

Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Lucas Meirelles Pires Deotti

**Extração dos Parâmetros do Modelo Fotovoltaico de Um Diodo Através de um Método
Metaheurístico Baseado no Algoritmo do Morcego**

Juiz de Fora

2019

Lucas Meirelles Pires Deotti

**Extração dos Parâmetros do Modelo Fotovoltaico de Um Diodo Através de um Método
Metaheurístico Baseado no Algoritmo do Morcego**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.

Juiz de Fora

2019

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Deotti, Lucas Meirelles Pires.

Extração dos Parâmetros do Modelo Fotovoltaico de Um Diodo Através de um Método Metaheurístico Baseado no Algoritmo do Morcego / Lucas Meirelles Pires Deotti. – 2019.

104 f. : il.

Orientador: José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.

1. Modelagem de Geradores Fotovoltaicos. 2. Modelo de Um Diodo. 3. Estimativa de Parâmetros. 4. Dados Experimentais. 5. Método Metaheurístico. I. Pereira, José Luiz Rezende, orient. II. Título.

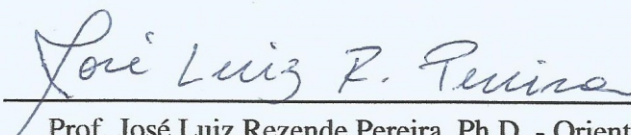
Lucas Meirelles Pires Deotti

Extração dos Parâmetros do Modelo Fotovoltaico de Um Diodo Através de um Método Metaheurístico Baseado no Algoritmo do Morcego

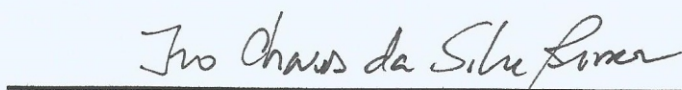
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 27 de agosto de 2019.

BANCA EXAMINADORA



Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D. - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Ivo Chaves da Silva Junior, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Walmir de Freitas Filho, D.Sc.
Universidade Estadual de Campinas

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter dado o sopro inicial e por sempre nos agraciar com sua luz.

Ao meu orientador, Professor José Luiz Rezende Pereira, pela oportunidade e pelas valiosas contribuições realizadas durante o desenvolvimento do presente trabalho; por sua admirável dedicação e por sua generosidade em compartilhar seus conhecimentos e suas vivências acadêmicas, profissionais e pessoais.

Aos meus pais, Roseli Meirelles Pires e Antônio Carlos Silveira Deotti, por todo amor e suporte. A minha irmã, Juliane Meirelles Pires Deotti, pelo amparo e incentivo. A Sandra da Silva (Dadá) e a Rose Mary Silveira Diotte (Tia Ni), pelo carinho e por todos os pensamentos positivos. A todos meus tios e tias, primos e primas, por serem meu refúgio de alegria e proteção.

A minha namorada, Maria Carmela Kneip Lopes Fonseca, por todo amor e cumplicidade; e a toda sua família, pelo grande apreço.

Aos meus amigos de infância, colégio e universidade, por todo apoio, companheirismo e momentos de descontração.

Aos amigos e colegas do Núcleo de Pesquisa em Sistemas de Potência (NUPESP) e do Laboratório de Sistemas de Potência (LABSPOT), pela amistosa convivência. Em particular, ao Engenheiro Matheus Alberto de Souza, pelos relevantes ensinamentos profissionais transpassados.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Faculdade de Engenharia, por contribuírem para minha formação acadêmica. Em particular, ao Professor Flavio Vanderson Gomes, por ter me introduzido no setor de energia solar fotovoltaica.

A todos aqueles que contribuíram de algum modo para realização deste trabalho ou efetuaram em algum momento, os seus votos de sucesso.

"The silicon solar cell may mark the beginning of a new era leading eventually to the realization of one of the mankind's most cherished dreams – the harnessing of almost limitless energy of the sun for the uses of the civilization."

New York Times, 1954.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova metodologia para extração dos parâmetros do modelo de um diodo via dados experimentais da curva característica que descreve o comportamento elétrico de um gerador fotovoltaico operando em regime permanente.

Tendo em vista a natureza contínua, multidimensional, restrita, não-linear e multimodal, do problema de otimização tipicamente formulado para realização desta tarefa, uma nova técnica de otimização metaheurística fundamentalmente baseada no algoritmo de morcego, foi especialmente desenvolvida para a sua resolução.

Esta técnica, a qual foi denominada pela expressão em inglês, *Lévy flight directional bat algorithm* (LDBA), congrega recursos trazidos por uma versão modificada do algoritmo do morcego, os quais, permitem realizar uma intensificação mais eficiente no processo de busca da solução ótima, habilitando tratar de maneira conveniente com as discrepantes ordens de grandeza normalmente verificadas entre os valores assumidos pelos parâmetros do modelo fotovoltaico de um diodo. Adicionalmente a estes recursos, uma estratégia de randomização inspirada no voo de Lévy e um processo de tratamento dinâmico dos limites de valores assumidos pelos parâmetros, são ineditamente incorporados a esta técnica com intuito de melhorar a sua capacidade de exploração do espaço de solução do problema.

A validação desta técnica metaheurística desenvolvida é realizada a partir da aplicação do modelo fotovoltaico de um diodo na representação do comportamento elétrico de três dispositivos de geração fotovoltaica comumente adotados por trabalhos correlatos. Em um primeiro momento, uma análise é especificamente realizada com intuito de averiguar a real pertinência dos instrumentos de diversificação incorporados ao LDBA. Já em um segundo momento, uma análise comparativa da qualidade das soluções retornadas por esta técnica desenvolvida, bem como o seu desempenho computacional, é realizada tomando como base os resultados reportados na literatura para outras destacadas técnicas metaheurísticas tradicionais, modificadas e híbridas.

Embora seja investigada há décadas, a extração dos parâmetros do modelo de um diodo, a partir de dados experimentais, ainda hoje é uma questão em aberto no setor fotovoltaico, sendo inclusive, um dos temas de pesquisa mais atrativos e fundamentais para o seu desenvolvimento. Dessa forma, a principal contribuição deste trabalho é a proposição de uma nova ferramenta que permita a efetiva e confiável realização desta tarefa.

Palavras-chave: Modelagem de Geradores Fotovoltaicos. Modelo de Um Diodo. Estimação de Parâmetros. Dados Experimentais. Método Metaheurístico.

ABSTRACT

This work presents a novel methodology for extracting the one-diode model parameters via experimental data from the characteristic curve in which the photovoltaic generator electrical behavior at steady state is described.

Since the optimization problem typically formulated to accomplish this task is continuous, multi-dimensional, constrained, nonlinear and multimodal in nature, a new metaheuristic optimization technique, fundamentally based on the bat algorithm, has been proposed.

This technique, which was named *Lévy flight directional bat algorithm* (LDBA), gather features brought by a modified version of the bat algorithm, which allow performing a more efficient intensification in the searching process for the optimal solution, enabling to handle it conveniently with the discrepant magnitude orders normally observed between the values assumed by the one-diode model parameters. In addition to these features, a randomization strategy inspired by the Lévy flight and a dynamic procedure for correcting any solution found which violates the established parameters bounds, are incorporated in an innovative way to this technique in order to improve its ability to exploit the solution space problem.

The validation of proposed metaheuristic technique is performed from the application of the one-diode model in the representation of the electrical behavior of three photovoltaic generation devices commonly adopted in the literature. Firstly, an analysis is performed specifically to ascertain the real relevance of exploiting the features incorporated into the LDBA. Secondly, a comparative analysis of the solutions quality obtained from this developed technique, as well as its computational performance with existing methods in the literature is presented.

Although the parameters extraction of the one-diode model via experimental data has been investigated for decades, it is still an open problem in the photovoltaic industry, being one of the most attractive and fundamental research themes for investigation. Thus, the main contribution of this work is the proposition of a new tool which allows the effective and reliable accomplishment of this task.

Key-words: Photovoltaic Modeling. One-Diode Model. Parameters Extraction. Experimental Data. Metaheuristic Method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Tipos estruturais dos materiais de silício empregados na fabricação de células fotovoltaicas.	26
Figura 2	– Possíveis formações da corrente de campo em um material de silício cristalino.	28
Figura 3	– Estrutura típica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino, em perspectiva.	29
Figura 4	– Visão lateral da <i>junção pn</i> de uma célula fotovoltaica de silício cristalino. Em destaque, estão representados as correntes de difusão, de campo e fotogerada na célula fotovoltaica.	30
Figura 5	– Aproveitamento espectral típico de uma célula fotovoltaica de silício cristalino, considerando um espectro padrão de 1,5 AM para a radiação solar.	32
Figura 6	– Curvas características <i>I-V</i> e <i>P-V</i> de uma célula fotovoltaica de silício monocristalino operando sob uma irradiância solar incidente de 985 W/m^2 e uma temperatura de 45°C	34
Figura 7	– Composição típica de um módulo fotovoltaico de silício cristalino: à esquerda, sua visão frontal; no centro, uma visão da sua seção lateral; e à direita, uma visão da sua caixa de junção quando aberta.	35
Figura 8	– Curvas características <i>I-V</i> e <i>P-V</i> de um módulo fotovoltaico de silício monocristalino operando sob uma irradiância solar incidente de 985 W/m^2 e uma temperatura de 45°C ; e de duas possíveis configurações de arranjo para este.	37
Figura 9	– Esquema geral de modelagem dos geradores fotovoltaicos.	38
Figura 10	– Estrutura lógica típica dos métodos metaheurísticos de extração dos parâmetros do modelo de um diodo via dados experimentais.	45
Figura 11	– Circuito elétrico equivalente típico do modelo de um diodo.	52
Figura 12	– Efeito da variação dos cinco parâmetros do modelo de um diodo sobre a curva <i>I-V</i> de um módulo fotovoltaico de silício cristalino.	55
Figura 13	– Comparação entre os pontos medidos nos terminais da célula fotovoltaica RTC France e a curva <i>I-V</i> simulada pelo modelo de um diodo com os valores dos seus parâmetros dados pela melhor solução encontrada pelo LDBA.	77
Figura 14	– Boxplot dos valores de RMSE referentes às soluções obtidas por cada técnica metaheurística nas 50 execuções independentes realizadas no estudo célula da fotovoltaica RTC France.	78
Figura 15	– Gráfico de convergência médio verificado por cada técnica metaheurística nas 50 execuções independentes realizadas no estudo da célula fotovoltaica RTC France.	78
Figura 16	– Comparação entre os pontos medidos nos terminais do módulo fotovoltaico STM6-40 e a curva <i>I-V</i> simulada pelo modelo de um diodo com os valores dos seus parâmetros dados pela melhor solução encontrada pelo LDBA.	80

Figura 17 – Boxplot dos valores de RMSE referentes às soluções obtidas por cada técnica metaheurística nas 50 execuções independentes realizadas no estudo do módulo fotovoltaico STM6-40.	80
Figura 18 – Gráfico de convergência médio verificado por cada técnica metaheurística nas 50 execuções independentes realizadas no estudo do módulo fotovoltaico STM6-40.	81
Figura 19 – Comparação entre os pontos medidos nos terminais do módulo fotovoltaico STP6-120 e a curva $I-V$ simulada pelo modelo de um diodo com os valores dos seus parâmetros dados pela melhor solução encontrada pelo LDBA. . .	82
Figura 20 – Boxplot dos valores de RMSE referentes às soluções obtidas por cada técnica metaheurística nas 50 execuções independentes realizadas no estudo do módulo fotovoltaico STP6-120.	83
Figura 21 – Gráfico de convergência médio verificado por cada técnica metaheurística nas 50 execuções independentes realizadas no estudo do módulo fotovoltaico STP6-120.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características elétricas e térmicas comumente apresentadas no ficha técnica de um módulo fotovoltaico.	41
Tabela 2 – Faixas de valores permitidos para os parâmetros do modelo de um diodo, quando este aplicado na modelagem do módulo fotovoltaico de silício multicristalino com potência nominal de 120 Wp.	56
Tabela 3 – Pseudocódigo do BA.	59
Tabela 4 – Pseudocódigo do DBA. As linhas de código destacadas em vermelho indicam as inovações trazidas por este em relação ao BA.	62
Tabela 5 – Pseudocódigo do LDBA. As linhas de código destacadas em vermelho indicam as inovações trazidas por este em relação ao DBA.	68
Tabela 6 – Pseudocódigo do tratamento dinâmico de limites proposto.	69
Tabela 7 – Pseudocódigo de cálculo da função de aptidão do problema de otimização tipicamente formulado para extração dos parâmetros do modelo de um diodo.	71
Tabela 8 – Pseudocódigo dos procedimentos adotados no LDBA para o sorteio das posições iniciais dos morcegos.	71
Tabela 9 – Faixas de valores permitidos aos parâmetros do modelo de um diodo, tendo em vista os dispositivos de geração fotovoltaica considerados.	74
Tabela 10 – Valores estabelecidos para os parâmetros de controle das técnicas metaheurísticas consideradas.	75
Tabela 11 – Condições de teste estabelecidas.	76
Tabela 12 – Melhores resultados obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 50 vezes na modelagem da célula fotovoltaica RTC France.	76
Tabela 13 – Análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 50 vezes na modelagem da célula fotovoltaica RTC France.	77
Tabela 14 – Melhores resultados obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 50 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STM6-40.	79
Tabela 15 – Análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 50 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STM6-40.	79
Tabela 16 – Melhores resultados obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 50 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STP-120.	81
Tabela 17 – Análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 50 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STP-120.	82

Tabela 18 – Melhores resultados obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 40 vezes na modelagem da célula fotovoltaica RTC France.	85
Tabela 19 – Análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 40 vezes na modelagem da célula fotovoltaica RTC France.	86
Tabela 20 – Melhores resultados obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 30 vezes na modelagem da célula fotovoltaica RTC France.	87
Tabela 21 – Análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 30 vezes na modelagem da célula fotovoltaica RTC France.	87
Tabela 22 – Melhores resultados obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 30 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STM6-40.	88
Tabela 23 – Análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 30 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STM6-40.	88
Tabela 24 – Melhores resultados obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 30 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STP6-120.	88
Tabela 25 – Análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 30 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STP6-120.	88
Tabela 26 – Comparação entre os pontos medidos da curva <i>I-V</i> levantada experimentalmente para a célula fotovoltaica RTC France e os pontos reproduzidos pelo modelo de um diodo, quando este habilitado pelas melhores soluções obtidas por cada técnica metaheurística para os valores dos seus parâmetros.	102
Tabela 27 – Comparação entre os pontos medidos da curva <i>I-V</i> levantada experimentalmente para o módulo fotovoltaico STM6-40 e os pontos reproduzidos pelo modelo de um diodo, quando este habilitado pelas melhores soluções obtidas por cada técnica metaheurística para os valores dos seus parâmetros.	103
Tabela 28 – Comparação entre os pontos medidos da curva <i>I-V</i> levantada experimentalmente para o módulo fotovoltaico STP-120 e os pontos reproduzidos pelo modelo de um diodo, quando este habilitado pelas melhores soluções obtidas por cada técnica metaheurística para os valores dos seus parâmetros.	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Algoritmo de colônia de abelhas
AIS	Sistema imunológico artificial
AM	Massa de ar
Ag	Prata
Al	Alumínio
As	Arsênio
B	Boro
BA	Algoritmo do morcego
BBO	Algoritmo baseado em biogeografia
BFA	Algoritmo baseado em colônia de bactérias
BHCS	Algoritmo híbrido baseado em biogeografia heterogênea e busca do cuco
BLPSO	Otimização por dispersão de partículas com aprendizagem baseada em biogeografia
BMO	Algoritmo de acasalamento de aves
CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio
CLPSO	Otimização por dispersão de partículas com aprendizagem compreensiva
CS	Busca do pássaro cuco
CdTe	Telureto de cádmio
DBA	Algoritmo direcional do morcego
DE	Evolução diferencial
FA	Algoritmo de vaga-lumes
GA	Algoritmo genético
GWO	Otimização do lobo cinza
GaAs	Arseneto de gálio

HS	Busca harmônica
LDBA	Algoritmo direcional do "voo de Lévy" do morcego
MP	Máxima potência
MPP	Ponto de máxima potência
N	Nitrogênio
OC	Circuito aberto
P	Fósforo
PSO	Otimização por dispersão de partículas
Pt	Platina
SATLBO	Algoritmo baseado em ensino-aprendizagem autoadaptativo
SC	Curto-circuito
Se	Selênio
Si	Silício
TLBO	Algoritmo baseado em ensino-aprendizagem
a-Si	Silício amorfo
c-Si	Silício cristalino
m-Si	Silício multicristalino
p-Si	Silício policristalino
x-Si	Silício monocristalino
μ -Si	Silício microcristalino
c.a.	Corrente alternada
c.c.	Corrente contínua

LISTA DE SÍMBOLOS

A_i^t	Amplitudes da onda sonora emitida pelo morcego i na iteração t
A_m	Média das amplitudes das ondas sonoras emitidas pela população até então
A_0	Valor inicial da amplitude da onda sonora emitida pela população de morcegos
A_∞	Valor final da amplitude da onda sonora emitida pela população de morcegos
D	Diodo em antiparalelo no modelo de um diodo
Erro	Erro associado a diferença de valores de corrente elétrica esperados e estimados
E_F	Energia associada a um fóton
E_G	Energia necessária para quebrar um ligação química de um material
F	Função de aptidão do problema de otimização
FE	Número de avaliações da função de aptidão já realizadas
FE_{max}	Número máximo de avaliações da função de aptidão
I	Corrente elétrica terminal de um gerador fotovoltaico
I_D	Corrente elétrica que flui através do diodo
I_{MP}	Corrente elétrica de máxima potência de um gerador fotovoltaico
I_P	Corrente elétrica que flui sobre a resistência paralelo
I_{Ph}	Corrente elétrica fotogerada
$I_{Ph,min}$	Menor valor permitido para a corrente elétrica fotogerada
$I_{Ph,max}$	Maior valor permitido para a corrente elétrica fotogerada
I_{SC}	Corrente elétrica de curto-circuito de um gerador fotovoltaico
I_{cel}	Corrente elétrica terminal de uma célula fotovoltaica
I_{esp}	Valor esperado ou medido da corrente elétrica terminal de um gerador fotovoltaico
I_{est}	Valor estimado para a corrente elétrica terminal de um gerador fotovoltaico

$I_{paralelo}$	Corrente elétrica terminal de uma associação em paralelo de células fotovoltaicas
I_{serie}	Corrente elétrica terminal de uma associação em série de células fotovoltaicas
I_0	Corrente elétrica de saturação inversa
$I_{0,min}$	Menor valor permitido para a corrente elétrica de saturação inversa
$I_{0,max}$	Maior valor permitido para a corrente elétrica de saturação inversa
L	Distribuição Normal com variância σ_L^2
LB	Vetor contendo os limites inferiores de valores permitidos para cada dimensão de \mathbf{x}
M	Número de pares $\{I,V\}$ que compõe o conjunto de dados que descreve uma curva $I-V$
N	Distribuição Normal
N_B	Tamanho da população de morcegos ou dos respectivos indivíduos referentes à técnica metaheurística considerada
N_C	Número de células fotovoltaicas conectadas em série
N_D	Número de dimensões do vetor que caracteriza um morcego
N_P	Número de módulos fotovoltaicos conectados em paralelo ou número de <i>strings</i> que compõem o arranjo fotovoltaico
N_S	Número de módulos fotovoltaicos conectados em série ou o produto do número de células fotovoltaicas que compõe o módulo fotovoltaico com o respectivo número de módulos que compõe uma <i>string</i> do gerador fotovoltaico
P_{MP}	Máxima potência fornecida por um gerador fotovoltaico
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
R_P	Resistência paralelo do modelo de um diodo
$R_{P,min}$	Menor valor permitido para a resistência paralelo do modelo de um diodo
$R_{P,max}$	Maior valor permitido para a resistência paralelo do modelo de um diodo
R_S	Resistência série do modelo de um diodo

$R_{S,min}$	Menor valor permitido para resistência série do modelo de um diodo
$R_{S,max}$	Maior valor permitido para resistência série do modelo de um diodo
S	Comprimento do passo dado sobre a distribuição de Lévy
T_C	Temperatura de operação da célula fotovoltaica
U	Distribuição Normal com variância σ_U^2
UB	Vetor contendo os limites superiores de valores permitidos para cada dimensão de \mathbf{x}
V	Tensão elétrica terminal de um gerador fotovoltaico
V_D	Tensão elétrica sobre o diodo
V_{MP}	Tensão elétrica de máxima potência de um gerador fotovoltaico
V_{OC}	Tensão elétrica de circuito aberto de um gerador fotovoltaico
V_T	Tensão térmica do diodo
V_{cel}	Tensão elétrica terminal de uma célula fotovoltaica
$V_{paralelo}$	Tensão elétrica terminal de uma associação em paralelo de células fotovoltaicas
V_{serie}	Tensão elétrica terminal de uma associação em série de células fotovoltaicas
c	Velocidade da luz em um meio ($2,99792 \times 10^8$ m/s, no vácuo)
f	Frequência das ondas sonoras emitidas por um morcego
f_{min}	Menor frequência de uma onda sonora emitida por um morcego
f_{max}	Maior frequência de uma onda sonora emitida por um morcego
\mathbf{f}_1	Frequência de uma onda sonora emitida por um morcego na direção daquele melhor posicionado
\mathbf{f}_2	Frequência de uma onda sonora emitida por um morcego na direção do morcego j
h	Constante de Planck ($6,62607 \times 10^{-34}$ J.s)
i	Número referente a um morcego considerado em uma população
j	Número referente a um morcego diferente de i , considerado em uma população

k	Constante de Boltzmann ($1,3806488 \times 10^{-23}$ J/K)
m	Dado par $\{I_m, V_m\}$ do conjunto de M registros experimentais de uma curva $I-V$ de um gerador fotovoltaico
n	Fator de idealidade da célula fotovoltaica
n_{min}	Menor valor permitido para o fator de idealidade da célula fotovoltaica
n_{max}	Maior valor permitido para o fator de idealidade da célula fotovoltaica
q	Carga típica de um elétron expressa em termos absolutos ($1,60217646 \times 10^{-19}$ C)
r_i^t	Taxa de pulso da onda sonora emitida pelo morcego i na iteração t
r_0	Valor inicial da taxa de pulso da onda sonora emitida pela população de morcegos
r_∞	Valor final da taxa de pulso da onda sonora emitida pela população de morcegos
$rand$	Número aleatório sorteado em um distribuição Normal que varia entre 0 e 1
$randn$	Número aleatório sorteado em um distribuição Normal padrão
$rand_1$	Número aleatório sorteado em um distribuição Normal que varia entre 0 e 1, associado a f_1
$rand_2$	Número aleatório sorteado em um distribuição Normal que varia entre 0 e 1, associado a f_2
t	Número da iteração corrente
t_{max}	Número máximo de iterações
\mathbf{v}_i^t	Velocidade de um morcego i na iteração t relativa ao morcego melhor posicionado
\mathbf{x}	Vetor relacionado a posição de um morcego
\mathbf{x}_i^t	Posição de um morcego i na iteração t
\mathbf{x}_i^{t+1}	Posição de um morcego i na iteração $t + 1$
\mathbf{x}_j^t	Posição de um morcego j na iteração t
\mathbf{x}^*	Posição do morcego melhor posicionado da população

z	Certa dimensão do vetor que caracteriza um morcego
Γ	Distribuição Gamma
α	Taxa de decrescimento da amplitude da onda sonora emitida
β	Parâmetro da distribuição de Lévy
γ	Taxa de crescimento referente a emissão do pulso de onda sonora
ε	Número aleatoriamente sorteado em um distribuição Normal que varia entre -1 e 1
λ	Comprimento da onda eletromagnética
ν	Frequência de oscilação da onda eletromagnética
ω_i^t	Parâmetro de escala das dimensões de um morcego i na iteração t
ω_0^t	Valor inicial do parâmetro de escala de cada dimensão z de \mathbf{x}
ω_∞^t	Valor final do parâmetro de escala de cada dimensão z de \mathbf{x}

Neste trabalho, símbolos em negrito são adotados na representação de vetores.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	20
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	23
1.3 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DA PESQUISA	23
1.4 ESTRUTURAÇÃO DO DOCUMENTO	24
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	25
2.1.1 Propriedades dos Materiais Semicondutores	26
2.1.2 Células Fotovoltaicas de Silício Cristalino	29
2.1.3 Associações de Células Fotovoltaicas	34
2.2 MODELAGEM DO DESEMPENHO DE GERADORES FOTOVOLTAICOS .	37
2.3 MÉTODOS METAHEURÍSTICOS DE EXTRAÇÃO DOS PARÂMETROS . .	44
2.4 CONCLUSÕES PARCIAIS	49
3 – METODOLOGIA PROPOSTA	51
3.1 MODELO DE UM DIODO	51
3.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	54
3.3 TÉCNICA METAHEURÍSTICA DESENVOLVIDA PARA RESOLUÇÃO . .	57
3.3.1 Algoritmo do Morcego	58
3.3.2 Algoritmo Direcional do Morcego	61
3.3.3 Versão Modificada do Algoritmo Direcional do Morcego	65
3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DA TÉCNICA METAHEURÍSTICA DESENVOLVIDA	69
3.5 CONCLUSÕES PARCIAIS	71
4 – TESTES E RESULTADOS	73
4.1 DADOS UTILIZADOS PARA A REALIZAÇÃO DOS TESTES	73
4.2 ANÁLISE DA METODOLOGIA PROPOSTA	74
4.2.1 Estudo de Caso 1: Célula Fotovoltaica Monocristalina RTC France	76
4.2.2 Estudo de Caso 2: Módulo Fotovoltaico de Silício Monocristalino STM6-40	78
4.2.3 Estudo de Caso 3: Módulo Fotovoltaico de Silício Policristalino STP6-120	81
4.2.4 Discussão	82
4.3 COMPARAÇÃO COM METODOLOGIAS PUBLICADAS NA LITERATURA	84

4.3.1	Comparação com Técnicas Metaheurísticas Tradicionais	85
4.3.2	Comparação com Técnicas Metaheurísticas Modificadas e Híbridas	86
4.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	89
5	– CONCLUSÃO	90
5.1	PROPOSTA DE CONTINUIDADE	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
	APÊNDICE A – DADOS DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS	101

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho se encontra inserido dentro do contexto de pesquisas relacionadas à modelagem do desempenho de geradores fotovoltaicos operando em regime permanente e à aplicação de técnicas metaheurísticas na resolução de problemas de otimização com natureza multimodal. Neste capítulo introdutório, as principais motivações para sua realização, bem como os seus objetivos, são devidamente apresentados.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em uma sociedade que se encontra cada vez mais dependente da eletricidade e que, ao mesmo tempo, busca reinventar os seus caminhos de desenvolvimento por meio de rotas alternativas, mais sustentáveis e menos impactantes ao meio ambiente do que aquelas percorridas até então, tem-se que a geração de energia elétrica útil a partir de fontes renováveis, tal como hídrica, eólica, solar e biomassa, desponta como uma inevitável via de progresso. Em meio as estas fontes e suas respectivas tecnologias de conversão, tem-se que a *geração solar fotovoltaica* se apresenta como a mais incipiente e promissora opção (BABU et al., 2016).

