53
3º	2,7348	0,3261	1,0208	0,5619	54,2132	2000	0,05	0,8	0,0273	250	21,53
4º	2,7395	0,2341	1,0000	0,5754	52,5356	3000	0,05	0,8	0,0263	250	32,44
5º	2,7395	0,2341	1,0000	0,5754	52,5356	2000	0,1	0,8	0,0311	250	23,94
6º	2,7395	0,2341	1,0000	0,5754	52,5356	3000	0,05	0,8	0,0311	250	39,21
7º	2,7156	3,6507	1,2029	0,4634	67,6108	3000	0,6	0,8	0,0421	250	36,35
8º	2,7395	0,2341	1,0000	0,5754	52,5356	2500	0,01	0,8	0,0311	250	36,04
9º	2,7359	0,6926	1,0717	0,5288	54,7540	1000	0,05	0,7	0,0352	250	12,31
10º	2,7395	0,2341	1,0000	0,5754	52,5356	1000	0,03	0,8	0,0311	400	19,71

De posse desses resultados, foi possível gerar os gráficos nas Figuras 5.12 e 5.13, que comparam as curvas simuladas, a partir dos melhores parâmetros obtidos, com a curva real. Os parâmetros utilizados nesta comparação foram extraídos do quarto teste, o qual apresentou o melhor resultado.

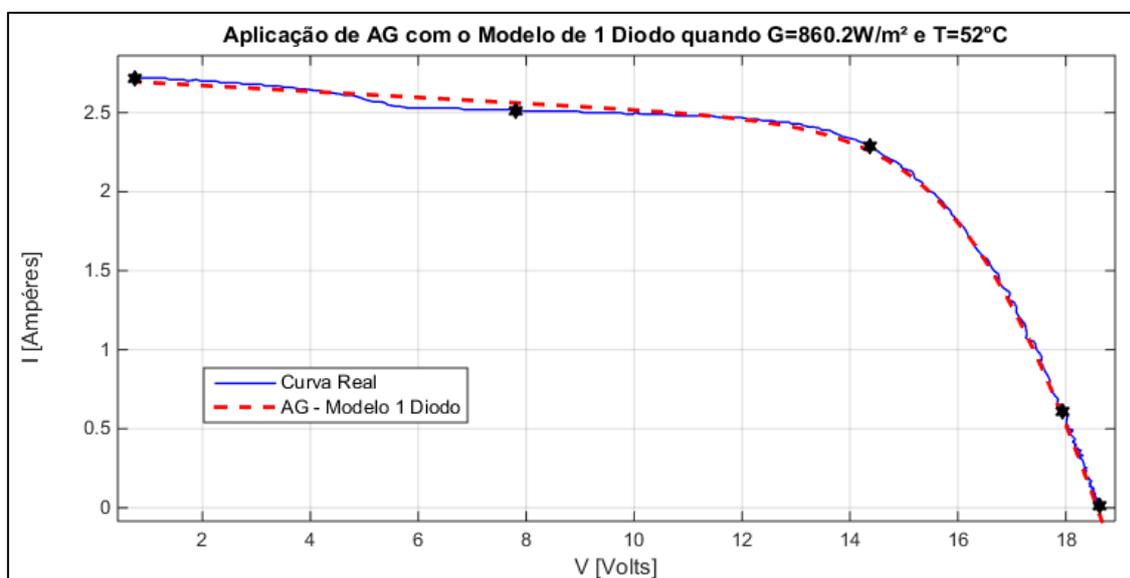


Figura 5.12 - Curva 4 VxI, utilizando AG no modelo de um diodo.

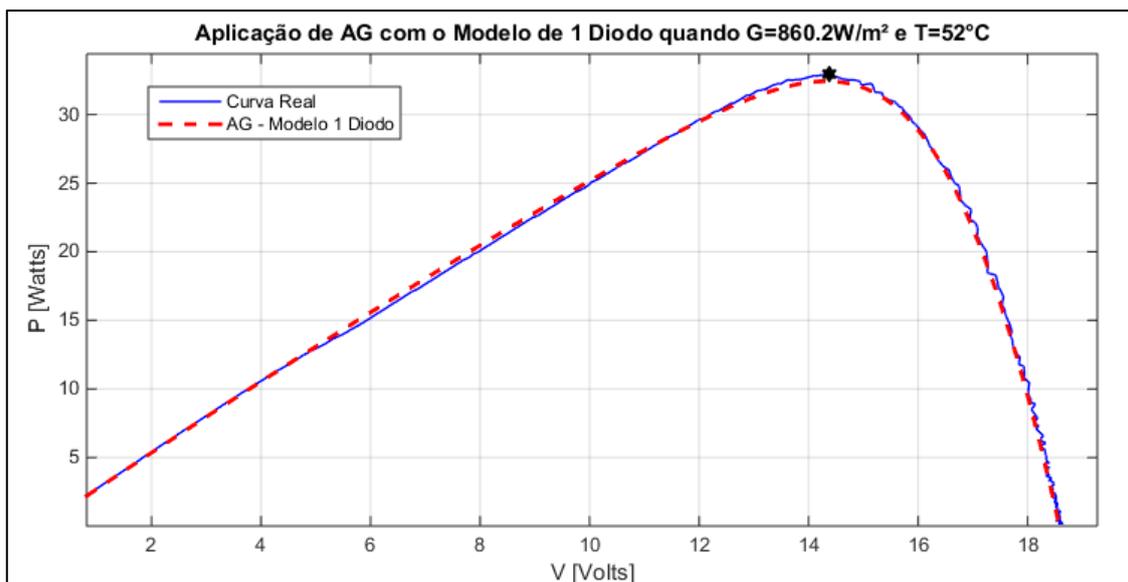


Figura 5.13 - Curva 4 VxP, utilizando AG no modelo de um diodo.

#### 5.4. Comparação entre o Método Newton Raphson e Algoritmos Genéticos no Modelo de Um Diodo

Como mostrado no Capítulo 4, o método de Newton Raphson só conseguiu convergência nas duas primeiras curvas das quatro analisadas. Logo, é possível comparar os resultados obtidos com Algoritmos Genéticos e os encontrados anteriormente com NR, os dados obtidos foram detalhados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Comparação dos Dados Obtidos entre NR e AG

Curva 1					
Método	I <sub>ph</sub> (A)	I <sub>s</sub> (μA)	m	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>p</sub> (Ω)
Algoritmos Genéticos	0,6687	2,0208	1,4297	1,1670	120,6228
Newton Raphson	0,6687	2,0060	1,4288	1,1686	120,5853
Curva 2					
Método	I <sub>ph</sub> (A)	I <sub>s</sub> (μA)	m	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>p</sub> (Ω)
Algoritmos Genéticos	1,8446	0,0726	1,0547	0,1759	59,8983
Newton Raphson	1,8462	0,0441	1,0245	0,1979	58,92

Observe que os parâmetros obtidos aplicando os dois métodos à curva 1 (um) apresentaram valores muito próximos um do outro, gerando curvas iguais, conforme mostra a Figura 5.14, mostrando a eficiência dos dois métodos. O resultado obtido na curva 2 também se mostra próximo, conforme mostra a Figura 5.15, porém apresenta uma

maior diferença no parâmetro  $I_S$  na curva 2, sendo nesse caso, o método de Newton Raphson melhor que o AG usando o modelo de 1 diodo. Essa pequena vantagem do método de NR é obtida pois a curva gerada com NR passa exatamente em cima dos pontos de: corrente de curto circuito ( $I_{cc}$ ), tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e ponto de máxima potência ( $P_{mp}$ ). Essa diferença só é perceptível com uma ampliação da figura ao redor dos pontos citados acima.

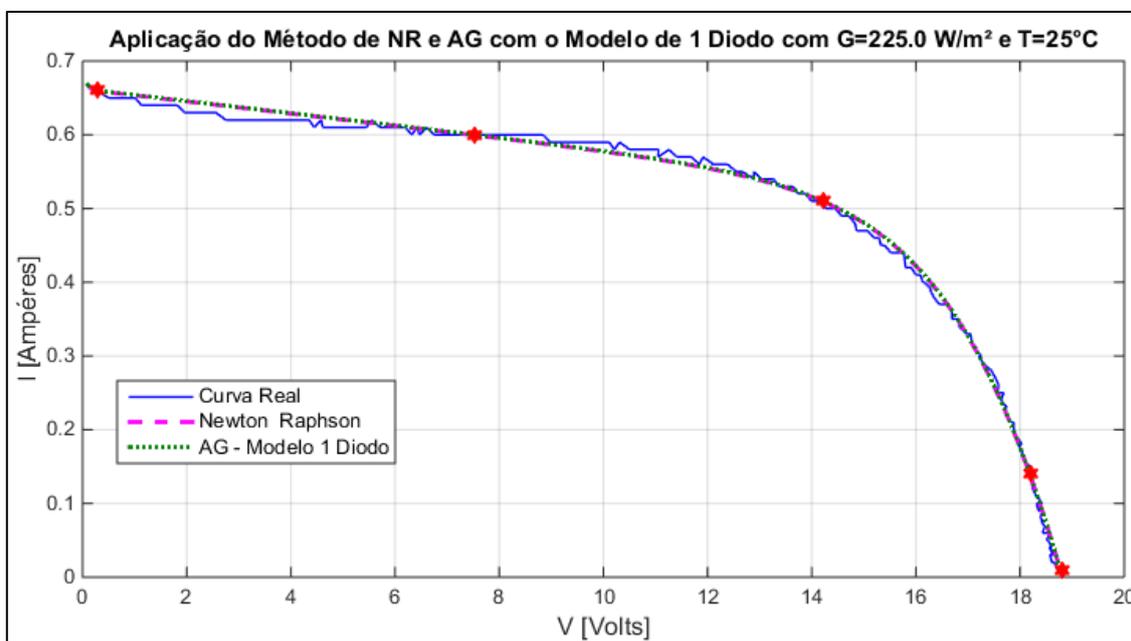


Figura 5.14 - Comparação dos métodos Newton Raphson e AG 1 diodo na curva 1 –  $V \times I$

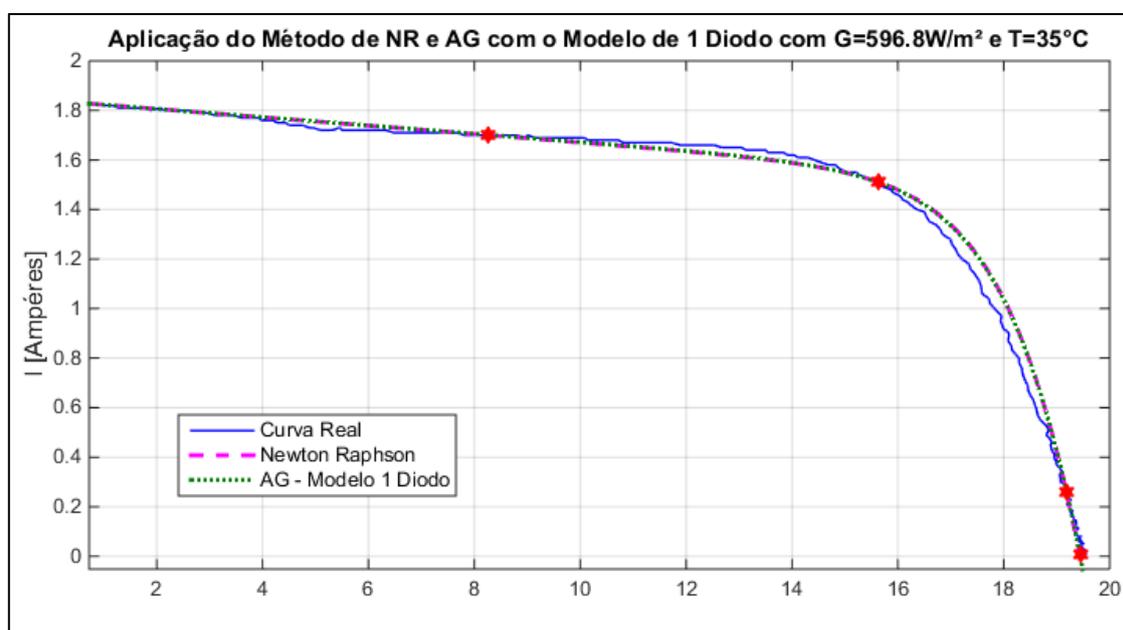


Figura 5.15 - Comparação dos métodos Newton Raphson e AG 1 diodo na curva 2 –  $V \times I$ .

Já as Figuras 5.16 e 5.17 demonstram a comparação entre as curvas de potência versus tensão, simuladas em NR e AG usando o modelo de um diodo com a curva real.