Esta forma de geração é principalmente representada pelos chamados *sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica* (SAWIN et al., 2018). Estes sistemas são tipicamente compostos por um gerador fotovoltaico e um inversor. O primeiro, é formado essencialmente por um arranjo de módulos fotovoltaicos interconectados entre si, sendo estes dispositivos, os responsáveis por converter a energia contida na radiação eletromagnética proveniente do Sol em energia elétrica. Todavia, como esta energia convertida é traduzida na forma de corrente contínua (c.c.), tem-se que o segundo componente descrito é responsável por condicioná-la à forma de corrente alternada (c.a.), tendo esta as mesmas características de frequência e onda da rede elétrica local (ZILLES et al., 2012). Adicionalmente, este componente ainda é responsável por otimizar, supervisionar e garantir a operação segura do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (HÄBERLIN, 2012; PEARSALL, 2016).

Em vista disso, tem-se que esta particular modularidade do gerador fotovoltaico associada aos fatos dos componentes dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica necessitarem de pouca manutenção, não emitirem elevados ruídos, não produzirem diretamente nenhum tipo de poluição e dependerem somente da rede elétrica e do recurso solar para funcionarem, sendo que este último se encontra disponível em diferentes níveis, porém, em todas localidades do mundo e sem nenhum custo associado; é que tornam a geração solar fotovoltaica tão distinta das demais tecnologias de geração, as quais sofrem por não compartilharem ao menos uma destas características (ZILLES et al., 2012; MA; YANG; LU, 2014b).

Além disso, as oportunidades de mercado oferecidas pela geração solar fotovoltaica, associadas aos potenciais benefícios que esta pode trazer às redes elétricas e aos seus custos cada

vez mais competitivos, tornam-na uma opção atrativa tanto para o contexto da geração distribuída quanto da centralizada, de qualquer país industrializado (SAWIN et al., 2018; FRAUNHOFER, 2019). Não ao acaso, que inúmeros desses países têm promovido fortes políticas de incentivo a sua aplicação nos últimos anos, a se destacar o próprio Brasil (DEOTTI; GOMES, 2018; SAWIN et al., 2018). Em decorrência dessas políticas, verifica-se que em 2017, a capacidade instalada de geração solar fotovoltaica no mundo foi superior ao de qualquer outra tecnologia de geração, incluindo aquelas baseadas em fontes não-renováveis de energia (SAWIN et al., 2018).

Nesse contexto, tem-se que a modelagem do comportamento elétrico de geradores fotovoltaicos se torna algo crucial para o desenvolvimento do setor fotovoltaico. Além de ser o componente-chave por traz dos simuladores de sistemas fotovoltaicos (CHIN; SALAM; ISHAQUE, 2015; PEARSALL, 2016), tem-se que somente a partir desta é que se torna possível: (i) realizar o projeto otimizado de novos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (DEOTTI; GOMES, 2018); (ii) desenvolver novos recursos de otimização da operação e proteção destes sistemas (SILVESTRE et al., 2014; BENDIB; BELMILI; KRIM, 2015); (iii) avaliar o conformidade do desempenho operacional de sistemas já existentes (PEARSALL, 2016); (iv) responsabilizar e garantir a aplicação correta de garantias no caso de eventuais falhas dos componentes dos geradores fotovoltaicos (PARRA et al., 2017); e (v) analisar os impactos elétricos provocados pelos sistemas fotovoltaicos nas redes às quais estes se encontram conectados (KANCHEV et al., 2011; XIAO, 2017).

Em meio aos diversos modelos representativos do desempenho de geradores fotovoltaicos disponíveis na literatura, tem-se que o mais amplamente empregado pelos agentes atuantes do setor é o chamado *modelo de um diodo* (CHIN; SALAM; ISHAQUE, 2015; PETRONE; RAMOS-PAJA; SPAGNUOLO, 2017). Este modelo se caracteriza por um circuito elétrico equivalente, sendo que a partir da sua análise via Leis de Kirchhoff, é possível obter uma equação paramétrica que permite descrever o comportamento elétrico esperado nos terminais de um gerador fotovoltaico em questão, seja este de pequeno ou grande porte, tendo em vista somente as características da radiação solar incidente e a temperatura de operação deste gerador (PETRONE; RAMOS-PAJA; SPAGNUOLO, 2017). Vale destacar que a efetividade do modelo de um diodo ainda é assegurada pelo sucesso de sua aplicação em alguns dos principais e mais renomados *softwares* de projeto e análise de sistemas fotovoltaicos, tal como o PVsyst, o PV*Sol e o System Advisor Model (GILMAN et al., 2018; MERMOUD; WITTMER, 2019; VALENTIN, 2019).

Dessa forma, tem-se que a aplicação do modelo de um diodo na representação de um gerador fotovoltaico normalmente requer a aplicação de dois tipos de métodos: os *métodos de extração dos parâmetros* e os *métodos de translação* (PETRONE; RAMOS-PAJA; SPAGNUOLO, 2017).

Uma vez que os valores dos parâmetros do modelo de um diodo não são fornecidos pelos fabricantes de dispositivos de módulos fotovoltaicos ou mesmo pelos projetistas de sistemas, tem-se que estes precisam ser estimados ou, em outras palavras, *extraídos* a partir de dados:

(i) levantados experimentalmente em laboratório ou em campo diretamente nos terminais do gerador para uma condição operacional conhecida; e/ou (ii) dos dados providos em sua ficha técnica. Todavia, em função das características não-linear e transcendente da equação descritiva do modelo de um diodo, tem-se que ambas opções são desafiadoras.

A extração dos parâmetros do modelo de um diodo a partir de dados experimentais é fundamental para estudos que envolvem o projeto de componentes fotovoltaicos mais eficientes e avaliação dos efeitos do envelhecimento sobre o seu desempenho (KENNERUD, 1969; SELLAMI; BOUAÏCHA, 2011; CHIN; SALAM; ISHAQUE, 2015; YANG, 2015). Os métodos utilizados neste caso, normalmente se caracterizam pela resolução de um problema de otimização, o qual, embora possa ser facilmente modelado, possui em contrapartida, uma natureza contínua, multidimensional, restrita, altamente não-linear e multimodal (LAUDANI; FULGINEI; SALVINI, 2014; JORDEHI, 2016).

De acordo com LAUDANI; FULGINEI; SALVINI (2014), a resolução deste problema de otimização é algo tão difícil que este poderia ser considerado como um verdadeiro problema de *benchmark* para avaliação do desempenho de qualquer técnica de otimização; e, de fato, observa-se que alguns trabalhos publicados recentemente o consideram, a exemplo das referências: NIU; ZHANG; LI (2014b) e YU et al. (2017).

Nesse âmbito, é importante mencionar que principalmente na última década, inúmeras técnicas metaheurísticas dos mais diversos tipos e conceitos - tal como o *algoritmo genético*, a *otimização por exame de partículas* e a *busca harmônica* - têm sido extensivamente empregadas na resolução deste problema de otimização, com intuito de se averiguar qual é aquela capaz de retornar as soluções mais efetivas e da maneira mais eficiente, para os parâmetros do modelo de um diodo (CHIN; SALAM; ISHAQUE, 2015; JENA; RAMANA, 2015; JORDEHI, 2016; ABBASSI et al., 2018; KUMARI; GEETHANJALI, 2018).

Ao que diz respeito aos métodos de translação, tem-se que estes são os responsáveis por habilitar modelo à representar o comportamento elétrico do gerador fotovoltaico em uma condição operacional arbitrária, sem que seja necessário o conhecimento de dados reais referentes à sua operação em tal condição. Dessa forma, esses métodos geralmente se caracterizam por equações que permitem estimar os valores que seriam verificados para os parâmetros do modelo de um diodo na então condição arbitrada, tendo em vista o seu valor extraído para uma condição conhecida (DUCK et al., 2013; IBRAHIM; ANANI, 2017).

Diante desse fato, é interessante notar o papel preponderante que os métodos de extração dos parâmetros exercem sobre o sucesso do modelo de um diodo na representação do comportamento elétrico de um gerador fotovoltaico. Em um primeiro momento, o seu *status* de convergência é que define se o modelo de um diodo poderá ou não ser empregado no estudo. E, em um segundo momento, a qualidade da sua solução retornada é o fator que determina a acurácia a ser alcançada pelo modelo de um diodo na representação do gerador fotovoltaico em estudo operando na condição conhecida, tal como a própria que foi utilizada para extração dos

parâmetros, e/ou em uma condição arbitrária.

Não ao acaso, que desde a década de 1960, a extração dos parâmetros do modelo de um diodo é um tema que mobiliza a comunidade científica (KENNERUD, 1969). Embora centenas de métodos já tenham sido propostos na literatura, a busca por um método de extração mais eficiente e confiável, continua sendo uma questão aberta, extremamente atrativa e fundamental para o desenvolvimento do setor fotovoltaico (JORDEHI, 2016).

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver um novo método de extração dos parâmetros do modelo de um diodo via dados experimentais. Tendo em vista que este tipo de método é essencialmente caracterizado pela técnica adotada para resolução do problema de otimização tipicamente formulado para a extração dos parâmetros, uma nova técnica de otimização metaheurística foi então proposta.

Inicialmente, o algoritmo do morcego (em inglês, "*bat algorithm*" - BA) havia sido considerado para compor este novo método de extração almejado, em decorrência deste: (i) apresentar uma lógica simples e de fácil implementação computacional; (ii) necessitar o ajuste de poucos parâmetros de controle, se comparado a outras técnicas similares (YANG, 2014; YANG, 2017); (iii) ter uma eficácia amplamente comprovada na resolução de problemas de otimização contínuos e multimodais (YANG, 2010; YANG, 2017); e (iv) ter sido praticamente inexplorada no contexto da presente pesquisa (JORDEHI, 2016). Todavia, nas análises previamente realizadas foi constatado que o BA apresenta originalmente certa falta de habilidade para lidar com as discrepâncias comumente verificadas entre as ordens de grandeza dos valores assumidos pelos parâmetros do modelo de um diodo, o que dificulta e/ou ameaça o sucesso do seu emprego.

Dessa forma, foi definido como objetivo específico deste trabalho o desenvolvimento de uma nova técnica metaheurística baseada no algoritmo do morcego, a qual permita solucionar o problema de otimização referente a extração dos parâmetros do modelo de um diodo a partir de dados experimentais, de maneira ao menos satisfatória.

1.3 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DA PESQUISA

No período de realização da pesquisa que caracteriza o presente trabalho, a seguinte publicação foi aceita para ser apresentada no evento *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America*, o qual será realizado entre os dias 15 e 18 de setembro de 2019, na cidade Gramado, Rio Grande do Sul.

- DEOTTI, L. M. P; PEREIRA J. L. R. *Parameter Extraction of One-Diode Photovoltaic Model using Lévy Flight Directional Bat Algorithm*. In: 2019 IEEE PES Conference On Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA). IEEE, 2019.

1.4 ESTRUTURAÇÃO DO DOCUMENTO

O presente trabalho se encontra dividido em cinco capítulos, incluindo este Capítulo 1, o qual possui um caráter introdutório.

No Capítulo 2 uma breve descrição acerca das práticas e conceitos que permeiam a modelagem dos geradores fotovoltaicos é apresentada. Além disso, uma revisão crítica dos trabalhos correlatos já publicados em revistas e anais de congresso é realizada.

No Capítulo 3, a metodologia proposta por este trabalho é devidamente apresentada. Sendo assim, o problema de otimização tipicamente formulado para extração dos parâmetros do modelo de um diodo, bem como o próprio modelo, são inicialmente apresentados. Em seguida, todos os passos realizados para a construção da técnica metaheurística objetivada para sua resolução e algumas considerações a respeito do seu emprego são descritas.

No Capítulo 4, os testes realizados para validação da técnica metaheurística desenvolvida são propriamente apresentados, sendo os resultados encontrados, descritos, analisados e comparados com outros reportados na literatura.

Finalmente, no Capítulo 5, uma síntese da pesquisa realizada é apresentada, sendo a sua principal contribuição destacada e, complementarmente, algumas propostas para sua continuidade sugeridas.

Além destes cinco capítulos, este trabalho ainda conta com o Apêndice A. Neste, os dados experimentais utilizados para a realização dos testes de validação são descritos de forma tabular. Além disso, alguns resultados encontrados no contexto dos referidos testes são adicionalmente apresentados, visando facilitar a realização de análises comparativas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta um levantamento bibliográfico referente à pesquisa que caracteriza o presente trabalho. O seu objetivo é discutir os conceitos essenciais necessários ao entendimento da pesquisa, tomando como base trabalhos correlatos e referências básicas encontradas na literatura específica.

Dessa forma, tem-se que este capítulo se encontra dividido em três seções. A primeira seção aborda de maneira sintética os aspectos operacionais e construtivos que são fundamentais para descrição do comportamento elétrico dos geradores fotovoltaicos. A segunda seção, apresenta um panorama acerca dos dados requeridos e procedimentos empregados na modelagem matemática desse comportamento elétrico. E a terceira seção, por sua vez, apresenta uma análise a respeito da aplicação de algoritmos metaheurísticos no processo de modelagem matemática do comportamento elétrico de geradores fotovoltaicos.

2.1 ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A conversão direta da energia contida na radiação eletromagnética proveniente do Sol em energia elétrica se dá através de um fenômeno físico, conhecido como *efeito fotovoltaico*. Tal fenômeno foi reportado primeiramente em 1839, pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel, o qual observou que a condutividade elétrica de uma determinada solução de eletrólitos aumentava quando exposta à luz solar, permitindo que uma diferença de potencial surgisse entre dois eletrodos nela mergulhados (BECQUEREL, 1839). Em 1873, o engenheiro eletricitista inglês Willoughby Smith, por sua vez, observou que esse mesmo perfil de fotocondutividade também ocorria em materiais sólidos, como no caso, o selênio (Se) (SMITH, 1873). Três anos mais tarde, o professor inglês William Grylls Adams junto com seu aluno Richard Evans Day, provou que era possível converter a energia solar em energia elétrica sem auxílio de nenhum mecanismo móvel ou de transferência de calor, mas sim, de forma direta, através de uma junção de selênio e plantina (Pt) (ADAMS; DAY, 1877).

Já na metade século XX, com o desenvolvimento da Teoria Quântica e o advento das tecnologias de semicondutores, o primeiro dispositivo prático de geração fotovoltaica foi criado pela empresa norte-americana Bell Laboratories, para alimentação dos seus sistemas de telefonia rural. Apelidado de *célula solar*, este consistia em uma junção de dois materiais semicondutores compostos por silício (Si) e detinha uma eficiência próxima de 6% (PERLIN, 1999).

Nas décadas seguintes, o próprio desenvolvimento da tecnologia de materiais semicondutores propiciou a evolução da indústria fotovoltaica, sendo a sua expansão no mercado impulsionada sobretudo pelas aplicações aeroespaciais, militares e, mais recentemente, para a geração de energia elétrica útil, tanto de forma distribuída como em grandes centrais (ZILLES et al., 2012).

Atualmente, as células solares ou, mais formalmente, *células fotovoltaicas*, se caracterizam por uma junção ou mais de materiais semicondutores baseados principalmente em: silício, arseneto de gálio (GaAs), disseleneto de cobre, índio e gálio (Cu(Ga,In)Se₂) ou, simplesmente, CIGS) ou telureto de cádmio (CdTe); e apresentam uma eficiência típica de até 24% (ZILLES et al., 2012; VDMA, 2017).

No caso específico do silício, é importante mencionar que cinco tipos de materiais estruturalmente distintos são comumente utilizados pela indústria fotovoltaica. Assim como ilustra a Figura 1, os materiais denominados de *silício monocristalino* (x-Si), se caracterizam por apresentarem integralmente apenas um único padrão cristalino. Em contrapartida, os materiais chamados de *silício multicristalino* (m-Si), *poli* (p-Si) ou *microcristalino* (μ -Si), se caracterizam por apresentarem diferentes padrões cristalinos, os quais se estendem por regiões ou "grãos" de até 10 cm, 1 mm e 1 μ m, respectivamente (WENHAM et al., 2006). Além disso, há ainda os materiais apelidados de *silício amorfo* (a-Si), os quais não apresentam um padrão cristalino e muitas vezes precisam ser passivados, isto é, ter suas ligações interatômicas completadas pela dopagem de elementos como o hidrogênio (MERTENS, 2013).

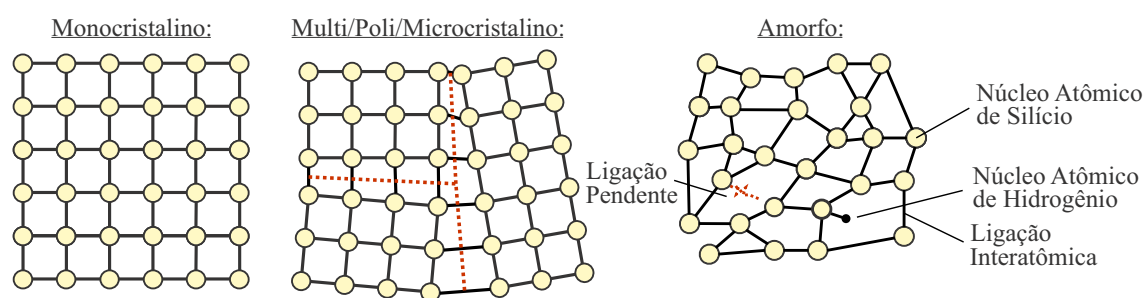


Figura 1 – Tipos estruturais dos materiais de silício empregados na fabricação de células fotovoltaicas.

Fonte: Próprio autor.

Por apresentarem propriedades físicas semelhantes, os materiais semicondutores de silício mono, multi, poli e microcristalino, são comumente referenciados de maneira única pelo termo *silício cristalino* (c-Si). Ademais, tem-se que estes historicamente são os materiais semicondutores mais popularmente empregados na fabricação de células fotovoltaicas. Para fins de esclarecimento, mais de 95% da produção mundial de dispositivos de geração fotovoltaica em 2017, foram de uma dessas quatro tecnologias (FRAUNHOFER, 2019).

Diante desse breve descrição, tem-se que as propriedades físicas que permitem os materiais semicondutores desenvolverem o efeito fotovoltaico e os principais aspectos construtivos e operacionais das células fotovoltaicas de silício cristalino são devidamente descritos a seguir.

2.1.1 Propriedades dos Materiais Semicondutores

Os materiais semicondutores recebem este nome pelo fato de apresentarem uma característica de condutividade elétrica intermediária ao dos isolantes e condutores. Essa característica, por sua vez, é especialmente sensível à quantidade de energia que é submetida a estes materiais.

Em uma condição próxima ao zero absoluto (0 K), por exemplo, os átomos constituintes de certo material semicondutor permanecem todos praticamente imóveis em suas respectivas posições de estabilidade e com todas suas ligações interatômicas bem estabelecidas; logo, suas características de condutividade elétrica são tão insignificantes quanto ao de um material isolante. Contudo, com o aumento da temperatura, esses átomos começam a oscilar em torno dessas posições, o que eventualmente provoca a quebra de algumas de suas ligações e origina elétrons livres no material, os quais podem ser aproveitados para a formação de uma corrente elétrica (MERTENS, 2013). Dessa forma, tem-se que a excitação térmica é capaz de aumentar a condutividade elétrica do material semicondutor. É pertinente comentar que essa dinâmica térmica é contrária a verificada em um material propriamente condutor. Neste último, o aumento da temperatura não provoca um acréscimo significativo do número de elétrons livres no material, de modo que a oscilação dos seus átomos em torno de suas respectivas posições de estabilidade apenas dificulta o fluxo ordenado de elétrons, ou seja, a passagem da corrente (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Em vista disso, tem-se que uma outra forma de aumentar a condutividade elétrica de um material semicondutor é justamente expondo-o à radiação eletromagnética proveniente Sol ou, de forma mais simples, à radiação solar. Assim como estabelece a Teoria Quântica, qualquer forma de radiação eletromagnética pode ser compreendida como uma partícula chamada *fóton*, a qual carrega certa quantia ou "pacote" de energia. Essa energia (E_F) é determinada pela equação (2.1), onde: h é constante de Planck ($6,62607 \times 10^{-34}$ J.s); c é a velocidade da luz no meio em questão (tipicamente considerado o vácuo, logo, $2,99792 \times 10^8$ m/s); λ é o comprimento da onda eletromagnética (m); e ν a sua respectiva frequência (1/s).

$$E_F = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot \nu \quad (2.1)$$

Desse modo, tem-se que três cenários podem ocorrer quando a radiação solar incide sobre um material semicondutor: (i) se a energia contida em um dos seus fótons for menor que a energia necessária quebrar certa ligação interatômica desse material (E_G), isto é, $E_F < E_G$, tem-se que a energia absorvida por um elétron integrante dessa ligação será imediatamente transmitida tal como se este fosse transparente à radiação solar incidente; (ii) por outro lado, se $E_F = E_G$, tem-se que tal elétron se libertará da ligação e ficará disponível no material, reforçando a sua característica de condutividade elétrica; (iii) e, finalmente, se $E_F > E_G$, tem-se que a mesma situação anterior é verificada, porém, a energia em excesso adquirida pelo referido elétron será subsequentemente dissipada na forma de calor, através de um processo conhecido como *termalização* (MERTENS, 2013).

Além da questão energética, é importante ainda mencionar que a absorção dos fótons presentes na radiação solar incidente também é afetada pelas suas características de interação com a matéria que configura o material semicondutor. Dessa forma, os fótons associados aos comprimentos de onda curta e, portanto, mais energéticos, são normalmente absorvidos

pelos átomos mais superficiais do material semicondutor, enquanto os fótons associados aos comprimentos de onda longa, pelos seus átomos mais internos. Um fóton associado a $\lambda = 600$ nm (cor laranja), por exemplo, penetra cerca de $2,5 \mu\text{m}$ no material de silício cristalino até ser absorvido (MERTENS, 2013).

Apesar do calor e da radiação solar propiciarem as condições básicas para que o material semicondutor detenha elétrons livres, tem-se que somente estes não são capazes de garantir a geração de uma corrente elétrica interna no material. Um elétron ao se tornar livre pode perder rapidamente a energia adquirida e sofrer um *processo de recombinação*, isto é, restabelecer sua ligação interatômica inicial ou preencher aleatoriamente uma *lacuna* deixada por outro elétron em das ligações de um átomo vizinho. É importante destacar que as lacunas existentes no material semicondutor podem ser simbolicamente encaradas como portadores de carga positiva, uma vez que estas exercem grande atração sobre os elétrons.

Para que seja possível viabilizar a formação de uma corrente elétrica no material semicondutor tem-se, por exemplo, que um campo elétrico deve ser estabelecido sobre este. Os intuitos deste campo são essencialmente: impedir que os elétrons uma vez excitados, venham posteriormente à se recombinarem localmente; e estabelecer uma direção líquida de fluxo para estes. Logo, tem-se que na sua presença uma *corrente de campo* pode ser firmada no material (MERTENS, 2013). Conforme apresenta a Figura 2, a formação desta corrente de campo pode se suceder de suas formas: pela movimentação de elétrons ou de lacunas. Na primeira situação, os elétrons livres seguem na direção oposto ao do campo, sendo desacelerados ao "esbarrarem" nos átomos do material e novamente acelerados pela própria ação do campo. Já na segunda, os elétrons livres vão ocupando as lacunas dos átomos vizinhos em direção ao polo positivo do campo, formando um fluxo figurativo de "lacunas" na direção contrária.

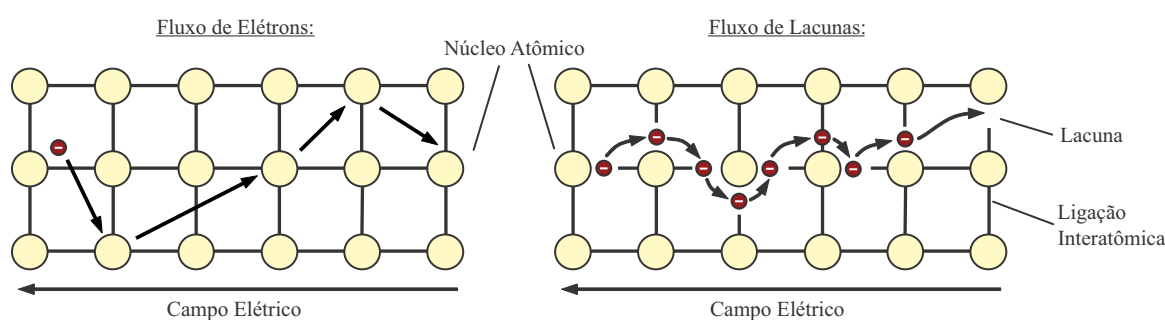


Figura 2 – Possíveis formações da corrente de campo em um material de silício cristalino.

Fonte: Próprio autor.

Uma maneira conveniente de intensificar a ocorrência desses dois tipos de correntes de campo é dopando impurezas no material semicondutor, ou seja, formando materiais semicondutores extrínsecos. As impurezas classificadas como negativas ou *tipo n*, como o arsênio (As) e o fósforo (P), têm por finalidade aumentar a quantidade de elétrons livres no material, e as impurezas classificadas como positivas ou *tipo p*, como o alumínio (Al) e o boro (B), têm por finalidade aumentar a quantidade de lacunas (PINHO; GALDINO, 2014).

2.1.2 Células Fotovoltaicas de Silício Cristalino

Se fazendo valer das propriedades apresentadas pelos materiais semicondutores, tem-se que as células fotovoltaicas de silício cristalino são essencialmente formadas pela junção de uma fina camada de silício cristalino (cerca de 1 μm) altamente dopado com impurezas *tipo n* - como tipicamente o fósforo - com uma espessa camada de silício cristalino levemente dopado com impurezas *tipo p* - como tipicamente o boro (WENHAM et al., 2006; MERTENS, 2013). A Figura 3 apresenta uma ilustração desta composição.

Uma vez que os contatos metálicos das células fotovoltaicas são tipicamente compostos por um material opaco à base de prata (Ag) (VDMA, 2017), é interessante notar na Figura 3, que os contatos instalados na superfície da *camada n* são projetados de modo a minimizar a obstrução da radiação solar incidente. Além disso, durante seu projeto há ainda a preocupação de se minimizar as perdas ôhmicas associadas a resistência oferecida à condução de corrente elétrica e a resistência de contato verificada na interface destes contatos com a *camada n*.

Vale ainda observar na Figura 3 e complementarmente na Figura 4, que a superfície das células fotovoltaicas normalmente são texturizadas e revestidas por uma fina camada de material de baixa refletância, tal como o nitreto de silício (Si_3N_4) (MERTENS, 2013). O intuito da texturização, a qual normalmente segue um padrão piramidal, é minimizar a reflexão da radiação solar incidente ou ao menos propiciar que esta, quando refletida, incida em um seguinte momento sobre outra porção da superfície da célula (WENHAM et al., 2006; MERTENS, 2013). A aplicação do revestimento, por sua vez, também tem o objetivo de minimizar a reflexão na superfície da célula, sendo este capaz de reduzir de 35% para menos de 1% a reflexão de certos comprimentos de onda da radiação solar incidente (HÄBERLIN, 2012; MERTENS, 2013).

Feitas tais considerações, tem-se conforme apresenta a Figura 4, que a diferença de potencial existente entre as duas camadas que compõem a célula fotovoltaica faz com que os

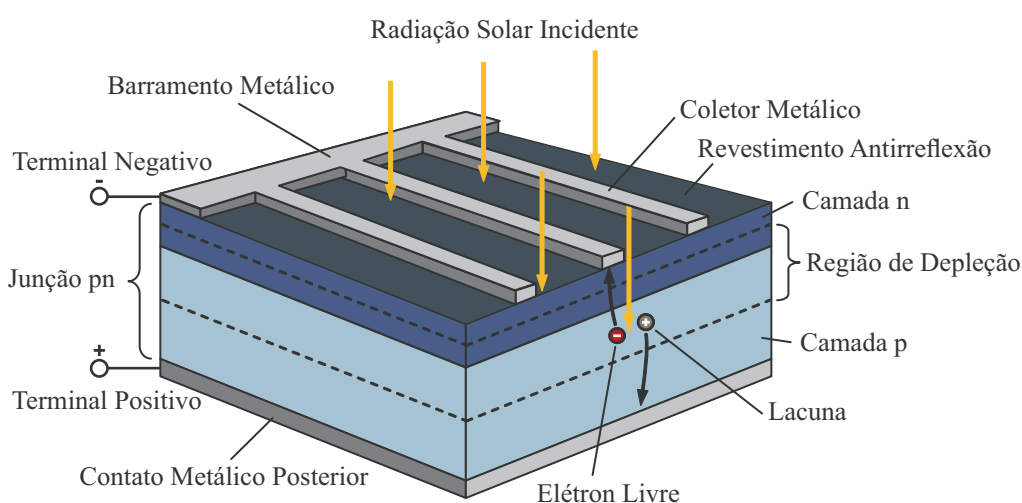


Figura 3 – Estrutura típica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino, em perspectiva.

Fonte: Próprio autor.

elétrons em excesso da *camada n* sejam atraídos pelas lacunas presentes na *camada p*, gerando uma corrente interna natural, denominada *corrente de difusão*. Todavia, tem-se em função do grande tráfego de elétrons e lacunas verificado entre essas duas camadas, que um número elevado e praticamente fixo de portadores de carga negativos e positivos são verificados nos limites da *junção pn*, gerando um campo elétrico interno que se origina nos íons positivos (+) e termina nos íons negativos (-). Tendo em vista que esse campo elétrico gerado cria uma corrente de campo que se opõe ao movimento original de cargas, é dito que uma barreira de potencial é estabelecida na região de transição entre as camadas, a qual recebe nome de *região de depleção*. Desse modo, tem-se mediante a condição de neutralidade essencialmente assumida pela célula fotovoltaica, que a corrente gerada pelo campo elétrico nesta região normalmente é compensada pela corrente de difusão, o que configura um *estado de equilíbrio térmico* em seu interior (HONSBURG; BOWDEN, 2019).

Ao ser iluminada pelo Sol, entretanto, este estado de equilíbrio é quebrado. Os fótons presentes na radiação solar com $E_F \geq E_G$, ao penetrarem sobretudo na região de depleção, são prontamente absorvidos gerando pares de portadores de cargas (elétron-lacuna). Por ação do campo elétrico interno existente nessa região, os elétrons agora livres são atraídos para a *camada n* e, simultaneamente, as lacunas atraídas para a *camada p*. Essa movimentação de portadores de cargas provoca um desequilíbrio no saldo das correntes verificadas na *junção pn*, gerando um acúmulo de elétrons na *camada n* e um acúmulo de lacunas na *camada p*, ou seja, uma diferença de potencial entre estas. Este processo descrito é que propriamente define o *efeito fotovoltaico*.

O aproveitamento dessa tensão interna gerada para realização de trabalho ou, em outras palavras, geração de energia elétrica, se dá através de contatos metálicos instalados na superfície da *camada n* e na face posterior da *camada p*. Interligando estes dois contatos à uma carga através de condutores, tem-se que uma corrente elétrica partindo do terminal negativo em direção ao terminal positivo pode ser contatada. Como tal corrente apresenta um sentido único de fluxo,

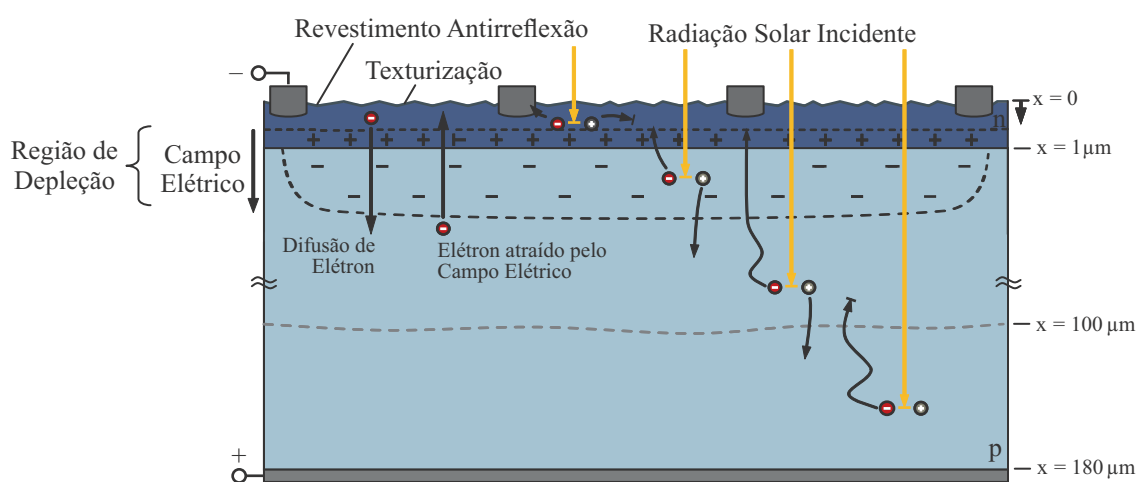


Figura 4 – Visão lateral da *junção pn* de uma célula fotovoltaica de silício cristalino. Em destaque, estão representados as correntes de difusão, de campo e fotogerada na célula fotovoltaica.

Fonte: Próprio autor.

tem-se que ela se caracteriza como uma *corrente elétrica contínua*. Além disso, por ter sua origem na absorção dos fótons, esta idealmente recebe o nome de *fotocorrente* ou *corrente fotogerada*.

Uma questão que deve ser ressaltada é que nem todos portadores de carga gerados pela absorção dos fótons presentes na radiação solar incidente (com $E_F \geq E_G$) sobre a célula fotovoltaica são capazes de contribuir em última instância para corrente fotogerada. Quando o fóton é absorvido muito profundamente, há uma grande probabilidade do elétron livre gerado se recombinar com uma lacuna presente na *camada p* antes de alcançar a região de depleção e ser atraído por ação do campo elétrico local para *camada n*. De maneira análoga, em função do alto nível de dopagem da *camada n*, tem-se que quando o fóton é absorvido próximo a sua superfície, fora da região de depleção, há uma grande probabilidade da lacuna gerada ser preenchida por um dos inúmeros elétrons livres presentes na camada ou mesmo oriundo dos contatos metálicos, antes que esta alcance a *camada p*. Além disso, a superfície da *camada n* é propriamente considerada uma *zona morta*, uma vez que as imperfeições inerentes das bordas de estruturas cristalinas, tal como ligações interatômicas abertas, somadas aos defeitos estruturais ocasionados pelos processos de corte industrial, favorecem de sobremaneira o predomínio dos processos de recombinação (MERTENS, 2013; HONSBURG; BOWDEN, 2019).

Embora as características construtivas das camadas da célula fotovoltaica ocasionem tais situações de não aproveitamento de parte dos portadores de carga gerados pela absorção dos fótons presentes na radiação solar incidente, tem-se que no âmbito global, estas são determinadas para maximizar eficiência operacional da célula. Desse modo, tem-se que a *camada n* comumente adotada para ser a camada frontal da *junção pn* que caracteriza a célula fotovoltaica pelo fato de tipicamente apresentar uma superfície de melhor qualidade do que a *camada p* (HONSBURG; BOWDEN, 2019). Seu alto e preciso nível de dopagem tem por objetivo minimizar a resistência verificada pelos elétrons ao transitarem em seu interior até os contatos metálicos. Além disso, a sua fina espessura proporciona que a absorção dos fótons mais energéticos presentes na radiação solar incidente, tal como os referentes à cor azul, se dê propriamente na região de depleção da célula. Por outro lado, a maior espessura da *camada p* em conjunto com o seu menor nível de dopagem, promove mediante a condição de neutralidade atribuída à célula fotovoltaica, um aprofundamento da região de depleção. Tal situação favorece a absorção dos fótons de maior comprimento de onda contidos na radiação solar, tal como os referentes à cor vermelho.

Diante desses fatos, torna-se pertinente destacar que a presença de impurezas indesejadas no material de silício cristalino essencialmente utilizado para fabricação da célula fotovoltaica provoca um desequilíbrio do número de elétrons ou lacunas no seu entorno, de modo que a probabilidade de um portador de carga ao passar por esta região sofrer uma recombinação aumenta consideravelmente. A presença dessas impurezas indesejadas, portanto, estabelece verdadeiros *centros de recombinação* no interior da célula, afetando a intensidade da corrente fotogerada (MERTENS, 2013).

Aproveitamento Espectral Típico das Células Fotovoltaicas de Silício Cristalino

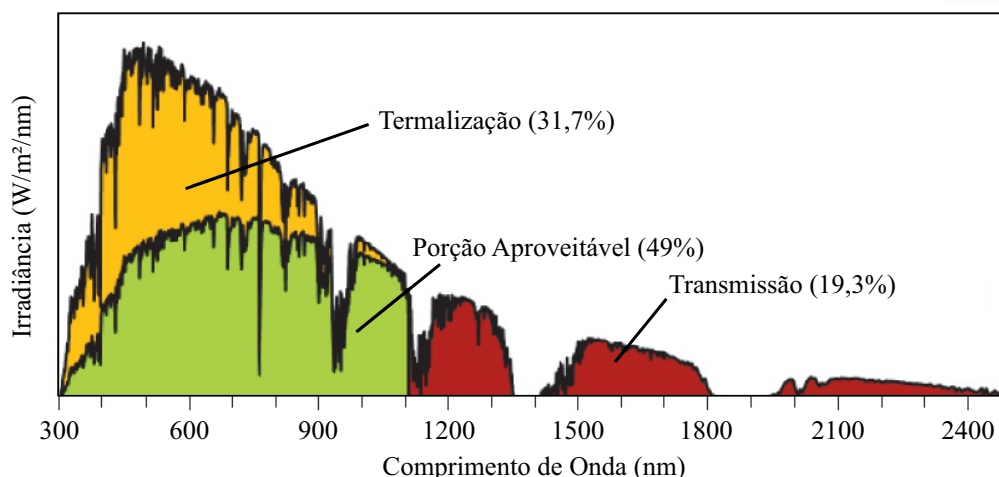


Figura 5 – Aproveitamento espectral típico de uma célula fotovoltaica de silício cristalino, considerando um espectro padrão de 1,5 AM para a radiação solar.

Fonte: Adaptado de MERTENS (2013).

Além dessas questões relacionadas aos aspectos construtivos da célula fotovoltaica, tem-se que outros dois fatores preponderantes ao seu desempenho são: a sua temperatura de operação e as próprias características da radiação solar incidente.

Ao que diz respeito a sua temperatura de operação, tem-se conforme mencionado na subseção 2.1.1, que o seu aumento provoca um incremento do número de elétrons e lacunas presentes no material semiconductor. Se por um lado, tal situação contribui positivamente para a formação da corrente fotogerada, tem-se por outro, que esta ocasiona um crescimento exponencial dos processos de recombinação ao longo de toda célula fotovoltaica, prejudicando o acúmulo de portadores de carga na região depleção e, conseqüentemente, a intensidade do seu campo elétrico interno e da sua tensão terminal (HÄBERLIN, 2012; HONSBURG; BOWDEN, 2019). Como este último efeito é mais significativo, tem-se que a elevação da temperatura de operação da célula, para uma condição constante de radiação solar incidente e de carga, provoca um impacto negativo sobre o desempenho da célula fotovoltaica (ZILLES et al., 2012; HONSBURG; BOWDEN, 2019).

Já ao que se refere às características da radiação solar incidente, tem-se que o aumento da sua intensidade representa um maior número de fótons incidindo sobre célula e, conseqüentemente, em uma corrente fotogerada proporcionalmente mais intensa. Todavia, tal consideração só é válida a rigor, se considerado o aumento da intensidade da radiação solar incidente para uma distribuição espectral fixa. Caso tal aumento transcorra exclusivamente em comprimentos de onda cujos fótons detenham $E_F \leq E_G$, por exemplo, nenhum efeito será observado sobre a corrente e a tensão terminal da célula fotovoltaica. Nesse contexto, a Figura 5 apresenta como os comprimentos de onda da radiação solar, nas respectivas intensidades verificadas em um espectro padrão, sensibilizam uma célula fotovoltaica de silício cristalino. Um fato que se destaca nela, é que somente cerca da metade da energia contida nesta radiação solar incidente é capaz de

contribuir para geração de energia elétrica. Além disso, os mais de 30% dos fótons absorvidos que ocasionam os processos de termalização posteriormente, favorecem o aquecimento da célula, o que conseqüentemente prejudica o seu desempenho.

Dessa forma, tem-se que o comportamento elétrico de uma célula fotovoltaica em operação é comumente descrito por meio de suas curvas características de corrente-tensão ($I-V$) e potência-tensão ($P-V$). Essas curvas características podem ser obtidas experimentalmente em laboratório ou em campo (PEARSALL, 2016), através da variação da carga conectada nos terminais da célula fotovoltaica e tendo em vista uma condição específica de radiação solar incidente e temperatura de operação. A Figura 6 apresenta um exemplo destas curvas características.

Assim como é destacado na Figura 6, as células fotovoltaicas possuem *três pontos notáveis de operação*: curto-circuito (em inglês, "*short-circuit*" - SC), circuito aberto (em inglês, "*open-circuit*" - OC) e máxima transferência de potência (em inglês, "*maximum power point*" - MPP ou, simplesmente, MP). No primeiro, a corrente elétrica verificada nos terminais da célula para a dada condição de radiação solar incidente e temperatura de operação é máxima, entretanto, como nenhuma tensão é verificada entre seus terminais, tem-se que a transferência de potência desta para a carga é nula (I_{SC}). Já no segundo, a tensão verificada entre seus terminais é máxima (V_{OC}), todavia, como não há circulação de corrente ou mesmo uma carga conectada, tem-se que a referida transferência de potência também é nula.

Em qualquer outra situação que não seja caracterizada por estes dois pontos de operação, tem-se que certos níveis intermediários de tensão e corrente são simultaneamente verificados nos terminais da célula fotovoltaica, sendo esta determinada fundamentalmente pela impedância da carga e pela qualidade dos materiais e recursos empregados na fabricação da célula. Não obstante, existe uma condição de carga na qual ocorre a máxima transferência de potência da célula para a carga. O ponto de operação que caracteriza tal condição, é denominado *ponto de máxima potência*, e tipicamente ocorre em um nível de tensão (V_{MP}) e corrente (I_{MP}) situados no joelho da curva $I-V$ e, naturalmente, no nível de potência (P_{MP}) associado ao ápice da curva $P-V$.

Finalmente, para fins de esclarecimento, é pertinente comentar que a medição da radiação solar incidente na célula fotovoltaica ou em qualquer ponto da superfície terrestre é normalmente realizada por meio de dispositivos, tal como os piranômetros de termopilha e as células de referência, os quais são capazes de retornar somente o valor integralizado das potências associadas a cada comprimento de onda que a caracteriza, sendo este expresso por unidade de área (DUNN; GOSTEIN; EMERY, 2012; INPE, 2019). Uma vez que estas medidas de *irradiância solar* se demonstram suficientes para a maioria dos estudos relacionados à geração fotovoltaica (e mesmo para estudos ambientais), tem-se que esta é a medida padrão da radiação solar adotada pelo setor (PEARSALL, 2016). Logo, exceto quando levantada em laboratório, as curvas características das células fotovoltaicas (ou qualquer outro porte de gerador fotovoltaico) são tipicamente referenciadas por uma condição de irradiância solar incidente.

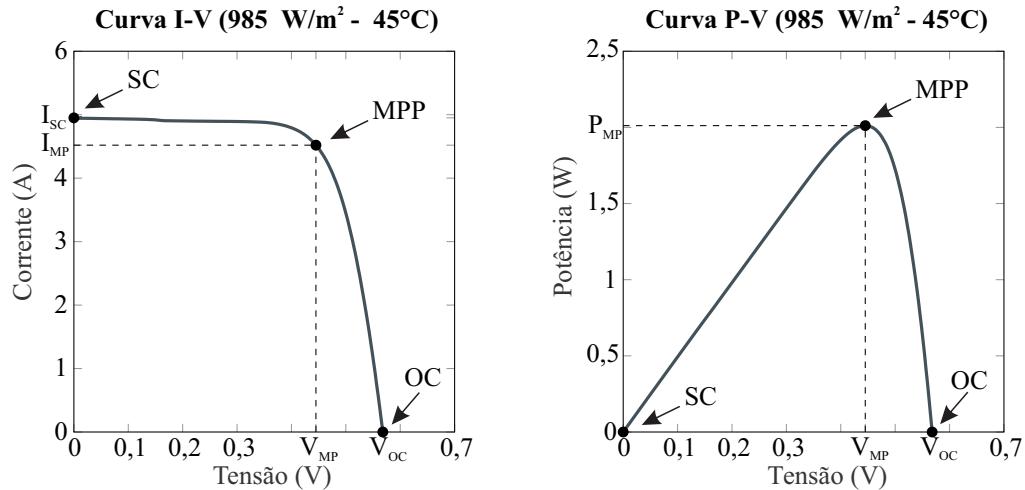


Figura 6 – Curvas características $I-V$ e $P-V$ de uma célula fotovoltaica de silício monocristalino operando sob uma irradiância solar incidente de 985 W/m^2 e uma temperatura de 45°C .

Fonte: Próprio autor, a partir dos dados providos por MARION et al. (2014).

2.1.3 Associações de Células Fotovoltaicas

Assim como pode se verificar na Figura 6, as células fotovoltaicas de silício cristalino são tipicamente capazes de produzir níveis de tensão e corrente bastante reduzidos para o contexto de geração de energia elétrica útil. Desse modo, com intuito de obter níveis de potência mais elevados, tem-se que um determinado número de células fotovoltaicas são normalmente associadas e instaladas no chamado *módulo fotovoltaico* que, por sua vez, é o dispositivo de geração fotovoltaica propriamente comercializado ao consumidor final.

Tendo em vista os princípios operacionais descritos, tem-se que em uma associação em série de N_c células fotovoltaicas, a sua tensão terminal (V_{serie}) é determinada pelo somatório das suas tensões terminais (V_{cel}), enquanto a corrente elétrica verificada no conjunto (I_{serie}) é essencialmente a mesma produzida por uma única célula (I_{cel}). Ou seja:

$$\begin{aligned} V_{serie} &= V_{cel,1} + V_{cel,2} + \dots + V_{cel,N_c} \\ I_{serie} &= I_{cel,1} = I_{cel,2} = \dots = I_{cel,N_c} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Já em uma associação paralelo, a situação contrária é verificada, isto é, a tensão do conjunto formado ($V_{paralelo}$) é a mesma de uma única célula fotovoltaica e a corrente verificada no conjunto ($I_{paralelo}$) é resultante do somatório das correntes fornecidas por cada célula. Logo:

$$\begin{aligned} V_{paralelo} &= V_{cel,1} = V_{cel,2} = \dots = V_{cel,N_c} \\ I_{paralelo} &= I_{cel,1} + I_{cel,2} + \dots + I_{cel,N_c} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Ciente dessas particularidades elétricas e visando uma menor perda ôhmica, tem-se que os módulos fotovoltaicos são normalmente compostos por 60 ou 72 células fotovoltaicas conectadas em série (VDMA, 2017) - sendo comum, entretanto, encontrar módulos fabricados até o início desta década com 36 células (ZILLES et al., 2012).

Assim como demonstra a Figura 7, esta associação de células em série normalmente é envolvida por um material *encapsulante*, tal como etileno-acetato de vinila (EVA), o qual é responsável por protegê-las da umidade e dos demais agentes externos, otimizar a sua condução elétrica, e preencher os espaços existentes entre a associação e os substratos posterior e frontal do módulo (TOLMASQUIM et al., 2016; HONSBURG; BOWDEN, 2019).

O substrato posterior ou, em termo derivado do inglês, *backsheet*, é geralmente formado por um polímero fino, como o tedlar, o qual reforça a sua isolamento física e elétrica (HONSBURG; BOWDEN, 2019). Em contrapartida, o substrato frontal do módulo é normalmente caracterizado por um vidro temperado, com baixo teor de ferro, 2 ou 3 mm de espessura, e que apresenta uma baixa refletância e uma alta transmitância especialmente, nos comprimentos de onda associados à faixa de resposta espectral das células (HONSBURG; BOWDEN, 2019; VDMA, 2017). Este vidro tem a função de conferir proteção mecânica ao módulo contra os agentes externos, refletindo o mínimo possível da radiação solar incidente.

Vale comentar que embora, teoricamente, essa reflexão possa ser minimizada pela aplicação de um revestimento tal como o empregado nas células fotovoltaicas, na prática, os materiais utilizados para esta finalidade não são robustos o suficiente para resistir às condições ambientais que a maioria dos módulos fotovoltaicos são expostos em condições normais de operação. Uma técnica alternativa para reduzir a reflexão também seria a texturização a superfície. No entanto, neste caso, a poeira e a sujeira normalmente verificada na superfície dos módulos fotovoltaicos ficariam mais propensas a se prender nesta do que serem "varridas" pela ação do vento ou da chuva. Logo, os ganhos de eficiência obtidos com a redução da reflexão seriam rapidamente suprimidos pelas perdas incorridas da obstrução da incidência da radiação solar sobre às células fotovoltaicas (HONSBURG; BOWDEN, 2019).

Posto isto, tem-se que as bordas dos módulos fotovoltaicos são normalmente compostas por uma moldura de alumínio, a qual viabiliza a sua fixação em estruturas de suporte no

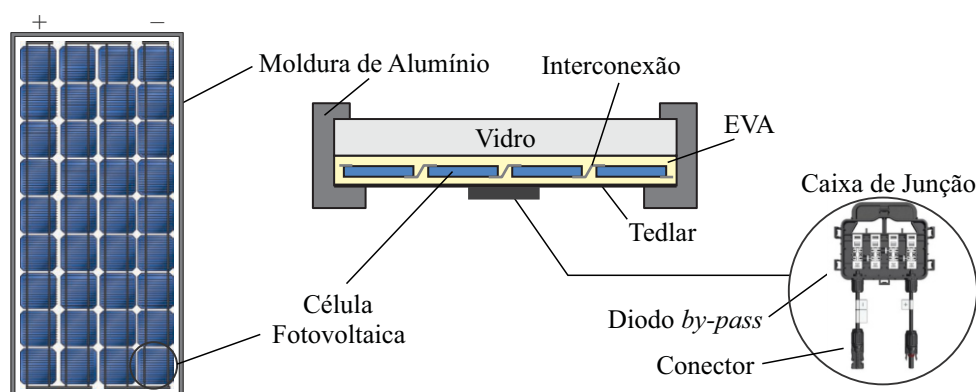


Figura 7 – Composição típica de um módulo fotovoltaico de silício cristalino: à esquerda, sua visão frontal; no centro, uma visão da sua seção lateral; e à direita, uma visão da sua caixa de junção quando aberta.

Fonte: Próprio autor.

ambiente externo. Concomitante à moldura, um material selante é empregado para uni-la ao conjunto formado pela associação de células fotovoltaicas, material encapsulante e substratos, evitando a entrada de gases e umidade, e protegendo o interior de vibrações e choques mecânicos (TOLMASQUIM et al., 2016).

O último componente de um módulo fotovoltaico é a caixa de junção. Fixada externamente ao *backsheet*, é por meio dela que se tem acesso aos terminais elétricos do módulo e, portanto, é dela que partem os cabos terminais dos polos positivo e negativo da associação de células conectadas em série que o caracteriza. Por questões de padronização, as extremidades de conexão desses cabos são concebidas com conectores tipo *MC-3*, *MC-4*, ou similares. Além disso, é na caixa de junção que se encontram os dispositivos de proteção do módulo, como os *diodos de derivação* ou *diodos by-pass*. Mais informações a respeito destes dispositivos podem ser encontradas em HÄBERLIN (2012) e MERTENS (2013).

Uma vez que os módulos fotovoltaicos são os dispositivos de geração fotovoltaica comercialmente disponíveis para o consumidor final, tem-se como no caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, por exemplo, que *arranjos* costumam ter que ser formados a partir de suas interconexões em série e/ou paralelo, vide (2.2) e (2.3), para atender de maneira suficiente ou otimizada os limites operacionais de entrada do inversor empregado na sua composição (ZILLES et al., 2012; DEOTTI; GOMES, 2018).

Assim, tem-se que a interconexão dos módulos em série é realizada visando elevar o nível de tensão nos terminais do conjunto, o qual, neste caso recebe o nome particular de *string fotovoltaica*. Nos inversores modernos a tensão de entrada limite chega no máximo a ser de 1.000 V (VDMA, 2017), logo, dependendo da sua potência de entrada limite, tem-se que eventualmente as *strings* podem ainda ser interconectadas em paralelo visando alcançar níveis maiores de corrente e, conseqüentemente, de potência entregue pelo arranjo ao inversor do sistema.