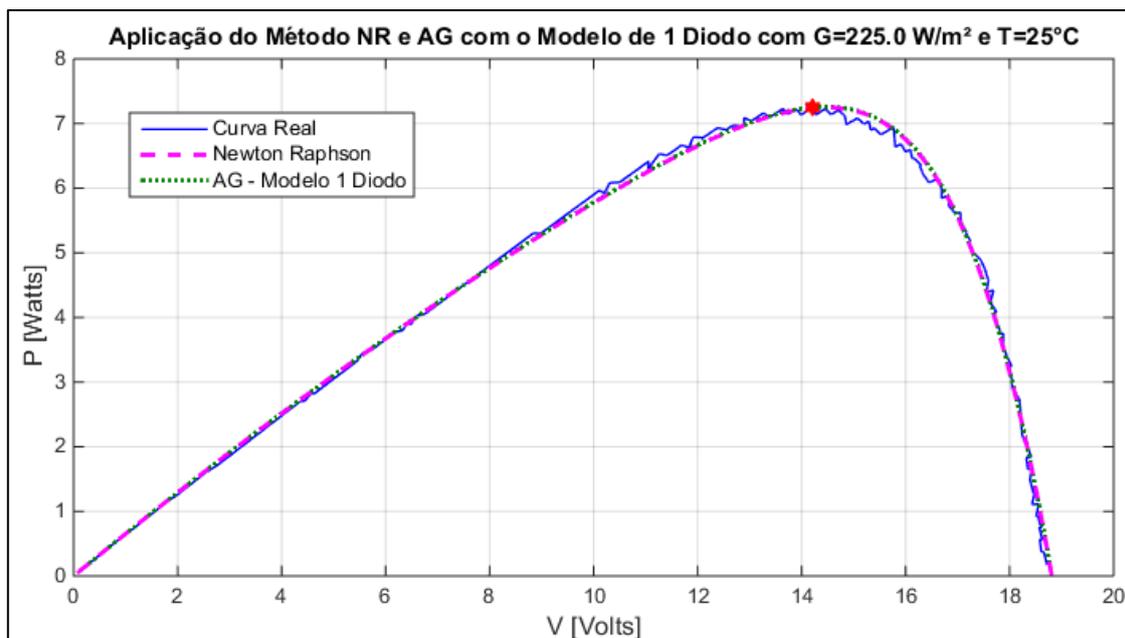


Figura 5.16 - Comparação dos métodos Newton Raphson e AG 1 diodo na curva 1 – VxP.

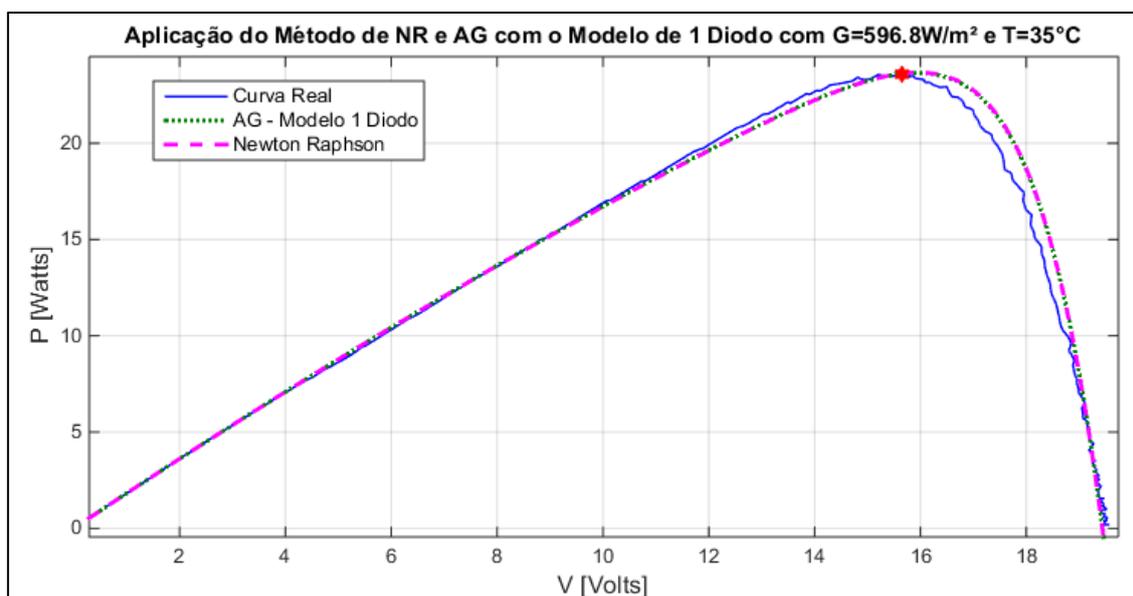


Figura 5.17 - Comparação dos métodos Newton Raphson e AG 1 diodo na curva 2 – VxP.

## 5.5. Aplicação de Algoritmos Genéticos no Modelo de Dois Diodos

Nesta etapa da pesquisa foi implementado um programa usando AG com o modelo de 2 diodos, sendo a função de avaliação dada pelas Equações (5.2) e (5.4) e as restrições

dadas pela Tabela 5.2. De posse do programa desenvolvido, os dados foram obtidos e analisados para as quatro curvas, conforme será mostrado nos tópicos seguintes.

### 5.5.1 Análise dos Resultados aplicando AG com o modelo de dois diodos na Curva 1

Várias simulações foram feitas para a curva 1, alterando o número de indivíduos, a taxa de mutação, a taxa de cruzamento e a quantidade de gerações, entre esses, foram selecionados alguns testes e expostos na Tabela 5.8.

Tabela 5.8- Resultado das simulações da curva 1, AG com modelo de dois diodos

<b>Resultado Simulações com AG 2 Diodos - CURVA 1</b>													
<b>Teste</b>	<b>I<sub>ph</sub>(A)</b>	<b>I<sub>s1</sub> (<math>\mu</math>A)</b>	<b>I<sub>s2</sub> (<math>\mu</math>A)</b>	<b>R<sub>s</sub>(<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>sh</sub>(<math>\Omega</math>)</b>	<b>m1</b>	<b>m2</b>	<b>N<sup>o</sup> Ger.</b>	<b>Taxa Mut.</b>	<b>Taxa Cross.</b>	<b>F<sub>A</sub></b>	<b>Tam.</b>	<b>Tempo(s)</b>
1 <sup>o</sup>	0,6629	1,0000	1,0000	1,3278	132,4275	1,3827	1,5080	3000	0,05	0,7	0,0066	250	40,72
2 <sup>o</sup>	0,6625	1,0000	1,0000	1,2979	133,0886	1,4267	1,4267	3000	0,05	0,8	0,0066	250	41,10
3 <sup>o</sup>	0,6626	1,0000	0,9942	1,3007	133,0732	1,4424	1,4125	3000	0,2	0,7	0,0066	250	41,05
4 <sup>o</sup>	0,6635	0,6153	1,0000	1,3918	130,9665	1,5335	1,3663	3000	0,01	0,8	0,0066	300	47,45
5 <sup>o</sup>	0,6636	0,8118	1,0000	1,4395	131,7509	1,3428	1,6180	3000	0,6	0,7	0,0067	250	42,55
6 <sup>o</sup>	0,6641	0,3057	1,0000	1,4950	131,1711	1,2847	1,4552	1000	0,05	0,7	0,0067	250	14,45
7 <sup>o</sup>	0,6643	0,1463	1,0000	1,4394	128,8595	1,5055	1,3562	1000	0,05	0,7	0,0067	150	9,08
8 <sup>o</sup>	0,6696	0,2312	0,2005	1,7668	120,5722	1,2199	1,5955	1000	0,1	0,7	0,0072	100	7,37

O primeiro, segundo, terceiro e quarto testes foram os que obtiveram os melhores resultados entre os simulados, apresentando a raiz do valor quadrático médio da equação do módulo fotovoltaico ( $F_A$ ) igual a 0,0066. Os valores não variaram muito durante as simulações, mantendo uma boa precisão durante todos os testes feitos. Há de se notar uma grande variação no tempo de execução, que depende principalmente do número de indivíduos e da quantidade de gerações executada, quanto maior esses, maior o tempo de execução. Logo, notou-se que não são necessárias 3000 gerações nas simulações, 1000 são suficientes e garantem um excelente resultado, com um esforço computacional menor. Entretanto, com um menor número de gerações,  $F_A$  obteve um pequeno aumento, porém, aceitável.

As Figuras 5.18 e 5.19 mostram as curvas VxI e VxP obtidas através do algoritmo genético no modelo de dois diodos comparada com a curva real.

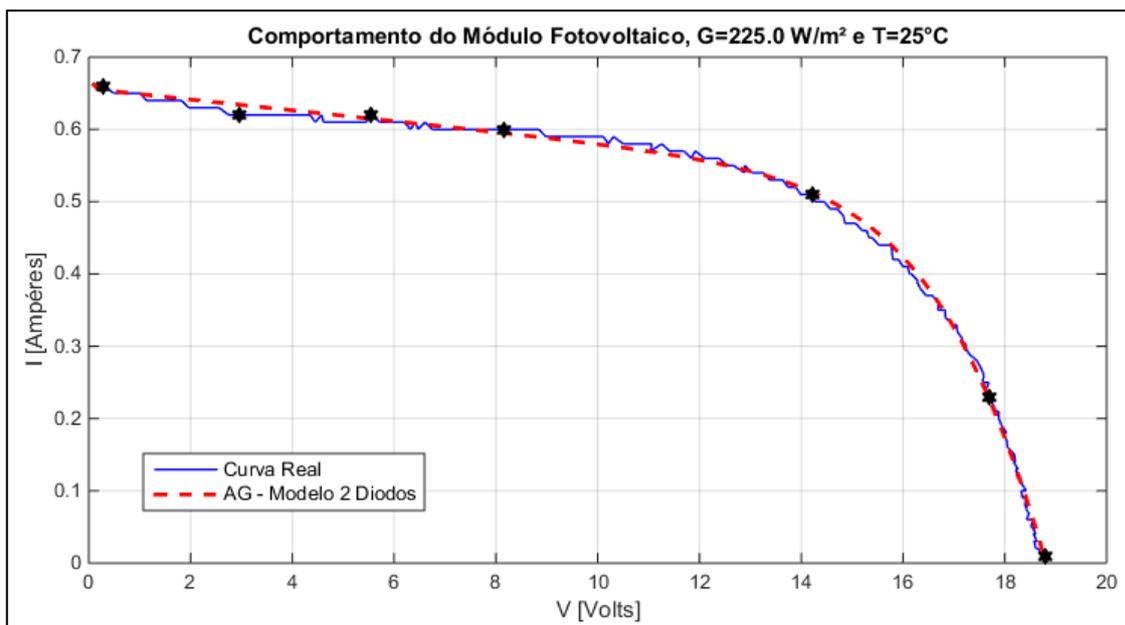


Figura 5.18 - Curva  $I \times V$ , utilizando AG no modelo de dois diodos.

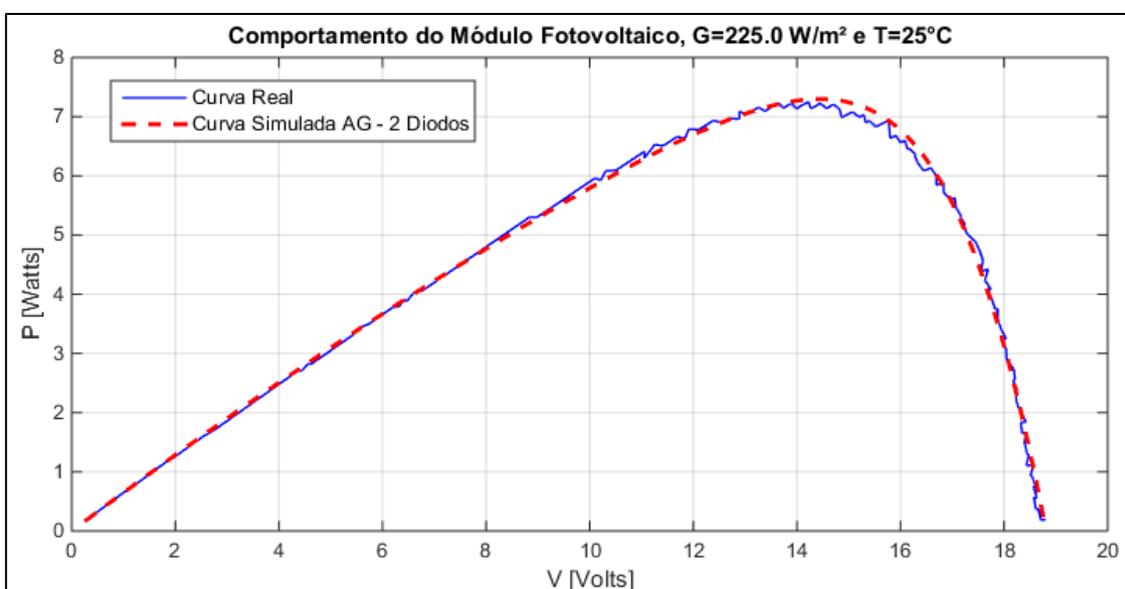


Figura 5.19 - Curva  $I \times P$ , utilizando AG no modelo de dois diodos.

As Figuras 5.20 e 5.21 mostram as curvas  $V \times I$  e  $V \times P$  comparando o modelo de um e de dois diodos. Verifica-se através delas que o método se aproxima muito da curva real, caracterizando de forma satisfatória a curva do módulo fotovoltaico. Além disso, observa-se que neste caso analisado, o modelo de dois diodos é mais próximo da curva real do que o modelo de um diodo.

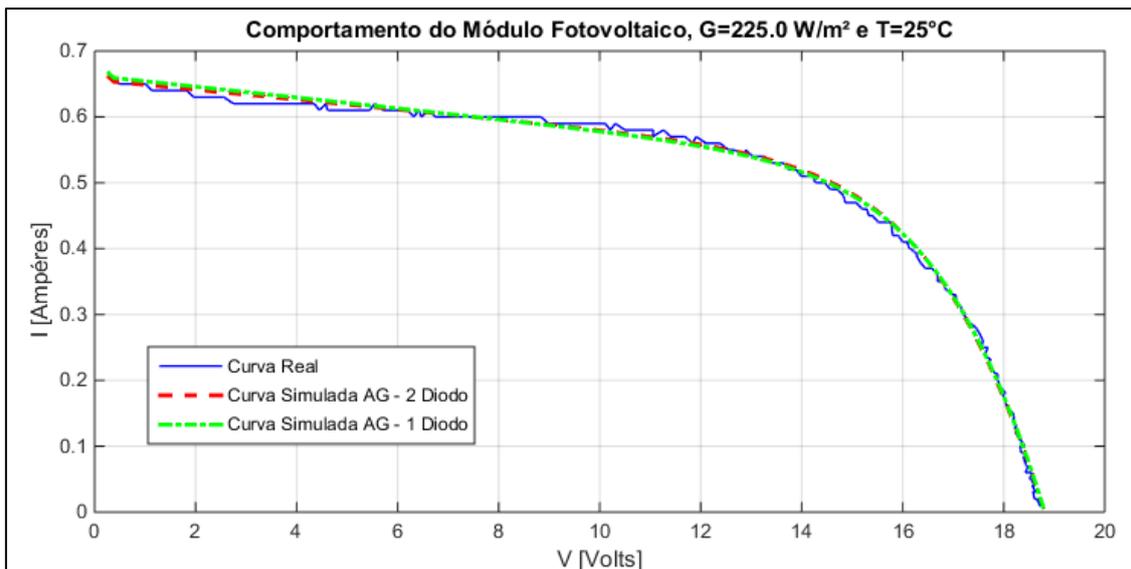


Figura 5.20 - Curva 1 VxI, comparando AG no modelo de um e dois diodos.

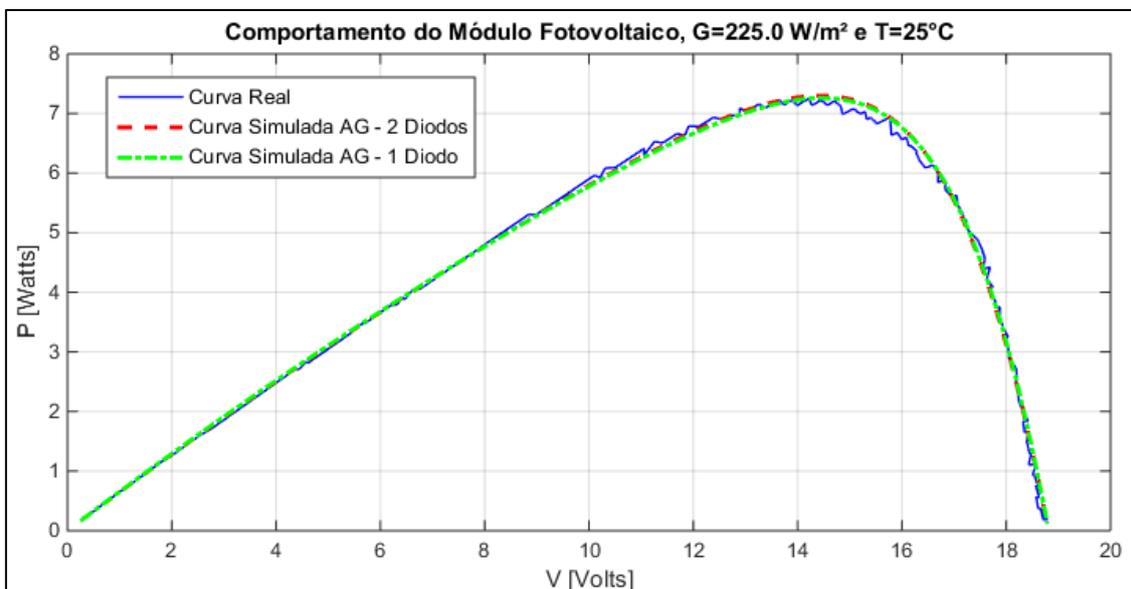


Figura 5.21 - Curva 1 VxP, comparando AG no modelo de um e dois diodos.

### 5.5.2 Análise dos Resultados aplicando AG com o modelo de dois diodos na Curva 2

Da mesma forma que na curva 1, várias simulações foram feitas na curva 2 utilizando o modelo de dois diodos, alguns destes testes estão expostos na Tabela 5.9. Pode-se observar que a função objetivo obteve valor bem próximo de uma simulação para outra, alterando as variáveis de entrada: taxa de mutação, taxa de cruzamento, número de indivíduos e número de gerações.

Tabela 5.9 - Resultado das simulações da curva 2, AG com modelo de dois diodos.

**Resultado Simulações com AG 2 Diodos - CURVA 2**

Teste	I <sub>ph</sub> (A)	I <sub>s1</sub> ( $\mu$ A)	I <sub>s2</sub> ( $\mu$ A)	R <sub>s</sub> ( $\Omega$ )	R <sub>sh</sub> ( $\Omega$ )	m1	m2	N <sup>o</sup> Ger.	Taxa Mut.	Taxa Cross.	J	Tam.	Tempo(s)
1 <sup>o</sup>	1,8320	0,4974	0,0010	0,1310	68,6314	1,1918	1,0000	3000	0,05	0,7	0,0087	250	39,08
2 <sup>o</sup>	1,8337	0,3101	0,0010	0,1610	67,4797	1,1554	1,0000	3000	0,05	0,7	0,0084	250	38,19
3 <sup>o</sup>	1,8302	1,0000	0,0969	0,0957	70,0345	1,2960	1,1313	3000	0,1	0,7	0,0084	250	39,89
4 <sup>o</sup>	1,8375	0,1310	0,0010	0,2088	65,0155	1,0945	1,0000	3000	0,1	0,8	0,0082	250	39,70
5 <sup>o</sup>	1,8377	0,1622	0,0113	0,2152	65,0393	1,1413	1,0000	3000	0,05	0,8	0,0082	300	49,11
6 <sup>o</sup>	1,8299	0,6473	0,1349	0,0745	69,0332	1,2136	1,3615	500	0,7	0,8	0,0092	250	6,73
7 <sup>o</sup>	1,8335	0,4639	0,1031	0,1566	67,8763	1,2814	1,1014	500	0,1	0,7	0,0085	200	5,06
8 <sup>o</sup>	1,8289	0,9654	0,0010	0,0788	70,7817	1,2438	2,0000	1000	0,05	0,7	0,0093	200	13,32

As Figuras 5.22 e 5.23 mostram as curvas VxI e VxP, comparando as curvas reais do módulo fotovoltaico utilizado e as curvas simuladas obtidas por AG no modelo de dois diodos.

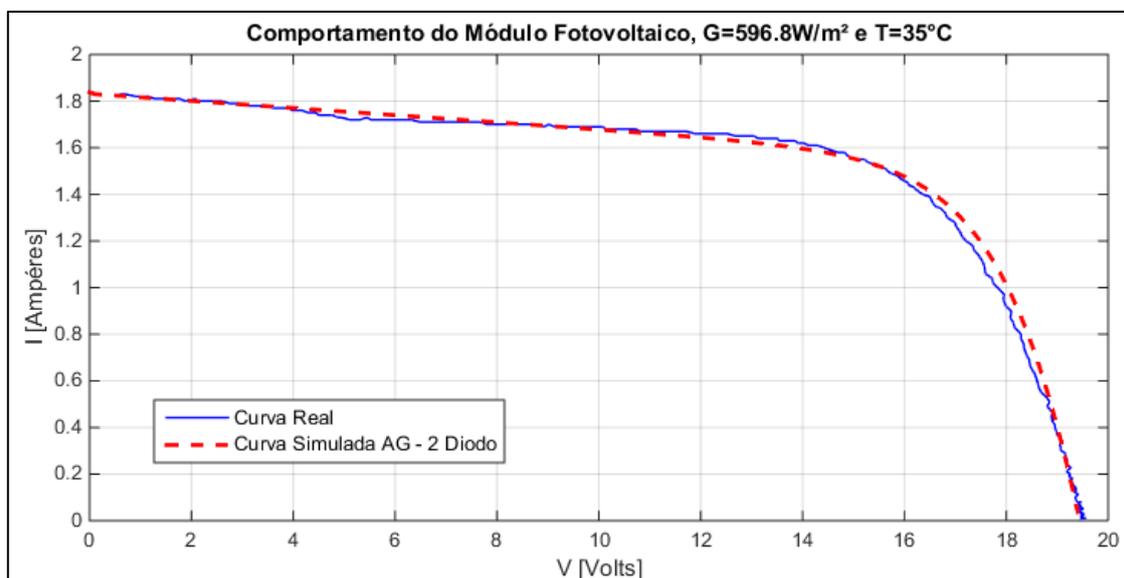


Figura 5.22 - Curva 2 VxI, utilizando AG no modelo de dois diodos.

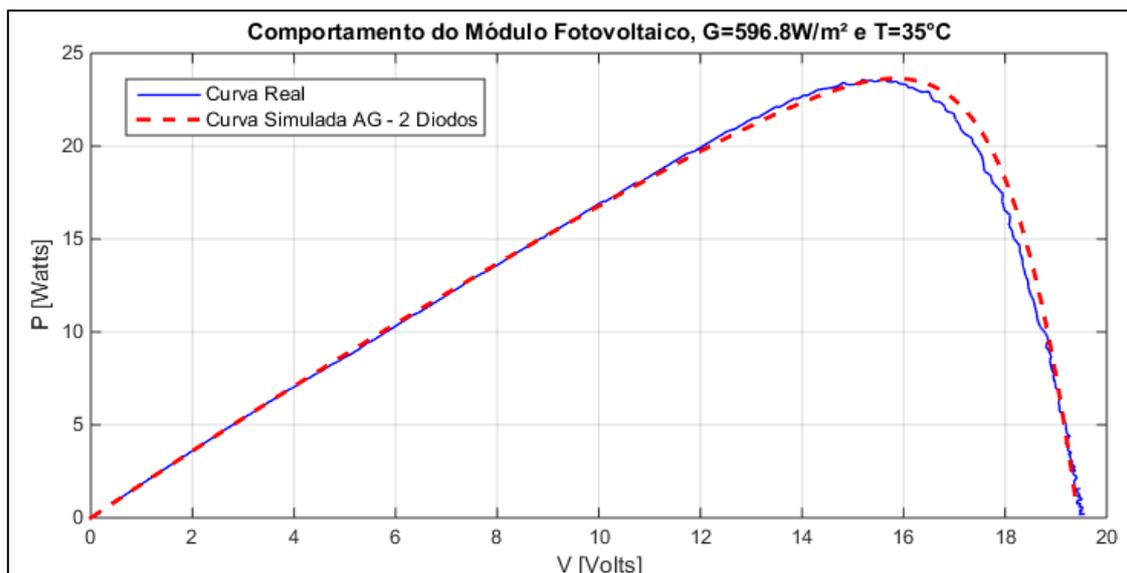


Figura 5.23 - Curva 2 VxP, utilizando AG no modelo de dois diodos.

Já as Figuras 5.24 e 5.25 confrontam as curvas geradas no modelo de um e dois diodos, com isso, é possível visualizar que a curva obtida através do modelo de dois diodos é ligeiramente mais próxima à curva real neste caso analisado, logo, o modelo se mostrou mais eficaz, isso é justificado pela baixa irradiância no módulo fotovoltaico.