Dado esse contexto, é interessante destacar que assim como no caso das células fotovoltaicas, tanto o módulo quanto a *string* ou arranjo fotovoltaico, têm seu comportamento elétrico descrito pelas curvas características *I-V* e *P-V*. Nesse sentido, a Figura 8 demonstra as curvas *I-V* e *P-V* levantadas para um módulo fotovoltaico formado por 36 células de silício monocristalino semelhantes ao da Figura 6. Além disso, nesta ainda são apresentadas as diferentes curvas características esperadas no caso de 5 ou 10 unidades deste módulo serem utilizados para formar uma *string* ou um arranjo fotovoltaico, respectivamente.

Para fins de complementariedade, é interessante comentar que idealmente a temperatura de operação de um módulo ou de um gerador fotovoltaico de maior porte deveria ser realizada diretamente a partir das células fotovoltaicas que o compõe. Todavia, como o acesso ou mesmo a medição de todas estas é algo praticamente inviável, tem-se que a medição da sua temperatura de operação é comumente realizada por meio de um ou mais sensores termopar estrategicamente instalados no *backsheet* de um ou mais dos seus módulos fotovoltaicos (PEARSALL, 2016;

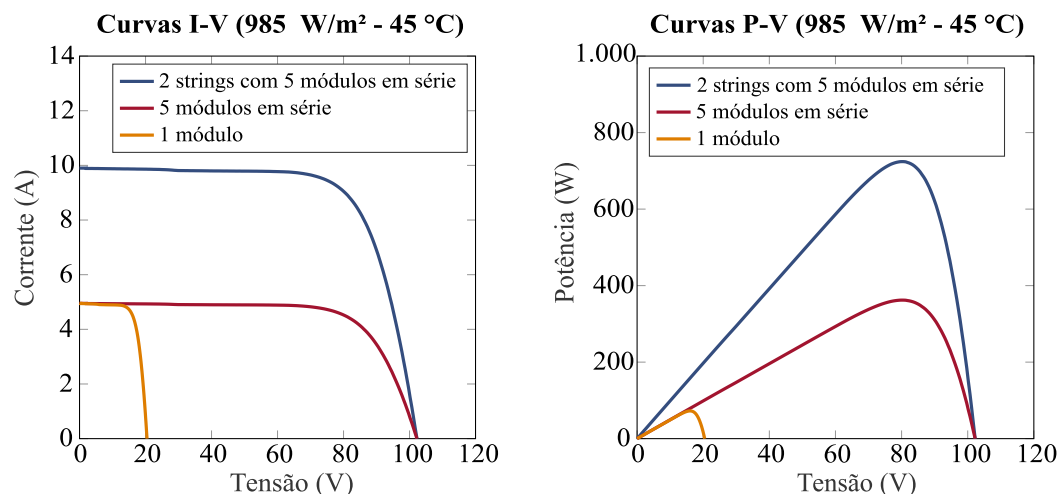


Figura 8 – Curvas características $I-V$ e $P-V$ de um módulo fotovoltaico de silício monocristalino operando sob uma irradiância solar incidente de 985 W/m^2 e uma temperatura de 45°C ; e de duas possíveis configurações de arranjo para este.

Fonte: Próprio autor, a partir dos dados providos por MARION et al. (2014).

ROSSA; MARTÍNEZ-MORENO; LORENZO, 2018). Logo, como tais medições se demonstram suficientes para a maioria dos estudos relacionados à geração fotovoltaica, tem-se que a temperatura de operação das células fotovoltaicas são convenientemente assumidas como sendo similares às aquelas obtidas por meio de tal procedimento.

2.2 MODELAGEM DO DESEMPENHO DE GERADORES FOTOVOLTAICOS

A modelagem matemática do desempenho energético de um gerador fotovoltaico, seja este composto por uma célula ou por uma associação destas, é realizada com base no fluxo de potência que este apresenta em uma determinada condição de operação. Assim, tomando como base todo conteúdo apresentado na seção anterior, tem-se que a irradiância solar incidente caracteriza essencialmente a sua potência de entrada e, em contrapartida, a sua corrente e tensão terminal definem a sua potência de saída. Todavia, tal como em qualquer outro sistema físico real, tais potências não apresentam um mesmo valor, pois, no caso, diversas perdas de caráter ótico, ôhmico e por recombinação indesejada de portadores de carga, inevitavelmente ocorrem durante a sua operação.

As perdas óticas diretamente associadas ao gerador fotovoltaico são caracterizadas pela(s): (i) *reflexão* de parte da radiação solar incidente que inevitavelmente ocorre em sua superfície; (ii) *limitações espectrais* intrínsecas à tecnologia do material semiconductor empregado na sua fabricação. Conforme ilustra a Figura 9, estas perdas normalmente são tratadas externamente ao modelo representativo do gerador fotovoltaico, sendo seus impactos diretamente descontados do valor da irradiância solar incidente que se tem disponível. Os modelos matemáticos utilizados para estimar estes impactos e a forma como eles são descontados do valor da irradiância solar, são devidamente descritos em FREEMAN et al. (2016), REINDERS et al. (2017) e PARRA

et al. (2017). Uma vez feito isso, torna-se então conhecida a real oferta de irradiância solar disponível para ser convertida pelo gerador fotovoltaico em potência elétrica. Tal oferta, a qual é denominada de *irradiância solar efetiva*, é que utilizada como dado de entrada do modelo representativo do gerador fotovoltaico.

O modelo representativo do gerador fotovoltaico, por sua vez, é responsável por determinar o quanto desta irradiância solar efetiva será convertida em potência elétrica. Dessa forma, seja de maneira específica ou agregada, estes devem ser capazes de quantificar de modo escalável todos os impactos causados pelos diversos processos de perdas ôhmicas e por recombinação indesejada de portadores de carga que ocorrem durante a sua operação. Vale destacar que as perdas ôhmicas são essencialmente decorrentes das resistências verificadas pela corrente fotogerada durante o seu trânsito no interior do material semicondutor, na interface com os contatos metálicos, nos próprios contatos e ainda, no caso dos módulos e geradores fotovoltaicos de maior porte, nos cabos metálicos e elementos de proteção. E as perdas por recombinação indesejada dos portadores de carga, se caracterizam pelos fótons da irradiância solar efetiva que foram absorvidos e não contribuíram em última instância para a geração da corrente fotogerada e pelas "correntes de fuga" causadas pelos processos de recombinação verificados nas bordas dos material semicondutor e regiões próximas à impurezas estranhas.

Além disso, como as perdas ôhmicas e por recombinação são particularmente sensíveis a temperatura de operação do gerador fotovoltaico, tem-se que adicionalmente ao dado de irradiância solar efetiva, um dado de entrada referente temperatura de operação do gerador fotovoltaico também é comumente requerido pelos seus modelos representativos.

Nesse âmbito, é pertinente comentar que em situações onde não estão disponíveis dados da temperatura de operação do gerador fotovoltaico em estudo, ou ainda, referentes a irradiância solar incidente sobre ele, tem-se que estes podem ser satisfatoriamente estimados, tanto temporalmente quanto espacialmente, a partir de modelos e bancos de dados específicos. Mais informações a respeito, podem ser encontradas em SKOPLAKI; PALYVOS (2009), DUFFIE; BECKMAN (2013), MYERS (2013), SEGADO; CARRETERO; CARDONA (2015),

Modelagem do Desempenho Energético de Geradores Fotovoltaicos

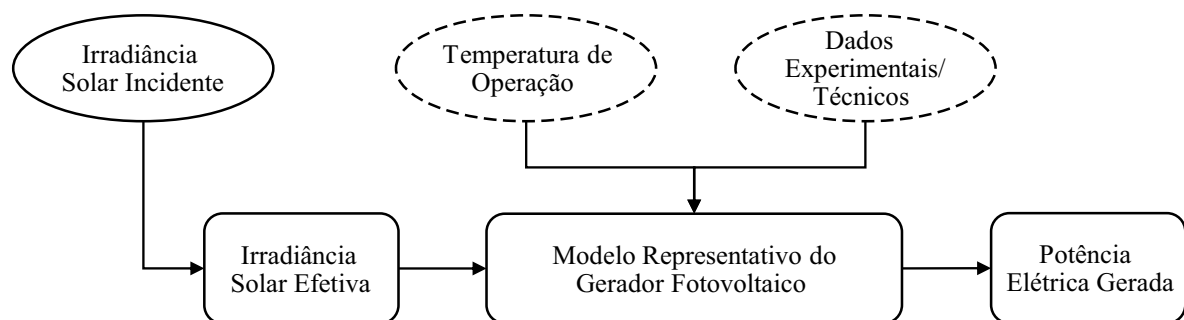


Figura 9 – Esquema geral de modelagem dos geradores fotovoltaicos.

Fonte: Próprio autor.

PEARSALL (2016), REINDERS et al. (2017) e SANTIAGO et al. (2018).

Feitas tais considerações, tem-se que os modelos representativos de geradores fotovoltaicos presentes na literatura são comumente classificados em duas principais categorias: os *modelos físicos* e os *modelos empíricos* (PARRA et al., 2017). Os modelos físicos buscam descrever o comportamento operacional de um gerador fotovoltaico a partir de um circuito elétrico equivalente, sendo que por meio da sua análise, torna-se possível obter uma equação paramétrica que represente de modo contínuo a relação $I-V$ verificada ou esperada nos terminais do gerador fotovoltaico (PEARSALL, 2016).

Os modelos empíricos, por sua vez, se caracterizam por expressões empíricas e/ou semi-empíricas que permitem estimar somente alguns pontos discretos da relação $I-V$ verificada ou esperada nos terminais de um gerador fotovoltaico, como principalmente os seus pontos notáveis de operação (SC, OC e MPP). Tais expressões podem ser inspiradas em certos fundamentos dos próprios modelos físicos (ARAUJO; SANCHEZ, 1982; ZHOU; YANG; FANG, 2007), observações do comportamento especificamente apresentado por cada ponto notável (OSTERWALD, 1986; KING; KRATOCHVIL; BOYSON, 2004; BATZELIS, 2019), ou como próprio nome da categoria sugere, por relações puramente empíricas (HEYDENREICH; MÜLLER; REISE, 2008; HULD et al., 2011; RANSOME; SUTTERLUETI, 2018).

Cada uma dessas categorias de modelos possuem suas forças e fraquezas. Os modelos físicos, por exemplo, são a melhor opção para estudos que se concentram na relação dos geradores fotovoltaicos com inversores ou outros dispositivos eletrônicos de conversão estática, pois, podem ser convenientemente implementados em *softwares* orientados à circuitos, tal como o PSPICE e o PSIM (SILVESTRE et al., 2014; BENDIB; BELMILI; KRIM, 2015; PEARSALL, 2016). Os modelos empíricos em contrapartida, são uma ótima opção para estudos de previsão de geração de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, uma vez que estes são computacionalmente mais simples e rápidos que os modelos físicos e permitem obter diretamente o MPP do gerador fotovoltaico - condição de operação esta que é satisfatoriamente garantida pelos inversores empregados neste tipo de sistema em situações adequadas de operação (PARRA et al., 2017; DEOTTI; GOMES, 2018). Todavia, por uma questão de maior afinidade com a engenharia e, também, por apresentar menos limitações ao seu emprego, tem-se que os modelos físicos são os mais amplamente empregados pelo setor fotovoltaico (CHIN; SALAM; ISHAQUE, 2015; PARRA et al., 2017).

Nesse contexto, tem-se que diante da similaridade existente entre a junção pn que caracteriza a célula fotovoltaica e a junção pn típica de um diodo tradicional, a maioria dos modelos físicos são caracterizados por um circuito elétrico equivalente que possui ao menos um diodo em sua composição; sendo estes, dessa forma, também chamados de *modelos de diodo* (PEARSALL, 2016).

Na literatura, observa-se que topologias de circuito elétrico equivalente formadas por um, dois ou três diodos, contendo quantidades e disposições distintas de elementos adicionais

resistivos e, menos comumente, reativos, se encontram disponíveis (CHIN; SALAM; ISHAQUE, 2015; JENA; RAMANA, 2015; ABBASSI et al., 2018). Cada um desses componentes representa uma característica física intrínseca do gerador fotovoltaico. Por exemplo, os diodos são normalmente empregados para representar os diferentes mecanismos de recombinação de portadores de carga verificados na *junção pn* da célula fotovoltaica; enquanto os elementos resistivos, podem representar tanto as perdas ôhmicas como as perdas promovidas pelas correntes de fuga existentes no gerador, a depender da sua disposição no circuito.

Uma vez concebido o circuito elétrico equivalente a ser utilizado na modelagem de um gerador fotovoltaico em estudo, tem-se conforme mencionado, que a partir da sua análise é possível determinar uma equação paramétrica representativa do comportamento elétrico do gerador fotovoltaico. A quantidade de parâmetros desta equação é diretamente proporcional ao número de elementos que compõe o circuito elétrico equivalente; logo, quanto maior for o número de componentes deste circuito, maior será a quantidade de parâmetros a serem determinados na equação que o descreve. Dessa forma, tem-se que por apresentar uma boa relação de compromisso entre a simplicidade e a precisão, o *modelo de um diodo* é o mais bem estabelecido no setor fotovoltaico (LAUDANI; FULGINEI; SALVINI, 2014; JORDEHI, 2016).

O modelo de um diodo é tipicamente caracterizado por um circuito elétrico equivalente formado por: uma fonte de corrente, um diodo em antiparalelo, uma resistência série e uma resistência paralelo (veja a Figura 11 no Capítulo 3). A equação decorrente da sua análise possui uma natureza não-linear e transcendente. Além disso esta é caracterizada por cinco parâmetros, os quais, se devidamente ajustados, o permitem representar desde uma célula fotovoltaica até o arranjo de uma grande central de geração fotovoltaica (PETRONE; RAMOS-PAJA; SPAGNUOLO, 2017). Por tal motivo, o modelo de um diodo quando descrito por esta típica topologia de circuito elétrico equivalente ¹ costuma ser também referenciado por *modelo de cinco parâmetros* (LAUDANI; FULGINEI; SALVINI, 2014).

Se conhecida as características de manufatura da célula fotovoltaica que compõe o gerador fotovoltaico em estudo, como propriedades físicas dos seus materiais semicondutores constituintes, concentração de meterias dopantes e características da sua resposta espectral, os valores dos cinco parâmetros do modelo de um diodo podem ser diretamente calculados (GREEN, 1982; MERTENS, 2013; PETRONE; RAMOS-PAJA; SPAGNUOLO, 2017; HONSBURG; BOWDEN, 2019). No entanto, as informações a respeito dessas características são praticamente inacessíveis para o público externo à indústria. Dessa forma, os valores dos parâmetros do modelo de um diodo são tipicamente determinados de maneira indireta, isto é, *extraídos* a partir de informações alternativas mais simples e acessíveis, como: (i) por meio do conjunto de pontos que caracterizam completamente uma curva *I-V* levantada experimentalmente em campo ou

¹ Na literatura é possível encontrar algumas variações da topologia de circuito elétrico equivalente descrita para o modelo de um diodo, como as apresentadas por BISHOP (1988), MERTEN et al. (1998) e PETRONE; RAMOS-PAJA; SPAGNUOLO (2017); contudo, os seus respectivos empregos somente são recomendados em casos particulares.

laboratório para um conjunto de condições operacionais conhecidas; e/ou (ii) através dos dados nominais tipicamente providos pela ficha técnica do módulo que compõe o gerador fotovoltaico em estudo.

Em relação aos dados tipicamente providos pela ficha técnica de um módulo fotovoltaico, tem-se que a Tabela 1 apresenta uma síntese destes. Conforme pode-se observar, os dados elétricos tipicamente fornecidos sobre comportamento elétrico do módulo são somente referentes aos pontos notáveis de uma de suas curvas $I-V$, a qual é levantada de forma padronizada em laboratório para um conjunto de condições conhecido como *condições padrão de teste* (em inglês, "*standard test conditions*" - STC) e que se define por: um nível de irradiância de 1.000 W/m^2 , incidente de modo normal ao módulo e com um espectro padrão de 1,5 AM; e uma temperatura de operação do módulo de 25°C (PEARSALL, 2016). Além disso, é interessante notar que a potência nominal do módulo fotovoltaico é definida pelo MPP da referida curva $I-V$, sendo, portanto, sua unidade figurativamente dada em watt-pico (Wp). Os procedimentos e normas estabelecidas para o levantamento dessa curva $I-V$ e para determinação dos parâmetros térmicos do módulo fotovoltaico são apresentados em PEARSALL (2016).

Na literatura, inúmeros métodos de extração dos parâmetros do modelo de um diodo já foram propostos, conforme revisado por: CHIN; SALAM; ISHAQUE (2015), JENA; RAMANA (2015), JORDEHI (2016), ABBASSI et al. (2018), KUMARI; GEETHANJALI (2018) e BATZELIS (2019). Apesar desses autores classificarem tais métodos de maneira por vezes conflitante (BATZELIS, 2019), observa-se que estes podem ser essencialmente divididos de acordo com a abordagem adotada para a resolução do problema de extração entre: *métodos de ajuste de curvas e métodos analíticos*.

Os métodos de ajuste de curvas são empregados sobretudo na extração dos parâmetros via dados experimentais da curva $I-V$. Uma vez que estes dados são caracterizados por um determinado número de pares $\{I, V\}$ medidos nos terminais do gerador fotovoltaico em estudo para várias condições de carga e em uma condição específica de irradiância solar incidente e temperatura de operação, tem-se que esses métodos fundamentalmente formulam o problema de

Tabela 1 – Características elétricas e térmicas comumente apresentadas na ficha técnica de um módulo fotovoltaico.

Parâmetro	Unidade
Potência elétrica máxima ou nominal	Wp
Corrente de máxima potência	A
Tensão de máxima potência	V
Corrente de curto-circuito	A
Tensão de circuito aberto	V
Coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito	$1/^\circ\text{C}$ ou $\%/^\circ\text{C}$ ou $\text{A}/^\circ\text{C}$
Coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto	$1/^\circ\text{C}$ ou $\%/^\circ\text{C}$ ou $\text{V}/^\circ\text{C}$
Coeficiente de temperatura da máxima potência	$1/^\circ\text{C}$ ou $\%/^\circ\text{C}$ ou $\text{W}/^\circ\text{C}$

Fonte: Próprio autor.

extração dos parâmetros tal como um problema de otimização, no qual o objetivo é encontrar os valores que habilitam o modelo de um diodo a reproduzir os respectivos pontos medidos da curva $I-V$ com um menor índice de erro possível. Contudo, pelo fato dos parâmetros do modelo de um diodo terem um compromisso com os seus significados físicos e pela equação descritiva do modelo possuir uma natureza não-linear, tem-se que o problema de otimização resultante desta abordagem é contínuo, multidimensional, restrito, altamente não-linear e multimodal (LAUDANI; FULGINEI; SALVINI, 2014; JORDEHI, 2016).

Em vista disso, tem-se que os métodos de ajuste de curvas se diferenciam essencialmente pela técnica que adotam para resolução desse problema de otimização. Na literatura, diversas técnicas determinísticas já foram consideradas, sendo estas baseadas principalmente no método de Newton-Raphson (EASWARAKHANTHAN et al., 1986; CHEGAAR; OUENNOUGHI; HOFFMANN, 2001), na função W de Lambert² (ORTIZ-CONDE; SÁNCHEZ; MUCI, 2006) e propriamente em processos de ajuste iterativo de curvas (CHAN; PHILLIPS; PHANG, 1986; BOUZIDI; CHEGAAR; BOUHEMADOU, 2007; TOLEDO; BLANES; GALIANO, 2018). Todavia, o fato dessas técnicas de otimização serem altamente sensíveis aos valores inicialmente atribuídos para os parâmetros do modelo de um diodo, faz com que frequentemente estas fiquem "aprisionadas" em mínimos locais ou mesmo não converjam para uma solução factível (EASWARAKHANTHAN et al., 1986; CHEGAAR; OUENNOUGHI; HOFFMANN, 2001; CHIN; SALAM; ISHAQUE, 2015; CHEN; YU, 2019). Dessa forma, observa-se que principalmente na última década, o emprego de técnicas de metaheurísticas tem sido amplamente explorado pelos métodos publicados na literatura (CHIN; SALAM; ISHAQUE, 2015; ABBASSI et al., 2018; BATZELIS, 2019).

É válido mencionar que diferentemente das técnicas determinísticas, as técnicas metaheurísticas se caracterizam por algoritmos probabilísticos, os quais são inspirados na dinâmica comportamental de algum fenômeno observado na natureza, tal como a inteligência coletiva de um espécie de animal ou processo físico de cozimento industrial de um metal (YANG, 2014); e normalmente não exigem condições de continuidade, diferenciabilidade e/ou convexidade do problema em questão (YANG, 2014; JORDEHI, 2016). Sendo assim, estas técnicas constituem uma valiosa ferramenta de resolução de problemas multimodais, tal como o considerado (YANG, 2014; YANG, 2017).

Ao que diz respeito aos métodos analíticos, tem-se que estes são predominantemente empregados na extração dos parâmetros via dados da ficha técnica (vide Tabela 1). Dessa forma, estes convencionalmente se caracterizam pela resolução de um sistema não-linear composto por cinco equações independentes, as quais são baseadas na aplicação dos dados da ficha técnica na equação descritiva do modelo de um diodo e em equações auxiliares provenientes da análise comportamental das curvas características dos geradores fotovoltaicos (SOTO; KLEIN;

² Mais informações a respeito da aplicação da função W de Lambert sobre o modelo de um diodo podem ser encontradas em JAIN; KAPOOR (2005) e BATZELIS et al. (2019).

BECKMAN, 2006; BRANO et al., 2010; TIAN et al., 2012; BRANO; CIULLA, 2013; NAYAK; MOHAPATRA; MOHANTY, 2013; KUMAR; KUMAR, 2017). De maneira alternativa, tem-se ainda que alguns métodos analíticos visando obter uma maior precisão de extração, consideram a resolução de um sistema não-linear expandido, isto é, formado por mais do que cinco equações e, eventualmente, ainda considerando incógnitas adicionais (BOYD et al., 2011; DOBOS, 2012; MA; YANG; LU, 2014a).

De modo geral, estes sistemas não-lineares de cinco ou mais equações são resolvidos por meio de técnicas tradicionais de determinação de raízes, tal como os métodos de Bisseção e Newton-Raphson (BRANO; CIULLA, 2013), ou de modo mais cômodo, através de ferramentas presentes em *softwares* populares do setor, tal como o *engineering equation solver* (EES) presente no F-chart (SOTO; KLEIN; BECKMAN, 2006) e o *fsolve* presente no Matlab (TIAN et al., 2012). No entanto, essas técnicas e ferramentas de determinação de raízes sofrem com problemas de inicialização e não-convergência, o que põe em risco aplicabilidade do modelo de um diodo na modelagem de um gerador fotovoltaico em um estudo (DOBOS, 2012; CIULLA et al., 2014).

Ciente dessa situação, diversos autores propõem que a extração dos parâmetros do modelo de um diodo seja realizado a partir da resolução de um sistema não-linear reduzido, formado por um número menor de equações e que possui um espaço de solução mais bem comportado ou mesmo convexo (SERA; TEODORESCU; RODRIGUEZ, 2007; VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009; CHATTERJEE; KEYHANI; KAPOOR, 2011; LAUDANI et al., 2013; LAUDANI; FULGINEI; SALVINI, 2014; HEJRI; MOKHTARI, 2016). Nestes métodos analíticos reduzidos, os cinco parâmetros do modelo de um diodo são divididos em parâmetros independentes e dependentes, onde: os primeiros são normalmente os determinados a partir da resolução do sistema não-linear proposto pelo método ou através da imposição direta do seu valor; enquanto os últimos são determinados a partir de equações aproximadas ou manipuladas algebricamente em função dos parâmetros independentes (LAUDANI et al., 2013).

A fim de obter uma praticidade ainda maior, outros autores vão além e defendem que a extração dos parâmetros do modelo de um diodo seja realizado a partir de equações que possam ser resolvidas sequencialmente. Para tanto, estes recorrem a aproximações e manipulações matemáticas razoáveis (ARAB; CHENLO; BENGHANEM, 2004; SENTURK; EKE, 2017), ao auxílio de versões simplificadas do modelo de um diodo (BAI et al., 2014) e ao uso de instrumentos matemáticos, tal como a função W de Lambert (BATZELIS, 2017).

É pertinente comentar que alguns trabalhos recentemente publicados tem recorrido ao emprego de técnicas metaheurísticas para resolução do sistema não-linear que especificamente caracteriza um método analítico. Contudo, observa-se na ampla revisão realizada por JORDEHI (2016), que tal prática tem sido realizada de maneira ainda bastante incipiente e em um contexto um tanto quanto questionável, uma vez que na maioria dos casos o sistema não-linear do método analítico considerado é da forma reduzida.

Em FILHO; FRANCO; VIEIRA (2018), por exemplo, uma técnica metaheurística

inspirada no fenômeno da bioluminescência de vaga-lumes, o *algoritmo de vagalumes* (em inglês, "*firefly algorithm*" - FA), é empregado para resolver o método analítico reduzido desenvolvido por LAUDANI; FULGINEI; SALVINI (2014); entretanto, conforme demonstrado pelos próprios resultados apresentados no trabalho, o sistema não-linear característico deste método, por ter um espaço de solução convexo, é prontamente resolvido pelo algoritmo determinístico de Levenberg-Marquadt (algoritmo padrão da ferramenta *fsolve* presente no Matlab), sem apresentar qualquer problema de convergência e alcançando em termos práticos, a mesma ordem de precisão que o FA para um determinado número de iterações considerado. Logo, o emprego da técnica metaheurística na resolução do método analítico considerado é algo que pode ser tido como meramente facultativo.

2.3 MÉTODOS METAHEURÍSTICOS DE EXTRAÇÃO DOS PARÂMETROS

Assim como apresentado na seção anterior, as técnicas de otimização metaheurísticas são principalmente empregadas para resolução dos problemas de otimização que caracterizam os métodos de extração dos parâmetros do modelo de um diodo classificados como métodos de ajuste de curvas. Não obstante, tal emprego tem sido realizado de maneira tão prevalente, que certos autores costumam avaliar os ditos *métodos metaheurísticos* ou *bio-inspirados* como um grupo à parte, sendo os demais métodos de ajuste de curvas pautados em técnicas determinísticas tratados somente por *métodos numéricos* (PIAZZA; VITALE, 2012; MA et al., 2016); ou aglomerados junto à outros métodos de extração analíticos não-sequenciais na composição de um novo grupo, o qual é genericamente referenciado por *métodos iterativos* (ABBASSI et al., 2018).