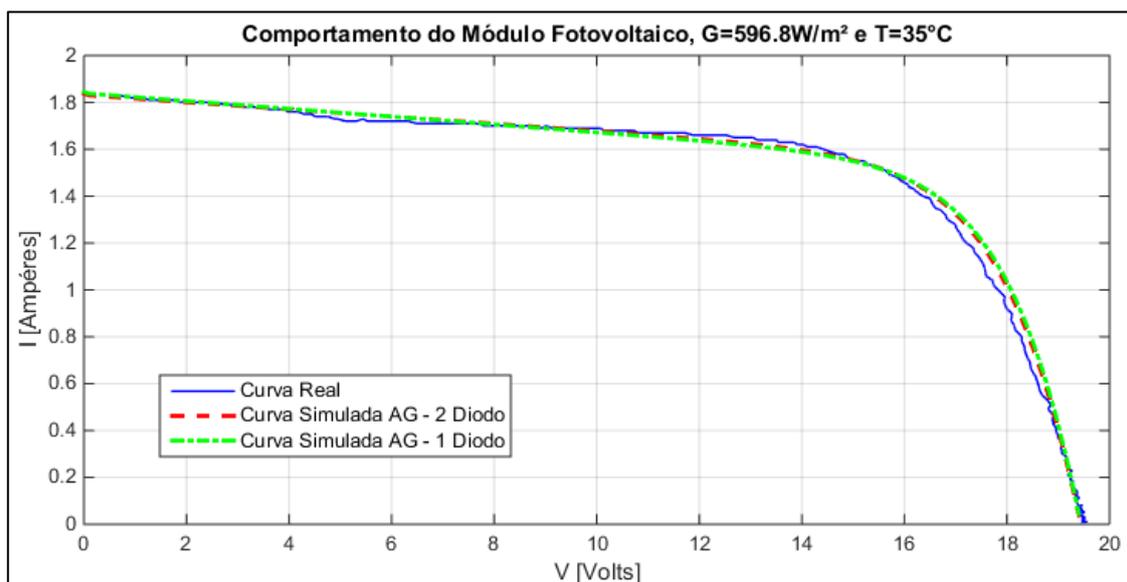


Figura 5.24 - Curva 2 VxI, comparando AG no modelo de um e dois diodos.

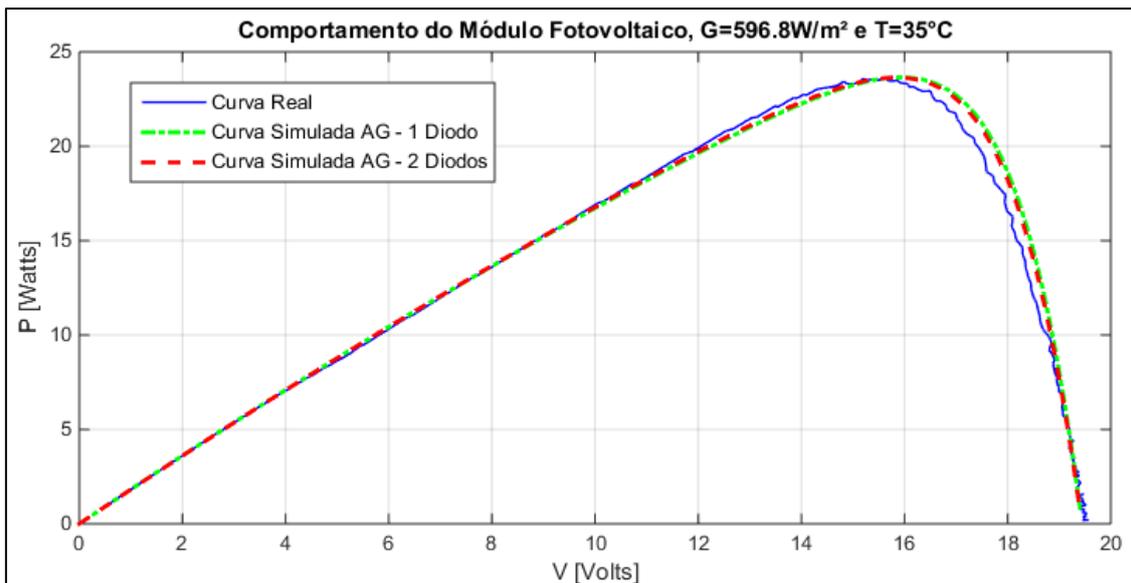


Figura 5.25 - Curva 2 VxP, comparando AG no modelo de um e dois diodos.

### 5.5.3 Análise dos Resultados aplicando Algoritmos Genéticos com o Modelo de Dois Diodos na Curva 3

A Tabela 5.10 mostra o resultado obtido das simulações feitas usando dados da curva 3 através do método de algoritmos genéticos com o modelo de dois diodos. O terceiro, quinto e oitavo casos foram os melhores entre os testados, obtendo para a raiz do valor quadrático médio da equação do módulo fotovoltaico o valor de 0.0169.

Tabela 5.10 - Resultado das simulações da curva 3, AG com modelo de dois diodos.

Resultado Simulações com AG 2 Diodos - CURVA 3													
Teste	I <sub>ph</sub> (A)	I <sub>s1</sub> (μA)	I <sub>s2</sub> (μA)	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>p</sub> (Ω)	m1	m2	Nº Ger.	Taxa Mut.	Taxa Cross.	J	Tam.	Tempo(s)
1º	2,1784	0,9964	0,0010	0,5203	64,4123	1,0731	2,0000	500	0,1	0,7	0,0193	200	5,44
2º	2,1804	0,4343	0,0011	0,5815	63,2596	1,0153	1,0000	3000	0,1	0,7	0,0175	250	41,91
3º	2,1844	0,3428	0,0010	0,5939	61,4833	1,0000	1,0000	3000	0,05	0,7	0,0169	250	49,08
4º	2,1848	0,4506	0,0010	0,5727	61,3016	1,0178	1,0340	3000	0,05	0,7	0,0175	250	43,57
5º	2,1844	0,3428	0,0010	0,5939	61,4833	1,0000	1,0000	3000	0,05	0,8	0,0169	250	42,73
6º	2,1845	0,0546	0,5717	0,5507	61,2778	1,3211	1,0341	3000	0,6	0,8	0,0181	250	41,92
7º	2,1844	0,3438	0,0010	0,5939	61,4834	1,0000	2,0000	1000	0,01	0,8	0,0169	250	14,22
8º	2,1844	0,2384	0,1054	0,5939	61,4833	1,0000	1,0000	500	0,05	0,8	0,0169	250	6,96

As Figuras 5.26 e 5.27 ilustram o comportamento do valor obtido e a média da população gerada durante a oitava simulação, observe que a função objetivo foi minimizada antes

mesmo da 50ª geração e que a média da população variou muito até encontrar um bom valor para os parâmetros, depois disso, eles alteraram pouco, conforme mostra a figura.

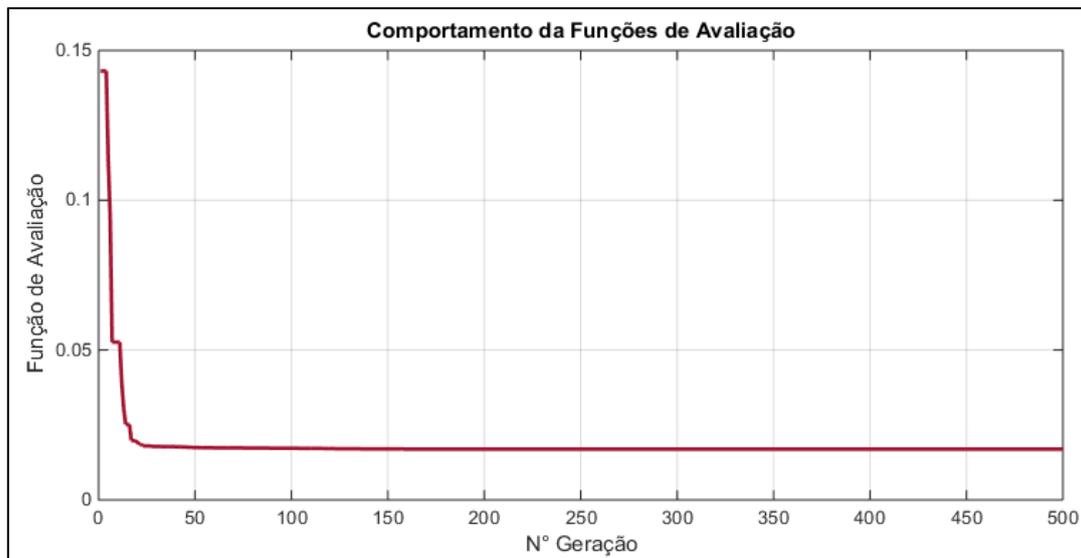


Figura 5.26 - Minimização da Função Aptidão, Curva 3, AG Dois Diodos.

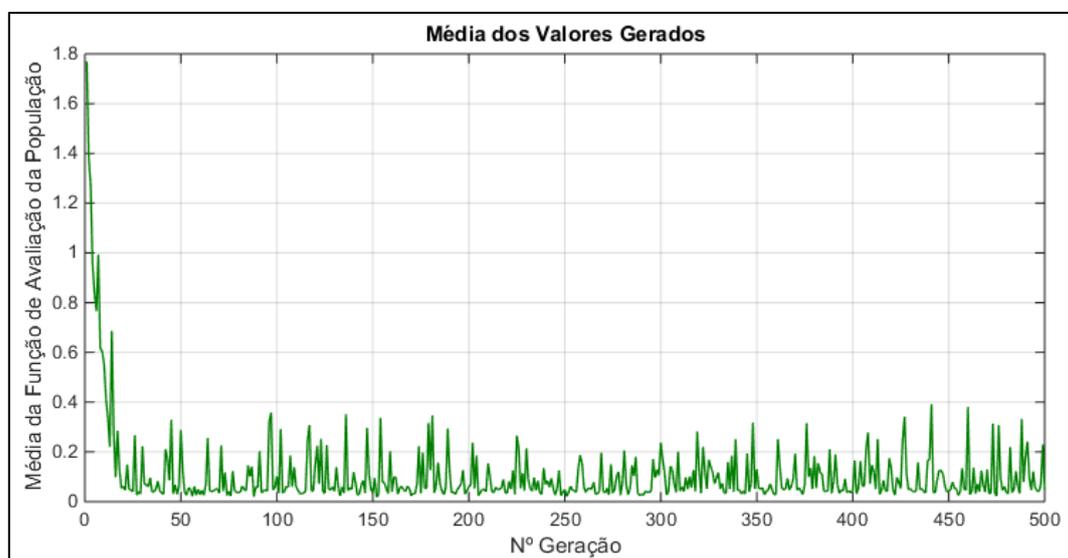


Figura 5.27 - Média da População, Curva 3, AG Dois Diodos.

As Figuras 5.28 e 5.29 mostram as curvas obtidas através dos parâmetros encontrados nas simulações feitas com o método descrito, a curva simulada mostrou-se muito próxima da curva real, tanto na curva  $V_{xI}$ , quanto em  $V_{xP}$ .

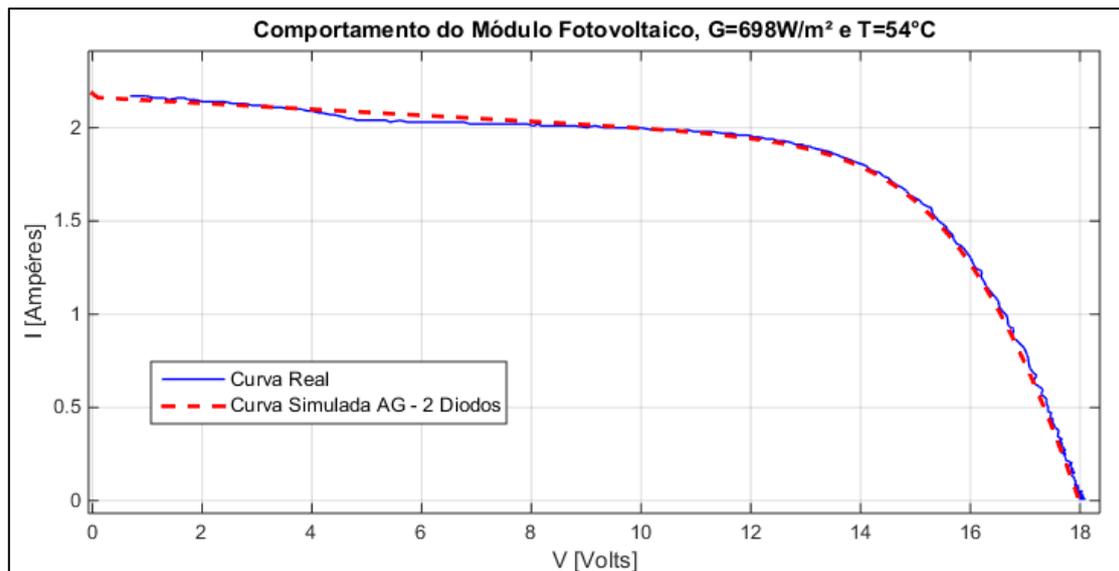


Figura 5.28 - Curva 3 VxI, utilizando AG no modelo de dois diodos.

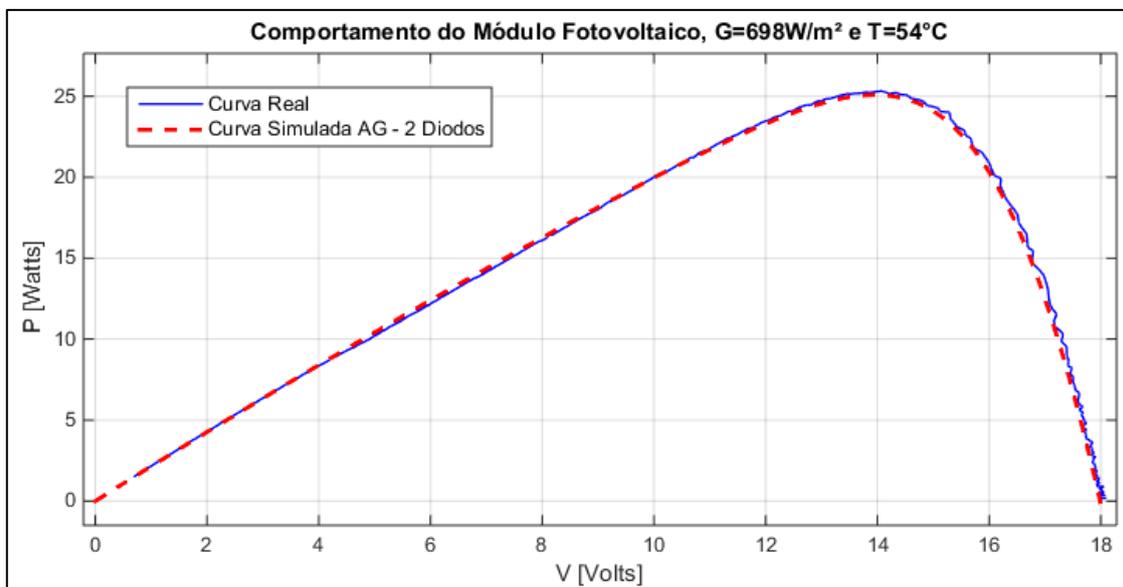


Figura 5.29 - Curva 3 VxP, utilizando AG no modelo de dois diodos.

A comparação entre o modelo de um e dois diodos pode ser vista nas Figuras 5.30 e 5.31, as quais mostram muita proximidade entre as curvas.

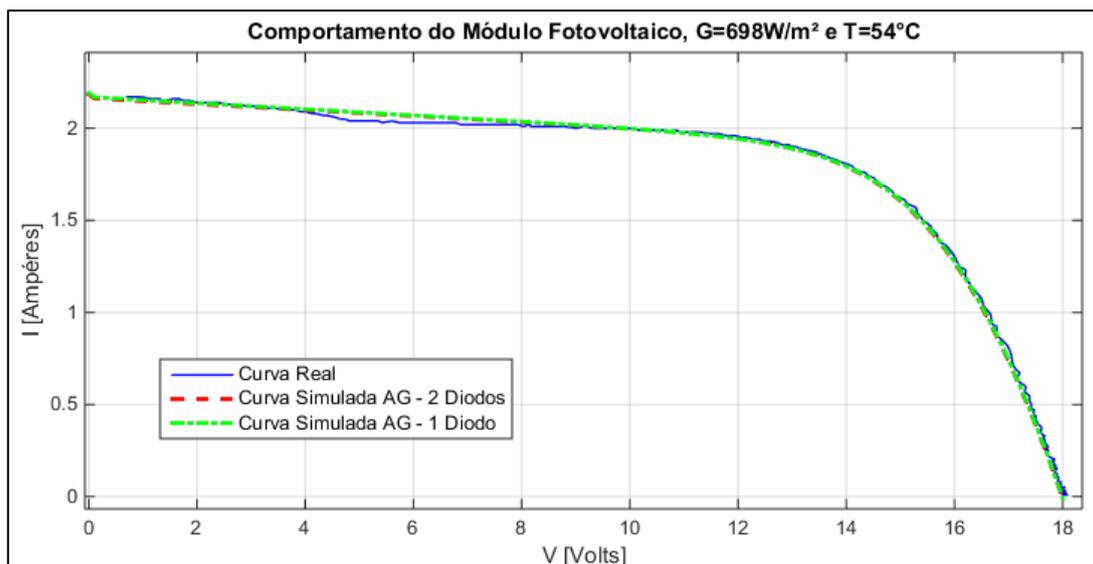


Figura 5.30 - Curva 3 VxI, comparando AG no modelo de um e dois diodos.

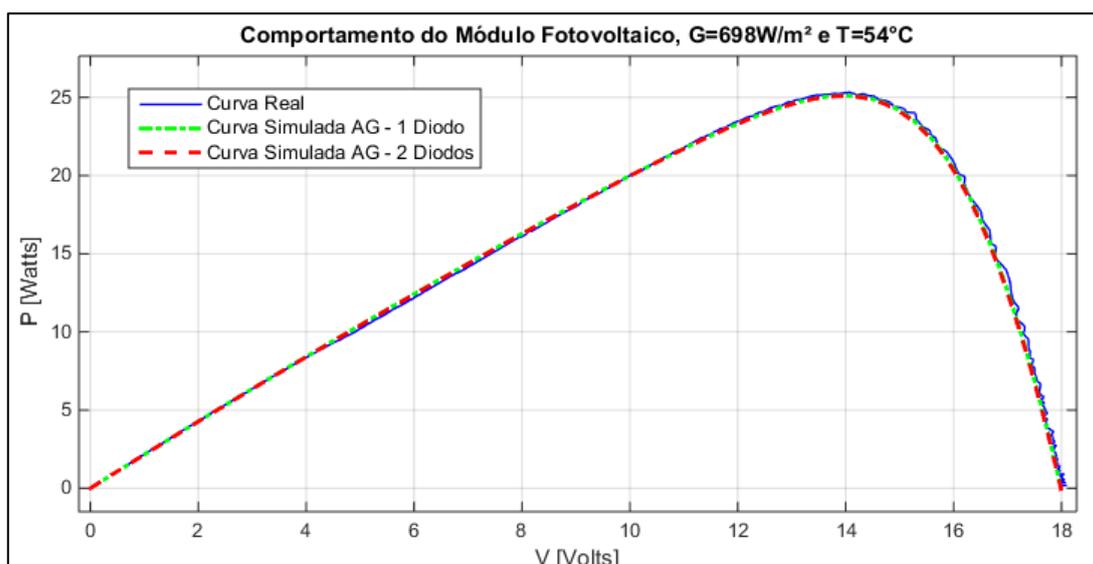


Figura 5.31 - Curva 3 VxP, comparando AG no modelo de um e dois diodos.

#### 5.5.4 Análise dos Resultados aplicando AG com o modelo de dois diodos na Curva 4

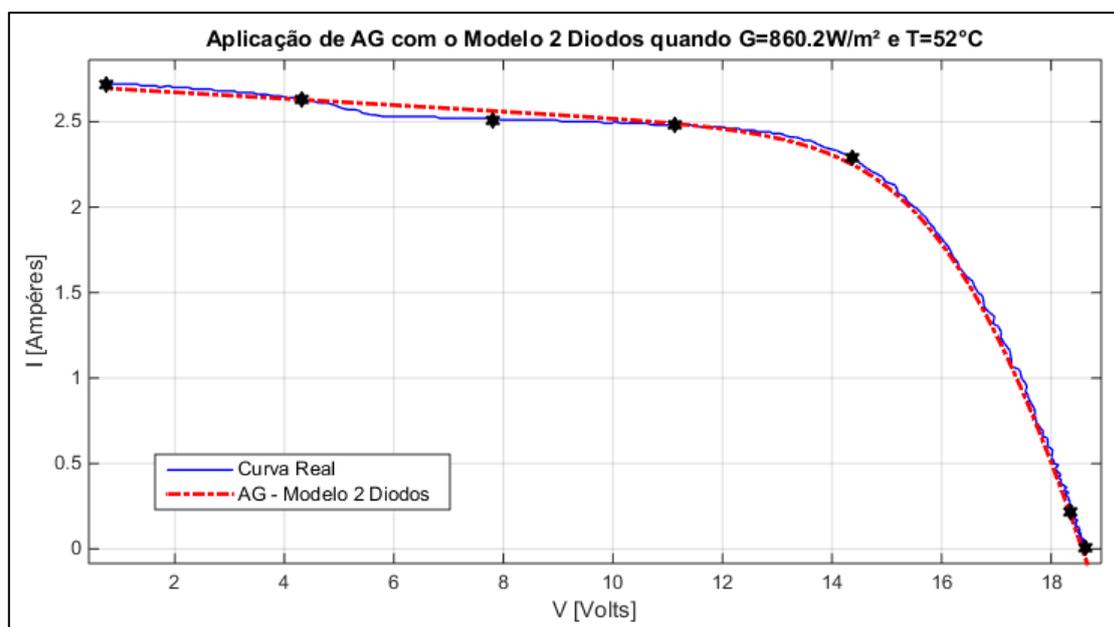
Do mesmo modo que nas curvas anteriores, vários testes foram feitos com o programa implementado em AG no modelo de 2 diodos para a curva 4, alguns deles foram expostos na Tabela 5.11, a qual apresentou valores muito próximos para a função objetivo nas simulações executadas.

Tabela 5.11 - Resultado das simulações da curva 4, AG com modelo de dois diodos.

**Resultado Simulações com AG 2 Diodos - CURVA 4**

Teste	I <sub>ph</sub> (A)	I <sub>s1</sub> ( $\mu$ A)	I <sub>s2</sub> ( $\mu$ A)	R <sub>s</sub> ( $\Omega$ )	R <sub>sh</sub> ( $\Omega$ )	m1	m2	N <sup>o</sup> Ger.	Taxa Mut.	Taxa Cross.	J	Tam.	Tempo(s)
1 <sup>o</sup>	2,7315	1,0000	0,0010	0,5005	55,0509	1,0976	2,0000	3000	0,05	0,7	0,0380	250	43,09
2 <sup>o</sup>	2,7398	0,2359	0,0010	0,5956	52,8579	1,0000	1,0000	3000	0,05	0,7	0,0347	250	42,97
3 <sup>o</sup>	2,7397	0,2144	0,0232	0,5961	52,8371	1,0000	1,0022	3000	0,05	0,8	0,0347	250	41,86
4 <sup>o</sup>	2,7417	0,2358	0,0010	0,5927	52,4098	1,0000	1,0000	3000	0,5	0,8	0,0347	250	40,73
5 <sup>o</sup>	2,7398	0,2369	0,0010	0,5956	52,8580	1,0000	2,0000	3000	0,01	0,9	0,0347	250	39,38
6 <sup>o</sup>	2,7398	0,0010	0,2359	0,5956	52,8579	1,0000	1,0000	1000	0,01	0,9	0,0347	250	12,29
7 <sup>o</sup>	2,7149	0,0010	0,8425	0,5143	59,5967	2,0000	1,0846	1000	0,05	0,7	0,0382	150	8,52
8 <sup>o</sup>	2,7398	0,0923	0,1446	0,5956	52,8579	1,0000	1,0000	1500	0,3	0,7	0,0347	250	21,22

As Figuras 5.32 e 5.33 demonstram as curvas V<sub>xI</sub> e V<sub>xP</sub> simuladas comparando-as com a curva real. A Figura 5.32 ilustra também os sete pontos usados na formulação do problema no modelo de dois diodos. Sendo *I<sub>cc</sub>*, o primeiro ponto, a corrente de curto circuito, *V<sub>oc</sub>*, o último ponto, a tensão de circuito aberto e *P<sub>mp</sub>*, o ponto de máxima potência.

Figura 5.32: Curva 4 V<sub>xI</sub>, utilizando AG no modelo de dois diodos.

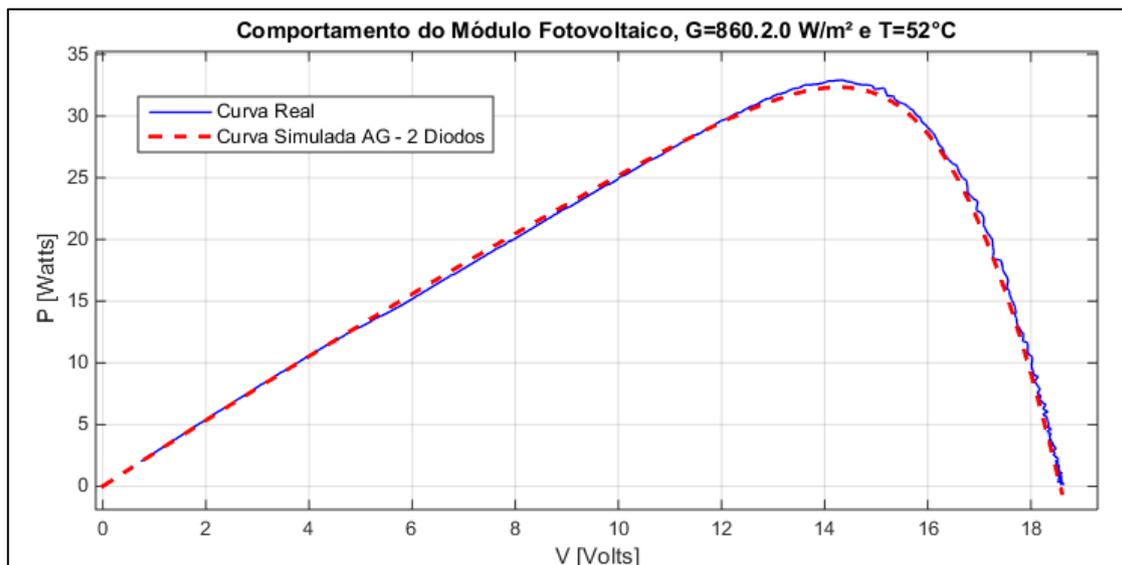


Figura 5.33 - Curva 4 VxP, utilizando AG no modelo de dois diodos.