Nesse âmbito, a Figura 10 apresenta a estrutura lógica típica de um método metaheurístico de extração dos parâmetros do modelo de um diodo. A função objetivo do problema de otimização, a qual também é comumente chamada neste contexto de *função de aptidão* (em alusão ao termo em inglês, "*fitness function*"), é normalmente caracterizada por uma métrica de erro, tal como a raiz do erro quadrático médio (em inglês, "*root mean square error*" - RMSE) ou o *erro médio absoluto* (em inglês, "*mean absolute error*" - MAE) (JORDEHI, 2016).

Dessa forma, tem-se que inicialmente a técnica metaheurística é responsável por gerar de maneira habitualmente aleatória um conjunto com determinado número de candidatas à solução ótima. Cada uma dessas candidatas é caracterizada por um vetor de cinco elementos, onde cada um destes é propriamente referente a um dos cinco parâmetros do modelo de um diodo. Uma vez gerado esse conjunto inicial, tem-se que cada uma de suas candidatas é avaliada pela função de aptidão que, por sua vez, aplica os valores atribuídos por estas na equação descritiva do modelo de um diodo e avalia o seu respectivo desempenho na reprodução dos pontos da curva *I-V* que se tem disponível do gerador fotovoltaico em estudo. A partir desta avaliação, a técnica metaheurística gera então um novo conjunto de candidatas à solução ótima, de modo que algumas

Métodos Metaheurísticos de Extração dos Parâmetros

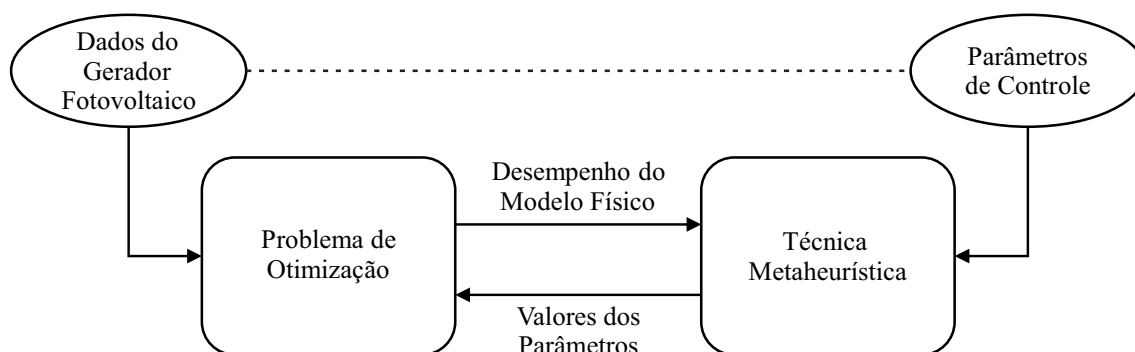


Figura 10 – Estrutura lógica típica dos métodos metaheurísticos de extração dos parâmetros do modelo de um diodo via dados experimentais.

Fonte: Próprio autor.

destas tipicamente se aproximam da candidata melhor avaliada no conjunto anterior - podendo esta ser ou não repassada para este novo grupo - e outras, se dispersam aleatoriamente no espaço de solução, buscando averiguar se nessas regiões inexploradas ou pouco exploradas, existem soluções potencialmente boas. Esse novo conjunto gerado é então novamente avaliado pela função de aptidão e todo o processo descrito é reiterado até que certo critério de convergência adotado seja satisfeito.

É importante destacar que esse mecanismo de aproximação da candidata melhor avaliada anteriormente e de exploração do espaço de solução durante a geração de um novo conjunto é uma característica marcante das técnicas metaheurísticas (YANG, 2014). Todavia, as estratégias e dinâmicas desenvolvidas por esse mecanismo, o qual é mais formalmente definido como de *intensificação* e *diversificação* do processo de busca da solução ótima, são justamente determinados pela analogia matemática que a respectiva técnica estabelece com o fenômeno da natureza na qual esta se inspira. Nesse sentido, é interessante mencionar que alguns *parâmetros de controle* relacionados a este mecanismo normalmente precisam ser ajustados previamente a aplicação de uma técnica metaheurística, sendo a quantidade destes, a complexidade de determinação e a generalidade dos seus valores, questões particulares de cada técnica.

Em vista disso, tem-se que inúmeras técnicas metaheurísticas já foram empregadas em trabalhos da literatura, com intuito de averiguar se seus respectivos mecanismos de busca são capazes de prover soluções satisfatórias, ou ainda, de maneira mais rápida, robusta e efetiva que outras técnicas metaheurísticas e determinísticas empregadas anteriormente na extração dos parâmetros de um gerador fotovoltaico em questão.

Em ZAGROUBA et al. (2010), por exemplo, o popular *algoritmo genético* (em inglês, "*genetic algorithm*" - GA) é empregado na extração dos parâmetros do modelo de um diodo. Proposto ainda na década de 1970 pelo professor americano John Henry Holland, o GA é inspirado na Teoria da Evolução das Espécies proposta por Charles Darwin, e se caracteriza

essencialmente por tratar os valores de uma candidata à solução ótima (cromossomos de um indivíduo) de forma binária, e pelos processos de seleção, cruzamento e mutação (LINDEN, 2008). Os resultados obtidos no trabalho demonstraram que com menos de dez iterações (ou gerações), as soluções obtidas pelo GA habilitavam o modelo de um diodo a representar com um bom nível de precisão, sobretudo, os MPPs das respectivas curvas *I-V* levantadas experimentalmente nos terminais de uma célula e de um módulo fotovoltaico.

Já em COSTA et al. (2010), a técnica de *evolução diferencial* (em inglês, "*differential evolution*" - DE) é empregado na extração dos parâmetros dos módulos fotovoltaicos Kyocera KC85T e Kyocera KC50, sendo que no caso do primeiro, a curva *I-V* utilizada para a modelagem foi alternativamente obtida através da digitalização da curva *I-V* excepcionalmente provida de forma gráfica em sua ficha técnica. O DE foi essencialmente desenvolvido por STORN; PRICE (1997) e pode ser considerado como uma variação do GA, a qual, dentre outras diferenças, trata uma solução candidata como um valor real e não por sua representação binária. Os resultados reportados no trabalho demonstraram que as soluções encontradas pelo DE habilitavam o modelo de um diodo a reproduzir de maneira satisfatória as respectivas curvas *I-V* consideradas.

Em YE; WANG; XU (2009), a técnica de *otimização por exame de partículas* (em inglês, "*particle swarm optimization*" - PSO) é empregado na extração dos parâmetros do modelo de um diodo, tendo em vista uma curva *I-V* sintética. O PSO foi proposto por KENNEDY; EBERHART (1995) e se baseia no comportamento social associado a cada indivíduo de um bando de pássaros ou de um cardume de peixes. No trabalho, os resultados obtidos pelo PSO foram comparados com aqueles encontrados através do GA, considerando um conjunto de 60 candidatas a solução (indivíduos) e um número máximo de 40.000 iterações, e ficou demonstrado que esta técnica é capaz de obter soluções para os parâmetros do modelo de um diodo de maneira mais rápida e precisa do que a segunda.

Em MA et al. (2013), a técnica de *busca do pássaro cuco* (em inglês, "*cuckoo search*" - CS) é empregado na extração dos parâmetros da célula fotovoltaica de silício monocristalino RTC France e do módulo fotovoltaico de silício multicristalino KC200GT. O CS foi desenvolvido por YANG; DEB (2009) e se baseia no parasitismo reprodutivo dos pássaros cuco. Os resultados apresentados no trabalho demonstram que para uma população de 25 indivíduos e um número máximo de 5.000 iterações, os parâmetros extraídos através do CS habilitam o modelo de um diodo a representar os dispositivos em questão de maneira mais precisa do que quando este é configurado com os parâmetros extraídos por meio do GA e do PSO.

Em RAJASEKAR; KUMAR; VENUGOPALAN (2013), o *algoritmo de baseado em colônia de bactérias* (em inglês, "*bacteria foraging algorithm*" - BFA) é empregado na extração dos parâmetros de três módulos fotovoltaicos com diferentes tecnologias. O BFA foi proposto por PASSINO (2002), e se baseia no processo desenvolvido pelas bactérias denominadas *E. coli*, em busca de nutrientes. No trabalho, os resultados obtidos pelo BFA foram comparados com aqueles encontrados através do GA e da técnica de *sistema imunológico artificial* (*artificial*

immune system - AIS), e ficou demonstrado que esta técnica é capaz de obter soluções para os parâmetros do modelo de um diodo de maneira significativamente mais eficiente e efetiva que as outras duas.

Em OLIVA; CUEVAS; PAJARES (2014), o *algoritmo de colônia de abelhas* (em inglês, "*artificial bee colony*" - ABC) é empregado na extração dos parâmetros da célula fotovoltaica de silício monocristalino RTC France. O ABC foi desenvolvido por KARABOGA (2005), e se baseia no comportamento inteligente de forrageamento das colônias de abelhas. No trabalho, o desempenho do ABC foi comparado aos observados pelo GA, DE, PSO, BFA e pela técnica de *busca harmônica* (*harmony search* - HS), considerando um conjunto de 150 indivíduos ou harmônicas, um número máximo de 10.000 iterações, e a execução independente de cada técnica 35 vezes. Embora o HS tenha sido capaz de encontrar o resultado que habilita o modelo de um diodo a representar a referida célula da maneira mais precisa, tem-se que o ABC demonstrou ser a técnica mais robusta dentre as testadas.

Já MA et al. (2014a) se dedicou a realizar uma comparação autodeclaradamente mais justa entre o desempenho do GA, DE, PSO, CS, BFA e ABC. Para tanto, estas técnicas foram aplicadas na modelagem da célula fotovoltaica de silício monocristalino RTC France, considerando um número máximo de 5.000 iterações, sendo as respectivas populações de cada técnica definidas de modo a garantir que a cada iteração, ambas realizariam um mesmo número de avaliações da função de aptidão. Além disso, cada técnica foi executada independentemente 40 vezes. Os resultados obtidos demonstraram que o CS é a técnica metaheurística mais efetiva dentre as analisadas nas referidas condições.

Além dessas técnicas metaheurísticas, diversas outras já foram também empregadas por trabalhos da literatura, como: o *algoritmo acasalamento de aves* (em inglês, "*bird mating optimizer*" - BMO) (ASKARZADEH; REZAZADEH, 2013), o *algoritmo baseado em ensino-aprendizagem* (em inglês, "*teaching-learning based optimization algorithm*" - TLBO) (NIU; ZHANG; LI, 2014a), e o *algoritmo baseado em biogeografia* (em inglês, "*biogeography-based optimization algorithm*" - BBO) (NIU; ZHANG; LI, 2014b).

Não obstante, JORDEHI (2016) ainda destaca algumas outras técnicas metaheurísticas, tal como o próprio BA (YANG, 2010) e a *otimização do lobo cinza* (em inglês, "*grey wolf optimization*" - GWO) (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014), para que sejam até então, ineditamente aplicadas na extração dos parâmetros do modelo de um diodo, tendo em vista os seus bons resultados apresentados na resolução de outros problemas de otimização igualmente difíceis.

Em relação ao BA, técnica a qual foi inicialmente considerada pelo presente trabalho, tem-se que na revisão bibliográfica realizada somente um trabalho foi encontrado tratando ao seu respeito. Em MIRZAPOUR; ARPANAHI (2017), o BA conjuntamente com GA, PSO, CS, ABC, HS e outras três técnicas metaheurísticas, foi empregado na extração dos parâmetros do modelo de um diodo quando este aplicado na representação de um módulo fotovoltaico de silício

monocristalino. Embora o BA tenha sido uma das técnicas que apresentaram os resultados mais satisfatórios, tem-se que nenhuma condição referente ao número máximo de iterações, número máximo de avaliações da função de aptidão, tamanho da população (ou harmônicas), ou mesmo, dos parâmetros de controle adotados para cada técnica foram informadas; o que, portanto, tornam os resultados apresentados no trabalho questionáveis e as suas conclusões pouco fidedignas.

Por fim, é interessante destacar que principalmente nos últimos anos alguns autores têm se dedicado a testarem ou mesmo especialmente desenvolverem técnicas metaheurísticas modificadas e híbridas para a extração dos parâmetros do modelo de um diodo.

Nesse sentido, tem-se que em GONG; CAI (2013), seis variantes do DE são empregados na extração dos parâmetros da célula fotovoltaica de silício monocristalino RTC France e do módulo fotovoltaico de silício policristalino Photowatt-PWP 201. Os resultados apresentados foram obtidos considerando uma população de 50 indivíduos, um número máximo de 10.000 avaliações da função de aptidão e 100 execuções independentes de cada técnica. A partir destes, foi demonstrado que versão modificada do DE proposta pelos autores, a qual é sinteticamente designada pela sigla Rcr-IJADE, é mais rápida e efetiva.

Em YU et al. (2017), por sua vez, cinco versões modificadas do TLBO (algumas similares ao do trabalho anterior), duas do PSO e duas do DE, são empregadas na extração dos parâmetros da célula fotovoltaica de silício monocristalino RTC France e do módulo fotovoltaico de silício policristalino Photowatt-PWP 201. Os resultados apresentados foram obtidos considerando um número máximo de 50.000 avaliações da função de aptidão e 30 execuções independentes de cada técnica. A população considerada por cada técnica foi mantida conforme originalmente recomendado por seus desenvolvedores. Assim, a partir da análise desses resultados, foi constatado que a versão modificada do TLBO proposta por ele, a qual é denominada *algoritmo baseado em ensino-aprendizagem autoadaptativo* (em inglês, "*self-adaptive teaching-learning based optimization algorithm*" - SATLBO), é a mais acurada e confiável.

Já em CHEN; YU (2019), uma versão híbrida do BBO e do CS, a qual é denominada de algoritmo híbrido baseado em biogeografia heterogênea e busca do cuco (em inglês, "*biogeography-based heterogeneous cuckoo search*" - BHCS), é especialmente desenvolvida para a extração dos parâmetros do modelo de um diodo. Tal técnica foi aplicada na extração dos parâmetros da célula fotovoltaica de silício monocristalino RTC France, do módulo fotovoltaico de silício monocristalino STP6-40 e do módulo fotovoltaico de silício policristalino STP6-120, considerando as mesmas premissas adotadas por YU et al. (2017). Através dos resultados obtidos, foi demonstrado que o BHCS é mais preciso e robusto que outras onze técnicas metaheurísticas, incluindo tradicionais, modificadas e híbridas.

Finalmente, é interessante destacar que nos trabalhos tidos como mais completos da literatura, tal como os desenvolvidos por GONG; CAI (2013), OLIVA; CUEVAS; PAJARES (2014), MA et al. (2016), YU et al. (2017) e CHEN; YU (2019), as análises comparativas dos desempenhos observados pelas técnicas metaheurísticas consideradas são realizadas tanto

numericamente quanto graficamente, em termos de:

- *Efetividade* - a precisão com que os valores retornados para os parâmetros habilitam o modelo de um diodo a representar o comportamento elétrico do gerador fotovoltaico em estudo;
- *Robustez* - avaliada principalmente a partir da média e do desvio padrão das métricas de erros verificadas pelas soluções finais obtidas pelas técnicas metaheurísticas em um determinado número de execuções independentes;
- *Velocidade de convergência* - dentro de um limite máximo estabelecido, quantas iterações ou avaliações da função de aptidão as técnicas metaheurísticas demandam para alcançar o patamar ou estabilizar a melhor solução encontrada até então, naquela que será retornada como a solução final³.

Além disso, é pertinente comentar que nem mesmo estes trabalhos mais completos tecem comentários a respeito do modo como as técnicas metaheurísticas consideradas tratam os limites de valores permitidos para os parâmetros do modelo de um diodo. Uma vez que não são todas as técnicas que possuem originalmente recursos para tanto, fica a dúvida se estes são: (i) utilizados apenas para delimitar o sorteio inicial das candidatas à solução, (ii) tratados internamente no problema de otimização em questão, isto é, através da penalização da função de aptidão, ou (iii) tratados internamente à técnica metaheurística, através de recursos propriamente implementados.

2.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo apresentou uma revisão bibliográfica acerca dos principais conceitos e procedimentos de modelagem relacionados ao tema do presente trabalho. Destaca-se a partir de da avaliação crítica da literatura que:

- O comportamento elétrico dos geradores fotovoltaicos, seja este uma célula, um módulo, uma *string* ou um arranjo fotovoltaico, é descrito pelas curvas *I-V* e *P-V*. Embora estas curvas apresentem um perfil característico, tem-se que as suas particularidades são fundamentalmente determinadas: pela associação de células fotovoltaicas que eventualmente caracteriza o gerador fotovoltaico, pela qualidade do material empregado na fabricação destas células, pelas características da radiação solar incidente, pela temperatura de operação do gerador fotovoltaico e pelas características carga conectada em seus terminais.
- O modelo fotovoltaico de um diodo é um modelo físico, o qual visa essencialmente representar as perdas ôhmicas e por recombinação indesejada de portadores de carga, que

³ Ressalta-se que a velocidade de convergência de uma técnica metaheurística é diretamente dependente das soluções inicialmente consideradas em sua execução.

ocorrem durante a operação de certo gerador fotovoltaico. A sua equação descritiva possui cinco parâmetros, os quais, quando devidamente ajustados, lhe permitem representar um gerador fotovoltaico de qualquer porte. Como os valores destes parâmetros não são apresentados pelos fabricantes e/ou projetistas, tem-se que estes costumam ser extraídos a partir de dados experimentais ou dados providos em suas fichas técnicas. Contudo, a natureza não-linear e transcendente da equação descritiva do modelo de um diodo torna a extração dos parâmetros em ambos os casos, uma tarefa desafiadora.

- O métodos de extração dos parâmetros do modelo de um diodo via dados experimentais se caracterizam por um problema de otimização típico e uma técnica proposta para sua resolução. Tendo em vista a natureza peculiar deste problema, observa-se que nos últimos anos, técnicas metaheurísticas tradicionais, modificadas e híbridas, tem sido amplamente empregadas na sua resolução. Além disso, a quantidade de trabalhos encontrados nessa linha, revela uma boa aceitação do setor fotovoltaico em relação ao seu emprego.
- O fato do BA já ter sido recomendado anteriormente por uma destacada obra de revisão encontrada na literatura, para ser testado na resolução do problema de otimização tipicamente formulado para extração dos parâmetros do modelo de um diodo, revela que a ideia de inicialmente adotá-lo para composição do método de extração objetivado neste trabalho se faz pertinente. Ademais, o fato da única publicação encontrada na revisão bibliográfica realizada a ter cumprido tal recomendação, tê-la feito sem um nível mínimo de detalhamento, reforça a ideia de que o seu emprego deve ser devidamente analisado.
- Os trabalhos encontrados na literatura que se dedicam a realizar uma análise comparativa mais concisa do desempenho de diferentes técnicas metaheurísticas, normalmente: (i) adotam como objetos de estudo um ou mais dos seguintes dispositivos: célula fotovoltaica de silício RTC FRance, módulo fotovoltaico de silício policristalino Photowatt-PWP 201, módulo fotovoltaico de silício monocristalino STM6-40 ou módulo fotovoltaico de silício policristalino STP-120; (ii) estabelecem como critérios de teste: um número máximo de iterações e/ou de avaliações da função de aptidão, um número de execuções a serem realizadas independentemente por cada técnica, e um tamanho para população ou conjunto de soluções consideradas por cada técnica; (iii) avaliam o desempenho apresentado pelas técnicas em termos de efetividade, robustez e velocidade de convergência. Portanto, é interessante que validação da técnica metaheurística a ser desenvolvida se alinhe a esta abordagem.
- É observada uma falta de informações no geral, a respeito de como as técnicas metaheurísticas, quando não originalmente munidas de recursos para tanto, tratam os limites de valores permitidos para os parâmetros do modelo de um diodo durante o processo iterativo de busca da solução ótima.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo apresenta o método metaheurístico desenvolvido para extração dos parâmetros do modelo de um diodo. Sendo assim, o seu objetivo é não apenas descrever os passos realizados para sua concepção, mas também, expôr as premissas assumidas durante este processo e os argumentos necessários para a sua inteira compreensão.

Posto isto, tem-se que este capítulo se encontra fundamentalmente dividido em quatro seções. A primeira seção apresenta o circuito elétrico equivalente que caracteriza o modelo de um diodo, bem como os principais aspectos de seus parâmetros a serem determinados. Já a segunda seção, descreve o problema de otimização tipicamente formulado para extração dos valores desses parâmetros a partir dos dados experimentais de uma curva característica $I-V$ de um gerador fotovoltaico. A terceira seção, por sua vez, descreve toda linha de raciocínio estabelecida e as características particularmente apresentadas pela técnica metaheurística desenvolvida para resolução deste problema de otimização. E, finalmente, a quarta seção esclarece alguns detalhes acerca do emprego desta técnica.

3.1 MODELO DE UM DIODO

O circuito elétrico equivalente típico do modelo de um diodo é fundamentado nos princípios operacionais de uma célula fotovoltaica. Desse modo, tem-se que na ausência da radiação solar incidente, este dispositivo se comporta tal como um diodo tradicional, isto é: se uma tensão superior aquela verificada em sua região de depleção for diretamente aplicada do seu *terminal p* para o seu *terminal n*, uma corrente elétrica no mesmo sentido é observada (HÄBERLIN, 2012). Todavia, na presença de irradiância solar, uma corrente elétrica no sentido contrário é gerada devido à absorção de parte dos fótons incidentes. Logo, a sobreposição destes dois cenários pode ser prontamente representada pela conexão de uma fonte de corrente independente com um diodo em antiparalelo (D).

O circuito elétrico formado por esses dois componentes, entretanto, caracteriza o comportamento esperado de uma célula fotovoltaica ideal, pois, este não é capaz de representar as diversas perdas ôhmicas e recombinatórias experimentadas pelos elétrons que compõem a *corrente fotogerada* (I_{ph}). Dessa forma, tem-se que o circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica real conta adicionalmente com duas resistências parasitas, as quais são dispostas no circuito, tal como demonstra a Figura 11.

A *resistência série* (R_S) representa as perdas ôhmicas existentes no trânsito da corrente fotogerada pelo interior dos materiais semicondutores extrínsecos que compõe a célula, nos contatos metálicos e interconexões, bem como, a resistência de contato existente entre os materiais semicondutores e os contatos metálicos (GREEN, 1982). A *resistência paralelo* (R_P), por sua vez, representa as correntes de fuga ou, em outras palavras, os processos de recombinação

verificados nas bordas da *junção pn* e em suas regiões não periféricas, devido à defeitos nos cristais dos materiais semicondutores e à presença de impurezas indesejadas (GREEN, 1982).

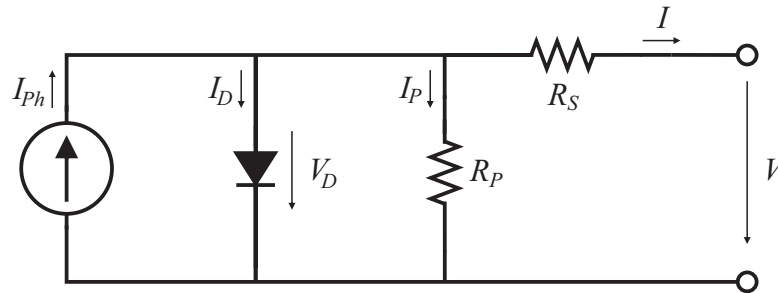


Figura 11 – Circuito elétrico equivalente típico do modelo de um diodo.

Fonte: Próprio autor.

Aplicando a Lei de Kirchhoff das Correntes na análise do circuito elétrico equivalente da Figura 11, tem-se que a corrente verificada nos terminais da célula fotovoltaica (I) é expressa por:

$$I = I_{ph} - I_D - I_P \quad (3.1)$$

Em (3.1), a corrente que flui através do diodo (I_D) é definida pela equação de Shockley e Queisser (MA; YANG; LU, 2014b; PARRA et al., 2017), a qual é dada por (3.2), onde: I_0 representa a corrente de saturação inversa; V_D representa tensão elétrica sobre o diodo, n representa o fator de idealidade do diodo (isto é, da célula); T_C a temperatura de operação da *junção pn* ou, em termos práticos, da célula fotovoltaica (dada em K); q a carga típica de um elétron expressa em termos absolutos ($1,60217646 \times 10^{-19}$ C); e k , a constante de Boltzmann ($1,3806488 \times 10^{-23}$ J/K).

$$I_D = I_0 \left[e^{\frac{q(V_D)}{nkT_C}} - 1 \right] \quad (3.2)$$

A título de complementariedade, é interessante comentar que os parâmetros T_C , q e k são frequentemente expressos na literatura de maneira aglutinada, na chamada *tensão térmica do diodo* (V_T), a qual é expressa por:

$$V_T = \frac{kT_C}{q}. \quad (3.3)$$

A respeito dos parâmetros da equação de Shockley e Queisser é importante destacar que o *fator de idealidade do diodo* é um índice representativo da dinâmica verificada pelos portadores de carga na *junção pn* da célula fotovoltaica. Sendo assim, tem-se que seu valor se aproxima de 1, quando os processos relacionados à corrente de difusão são dominantes, e de 2, quando os processos de perdas por recombinação são os mais preponderantes. Embora valores inferiores a 1 tenham um significado físico correspondente (HONSBURG; BOWDEN, 2019) e sejam verificados com certa frequência em estudos (MA; YANG; LU, 2014a), tem-se que as células fotovoltaicas com $n = 1$ são normalmente julgadas como sendo de melhor qualidade, uma vez que o predomínio dos processos relacionados à corrente de difusão é a situação primordialmente idealizada para operação de uma célula fotovoltaica.

Ainda nesse mesmo contexto, tem-se que o fator de idealidade do diodo tal como o termo exponencial na qual este se insere, representa um termo modulador da *corrente de saturação inversa*. Esta última, por sua vez, é uma medida relativa das dinâmicas recombinatórias verificadas na *junção pn* (CUEVAS, 2014); logo, quanto maior o seu valor, maior a intensidade dos processos de recombinação dos portadores de carga e, portanto, pior a qualidade da célula fotovoltaica (HONSBURG; BOWDEN, 2019). Além disso, é interessante notar em (3.2), a influência exercida pela temperatura de operação da célula fotovoltaica sobre a sua corrente de saturação inversa: uma vez que o fator de idealidade do diodo apresenta, enquanto um índice, um valor fixo, tem-se conforme descrito na seção 2.1 do Capítulo 2, que o aumento da temperatura de operação provoca uma intensificação dos processos de recombinação no interior da célula; logo, um crescimento da sua corrente de saturação inversa e uma queda do seu desempenho.