Da mesma forma que na curva 3, através do método AG, a curva 4 apresentou curvas simuladas nos modelos de um e dois diodos muito próximas uma da outra, representando assim a eficácia e precisão dos dois métodos, conforme mostram as Figuras 5.34 e 5.35.

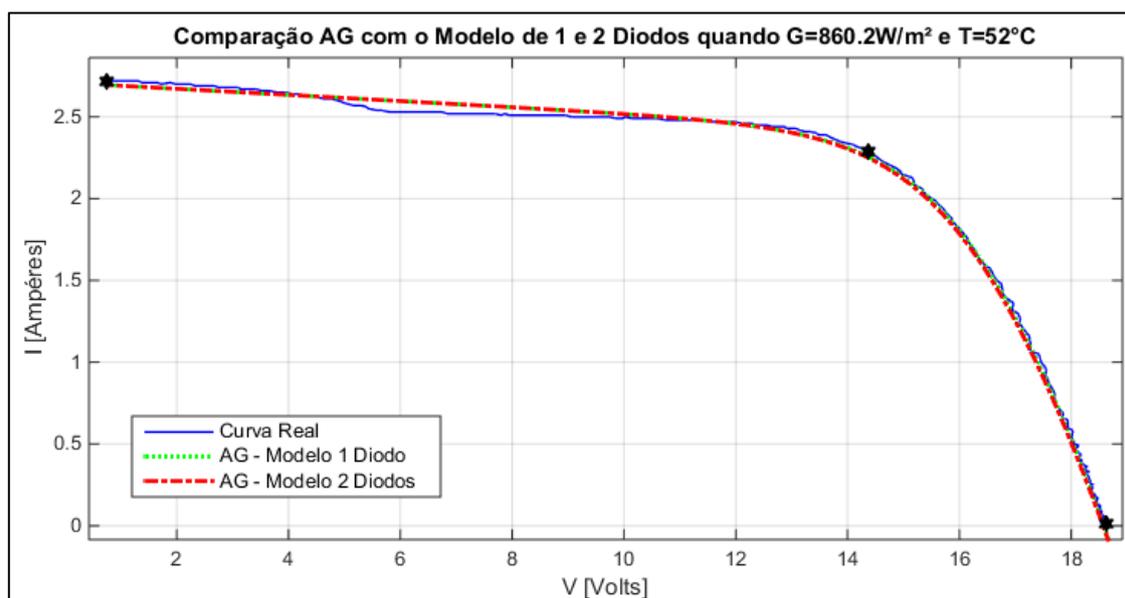


Figura 5.34 - Curva 4 VxI, comparando AG no modelo de um e dois diodos.

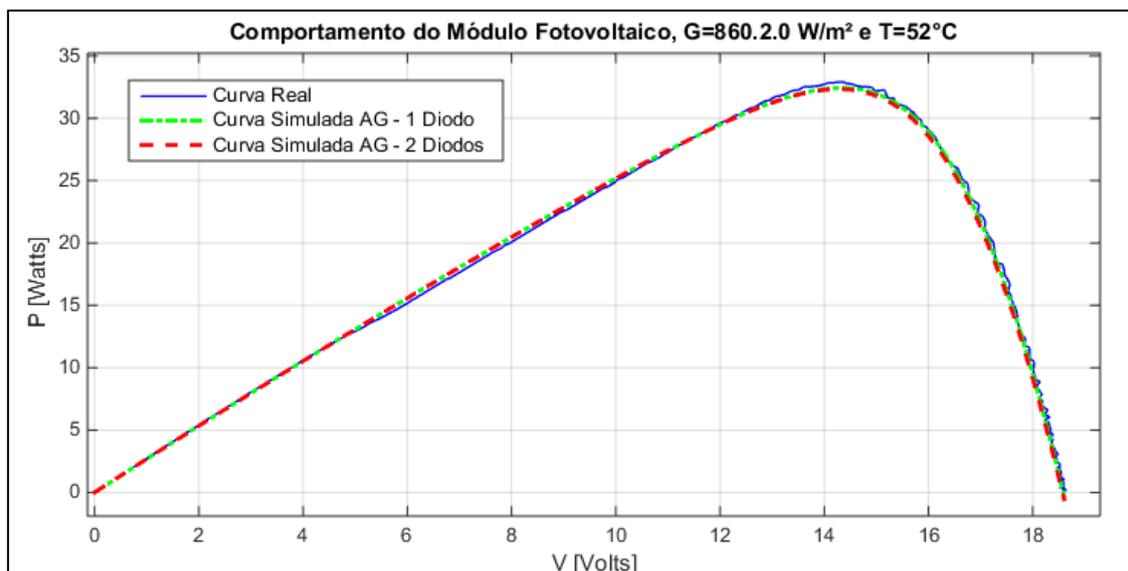


Figura 5.35 - Curva 4 VxP, comparando AG no modelo de um e dois diodos.

## 5.6 Utilizando o Resultado obtido dos Algoritmos Genéticos para o Chute Inicial no Método de Newton Raphson

O uso de Algoritmos Genéticos na solução do problema permitiu a obtenção de respostas em todos os casos analisados e possivelmente em qualquer módulo que se deseja extrair os parâmetros fotovoltaicos. Os dados obtidos, como dito anteriormente, são gerados de forma aleatória, podendo a cada simulação, gerar parâmetros diferentes, entretanto próximos à raiz, pois o método se mostrou preciso. Sendo assim, é possível utilizar os parâmetros obtidos em AG para criar o vetor “Chute Inicial” no método de Newton Raphson.

Essa técnica foi testada nas quatro curvas estudadas, primeiramente nas duas últimas e posteriormente nas duas primeiras.

Na curva 3, no modelo de um diodo, os melhores parâmetros obtidos através do algoritmo genético, conforme Tabela 5.5, foram:

5°	2,1913	0,3421	1,0000	0,5834	59,4829
----	--------	--------	--------	--------	---------

Utilizando estes parâmetros como “chute inicial” no método de Newton Raphson foi possível encontrar uma melhor solução para o problema, obtendo em 6 iterações os seguintes parâmetros:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ph} \\ I_S \\ m \\ R_s \\ R_{sh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.2241 \\ 0.0003 \\ 0.6913 \\ 0.7959 \\ 44.6789 \end{bmatrix}$$

De posse desses dados, é possível gerar a nova curva obtida através do método e compará-la com a gerada anteriormente pelo AG, conforme mostra a Figura 5.36. A nova curva se mostrou mais próxima da curva real, e passou exatamente sobre os cinco pontos utilizados no equacionamento dos métodos no modelo de um diodo, isso só foi possível, pois o AG gerou para o método de Newton Raphson um “chute inicial” próximo à raiz, tornando possível a convergência do método.

Para verificar a eficácia da utilização dos dois métodos, foi utilizado também o terceiro caso da Tabela 5.5 como “chute inicial” para NR, o resultado obtido foi o mesmo; porém a resposta foi obtida com 8 iterações.

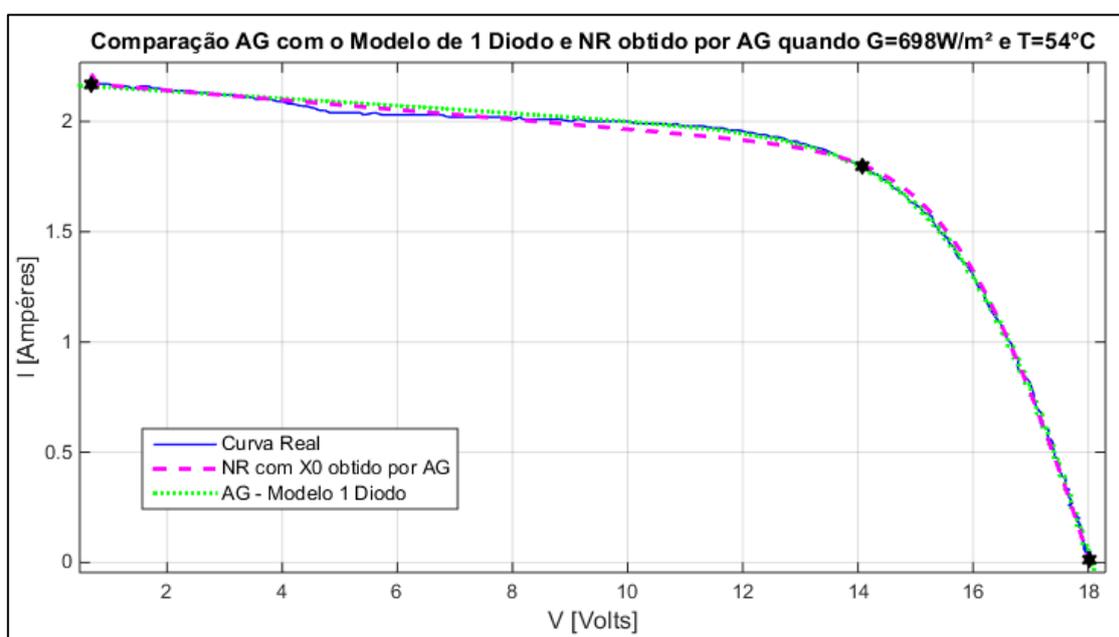


Figura 5.36 - Curva 3 gerada NR utilizando “chute inicial” obtido em AG.

A Figura 5.37 apresenta o resultado obtido por todos os métodos utilizados nessa pesquisa, AG com o modelo de um e dois diodos e NR com “chute inicial” dado através dos parâmetros obtidos em AG. Todos os métodos se mostraram próximos à curva real, sendo o AG de um e dois diodos mais próximos a curva real e NR consegue passar

exatamente nos pontos de corrente de curto circuito, máxima potência e tensão de circuito aberto, o que caracteriza muito bem a curva.

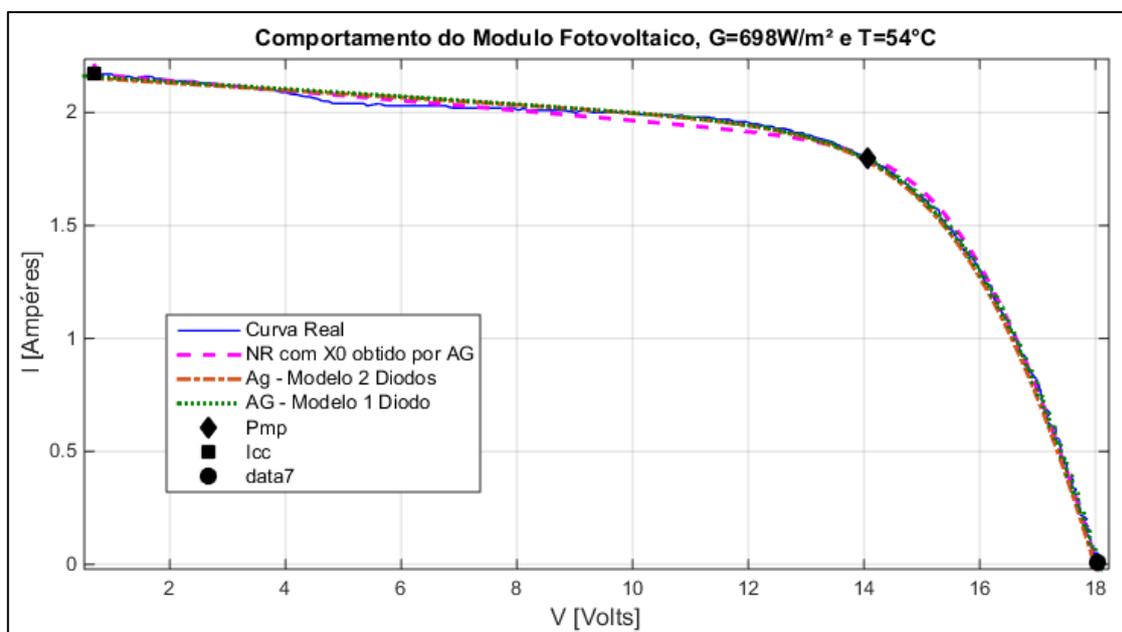


Figura 5.37 - Apresentação dos resultados da curva 3 utilizando de todos os métodos.

A Figura 5.38 mostra de forma ampliada o resultado obtido na curva 3 e prova que, apesar dos resultados obtidos diretamente por AG serem mais obedientes à curva real, o resultado obtido pelo novo método, NR com AG, consegue reproduzir uma média da parte inicial da curva, pontos entre  $I_{cc}$  e  $P_{mp}$ . Essa parte caracteriza a deterioração da placa com o tempo de uso, tema muito importante na atualidade, pois, as grandes usinas solares são novas, e a mudança dos parâmetros dos módulos fotovoltaicos com o tempo precisa ser estudada exaustivamente pelos pesquisadores da área.

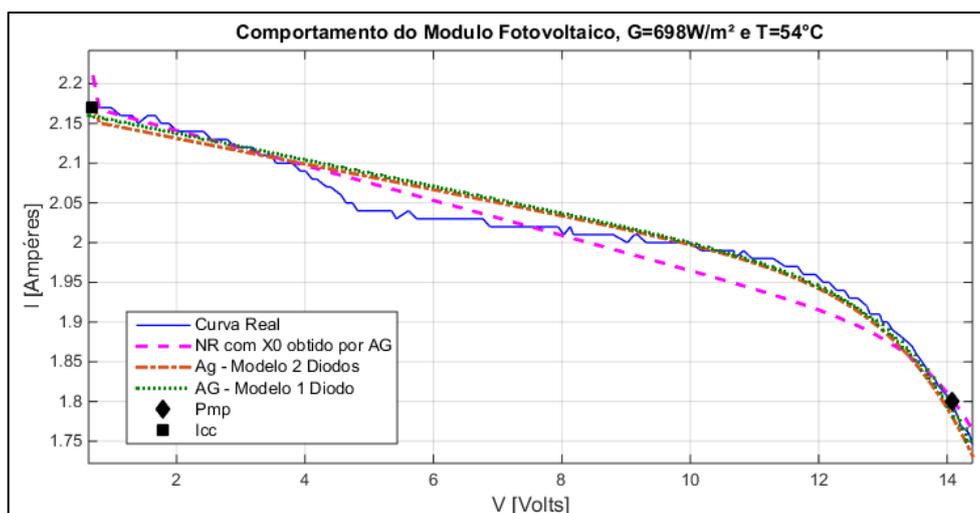


Figura 5.38 - Apresentação dos resultados da curva 3 utilizando de todos os métodos – curva ampliada.

Na Curva 4, utilizando os dados obtidos em AG como “chute inicial” em NR, o método gerou o seguinte resultado:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ph} \\ I_S \\ m \\ R_s \\ R_{sh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.8169 \\ 1.10^{-10} \\ 0.4286 \\ 0.8947 \\ 32.7242 \end{bmatrix}$$

A Figura 5.39 mostra a comparação dos gráficos desenvolvido com os dados obtidos.

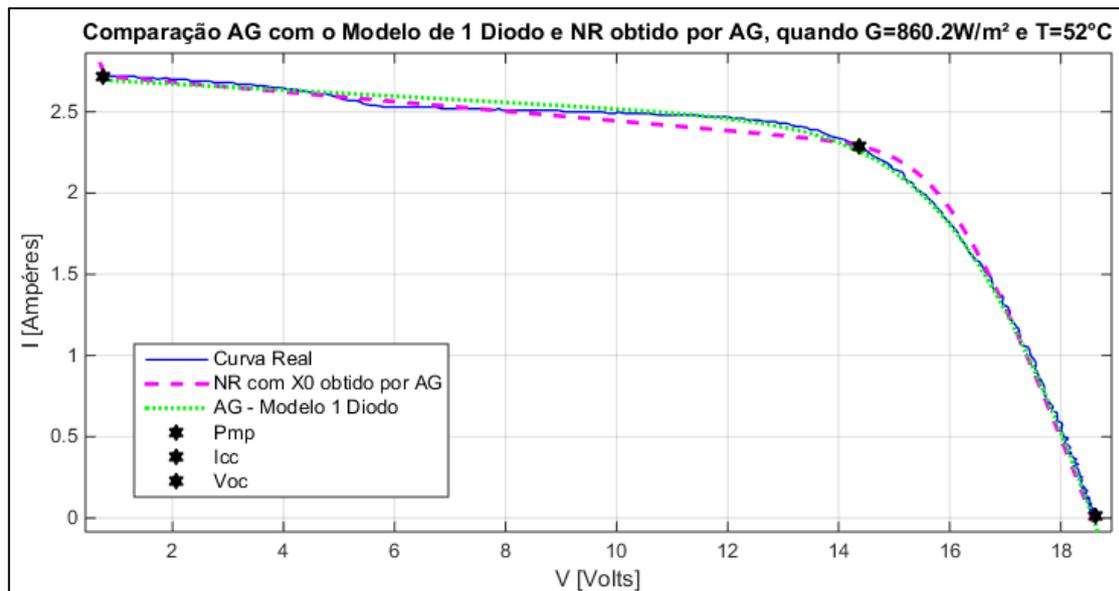


Figura 5.39 - Curva 4 gerada NR utilizando “chute inicial” obtido em AG.

Para a curva 4 também foi feita uma comparação entre todos os métodos utilizados e está representada pela Figura 5.40, sendo válidas as mesmas considerações feitas dos resultados obtidos na curva 3.

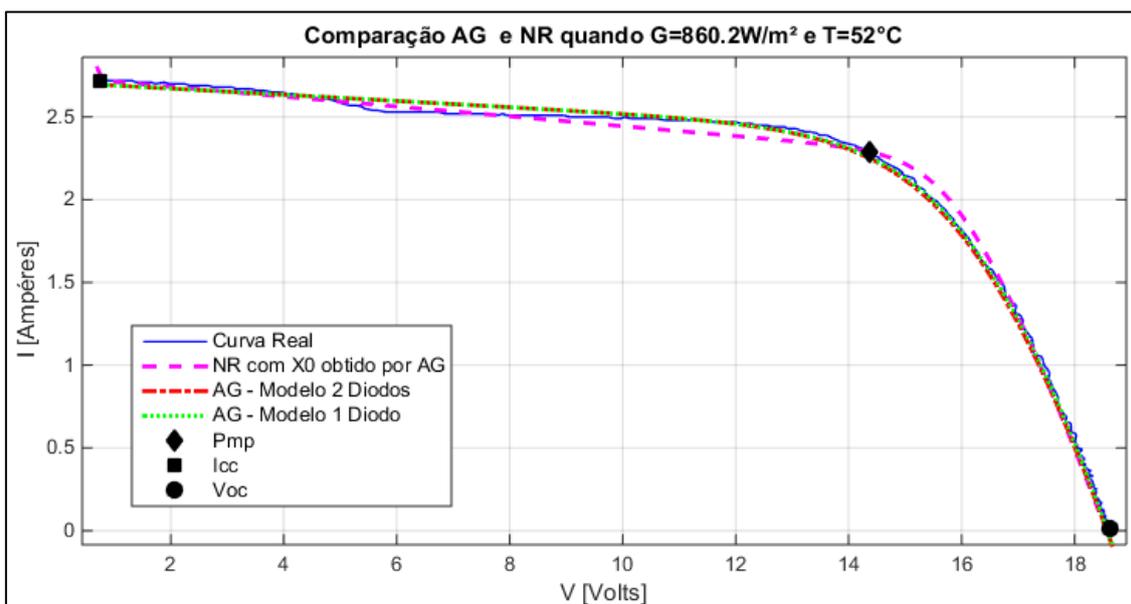


Figura 5.40 - Curva 4 - Apresentação dos resultados de todos os métodos.

Nas curvas 1 e 2, os parâmetros obtidos são muito próximos aos obtidos anteriormente com o método de Newton Raphson, pois, nessas curvas, o mesmo convergiu. A Figura 5.41 mostra os resultados obtidos em todos os métodos para a curva 1, apresentada com irradiância de valor igual a  $225\text{W/m}^2$  e temperatura do módulo fotovoltaico igual a  $25^\circ\text{C}$ , destacando os pontos de máxima potência, a corrente de curto circuito e a tensão de circuito aberto.

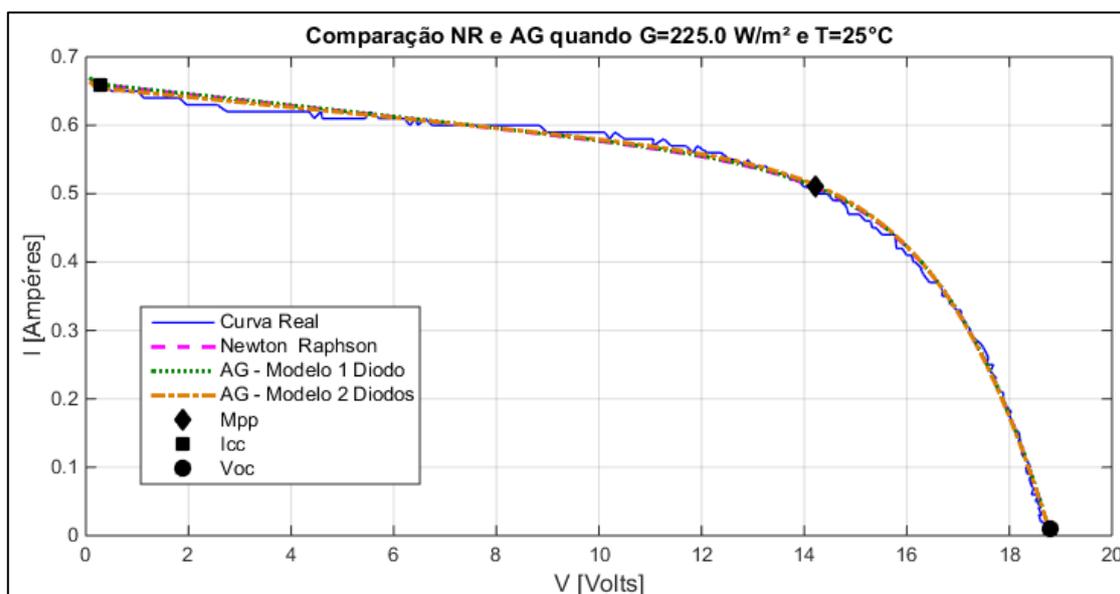


Figura 5.41 - Curva 1 - Apresentação dos resultados de todos os métodos.

A curva 2, apresentada com irradiância de valor igual a  $596.8\text{W/m}^2$  e temperatura do modulo fotovoltaico igual a  $35^\circ\text{C}$ , representada na Figura 5.42, mostra a comparação de todos os métodos utilizados nesse trabalho. Comparando o resultado do método de Newton Raphson e Algoritmos Genéticos com modelo de um e dois diodos, foi constatado, nesse caso, que todos os métodos apresentaram alta eficiência na extração dos parâmetros. Os pontos de tensão e corrente obtidos pelos métodos gerou curvas muito próximas umas das outras.

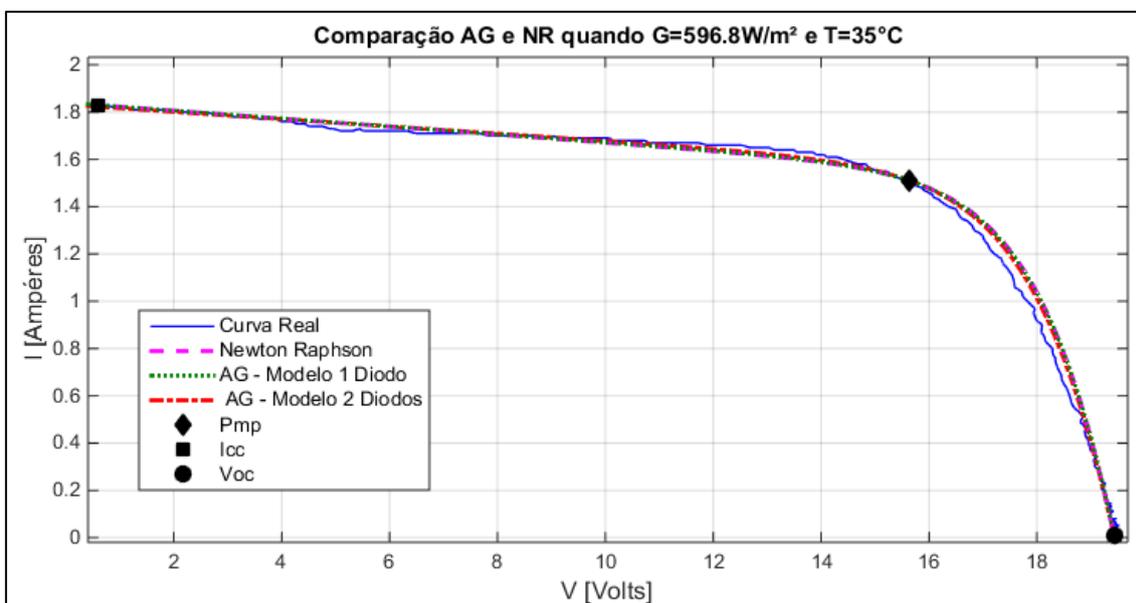


Figura 5.42 - Curva 2 - Apresentação dos resultados de todos os métodos.