Feitas tais considerações, tem-se a partir da Lei de Kirchhoff das Tensões, que a tensão elétrica sobre o diodo pode ser determinada em função da tensão terminal da célula fotovoltaica (V), como:

$$V_D = V + IR_S \quad (3.4)$$

E, em vista disso, tem-se que a corrente elétrica parasita que flui sobre a resistência paralelo (I_P) pode ser expressa como:

$$I_P = \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (3.5)$$

Dessa forma, substituindo, (3.2), (3.4) e (3.5) em (3.1), obtém-se que a relação corrente-tensão (I - V) verificada nos terminais da célula fotovoltaica pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$I = I_{Ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_S)}{nkT_C}} - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (3.6)$$

Embora o modelo de um diodo tenha sido tratado até este momento pela perspectiva de uma única célula fotovoltaica, tem-se que este pode ser utilizado para representar o comportamento elétrico de qualquer outro gerador fotovoltaico de maior porte que esteja operando sob condições homogêneas, isto é, com todas as células que o compõe operando em perfeito estado de integridade física e praticamente sob as mesmas condições de radiação solar incidente e temperatura de operação (PETRONE; RAMOS-PAJA; SPAGNUOLO, 2017). Neste caso, tem-se que a relação descrita em (3.6) pode ser generalizada conforme demonstrado por TIAN et al. (2012), resultando na seguinte expressão:

$$I = N_P I_{Ph} - N_P I_0 \left[e^{\frac{q \left(V + \frac{N_S}{N_P} IR_S \right)}{N_S nkT_C}} - 1 \right] - \frac{V + \frac{N_S}{N_P} IR_S}{\frac{N_S}{N_P} R_P} \quad (3.7)$$

onde, em termos práticos: I e V agora representam a corrente e a tensão elétrica verificadas nos terminais do arranjo fotovoltaico; N_S , o produto do número de células fotovoltaicas que compõe um módulo fotovoltaico com o respectivo número de módulos que compõe uma *string*; e N_P , o

número de *strings* do arranjo fotovoltaico. Como é possível notar, tal generalização pressupõe que o arranjo fotovoltaico em estudo é formado por N_P strings que possuem o mesmo número de módulos conectados em série. Caso tal situação não seja a observada, tem-se que eventualmente o estudo do arranjo fotovoltaico pode ser realizado em nível de seus "subarranjos" os quais se apresentem de tal forma, ou mesmo, a nível de cada uma de suas *strings*.

Uma vez que a corrente e a tensão terminal do gerador fotovoltaico em estudo podem ser adequadamente monitoradas por meio amperímetros e voltímetros, e que a sua temperatura de operação pode ser devidamente obtida conforme apresentado na seção 2.2 do Capítulo 2, tem-se que a expressão apresentada em (3.7) possui fundamentalmente *cinco parâmetros* desconhecidos: I_{ph} , I_0 , n , R_P e R_S . Vale ainda notar que tal expressão possui uma natureza não-linear e transcendente, tendo em vista que o termo referente a I é implícito.

Assim, para fins de elucidação, a Figura 12 demonstra graficamente os efeitos produzidos pela variação de cada um dos referidos parâmetros desconhecidos na curva $I-V$ retornada pelo modelo de um diodo quando aplicado na representação do comportamento elétrico de um módulo fotovoltaico formado por 36 células associadas em série e cujos valores de seus parâmetros são originalmente dados por: $I_{ph} = 6,1$ A; $I_0 = 1,2172 \times 10^{-9}$ A; $n = 1,1377$; $R_P = 12,7 \Omega$; e $R_S = 9,2 \times 10^{-3} \Omega$ (PETRONE; RAMOS-PAJA; SPAGNUOLO, 2017).

Através da análise desses gráficos, é possível constatar que: (i) o parâmetro I_{ph} atua na translação vertical da curva $I-V$, tendo forte relação com a corrente de curto circuito; (ii) os parâmetros I_0 e n atuam na translação horizontal da curva $I-V$, tendo ambos parâmetros uma forte relação com a tensão de circuito aberto; (iii) o parâmetro R_P afeta principalmente a inclinação da curva $I-V$ na região da corrente de curto circuito; (iv) o parâmetro R_S afeta principalmente a inclinação da curva $I-V$ na região da tensão de circuito aberto.

Diante dessas constatações, fica evidente que a determinação adequada dos valores dos cinco parâmetros do modelo de um diodo, o habilitam a representar uma curva $I-V$ levantada experimentalmente nos terminais de um gerador fotovoltaico de qualquer porte, levando em consideração todos aspectos da sua não-linearidade.

3.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

A extração dos parâmetros do modelo de um diodo através de dados experimentais da curva $I-V$ de um gerador fotovoltaico em questão pode ser facilmente transformado em problema de otimização (JORDEHI, 2016).

Nesse sentido, tem-se que os referidos parâmetros são assumidos como variáveis de estado do problema. Além disso, para evitar que estes assumam valores inadequados ou impróprios para a realidade física do circuito, isto é, assumam valores em uma ordem de grandeza não condizente com aquela comumente verificada ou com sinais negativos, tem-se que uma faixa

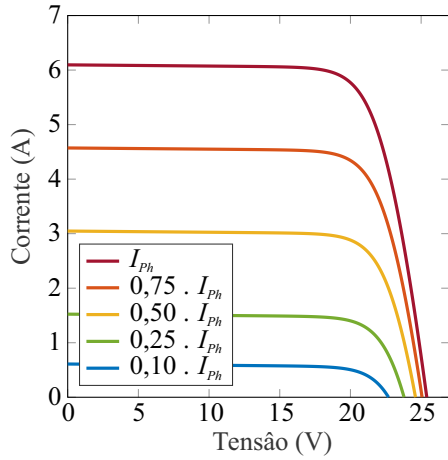
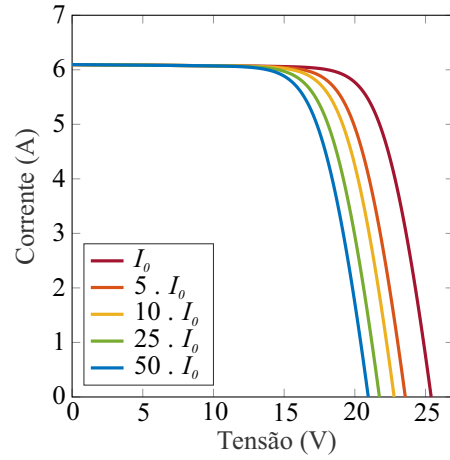
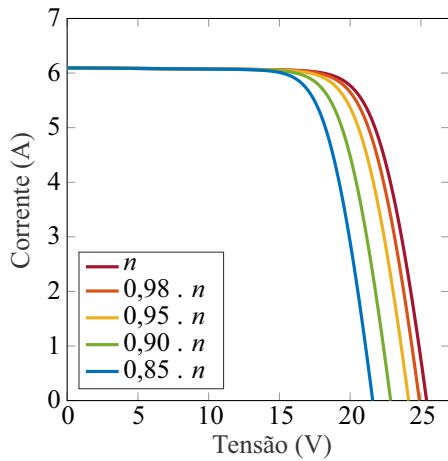
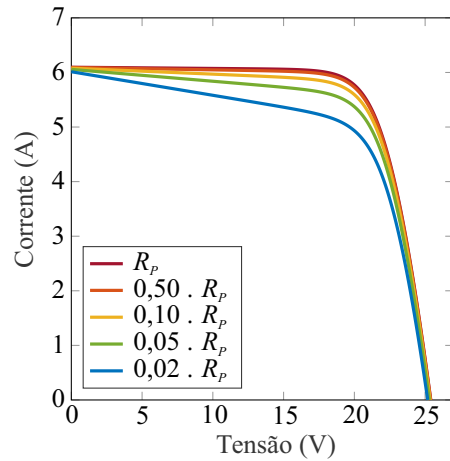
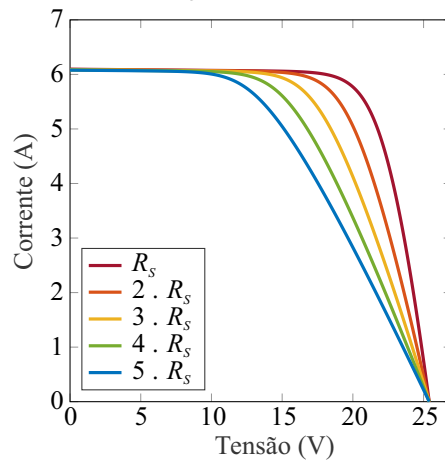
Efeito da Variação da Corrente Fotogerada (I_{ph})**Efeito da Variação da Corrente Saturação Inversa (I_0)****Efeito da Variação do Fator de Idealidade (n)****Efeito da Variação da Resistência Paralelo (R_p)****Efeito da Variação da Resistência Série (R_s)**

Figura 12 – Efeito da variação dos cinco parâmetros do modelo de um diodo sobre a curva I - V de um módulo fotovoltaico de silício cristalino.

Fonte: Próprio autor.

bem delimitada de valores permitidos para cada variável de estado costuma ser estabelecida. Uma revisão dos limites inferiores ($I_{Ph,min}$, I_0,min , n_{min} , $R_{S,min}$, $R_{P,min}$) e superiores ($I_{Ph,max}$, I_0,max , n_{max} , $R_{S,max}$, $R_{P,max}$) comumente adotados para o estudo de diferentes tecnologias de células e módulos fotovoltaicos pode ser encontrada em JORDEHI (2016) e em SAHA; AGBU; JINKS (2018).

Um fato que chama atenção nestes referidos limites e que merece ser destacado, é a diferença de ordem de grandeza e de extensão dessas faixas tipicamente determinadas para cada variável de estado do problema. Conforme demonstra o exemplo apresentado na Tabela 2, enquanto o parâmetro R_P pode alcançar valores da ordem milhares de ohms; o parâmetro I_0 , por outro lado, pode variar entre ordens de praticamente miliamperes e picoamperes.

Tabela 2 – Faixas de valores permitidos para os parâmetros do modelo de um diodo, quando este aplicado na modelagem do módulo fotovoltaico de silício multicristalino com potência nominal de 120 Wp.

Limites	I_{Ph} (A)	I_0 (A)	n	R_P (Ω)	R_S (Ω)
Inferior	0	1,00E-12	0,5	100	0,1
Superior	8	1,00E-05	2	5000	2

Fonte: Próprio autor, a partir dos dados providos por SAHA; AGBU; JINKS (2018).

Ao diz respeito a função objetivo do problema de otimização ou, mais propriamente, a função de aptidão, tem-se conforme introduzido na seção 2.2 do Capítulo 2 que esta é normalmente definida por uma métrica de erro. De acordo com JORDEHI (2016), a métrica mais amplamente adotada pelos métodos metaheurísticos de extração dos parâmetros do modelo de um diodo é a *raiz do erro quadrático médio* (em inglês, "root mean square error" - RMSE), sendo esta calculada por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M [\mathbf{Erro}(m)]^2}{M}} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M [I_{m,esp} - I_{m,est}(I_{Ph}, I_0, n, R_S, R_P)]^2}{M}} \quad (3.8)$$

Onde: **Erro** é um vetor contendo os erros verificados entre os valores de corrente esperados e aqueles reproduzidos pelo modelo de um diodo; o subscrito *esp* indica esses valores esperados ou, em outras palavras, medidos de I ; e o subscrito *est* indica os valores estimados para I a partir da substituição dos pares I - V que descrevem a curva característica disponível em (3.7).

Dessa forma, tem-se que a partir de um conjunto com M registros de pares $\{I, V\}$ referentes a uma curva levantada experimentalmente nos terminais de um gerador fotovoltaico em questão, torna-se possível extrair os valores dos cinco parâmetros do modelo de um diodo através da resolução do problema de otimização sintetizado em (3.9).

É interessante ressaltar que tal problema possui uma natureza contínua, multidimensional, restrita, não-linear e multimodal, conforme amplamente divulgado por trabalhos da literatura, a

se destacar: LAUDANI; FULGINEI; SALVINI (2014) e JORDEHI (2016).

$$\begin{aligned}
 &\text{minimizar} && \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M [I_{m,esp} - I_{m,est}(I_{Ph}, I_0, n, R_S, R_P)]^2}{M}} \\
 &\text{sujeito a} && I_{Ph,min} \leq I_{Ph} \leq I_{Ph,max} \\
 &&& I_{0,min} \leq I_0 \leq I_{0,max} \\
 &&& n_{min} \leq n \leq n_{max} \\
 &&& R_{S,min} \leq R_S \leq R_{S,max} \\
 &&& R_{P,min} \leq R_P \leq R_{P,max}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

3.3 TÉCNICA METAHEURÍSTICA DESENVOLVIDA PARA RESOLUÇÃO

Para resolução do problema de otimização formulado na seção anterior, foi inicialmente cogitado o emprego do BA (YANG, 2010). Todavia, conforme mencionado na seção 1.2 do Capítulo 1, durante os estudos preliminares realizados para aplicação do BA foi constatado um grande empecilho ao seu emprego: a sua falta de habilidade para lidar com as discrepâncias comumente verificadas entre as ordem de grandezas dos valores assumidos pelos parâmetros do modelo de um diodo (vide Tabela 2).

Em vista disso, uma pesquisa foi realizada em meio as diversas versões modificadas do BA, com intuito de se identificar alguma alternativa que fosse capaz de contornar satisfatoriamente tal questão e que já tivesse provado ter o mesmo poder de resolução, ou um ainda maior que a versão tradicional do BA, de problemas otimização com natureza contínua e multimodal. Fortuitamente, uma versão que atendia esses preceitos de maneira simples foi encontrada: o *algoritmo direcional de morcego* (em inglês, "*directional bat algorithm*" - DBA) (CHAKRI et al., 2017).

Não obstante, analisando o DBA, foi constatado que este carecia de alguns recursos de diversificação originalmente verificados no BA, os quais poderiam ser úteis à resolução do problema de extração dos parâmetros do modelo de diodo, haja visto a sua peculiar natureza. Além disso, foi ainda constatado que assim como boa parte das demais técnicas metaheurísticas, incluindo o próprio BA, o DBA não oferece originalmente nenhum recurso que possa tratar dos limites de valores estabelecidos para as variáveis de estado do problema, de modo interno ao seu processo de busca da solução ótima.

Dessa forma, visando obter uma técnica metaheurística capaz de resolver da maneira mais efetiva e confiável possível o problema de otimização formulado para extração dos parâmetros do modelo de um diodo, tem-se que certos recursos de diversificação e limitação dos valores das variáveis de estados foram propriamente incorporados ao DBA, dando origem ao que se chamou de *algoritmo direcional do "voo de Lévy" do morcego* ou, mais propriamente em língua inglesa, de *Lévy flight directional bat algorithm* (LDBA).

Assim, a fim de elucidar a construção dessa técnica metaheurística proposta, bem como prover um maior grau de entendimento acerca dos seus atributos, tem-se que as características comuns e distintas do BA, do DBA e do LDBA, são devidamente apresentadas a seguir.

3.3.1 Algoritmo do Morcego

Proposto por YANG (2010), o BA é uma técnica metaheurística aplicável à resolução de problemas contínuos e que se inspira no processo de ecolocalização desenvolvido pelos morcegos durante os seus voos.

O processo de ecolocalização consiste na emissão de ondas sonoras (ultrassônicas) e na correspondente medição do tempo gasto para que estas reflitam em um dado alvo, que no caso pode ser um outro indivíduo, um obstáculo ou uma presa, e retornem à sua origem (CORDEIRO; PARPINELLI; LOPES, 2012). As características dessas ondas emitidas pelos morcegos durante o processo de caça, varia de acordo com estratégia adotada. Quando o morcego está voando em busca de uma presa, por exemplo, a taxa de pulso (r) com que ele emite certa onda sonora é baixa, sendo entretanto, a sua amplitude (A) alta. Uma vez identificada a presa, tem-se que a taxa de pulso da onda enviada em sua direção é aumentada e a sua amplitude, por sua vez, é diminuída; dessa forma, o morcego consegue obter uma boa precisão a respeito da localização da presa, sem permitir que esta fuja. É interessante destacar que essa *estratégica de ecolocalização da presa* é justamente o que define o *mecanismo de exploração e intensificação* do BA.

Um fato extraordinário relacionado ao BA, é que no trabalho o qual este foi primeiramente publicado (YANG, 2010), muitos detalhes a respeito da sua implementação foram equivocadamente omitidos (CORDEIRO; PARPINELLI; LOPES, 2012). Nesse sentido, o seu próprio autor (YANG, 2014; YANG, 2017), assim como outros entusiastas da técnica (CORDEIRO; PARPINELLI; LOPES, 2012; CHAKRI et al., 2017), se empenharam posteriormente a corrigir tal questão e a formalizar um pseudocódigo mais bem esclarecido nas novas publicações realizadas. Não obstante, certas divergências entre estas formalizações propostas podem ser observadas, vide as referências CORDEIRO; PARPINELLI; LOPES (2012) e CHAKRI et al. (2017). Dessa forma, para fins de elucidação, o pseudocódigo do BA considerado no contexto do presente trabalho é apresentado na Tabela 3, sendo seus principais aspectos comentados a seguir.

No modelo computacional desenvolvido YANG (2010), a posição de cada morcego representa uma candidata à solução, sendo esta, portanto, codificada por um vetor com dimensão (N_D) igual ao número de variáveis de estado do problema.

As posições de cada morcego (\mathbf{x}'_i) de uma população com certo número de indivíduos (N_B), são inicialmente determinadas de forma aleatória, sendo em seguida, tais posições avaliadas pela função de aptidão do problema (F). O morcego que apresentar a melhor avaliação ou, em outras palavras, se apresentar mais próxima da presa, é então destacado como o morcego melhor posicionado da população (\mathbf{x}^*).

Tabela 3 – Pseudocódigo do BA.

1:	Definição dos parâmetros do problema de otimização: $N_S, N_P, F, \mathbf{LB}, \mathbf{UB}$
2:	Definição dos parâmetros de controle: $N_B, f_{min}, f_{max}, \alpha, \gamma, t_{max} (FE_{max})$
3:	Inicialização da posição de cada morcego: \mathbf{x}_i
4:	Avaliação das posições iniciais dos morcegos: $F(\mathbf{x}_i)$
5:	Definição do morcego melhor posicionado: \mathbf{x}^*
6:	Inicialização dos contadores de iterações e de avaliações de $F(\mathbf{x})$: $t = 0$ e $FE = 0$
7:	Enquanto o critério de parada não for atingido faça
8:	Para $i = 1 : N_P$ faça
9:	Atualização da frequência da onda sonora emitida - via (3.10)
10:	Atualização da velocidade relativa dos morcegos - via (3.11)
11:	Atualização da posição temporária do morcego - via (3.12)
12:	Se $rand > r_i^t$ faça
13:	Cálculo da nova posição temporária do morcego - via (3.13)
14:	Fim
15:	Sorteio de uma dimensão para ser perturbada
16:	Realização do voo randômico na dimensão sorteada - via (3.14)
17:	Avaliação das posições dos morcegos: $F(\mathbf{x}_i^{t+1})$
18:	Se $rand < A_i^t$ e $F(\mathbf{x}_i^{t+1}) < F(\mathbf{x}^*)$ faça
19:	Posição temporária vira definitiva: $\mathbf{x}_i^t = \mathbf{x}_i^{t+1}$
20:	Atualização da taxa de emissão de pulso - via (3.15)
21:	Atualização da amplitude da onda sonora emitida - via (3.16)
22:	Fim
23:	Se $F(\mathbf{x}_i^t) < F(\mathbf{x}^*)$ faça
24:	Atualização do morcego melhor posicionado: $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}_i^t$
25:	Fim
26:	Atualização do contador de avaliações de $F(\mathbf{x})$: $FE = FE + 1$
27:	Fim
28:	Atualização do contador de iterações: $t = t + 1$
29:	Fim
30:	Pós-processamento

Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, tem-se que a cada iteração (t) esta referida população de morcegos vai se movendo continuamente no espaço de solução do problema, sendo a frequência das ondas sonoras emitidas por cada morcego na direção daquele melhor posicionado (f_i), e as suas relativas velocidades (\mathbf{v}_i^t) e posições temporárias (\mathbf{x}_i^{t+1}) prontamente atualizadas. A atualização da frequência das ondas sonoras emitidas por cada morcego é determinada através de (3.10), onde: f_{min} e f_{max} são respectivamente os valores mínimo e máximo que esta frequência pode assumir e $rand$ é um número aleatório sorteado em um distribuição Normal que varia entre 0 e 1.

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})rand \quad (3.10)$$

A atualização da velocidade de movimentação de cada morcego, por sua vez, é calculada por (3.11), e a atualização de suas respectivas posições temporárias, é definida por (3.12).

$$\mathbf{v}_i^{t+1} = \mathbf{v}_i^t + (\mathbf{x}_i^t - \mathbf{x}^*)f_i \quad (3.11)$$

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^{t+1} \quad (3.12)$$

Realizadas essas atualizações, tem-se que sob certas circunstâncias, uma nova posição temporária pode ser determinada para cada morcego da população através de (3.13), onde: ε , é um número aleatório sorteado em uma distribuição Normal que varia entre -1 e 1; e A_m , é média das amplitudes das ondas sonoras emitidas pelos morcegos até então. Conforme pode se observar, esta nova posição temporária visa aproximar os morcegos daquele melhor posicionado.

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}^* + \varepsilon A_m \quad (3.13)$$

Após realizar tais procedimentos, tem-se que as posições temporárias dos morcegos são agora perturbadas por um *voo randômico*, isto é, uma de suas dimensões (z), a qual é aleatoriamente escolhida, sofre uma modificação também aleatória, sendo esta ser dada por:

$$\mathbf{x}_i^{t+1}(z) = \mathbf{x}_i^{t+1}(z) + \varepsilon A_m \quad (3.14)$$

Uma vez feito isso, a posição temporária de cada morcego é novamente avaliada pela função de aptidão do problema e, dependendo das circunstâncias, esta nova posição temporária é aceita em definitivo, isto é: $\mathbf{x}_i^t = \mathbf{x}_i^{t+1}$. Caso esta última situação ocorra, tem-se que as taxas de pulso e de amplitude da onda sonora emitida pelo respectivo morcego devem então ser atualizadas, pois, tal fato virtualmente indica que este se encontra agora mais próximo daquele melhor posicionado e, conseqüentemente, da presa. Essas atualizações são respectivamente dadas por:

$$r_i^{t+1} = 1 - \exp^{-\gamma} \quad (3.15)$$

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \quad (3.16)$$

Onde: γ , representa uma taxa de crescimento referente a emissão do pulso, e α , uma taxa de decréscimo da amplitude da onda sonora emitida, a qual por sua vez, tipicamente apresenta um valor inicial predefinido entre 1 e 2 (CORDEIRO; PARPINELLI; LOPES, 2012). Destaca-se que como valores para γ e α , é recomendado em uma primeira análise, o valor de 0,9 para ambos (YANG, 2017).

Por fim, aceitas ou não as posições temporárias calculadas para cada morcego, tem-se que aquele melhor posicionado é, se for o caso, atualizado. Em seguida, tem-se que todo processo descrito desde a atualização da frequência das ondas sonoras emitidas pelos morcegos da população na direção daquele melhor avaliado é reiterado até que o critério de convergência adotado seja satisfeito. Vale destacar que tal critério geralmente é caracterizado por um número máximo de iterações (t_{max}) ou de avaliações da função de aptidão (FE_{max}) (MA et al., 2016).

Finalmente, é pertinente notar no pseudocódigo da Tabela 3, que as circunstâncias mencionadas as quais determinam se (3.13) será aplicada e se a posição temporária de um dado

morcego, quando melhor avaliada do que aquela do morcego considerado mais próximo da presa até então, poderá ou não ser aceita em definitivo, são diretamente influenciadas pelos valores assumidos por r_i^t e A_i^t numa dada iteração e pelo valor definido por um *rand* executado no momento. Além disso, é interessante observar que essas relações de dependência associadas as dinâmicas impostas por (3.15) e (3.16), constituem um sistema de autocontrole das fases de maior intensificação ou diversificação no processo de busca da solução ótima.

Tendo em vista essa breve descrição do BA, já se torna possível constatar a sua falta de sensibilidade para lidar com as diferentes ordens de grandeza verificadas entre os parâmetros do modelo de um diodo. Em (3.13) e (3.14), observa-se que a atualização da posição temporária dos morcegos é realizada considerando que suas dimensões variam de maneira próxima à unidade; o que não é válido sobretudo, para o parâmetro do modelo de um diodo referente a corrente de saturação inversa, o qual tipicamente varia em ordens inferiores à 10^{-5} (vide Tabela 2).

3.3.2 Algoritmo Direcional do Morcego

Uma questão frequentemente comentada na literatura a respeito do BA é a sua característica de convergência prematura (CHAKRI et al., 2017). Em outras palavras, tal técnica recorrentemente alcança o critério de convergência estabelecido sem que uma efetiva exploração do espaço de solução do problema em questão seja realizada; o que eventualmente revela uma baixa habilidade de diversificação frente outras técnicas metaheurísticas e, ainda, compromete a qualidade da solução retornada.

Ciente disso, CHAKRI et al. (2017) recentemente propôs que quatro modificações fossem fundamentalmente realizadas na lógica original do BA, com intuito de superar tal deficiência e ainda melhorar as suas habilidades de diversificação e intensificação. O pseudocódigo do algoritmo metaheurístico resultante dessas modificações, o qual propriamente define o DBA, é apresentado na Tabela 4.

A primeira modificação introduzida por CHAKRI et al. (2017) e que dá origem ao nome deste algoritmo, foi considerar que cada morcego da população agora emite dois pulsos de onda sonora em duas direções diferentes: uma originalmente na direção daquele melhor posicionado; e outra na direção de um segundo morcego aleatoriamente escolhido na população - o qual será referenciado no presente momento por "morcego 2". Assim, a partir do retorno desses pulsos sonoros, isto é, do seu eco, um dado morcego consegue obter a informação se há ou não alguma presa perto desses dois morcegos. O eco advindo do morcego melhor posicionado naturalmente indicará que sim. Já o eco referente ao morcego 2 dependerá da sua avaliação realizada pela função de aptidão. Dessa forma, caso o morcego 2 se apresente mais bem avaliado que o próprio morcego em questão (o emissor das ondas sonoras), tem-se que este se moverá em direção a vizinhança que permeia o morcego melhor posicionado e o morcego 2, visando observar qual destes de fato encontrará primeiro uma presa. Por outro lado, se a referida condição não for

Tabela 4 – Pseudocódigo do DBA. As linhas de código destacadas em vermelho indicam as inovações trazidas por este em relação ao BA.