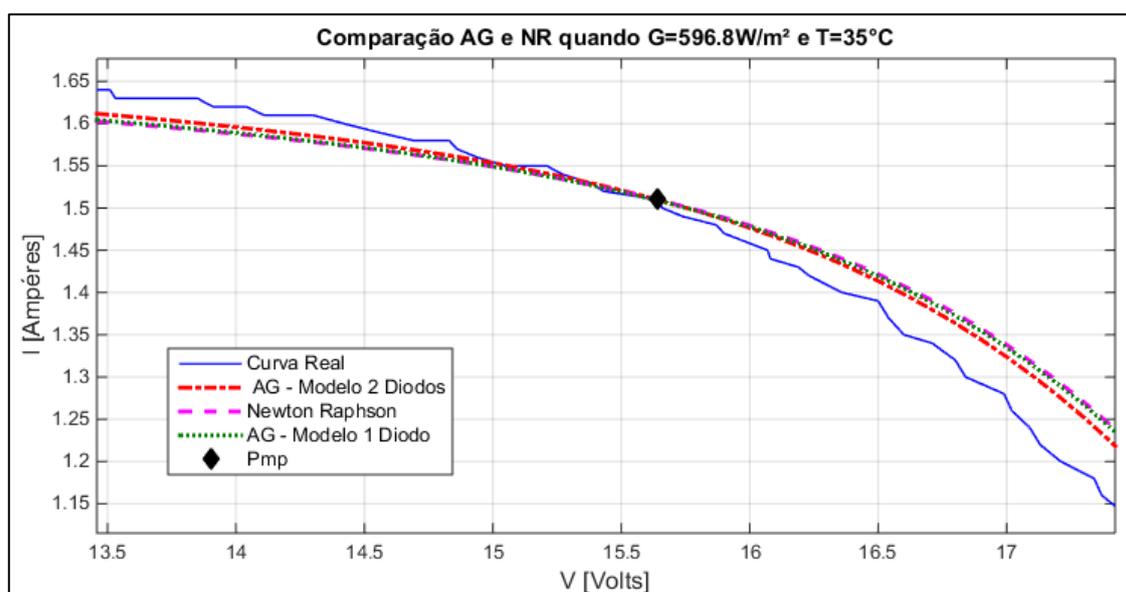


Figura 5.43 – Curva 2 IxV ampliada próximo ao Pmp.

O método AG usando o modelo de dois diodos foi mais eficiente, na curva 2, como mostra a figura 5.43, pois apresentou uma curva ligeiramente mais próxima da curva real. Na curva 1 o mesmo resultado foi verificado. Isso se justifica pelo fato da baixa irradiação solar, nesses dois casos, nas placas fotovoltaicas analisadas.

---

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 Considerações Finais

O método iterativo de Newton Raphson é usado em várias áreas de pesquisa, justamente por ser rápido e eficaz em grande parte das aplicações. Ao ser aplicado, possui pequeno esforço computacional, encontrando a resposta, nos casos onde há convergência, em poucas iterações. Além disso, os parâmetros encontrados são idênticos em todas as simulações e, quanto mais próximo o “chute inicial” for da solução do problema, menos iterações são necessárias para convergir para a raiz da função.

O método de Newton Raphson pode ser usado para vários tipos de problemas, mesmo com equações não lineares. No entanto, é fundamental ter o conhecimento de uma faixa de valores próxima da solução, caso contrário, a convergência não é obtida, como foi mostrado neste trabalho.

O método de NR é muito confiável para obter os parâmetros em questão, quando o usuário tem algum conhecimento do sistema fotovoltaico sob investigação e, conseqüentemente os valores aproximados dos parâmetros a serem usados como “chute inicial”. Entretanto, quando não há um “chute inicial” próximo à raiz, o método se torna falho e pode não obter a raiz das equações.

A obtenção dos parâmetros utilizando o método Newton Raphson só foi possível nas curvas um e dois, nas curvas três e quatro, na execução do método, a matriz Jacobiana tornou-se singular, impossibilitando assim encontrar as raízes das funções. Isso ocorreu devido à diferença na ordem de grandeza dos parâmetros, sendo algumas variáveis em unidades muito pequenas comparadas com outras, isso gera no sistema uma matriz com diagonal muito fraca, com determinante próximo de zero. Esta análise foi elucidada através do estudo dos autovalores das matrizes jacobianas, mostrando que quando pelo menos um autovalor possui valor nulo, a matriz é singular, impossibilitando a solução do problema.

Em um Algoritmo Genético, a população é modificada a cada geração, através dos cruzamentos e das mutações sofridas, até que se chegue a um indivíduo que tenha melhor resposta ao problema. Por isso, os resultados obtidos, em simulações distintas, podem ser diferentes, porém, próximos uns dos outros, como foi mostrado nas tabelas de resultados do Capítulo 5(cinco).

O uso de Algoritmos Genéticos, na extração dos parâmetros, permite que o usuário programe um intervalo que deve conter as variáveis buscadas, intervalo esse chamado de restrição pela teoria de otimização. Logo, os parâmetros encontrados nunca extrapolam os limites mínimos e máximos estipulados, nesse caso, por condições físicas e características técnicas do módulo fotovoltaico.

Os resultados obtidos em AG no modelo de um e dois diodos se mostraram muito próximos, sendo justificado o uso do modelo de dois diodos quando há baixa irradiância solar. Tal teoria pode ser comprovada analisando os resultados obtidos, pois, foi observado que nas curvas 1 (um) e 2 (dois), com irradiâncias  $225 W/m^2$  e  $596.8 W/m^2$ , o modelo de dois diodos gerou gráficos visualmente mais próximos da curva real. Enquanto que, nas curvas 3(três) e 4(quatro), em que a irradiância é maior,  $698 W/m^2$  e  $860.2W/m^2$ , o modelo de um diodo teve melhor eficiência.

O método de Newton Raphson é muito preciso quando comparado com o AG, embora possua a dificuldade de convergência, pois é necessário o “chute inicial” muito próximo à raiz. Mas, provou-se que, em alguns casos, ele se torna possível, quando se utiliza o AG para obter o chute inicial.

O uso dos parâmetros obtidos em Algoritmos Genéticos para o “chute inicial” no método de Newton Raphson é uma técnica válida e precisa, pois junta dois métodos para encontrar um ponto ótimo na solução do problema, viabilizando o uso do método de Newton Raphson em todos os casos na extração de parâmetros de módulos fotovoltaicos.

A grande vantagem do uso da junção dos dois métodos está no fato de que a curva resultante passa, exatamente, nos pontos utilizados na formulação do problema, principalmente de corrente de curto circuito, no ponto de máxima potência e no ponto de tensão de circuito aberto, preservando assim as características do módulo.

Os parâmetros da curva IxV utilizando todos os métodos propostos neste trabalho, apresentaram resultados satisfatórios, quando comparados com a curva real obtida a partir do módulo fotovoltaico. Pois, em todos os casos, a curva simulada se aproxima muito da curva real, mostrando assim, a eficiência do uso tanto do método de Newton Raphson, quanto dos Algoritmos Evolucionários, especificadamente, o Algoritmo Genético.

Finalmente, este trabalho apresenta um método matemático simples e rápido que pode ser aplicado em problemas práticos de engenharia elétrica de sistemas fotovoltaicos, usando Algoritmos Genéticos, através do modelo de um ou dois diodos, dependendo da aplicação exigida, ou aplicado AG como condição inicial para o método de Newton Raphson.

## **6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

O uso do modelo de um ou dois diodos depende da radiação solar a qual o módulo fotovoltaico está exposto. Logo, propõem-se como trabalho futuro, a implementação de um algoritmo que identifica a irradiância atual e define, portanto, qual modelo deve ser usado, de forma automática.

Como continuação desse trabalho, é almejado desenvolver um algoritmo numérico, que calcule o erro em todos os pontos, entre as curvas reais e simuladas, para verificar de forma mais precisa, a eficiência de cada método, em todos os casos analisados.

Posteriormente, deseja-se também integrar o módulo fotovoltaico à otimização em tempo real, permitindo que o programa gere os parâmetros com a temperatura e irradiância atuais. Desse modo, o controlador de carga utilizado pode operar sempre em seu ponto de máxima potência, qualquer que seja a condição de radiação ou temperatura de trabalho do módulo, de forma mais eficiente e precisa.



---

## REFERÊNCIAS

BRAGA, C. G. **O uso de Algoritmos Genéticos para aplicação de Otimização de Sistemas Mecânicos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1998.

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

CARVALHO, A. P. L. F. **Algoritmos Genéticos**. Departamento da Ciência da Computação da Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://conteudo.icmc.usp.br/pessoas/andre/research/genetic/>>. Acesso em: 26 mar. 2018.

COTA, E. F.; BASTOS, A. F.; SILVA, S. R. e PEREIRA, H. A. **Aplicação do Método de Newton-Raphson no Controle da Resistência Externa de Geradores Eólicos Durante Afundamentos de Tensão**. IV SBSE, Goiânia: 2012.

ENGELBRECHT, A. P. **Computational Intelligence**. [s.l.]: John Wiley and Sons Ltd, 2007. ISBN 0470035617. <https://doi.org/10.1002/9780470512517>

FLORES, A. C; PIERINI, B; PAVLACK, E; BOER, P; KENDERLI e ABÉ, S. **Software WxMaxima**. Universidade Federal de Santa Maria – RS. Grupo Pet Matemática da UFSM Santa Maria, RS, 2013. Disponível em: <[http://w3.ufsm.br/petmatematica/images/minicursos/Apostilas/apostila\\_software\\_wxmaxima.pdf](http://w3.ufsm.br/petmatematica/images/minicursos/Apostilas/apostila_software_wxmaxima.pdf)>. Acesso em: 09 abr. 2018.

GRIFFITHS, D. V. and SMITH, I. M. **Numerical Methods for Engineers: A Programming Approach**. University of Manchester. 1991.

HAUPT, R. L., HAUPT, S.E. **Practical Genetic Algorithms**. 2º ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

HEJRI, M., MOKHTARI, H., AZIZIAN, M. R., GHANDHARI, M. e SODER, L. On the Parameter Extraction of a Five-Parameter Double-Diode Model of Photovoltaic Cells and Modules. **IEEE – Journal of Photovoltaics**, Vol. 4, N°3, Maio 2014.

HENRIQUES, R. M. **Utilização de Autovalores e Autovetores no Problema de Fluxo de Potência para Determinação de Áreas de Controle de Tensão**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Tese (Doutorado) — University of Michigan, 1975.

HUSSEIN, A. A simple approach to extract the unknown parameters of PV modules. **Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences**, TUBITAK, Turkey, 2017.

INGENIEURBÜRO MENCKE & TEGTMEYER GmbH. **PV I-V Curve Analyser, Mini-KLA**. Disponível em: <<https://www.imt-solar.com/products/pv-i-v-curve-analyser/mini-kla/>> Acesso em: 09 abr. de 2018.

ISHAQUE, K., SALAM, Z. e TAHERI, H. **Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules**. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95 (2011) 586–594. ELSEVIER, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.09.023>

ISHAQUE, K.; SALAM, Z.; MEKHILEF S.; SHAMSUDIN A. **Parameter extraction of solar photovoltaic modules using penalty-based differential Evolution**. *Applied Energy* 99 (2012) 297–308. ELSEVIER, 2012.

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.

Jieming MA, Ka Lok MAN, T. O. TING, Nan ZHANG, Sheng-Wei GUAN e Prudence W. h. WONG. Approximate Single-Diode Photovoltaic Model for Efficient *I-V* Characteristics Estimation. **Scientific World Journal**. 2013. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3835605/>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

LUCAS, C. D. **Algoritmos Genéticos: uma Introdução**. 2002. 48 pag. (Apostila). Disponível em: <<http://www.muriloleal.com.br/visao/repositorio/centec/eai/ia/ALGORITMOS%20GENETICOS%20-%20APOSTILA.pdf>>. Acesso em 02 fev. 2018

MAMEDE, A. C. **Projeto Iterativo, Simulação, Análise e Otimização de Máquina a Relutância Variável Monofásica**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016, 143p.

NEDUMGATT, J. J.; JAYAKRISHNAN, K. B.; UMASHANKAR, S. and VIJAYAKUMAR, D. **Perturb and Observe MPPT Algorithm for Solar PV Systems- Modeling and Simulation**. in Proc. School of Electrical Engineering, VIT University. India Conference (INDICON), 2011.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistema de Controle**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

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. Sol. Cells 91 (2007) 1222–1227. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.04.009>

OLIVEIRA, A. C. M. de. **Algoritmos evolutivos híbridos com detecção de regiões promissoras em espaços de busca contínuos e discretos.** Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004.

PINHO, J.T. e GALDINO, M.A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014. 530p.

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, 117p.

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.

RODRIGUES, P.; CAMACHO, J. R.; MATOS, F. B. **The trust region methods applied to the extraction of the parameters for photovoltaic panels.** Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, Coimbra (Portugal), junho 2011. <https://doi.org/10.24084/repqj09.380>

SMITH, M. D. **Newton-Raphson Technique.** 1998, Disponível em: <[http://web.mit.edu/10.001/Web/Course\\_Notes/NLAE/node6.html](http://web.mit.edu/10.001/Web/Course_Notes/NLAE/node6.html)>. Acesso em: 02 out. 2016.

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

WRIGHT, A. H. **Genetic algorithms for real parameter optimization.** In: Foundations of Genetic Algorithms. [s.l.]: Morgan Kaufmann, 1991. p. 205–218. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-050684-5.50016-1>

ZILLES, R., MACÊDO, W. N., GALHARDO, M. A. B. e OLIVEIRA S. H. F. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.