1:	Definição dos parâmetros do problema de otimização: $N_S, N_P, F, \mathbf{LB}, \mathbf{UB}$
2:	Definição dos parâmetros de controle: $N_B, f_{min}, f_{max}, r_0, r_\infty, A_0, A_\infty, t_{max} (FE_{max})$
3:	Inicialização da posição de cada morcego: \mathbf{x}_i
4:	Avaliação das posições iniciais dos morcegos: $F(\mathbf{x}_i)$
5:	Definição do morcego melhor posicionado: \mathbf{x}^*
6:	Cálculo dos limites do parâmetro de escala - via (3.22)
7:	Inicialização dos contadores de iterações e de avaliações de $F(\mathbf{x})$: $t = 0$ e $FE = 0$
8:	Enquanto o critério de parada não for atingido faça
9:	Para $i = 1 : N_P$ faça
10:	Sorteio de um outro morcego da população: $\mathbf{x}'_j \neq \mathbf{x}'_i$
11:	Atualização das frequências das ondas sonoras emitidas - via (3.19)
12:	Se $F(\mathbf{x}'_j) < F(\mathbf{x}'_i)$ faça
13:	Atualização da posição temporária do morcego - via (3.18)
14:	Caso contrário faça
15:	Atualização da posição temporária do morcego - via (3.17)
16:	Fim
17:	Se $rand > r'_i$ faça
18:	Cálculo da nova posição temporária do morcego - via (3.20)
19:	Atualização do parâmetro de escala - via (3.21)
20:	Fim
21:	Avaliação das posições dos morcegos: $F(\mathbf{x}_i^{t+1})$
22:	Se $rand < A'_i$ e $F(\mathbf{x}_i^{t+1}) < F(\mathbf{x}_i^t)$ faça
23:	Posição temporária vira definitiva: $\mathbf{x}_i^t = \mathbf{x}_i^{t+1}$
24:	Atualização da taxa de emissão de pulso - via (3.23)
25:	Atualização da amplitude da onda sonora emitida - via (3.24)
26:	Fim
27:	Se $F(\mathbf{x}_i^{t+1}) < F(\mathbf{x}^*)$ faça
28:	Atualização do morcego melhor posicionado: $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}_i^{t+1}$
29:	Fim
30:	Atualização do contador de avaliações de $F(\mathbf{x})$: $FE = FE + 1$
31:	Fim
32:	Atualização do contador de iterações: $t = t + 1$
33:	Fim
34:	Pós-processamento

Fonte: Próprio autor.

satisfeita, tem-se que o morcego em questão seguirá na direção somente do morcego melhor posicionado.

Essa duas situações de voo dos morcegos são respectivamente transcritas por (3.17) e (3.18), sendo \mathbf{x}'_j referente ao morcego 2 ($j \neq i$); e \mathbf{f}_1 e \mathbf{f}_2 propriamente referentes às frequências das ondas sonoras emitidas na direção do morcego melhor posicionado e do morcego 2.

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + (\mathbf{x}^* - \mathbf{x}_i^t)\mathbf{f}_1 + (\mathbf{x}'_j - \mathbf{x}_i^t)\mathbf{f}_2, \text{ se } F(\mathbf{x}'_j) < F(\mathbf{x}_i^t) \quad (3.17)$$

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + (\mathbf{x}^* - \mathbf{x}_i^t)\mathbf{f}_1, \text{ se } F(\mathbf{x}'_j) \geq F(\mathbf{x}_i^t) \quad (3.18)$$

É interessante notar em (3.17) e (3.18), que a atualização da posição do morcego é feita diretamente por meio das frequências das ondas sonoras emitidas, isto é, sem considerar o cálculo da velocidade relativa de movimentação dos morcegos. Tal prática, no entanto, não gera em última análise nenhum impacto sobre a atualização das posições dos morcegos, se tratando apenas de uma simplificação dos procedimentos de cálculo de suas posições temporárias. Além disso, é necessário destacar que essas frequências são atualizadas ao longo do processo iterativo por meio de (3.19), sendo seus respectivos valores de **rand** independentemente determinados para cada dimensão que define a posição do morcego.

$$\begin{cases} \mathbf{f}_1 = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\mathbf{rand}_1 \\ \mathbf{f}_2 = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\mathbf{rand}_2 \end{cases} \quad (3.19)$$

A segunda modificação introduzida por CHAKRI et al. (2017) no algoritmo do BA e que configura o principal motivo pelo qual o emprego do DBA foi cogitado para resolução do problema de otimização formulado na seção anterior, é a forma com que este calcula uma nova posição temporária para os morcegos durante o processo de intensificação da busca da solução ótima. Ao invés de utilizar (3.13), no DBA tal cálculo é realizado por meio da seguinte expressão:

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \varepsilon A_m \omega_i^t \quad (3.20)$$

Onde ω_i^t é um parâmetro que regula dinamicamente as escalas de busca ao longo do processo iterativo, sendo, por sua vez, determinado por (3.21).

$$\omega_i^t = (\omega_0 - \omega_\infty) \left[\frac{t - t_{max}}{1 - t_{max}} \right] + \omega_\infty \quad (3.21)$$

O valor desse parâmetro de escala inicialmente é grande (ω_0), sendo determinado como um quarto da escala típica das dimensões do problema. No decorrer do processo iterativo ele vai sofrendo um decrescimento monotônico até finalmente alcançar uma pequena fração do seu valor inicial (ω_∞), o qual, tendo em vista o nível de precisão requerido a solução do problema de otimização em questão, pode ser definido como sendo igual a 0,1%. A determinação desses valores são, portanto, calculadas por meio de (3.22), onde **LB** e **UB** são os vetores contendo os limites inferiores e superiores das variáveis de estado do problema.

$$\begin{cases} \omega_0 = \frac{(\mathbf{UB} - \mathbf{LB})}{4} \\ \omega_\infty = \frac{\omega_0}{1000} \end{cases} \quad (3.22)$$

A terceira modificação trazida pelo DBA, é referente a forma de cálculo do crescimento da taxa de emissão dos pulsos e do decrescimento da amplitude das ondas sonoras, os quais agora são determinados também de forma monotônica, isto é:

$$r_i^t = (r_0 - r_\infty) \left[\frac{t - t_{max}}{1 - t_{max}} \right] + r_\infty \quad (3.23)$$

$$A_i^t = (A_0 - A_\infty) \left[\frac{t - t_{max}}{1 - t_{max}} \right] + A_\infty \quad (3.24)$$

É interessante notar que o invés de se definir no DBA as taxas com que esses parâmetros variam, agora se torna necessário definir seus valores iniciais (r_0 e A_0) e finais (r_∞ e A_∞). Se por um lado essa modificação resulta no dobro de parâmetros de controle, por outro, tem-se que as definições de seus valores são mais intuitivas e podem ser obtidas a partir da mesma análise requerida para determinação das referidas taxas no caso da aplicação do BA. Como valores iniciais, CHAKRI et al. (2017) recomenda o uso de $r_0 = 0,1$, $r_\infty = 0,7$, $A_0 = 0,9$ e $A_\infty = 0,6$. Vale observar que esta configuração assimétrica torna a aceitação das posições temporárias dos morcegos mais prováveis, o que contribui em última instância, para uma maior diversificação do processo de busca da solução ótima.

Por fim, tem-se que a quarta modificação trazida pelo DBA refere-se ao crivo de aceitação das novas posições temporárias atualizadas e/ou calculadas para cada morcego. Agora, estas são aceitas como definitivas ou não sob o critério de serem melhores avaliadas do que elas próprias no iniciar de uma dada iteração. Dessa forma, a avaliação em relação a posição do morcego melhor posicionado é realizado em um segundo momento, sem que seja considerado um fator probabilístico conforme demonstram as linhas 27-29 da Tabela 4.

Diante dessa breve descrição realizada a respeito das modificações trazidas pelo DBA em relação a lógica original do BA, é possível constatar que a primeira e terceira modificação, quando esta última devidamente configurada, contribuem para uma maior exploração do espaço de solução e, conseqüentemente, para que o algoritmo não sofra uma convergência tida como prematura.

A segunda modificação, por sua vez, habilita o processo de intensificação à lidar com as diferenças de ordens de grandeza verificadas entre as dimensões das variáveis de estado de um problema de otimização em questão, de maneira simples e conveniente, além de torná-lo mais dinâmico e possivelmente preciso, uma vez que os passos de variação vão ficando cada vez mais diminutos.

E a quarta modificação, torna o algoritmo de modo geral mais inteligente, pois evita que uma solução mais bem avaliada do que aquela indicada pelo morcego melhor posicionado em uma dada iteração seja recusada pelo simples fato do número definido pelo *rand* ser superior ao então valor da amplitude de onda sonora emitida pelo respectivo morcego.

Todavia, comparando os pseudocódigos apresentados nas Tabelas 3 e 4 é possível ainda constatar uma quinta modificação trazida pelo DBA, a qual não foi explicitamente comentada por CHAKRI et al. (2017): o fato do DBA não possuir uma etapa de voo randômico.

Diante desse fato, é interessante observar que os únicos instrumentos de exploração do espaço de solução presentes no DBA são limitados às redondezas das regiões visitadas pela

população de morcegos no decorrer do processo iterativo, não havendo, portanto, a existência de nenhum recurso que o permita eventualmente direcionar um morcego para uma região amplamente distinta daquelas já vasculhadas por sua população.

3.3.3 Versão Modificada do Algoritmo Direcional do Morcego

Embora o DBA demonstre ter um desempenho superior ao de outras técnicas metaheurísticas - tal como o próprio BA e os clássicos GA, DE, PSO e HS - na resolução de difíceis problemas de otimização específicos (CHAKRI et al., 2017), tem-se que a deficiência de recursos de diversificação identificada no final da subseção anterior é algo que particularmente preocupa, pois, tendo em vista a natureza peculiar do problema de otimização formulado, há um justificável receio de que o DBA fique preso próximo a um ótimo local, ou mesmo, que demande um longo tempo computacional para alcançar a região da solução ótima global, o que em primeira instância, não é desejável.

Dessa forma, visando coibir a ocorrência dessas potenciais situações e, principalmente, obter uma técnica metaheurística suficientemente efetiva, robusta e rápida para resolução do problema de otimização formulado, é proposto que, a exemplo do verificado no BA, uma *fase de voo randômico seja introduzida no pseudocódigo do DBA*. No entanto, ao invés desta ser realizada somente em uma dimensão da posição temporária do morcego e com a extensão da sua modificação determinada por meio do sorteio aleatório de um número sobre uma distribuição Normal limitada entre -1 e 1 (conforme imposto por ϵ no BA), é proposto neste momento que: (i) o número de dimensões as quais sofrerão perturbações também seja sorteado, podendo, portanto, uma modificação ocorrer em uma ou até mesmo em todas dimensões da posição temporária do morcego; (ii) e que se considere, de modo inovador, que a extensão desta modificação ou modificações sejam determinadas a partir da distribuição de Lévy.

O sorteio aleatório de um número sobre a distribuição de Lévy é popularmente conhecido como *voo de Lévy* (em inglês, "*Lévy flight*"). Tal estratégia de randomização é uma das que oferecem o maior potencial de diversificação para uma técnica metaheurística dentre as estratégias baseadas no sorteio aleatório de números sobre distribuições estatísticas (YANG, 2014). Pelo fato deste potencial de diversificação ser muito superior ao oferecido pela distribuição Normal (YANG, 2014) - a qual é adotada na estratégia de randomização presente no BA - é que justamente a sua adoção é proposta. Além disso, é pertinente comentar que alguns animais durante o seu processo de caça desempenham de fato rotas de voo randômicas similares aquelas obtidas por meio do voo de Lévy, o que demonstra seu compromisso com a bio-inspiração (YANG; DEB, 2013).

Não obstante, tem-se que o voo de Lévy costuma ter que ser propriamente implementado, pois, diferentemente do sorteio aleatório de um número sobre uma distribuição Normal, os *softwares* de simulação comuns do setor, tal como o Matlab, não oferecem comandos específica-

mente desenvolvidos para sua realização. Assim, dentre as alternativas que se tem disponíveis para realizar esta implementação, uma que se demonstra simples, eficiente e que inclusive é originalmente adotada com sucesso por outras técnicas metaheurísticas, tal como o CS (YANG; DEB, 2013), é através do chamado *algoritmo de Mantegna* (MANTEGNA, 1994). De modo simples, tem-se que neste algoritmo o comprimento do passo (S) dado sobre a distribuição de Lévy é definido por:

$$S(\beta) = \frac{U}{|L|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (3.25)$$

Onde: $0 < \beta \leq 2$ é um índice alheio a distribuição de Lévy; e U e L são descritos por uma distribuição Normal, isto é, $U \sim N(0, \sigma_U^2)$ e $L \sim N(0, \sigma_L^2)$, sendo σ_U^2 calculado por (3.26), em que Γ representa a distribuição Gamma, e $\sigma_L^2 = 1$.

$$\sigma_U = \left\{ \frac{\Gamma(1 + \beta) \text{sen} \left(\frac{\pi\beta}{2} \right)}{\Gamma \left(\frac{1+\beta}{2} \right) \beta 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right\}^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.26)$$

Uma vez que o passo calculado por (3.25) muitas vezes pode assumir um valor positivo ou negativo relativamente extremo, isto é, pode extrapolar os limites ou mesmo a ordem de grandeza de uma dada variável de estado do problema, tem-se que um fator de escala costuma ser aplicado junto à ele. Assim, se fazendo valer dos próprios parâmetros presentes no DBA, tem-se que a perturbação de uma dada dimensão sorteada (z), agora é determinada por (3.27), onde: $randn$ é um número aleatoriamente sorteado sobre uma distribuição Normal padrão (YANG, 2014).

$$\mathbf{x}_i^{t+1}(z) = \mathbf{x}_i^t(z) + \omega_\infty(z)S(\beta)randn \quad (3.27)$$

Feitas tais considerações, tem-se que a fase de voo randômico proposta é introduzida no pseudocódigo do DBA, tal como demonstram as linhas 28-32 da Tabela 5. É importante notar que diferentemente do praticado no BA, etapas de avaliação das posições temporárias dos morcegos obtidas previamente e posteriormente à realização do voo randômico são consideradas. Um dos motivos para tomada desta decisão, é que a lógica original do DBA já provou ser suficientemente efetiva para que seus resultados sejam perturbados sem nem ao menos passarem por um crivo (CHAKRI et al., 2017). O outro, se deve ao fato de que o intuito da modificação proposta é estritamente prover um *recurso de diversificação adicional* ao DBA, não havendo, portanto, inicialmente a pretensão de se realizar uma alteração mais pujante da sua lógica original.

Nesse âmbito, vale ainda comentar que inicialmente outras formas de inclusão da fase de voo randômico proposta no pseudocódigo do DBA foram consideradas, como: sua realização em somente uma fração da população de morcegos; ou a inclusão das suas etapas de realização no interior do crivo de aceitação das posições temporárias atualizadas e/ou calculadas para os morcegos - linhas 22-26 da Tabela 4. Todavia, a primeira opção tornaria o número de avaliações da função de aptidão que se é realizado por iteração em um número não inteiro, e a segunda

o tornaria pouco previsível; sendo ambos os casos críticos, pois, como a lógica do DBA é essencialmente pautada no número de iterações, tem-se que se em um dado estudo o critério de convergência adotado for um número máximo de avaliações da função de aptidão, a dinâmica por traz do parâmetros ω_i^t , r_i^t e A_i^t seriam diretamente afetadas, comprometendo a lógica e a efetividade das etapas originais do DBA.

Sendo assim, da forma como foi feita a inclusão da fase de voo randômico proposta, tem-se que a referida relação é de $2N_B : 1$, o que preserva as características originais do DBA e permite que tanto um número de avaliações da função de aptidão quanto um número máximo de iterações sejam escolhidos como critérios de convergência em um estudo.

Além da introdução desta etapa de voo randômico no pseudocódigo do DBA, tem-se que um segundo recurso de diversificação ainda é pertinentemente proposto: a introdução de *etapas dinâmicas de tratamento dos limites* de valores eventualmente violados pelas variáveis de estado que definem a posição temporária de um morcego.

Conforme mencionado na seção 2.3 do Capítulo 2, o tratamento de limites pode ser essencialmente realizado: através da penalização da função de aptidão daqueles morcegos que se encontrem em posições temporárias inadequadas; ou, em contrapartida, por meio de procedimentos de correção internamente implementados na técnica metaheurística. Uma vez que esta segunda opção possibilita que morcegos em posições temporárias inadequadas ou, em outras palavras, que soluções infactíveis sejam desnecessariamente avaliadas, tem-se que tal opção é neste momento preferida. Além disso, como tal opção oferece certa flexibilidade à sua implementação, tem-se que a lógica de correção descrita no pseudocódigo da Tabela 6 é proposta.

De modo simplório, esta lógica proposta prega que os valores eventualmente violados pelas variáveis de estado que definem a posição temporária de um morcego sejam propriamente substituídos por valores adequados, podendo estes serem determinados de duas maneiras: (i) através do sorteio aleatório de um número existente em meio as faixas de valores permitidos para essas respectivas variáveis de estado, conforme estabelece (3.28); ou (ii) pelos próprios valores que delimitam tal faixa, vide (3.29).

$$\mathbf{x}_i^{t+1}(z) = \mathbf{LB}(z) + [\mathbf{UB}(z) - \mathbf{LB}(z)] \mathit{rand} \quad (3.28)$$

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i^{t+1}(z) = \mathbf{LB}(z), & \text{se } \mathbf{x}_i^{t+1}(z) < \mathbf{LB}(z) \\ \mathbf{x}_i^{t+1}(z) = \mathbf{UB}(z), & \text{se } \mathbf{x}_i^{t+1}(z) > \mathbf{UB}(z) \end{cases} \quad (3.29)$$

Uma vez que a primeira alternativa pode potencialmente contribuir para uma melhor exploração dos espaço de solução do problema, tem-se que esta, de acordo com a lógica proposta, possui uma maior probabilidade de ser selecionada durante a fase de predomínio dos processos de diversificação da busca da solução ótima. Além disso, o fato da segunda alternativa apresentar uma maior probabilidade de ser selecionada durante a fase de predomínio dos processos de

Tabela 5 – Pseudocódigo do LDBA. As linhas de código destacadas em vermelho indicam as inovações trazidas por este em relação ao DBA.

1:	Definição dos parâmetros do problema de otimização: $N_S, N_P, F, \mathbf{LB}, \mathbf{UB}$
2:	Definição dos parâmetros de controle: $N_B, f_{min}, f_{max}, r_0, r_\infty, A_0, A_\infty, \beta, t_{max} (FE_{max})$
3:	Inicialização da posição de cada morcego: \mathbf{x}_i
4:	Avaliação das posições iniciais dos morcegos: $F(\mathbf{x}_i)$
5:	Definição do morcego melhor posicionado: \mathbf{x}^*
6:	Cálculo dos limites do parâmetro de escala - via (3.22)
7:	Inicialização dos contadores de iterações e de avaliações de $F(\mathbf{x})$: $t = 0$ e $FE = 0$
8:	Enquanto o critério de parada não for atingido faça
9:	Para $i = 1 : N_P$ faça
10:	Sorteio de um outro morcego da população: $\mathbf{x}'_j \neq \mathbf{x}'_i$
11:	Atualização das frequências das ondas sonoras emitidas - via (3.19)
12:	Se $F(\mathbf{x}'_j) < F(\mathbf{x}'_i)$ faça
13:	Atualização da posição temporária do morcego - via (3.18)
14:	Caso contrário faça
15:	Atualização da posição temporária do morcego - via (3.17)
16:	Fim
17:	Se $rand > r'_i$ faça
18:	Cálculo da nova posição temporária do morcego - via (3.20)
19:	Atualização do parâmetro de escala - via (3.21)
20:	Fim
21:	Análise e tratamento dos limites - via Tabela 6
22:	Avaliação das posições dos morcegos: $F(\mathbf{x}_i^{t+1})$
23:	Se $rand < A'_i$ e $F(\mathbf{x}_i^{t+1}) < F(\mathbf{x}'_i)$ faça
24:	Posição temporária vira definitiva: $\mathbf{x}_i^t = \mathbf{x}_i^{t+1}$
25:	Atualização da taxa de emissão de pulso - via (3.23)
26:	Atualização da amplitude da onda sonora emitida - via (3.24)
27:	Fim
28:	Sorteio de quantas e quais dimensões serão perturbadas
29:	Realização do voo randômico nas dimensão(ões) sorteada(s) - via (3.27)
30:	Análise e tratamento dos limites - via Tabela 6
31:	Avaliação das posições dos morcegos: $F(\mathbf{x}_i^{t+1})$
32:	Repetição dos procedimentos realizados anteriormente entre as linhas 23-27
33:	Se $F(\mathbf{x}_i^{t+1}) < F(\mathbf{x}^*)$ faça
34:	Atualização do morcego melhor posicionado: $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}_i^{t+1}$
35:	Fim
36:	Atualização do contador de avaliações de $F(\mathbf{x})$: $FE = FE + 2$
37:	Fim
38:	Atualização do contador de iterações: $t = t + 1$
39:	Fim
40:	Pós-processamento

Fonte: Próprio autor.

intensificação da busca da solução ótima é perfeitamente condizente, pois nesta, a variação local e certa das variáveis de estado que definem a posição temporária de um morcego são normalmente priorizadas.

Dessa forma, é proposto que estas etapas de tratamento dinâmico dos limites sejam

Tabela 6 – Pseudocódigo do tratamento dinâmico de limites proposto.

```

1:  Para  $z = 1 : N_D$  faça
2:    Se  $x_i^{t+1}(z) < LB(z)$  faça
3:      Se  $rand < A_i^t$ 
4:        Realização do tratamento dinâmico - via (3.28)
5:      Caso contrário faça
6:        Realização do tratamento rígido - via (3.29)
7:      Fim
8:    Fim
9:    Se  $x_i^{t+1}(z) > UB(z)$  faça
10:     Se  $rand < A_i^t$  faça
11:       Realização do tratamento - via (3.28)
12:     Caso contrário faça
13:       Realização do tratamento rígido - via (3.29)
14:     Fim
15:   Fim
16: Fim

```

Fonte: Próprio autor.

realizadas logo após os processos de intensificação da busca da solução ótima e após a fase de voo randômico proposta, tal como demonstram as linhas 21 e 30 da Tabela 5.

O algoritmo resultante dessas modificações realizadas no pseudocódigo do DBA foi batizado conforme já antecipado, de LDBA, em alusão a estratégia de randomização proposta para constituir a fase de voo randômico e devido ao fato desta caracterizar o principal recurso de diversificação adicionado.

Por fim, é interessante observar que se comparado o pseudocódigo do LDBA (Tabela 5) com aqueles apresentados para o BA (Tabela 3) e o próprio DBA (Tabela 4), é possível constatar que este é mais extenso, possui alguns parâmetros de controle extras a serem configurados (3 em relação ao BA e 1 ao DBA) e apresenta a característica de realizar o dobro de avaliações da função de aptidão por iteração. No entanto, vale fazer a ressalva de que estas linhas de código a mais são, conforme demonstrado, facilmente implementáveis, e que os parâmetro de controle extras ou podem ser determinados a partir da mesma análise requerida pelo BA ou se apresenta em uma faixa bem comportada (no caso de β). Além disso, é esperado que os ganhos computacionais providos pelos recursos que dão origem as estas características, minimizem tais fatos e demonstrem a pertinência de suas considerações.

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DA TÉCNICA METAHEURÍSTICA DESENVOLVIDA

Uma vez descrito o problema de otimização tipicamente formulado para extração dos parâmetros do modelo de um diodo via dados experimentais e apresentada a técnica metaheurística desenvolvida para sua resolução, torna-se pertinente neste momento explicitar como seus

atributos propriamente se relacionam.

Tendo em vista que os parâmetros do modelo de um diodo a serem determinados são quem justamente caracterizam as variáveis de estado do referido problema, tem-se que as posições dos morcegos no LDBA, sejam estas iniciais (\mathbf{x}_i), temporárias (\mathbf{x}_i^{t+1}) ou definitivas (\mathbf{x}_i^t), são codificadas por um vetor de cinco dimensões ($N_D = 5$), onde cada uma destas é respectiva a um desses parâmetros. Por exemplo:

$$\mathbf{x}_i^t = [I_{Ph}, I_0, n, R_S, R_P] \quad (3.30)$$

Nesse âmbito, tem-se que os limites das faixas de valores permitidas para estas variáveis de estado ou dimensões, são definidas no LDBA por:

$$\begin{cases} \mathbf{LB} = [I_{Ph,min}, I_{0,min}, n_{min}, R_{S,min}, R_{P,min}] \\ \mathbf{UB} = [I_{Ph,max}, I_{0,max}, n_{max}, R_{S,max}, R_{P,max}] \end{cases} \quad (3.31)$$

A partir desses limites, tem-se portanto, que o cumprimento das restrições de desigualdade apresentadas em (3.9) são formalmente garantidas pelas etapas de tratamento dinâmico de limites introduzidas no contexto do LDBA (Tabela 6).

Ao que diz respeito a função objetivo apresentada em (3.9), tem-se conforme anteriormente mencionado que esta define a função de aptidão considerada pelo LDBA (F). Logo, o erro fundamentalmente considerado em seu cálculo, o qual é associado a capacidade do modelo de um diodo - quando habilitado pelos valores de parâmetros definidos pelas respectivas dimensões da posição de um dado morcego \mathbf{x}_i^t - em reproduzir um certo dado experimental m da curva característica que se tem disponível do gerador fotovoltaico em questão, é dado por:

$$\mathbf{Erro}(m) = I_{m,esp} - \left\{ N_P \mathbf{x}_i^t(z=1) - N_P \mathbf{x}_i^t(z=2) \left[e^{\frac{q \left(V_{m,est} + \frac{N_S}{N_P} I_{m,est} \mathbf{x}_i^t(z=4) \right)}{N_S \mathbf{x}_i^t(z=3) k T_C}} - 1 \right] - \frac{V_{m,est} + \frac{N_S}{N_P} I_{m,est} \mathbf{x}_i^t(z=4)}{\frac{N_S}{N_P} \mathbf{x}_i^t(z=5)} \right\} \quad (3.32)$$

Dessa forma, para fins de elucidação, a Tabela 7 apresenta o modo como o cálculo dessa função de aptidão é realizada computacionalmente para certo morcego com posição \mathbf{x}_i^t . É interessante notar que este é dependente das informações fornecidas a respeito das interconexões de células fotovoltaicas que formam o gerador fotovoltaico em estudo, isto é, N_S e N_P .

Diante dessas relações destacadas, torna-se importante realizar dois comentários adicionais. O primeiro é que as posições iniciais dos morcegos (vide linha 3 da Tabela 5) são convenientemente determinadas no LDBA através um sorteio aleatório dentro da faixa de valores permitidas para cada uma de suas dimensões. Logo, o pseudocódigo apresentado na Tabela 8 pode ser empregado para tal finalidade.

E o segundo, é que em decorrência dos parâmetros associados as posições dos morcegos terem cinco dimensões, todos os demais parâmetros vetoriais intrínsecos do LDBA, como nominalmente: \mathbf{f}_1 , \mathbf{f}_2 , \mathbf{rand}_1 , \mathbf{rand}_2 , ω_i^t , ω_0 , ω_∞ ; são também caracterizados por estas mesmas cinco respectivas dimensões.

Tabela 7 – Pseudocódigo de cálculo da função de aptidão do problema de otimização tipicamente formulado para extração dos parâmetros do modelo de um diodo.

1: Para $m = 1 : M$ **faça**
2: Cálculo do erro verificado na reprodução do ponto m - via (3.32)
3: Fim
4: Cálculo do RMSE - via (3.8)

Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 – Pseudocódigo dos procedimentos adotados no LDBA para o sorteio das posições iniciais dos morcegos.

1: Para $z = 1 : N_D$ **faça**
2: Sorteio de um valor dentro da faixa de valores permitidos - via (3.28)
3: Fim

Fonte: Próprio autor.

3.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo, todos os passos desenvolvidos para a construção do método metaheurístico proposto para extração dos parâmetros do modelo de um diodo via dados experimentais, foram detalhadamente apresentados.

Na seção 3.1, o modelo de um diodo foi propriamente apresentado, sendo a sua equação descritiva minuciosamente deduzida e as relações dos seus cinco parâmetros com as características operacionais de um dado gerador fotovoltaico a ser representado, devidamente explicitadas.

Já na seção 3.2, foi formulado o problema de otimização que permite a extração dos valores destes cinco parâmetros do modelo de um diodo a partir dos dados referentes a uma curva $I-V$ levantada experimentalmente nos terminais do gerador fotovoltaico a ser representado. Apesar de sua estrutura simples, a qual é caracterizada por cinco variáveis de estado (parâmetros do modelo de um diodo), uma função objetivo (RMSE) e cinco restrições de desigualdades (limites de valores permitidos aos parâmetros), tem-se que a sua natureza contínua, multidimensional, restrita, não-linear e multimodal, torna sua resolução bastante desafiadora.

Na seção 3.3, por sua vez, a técnica metaheurística desenvolvida para resolução deste peculiar problema de otimização é apresentada. Baseada fundamentalmente no BA, esta técnica, a qual foi denominada de LDBA, possui recursos que visam principalmente: (i) contornar as questões computacionais relacionadas às discrepantes ordens de grandeza verificadas entre os valores normalmente assumidos pelos parâmetros do modelo de um diodo; (ii) corrigir tais

valores quando estes eventualmente violarem os seus respectivos limites mínimo e máximo permitidos no decorrer do processo de busca da solução ótima; e *(iii)* promover uma eficiente exploração do espaço de solução do problema.

E, finalmente, na seção 3.4 algumas considerações são realizadas com intuito de elucidar o modo como esta técnica metaheurística desenvolvida se relaciona com os principais aspectos do problema de otimização formulado, e de tornar mais didático o seu emprego.

4 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os testes computacionais realizados para validação da metodologia proposta. Nesse sentido, tem-se que dois tipos de testes são realizados. No primeiro, os desempenhos obtidos pelo LDBA e pelo DBA na resolução dos problema de otimização formulado para extração dos parâmetros do modelo de um diodo são confrontados, visando averiguar a pertinência da técnica metaheurística desenvolvida e os reais ganhos computacionais, isto é, de efetividade, robustez e eficiência, oferecidos por esta. No segundo, os desempenhos obtidos pelo LDBA agora são comparados com aqueles de outras técnicas metaheurísticas tradicionais, modificadas e híbrida reportados na literatura, com intuito de verificar o quão competitivo este se demonstra frente a estas.

Dessa forma, tem-se que este capítulo se encontra dividido em três seções. Na seção 4.1, os dados dos dispositivos de geração fotovoltaica considerados para a realização de ambos os testes são apresentados. Na seção 4.2, as premissas adotadas para realização do primeiro teste, bem como os resultados encontrados, são devidamente descritos e discutidos. E, de maneira análoga, na seção 4.3, as premissas estabelecidas para realização do segundo teste e os resultados nele obtidos são comentados.

Vale destacar que todas as simulações computacionais que configuram estes testes de validação foram desenvolvidas em ambiente Matlab, versão 2016b, através de um computador com processador Intel Core i7-4510U @ 2 GHz 2,60 GHz, memória RAM de 8 GB, e sistema operacional Windows 10 de 64 bits.

4.1 DADOS UTILIZADOS PARA A REALIZAÇÃO DOS TESTES

A fim de facilitar as posteriores análises de desempenho do método metaheurístico proposto, tem-se que três dispositivos de geração fotovoltaica comumente adotados na literatura para validação de métodos de extração dos parâmetros do modelo de um diodo via dados experimentais foram escolhidos para realização dos testes. O nome e as principais características destes dispositivos são sinteticamente apresentados a seguir, sendo os seus respectivos dados experimentais propriamente descritos no Apêndice A.

1. Célula fotovoltaica de silício monocristalino RTC France - dispositivo comercial com 57 mm de diâmetro; sua curva $I-V$ disponível foi levantada experimentalmente para uma condição de irradiância solar incidente de 1.000 W/m^2 e temperatura de operação de 33°C (ou $306,15 \text{ K}$), sendo caracterizada por um conjunto de 26 pontos medidos (EASWARAKHANTHAN et al., 1986).
2. Módulo fotovoltaico de silício monocristalino STM6-40 - dispositivo comercial formado por 36 células fotovoltaicas associadas em série; sua curva $I-V$ disponível foi levantada

experimentalmente para uma condição de irradiância solar incidente não informada e uma temperatura de operação de 51°C (ou 324,15 K), sendo caracterizada por um conjunto de 20 pontos medidos (TONG; PORA, 2016).

3. Módulo fotovoltaico de silício policristalino STP6-120 - dispositivo comercial formado por 36 células fotovoltaicas associadas em série; sua curva $I-V$ disponível foi levantada experimentalmente para uma condição de irradiância solar incidente não informada e uma temperatura de operação de 55°C (ou 328,15 K), sendo caracterizada por um conjunto de 22 pontos medidos (TONG; PORA, 2016).

Além disso, a Tabela 9 apresenta os limites de valores normalmente estabelecidos para os parâmetros do modelo de um diodo, quando este é aplicado na modelagem desses dispositivos de geração fotovoltaica. Vale observar que os limites superiores considerados para o parâmetro n no caso dos dois módulos fotovoltaicos são demasiadamente elevados, visto que estes por definição, assumem no máximo um valor próximo à 2.

Tabela 9 – Faixas de valores permitidos aos parâmetros do modelo de um diodo, tendo em vista os dispositivos de geração fotovoltaica considerados.

Dispositivo	I_{Ph} (A)	I_0 (μ A)	n	R_P (Ω)	R_S (Ω)
RTC France	0 - 1	0 - 1	1 - 2	0 - 100	0 - 0,5
STM6-40	0 - 2	0 - 50	1 - 60	0 - 1000	0 - 0,36
STP6-120	0 - 8	0 - 50	1 - 50	0 - 1500	0 - 0,36

Fonte: Próprio autor, a partir dos dados providos por MA et al. (2016) e CHEN; YU (2019).

4.2 ANÁLISE DA METODOLOGIA PROPOSTA

Tendo em vista que o LDBA foi somente concebido mediante ao receio de que a sua técnica metaheurística originária, isto é, o DBA, não fosse capaz de solucionar o referido problema de otimização com a devida eficácia ou eficiência requerida, tem-se que o primeiro passo a ser tomado para sua validação é averiguar se de fato esta é capaz de proporcionar os ganhos computacionais esperados.

Nesse sentido, tem-se que a metodologia proposta foi sistematicamente aplicada na modelagem dos dispositivos de geração fotovoltaico descritos na seção anterior, sendo o problema de otimização formulado, entretanto, pertinentemente resolvido por três técnicas metaheurísticas distintas: o LDBA, o DBA e uma versão ligeiramente modificada do DBA, a qual foi chamada de "DBA Limitado".

Tendo em vista que o DBA não possui recursos de análise e tratamento dos limites de valores assumidos pelas variáveis de estados (dimensões do morcego) do problema de otimização, tem-se que durante o processo de busca da solução ótima é vislumbrada a possibilidade deste seguir para regiões que violam o espaço de solução do problema, retornando soluções infatíveis.

Dessa forma, em uma tentativa de viabilizar uma comparação mais justa, é que o dito DBA Limitado foi adicionalmente considerado. Neste, uma fase de *tratamento rígido dos limites* foi implementado antes da etapa de avaliação da função de aptidão, isto é, entre as linhas 20 e 21 da Tabela 4. Neste tratamento, a correção dos valores constatados como inadequados é realizada sempre seguindo a lógica apresentada em (3.29). Vale destacar que esta opção de tratamento dos limites foi escolhida, pois, dentro das condições discutidas na seção 3.3 do Capítulo 3, esta seria a opção tida como mais conservadora que poderia ser adotada em alternativa ao tratamento dinâmico dos limites proposto.

Posto isto, tem-se que os parâmetros de controle dessas técnicas metaheurísticas foram configurados tal como demonstra a Tabela 10. É pertinente destacar que os valores adotados para f_{min} , r_0 , r_∞ , A_0 , A_∞ , são os mesmo recomendados por CHAKRI et al. (2017). Já os valores de f_{max} e β , foram estabelecidos a partir de análises propriamente realizadas.

Tabela 10 – Valores estabelecidos para os parâmetros de controle das técnicas metaheurísticas consideradas.

Parâmetro	DBA	DBA Limitado	LDBA
f_{min}	0	0	0
f_{max}	5	5	5
r_0	0,1	0,1	0,1
r_∞	0,7	0,7	0,7
A_0	0,9	0,9	0,9
A_∞	0,6	0,6	0,6
β	—	—	1,7

Fonte: Próprio autor.

Nesse âmbito, vale comentar que durante essas análises, valores de 1, 2, 5 e 10 para f_{max} e de 1, 1,5, 1,7 e 2 para β , foram simultaneamente testados, sendo aqueles definidos na Tabela 10, os que proporcionaram os melhores resultados gerais às respectivas técnicas metaheurísticas. Além disso, tem-se que estes valores testados para f_{max} e β foram escolhidos com base naqueles tipicamente adotados por trabalhos presentes na literatura (YANG; DEB, 2013; YANG, 2014; CHAKRI et al., 2017; YANG, 2017).

Ao que se refere as condições de teste adotadas para a aplicação dessas técnicas metaheurísticas, tem-se que os critérios apresentados na Tabela 11 foram estabelecidos. Vale destacar que, seguindo a lógica de comparação adotada por MA et al. (2016), o tamanho da população de morcegos considerada por cada técnica metaheurística foi determinada de modo a garantir que todas estas realizem um mesmo número de avaliações da função de aptidão a cada iteração processada, e tomando como base uma população de 20 morcegos para o LDBA.

Finalmente, é importante mencionar que durante a implementação computacional destas técnicas metaheurísticas, foi definido que na medida do possível, ambas partiriam de um mesmo conjunto de soluções iniciais ou, em outras palavras, ambas considerariam um mesmo conjunto de posições iniciais para os morcegos de suas respectivas populações a cada execução independente.

Tabela 11 – Condições de teste estabelecidas.

Critério	DBA	DBA Limitado	LDBA
Número de execuções independentes		50	
Número máximo de iterações (t_{max})		1.000	
Número máximo de avaliações da função de aptidão (FE_{max})		40.000	
Tamanho da população (N_B)	40	40	20

Fonte: Próprio autor.

O sorteio dessas posições foi realizado conforme os procedimentos estabelecidos na Tabela 8. Além disso, é válido mencionar que no caso do LDBA, em função de sua população reduzida, somente 20 dentre as 40 posições inicialmente sorteadas para cada execução independente foram consideradas, sendo estas escolhidas aleatoriamente.

Feitas tais considerações, tem-se que os resultados obtidos pelo emprego sistemático destas técnicas metaheurística na modelagem de cada dispositivo de geração fotovoltaica selecionado, é detalhadamente apresentada a seguir.

4.2.1 Estudo de Caso 1: Célula Fotovoltaica Monocristalina RTC France

A Tabela 12 apresenta um panorama acerca da melhor solução encontrada por cada técnica metaheurística no contexto das suas 50 execuções independentes. Conforme se observa, o LDBA e o DBA Limitado foram capazes de encontrar a solução mais efetiva para o problema. Já o DBA, assim como era de se esperar, acabou retornando uma solução infactível para este. Vale destacar inclusive, que em quase 20% das execuções realizadas, o DBA não se mostrou capaz de encontrar uma solução factível para o problema.

Tabela 12 – Melhores resultados obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 50 vezes na modelagem da célula fotovoltaica RTC France.

Metaheurística	I_{Ph} (A)	I_0 (μ A)	n	R_p (Ω)	R_s (Ω)	RMSE
DBA	0,00019	-3,54E+05	2,24E+06	3,09E+03	-3,15E+03	7,85747E-05
DBA Limitado	0,76078	0,32304	1,48119	53,71801	0,03638	9,86022E-04
LDBA	0,76078	0,32302	1,48119	53,71853	0,03638	9,86022E-04

Fonte: Próprio autor.

A qualidade da melhor solução encontrada pelo LDBA e, conseqüentemente pelo DBA Limitado, pode ser graficamente comprovada através da Figura 13 ou, de forma numérica, através da Tabela 26 apresentada no Apêndice A.

Conforme se observa na Figura 13, os valores definidos pela referida solução para os parâmetros do modelo de um diodo, o permitem reproduzir precisamente os pontos da curva $I-V$ levantados experimentalmente nos terminais célula fotovoltaica RTC France.

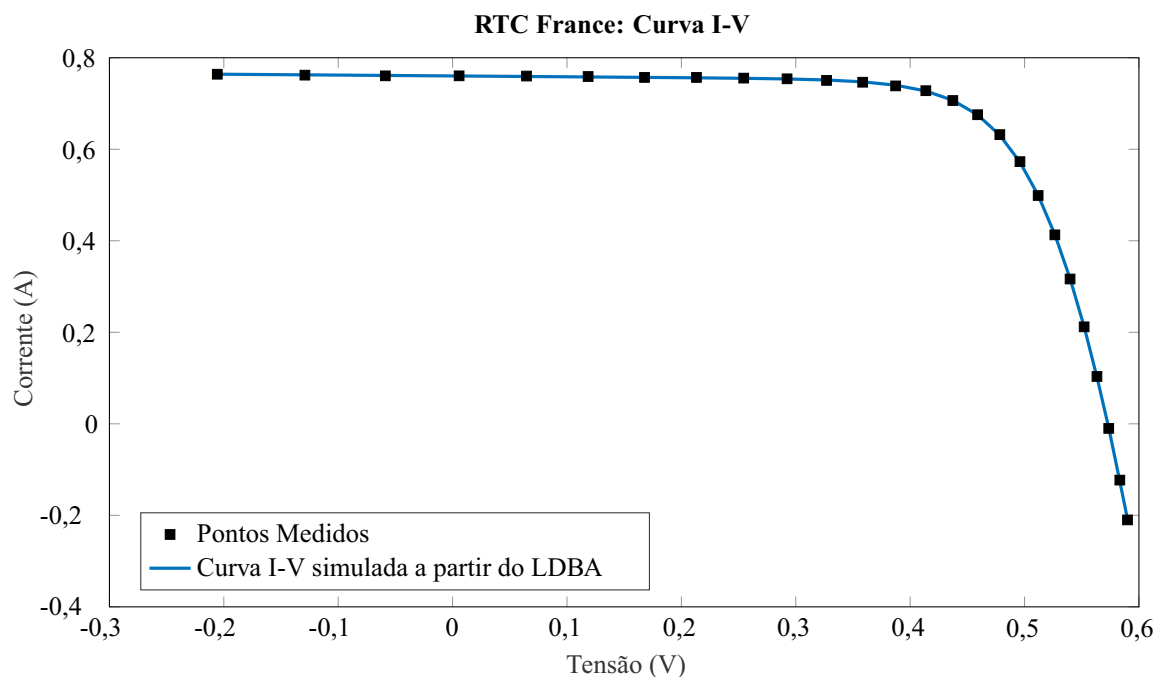


Figura 13 – Comparação entre os pontos medidos nos terminais da célula fotovoltaica RTC France e a curva $I-V$ simulada pelo modelo de um diodo com os valores dos seus parâmetros dados pela melhor solução encontrada pelo LDBA.

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 13, por sua vez, apresenta uma análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística no contexto das suas 50 execuções independentes. Através dos resultados nela apresentados, é possível notar que apesar do LDBA e do DBA Limitado terem sido capazes de encontrar em ao menos uma ocasião a mesma solução ótima descrita na Tabela 12, o LDBA é a técnica que se apresenta mais robusta. Esta constatação pode ainda ser corroborada pelo gráfico apresentado na Figura 14. Através deste, é possível observar que o LDBA foi a técnica que por mais ocasiões se aproximou da solução ótima descrita na Tabela 12.

Tabela 13 – Análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 50 vezes na modelagem da célula fotovoltaica RTC France.

Metaheurística	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Desvio Padrão
DBA	7,85747E-05	1,23450E-03	1,44238E-03	3,59902E-03	6,77562E-04
DBA Limitado	9,86022E-04	1,09923E-03	1,19437E-03	2,44805E-03	2,75451E-04
LDBA	9,86022E-04	9,86450E-04	1,03334E-03	1,48600E-03	1,05055E-04

Fonte: Próprio autor.

Por fim, a Figura 15 apresenta um gráfico do perfil de convergência médio desempenhado por cada técnica metaheurística no contexto das suas 50 execuções independentes. Através deste, é possível constatar que o LDBA e o DBA Limitado apresentaram, de modo geral, um comportamento de convergência idêntico. Ademais, embora o DBA Limitado tenha se mostrado capaz de convergir mais rapidamente para soluções de melhor qualidade, verifica-se que a partir de 20.000 avaliações da função de aptidão, o LDBA se apresenta ligeiramente superior.

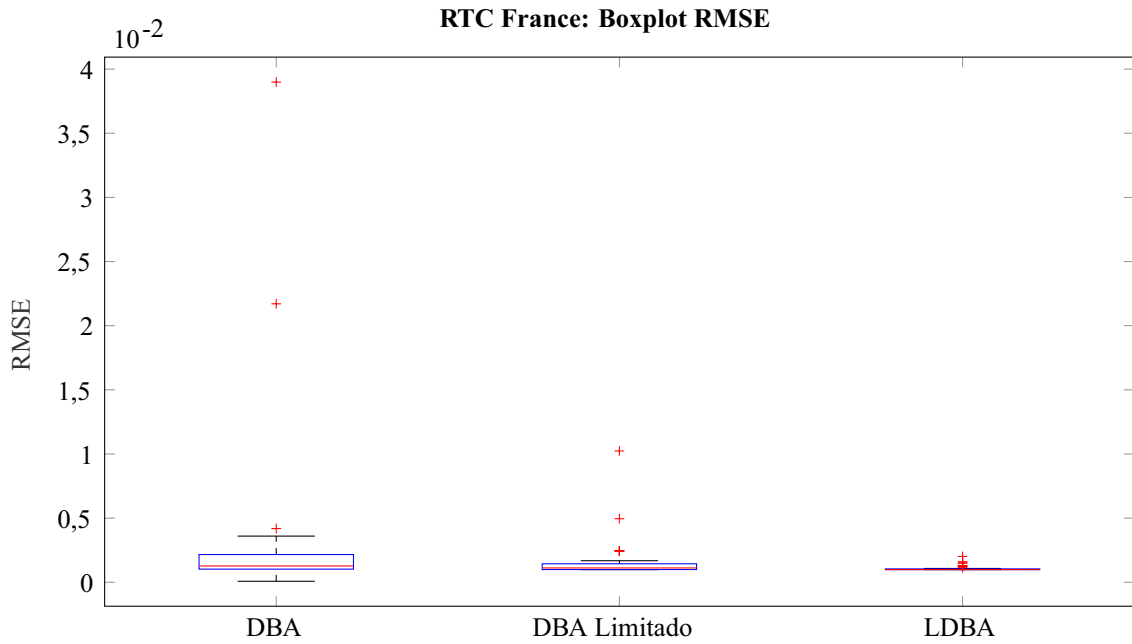


Figura 14 – Boxplot dos valores de RMSE referentes às soluções obtidas por cada técnica metaheurística nas 50 execuções independentes realizadas no estudo célula da fotovoltaica RTC France.

Fonte: Próprio autor.

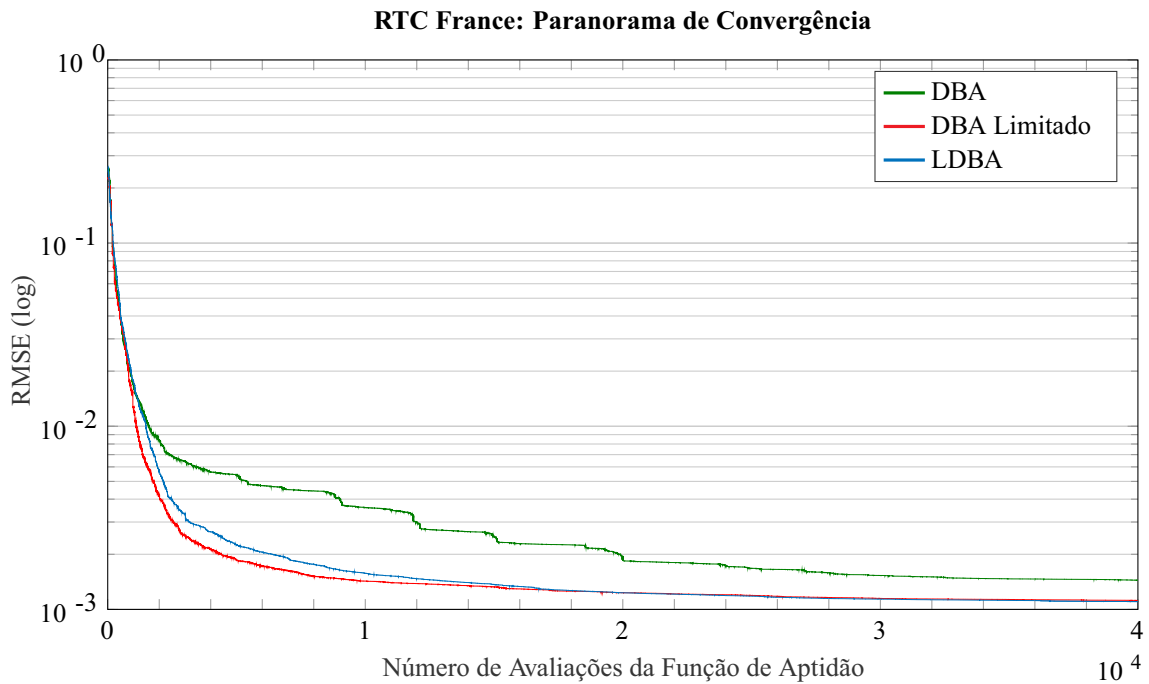


Figura 15 – Gráfico de convergência médio verificado por cada técnica metaheurística nas 50 execuções independentes realizadas no estudo da célula fotovoltaica RTC France.

Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Estudo de Caso 2: Módulo Fotovoltaico de Silício Monocristalino STM6-40

A Tabela 14 apresenta um panorama acerca da melhor solução encontrada por cada técnica metaheurística no contexto das suas 50 execuções independentes. Através desta, se

observa que o LDBA foi a técnica capaz de retornar a solução mais efetiva para o problema. O DBA Limitado, por sua vez, se demonstrou capaz de encontrar uma solução de boa qualidade, a qual, entretanto, não permite o modelo de um diodo reproduzir os pontos da curva $I-V$ considerada, com a mesma acurácia proporcionada pela solução retornada pelo LDBA. Esta situação pode ser complementarmente verificada nos dados apresentados na Tabela 27 no Apêndice A. E, a exemplo do ocorrido no estudo de caso anterior, foi observado que a melhor solução encontrada pelo DBA é infactível.

Tabela 14 – Melhores resultados obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 50 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STM6-40.

Metaheurística	I_{ph} (A)	I_0 (μ A)	n	R_p (Ω)	R_s (Ω)	RMSE
DBA	-0,00001	8,71E+03	-1,33E+10	5,20E+10	4,28E+04	1,25027E-05
DBA Limitado	1,66166	3,69016	1,60788	21,54177	0,00188	2,54928E-03
LDBA	1,66392	1,74450	1,52068	15,92476	0,00426	1,72991E-03

Fonte: Próprio autor.

Nesse âmbito, é importante destacar que em 48 das 50 execuções realizadas este retornou uma solução que possuía algum valor negativo para os parâmetros do modelo de um diodo, dessa forma, tem-se que seus resultados obtidos foram desconsiderados na análise deste estudo de caso.

Posto isto, tem-se que qualidade da melhor solução encontrada pelo LDBA pode ser adicionalmente comprovada através da Figura 16. Conforme se observa nesta, os valores definidos por tal solução para os parâmetros do modelo de um diodo o permitem reproduzir fielmente os pontos da curva $I-V$ levantados experimentalmente nos terminais do módulo fotovoltaico STM6-40.

A Tabela 15 e a Figura 17 apresentam uma análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística no contexto das suas 50 execuções independentes. Através destas, é possível constatar que embora a qualidade das soluções obtidas pelo DBA Limitado apresentem uma ligeira menor dispersão em relação à daquelas obtidas pelo LDBA, esta última técnica se apresenta mais estável, uma vez que a mesma não encontrou nenhum resultado classificado como escuso, isto é, nenhum *outlier* (denotado por "+" no boxplot).

Tabela 15 – Análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 50 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STM6-40.

Metaheurística	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Desvio Padrão
DBA	—	—	—	—	—
DBA Limitado	2,54928E-03	3,55849E-03	4,09761E-03	6,25769E-03	1,03511E-03
LDBA	1,72991E-03	3,73200E-03	3,95195E-03	7,31375E-03	1,13269E-03

Fonte: Próprio autor.

Finalmente, a Figura 18 apresenta um gráfico do perfil de convergência médio desempenhado por cada técnica metaheurística no contexto das suas 50 execuções independentes.

Através deste, é possível constatar que o LDBA e o DBA Limitado apresentaram novamente um comportamento geral de convergência bastante similar, se alternando frequentemente no posto de técnica metaheurística capaz de retornar a solução mais efetiva.

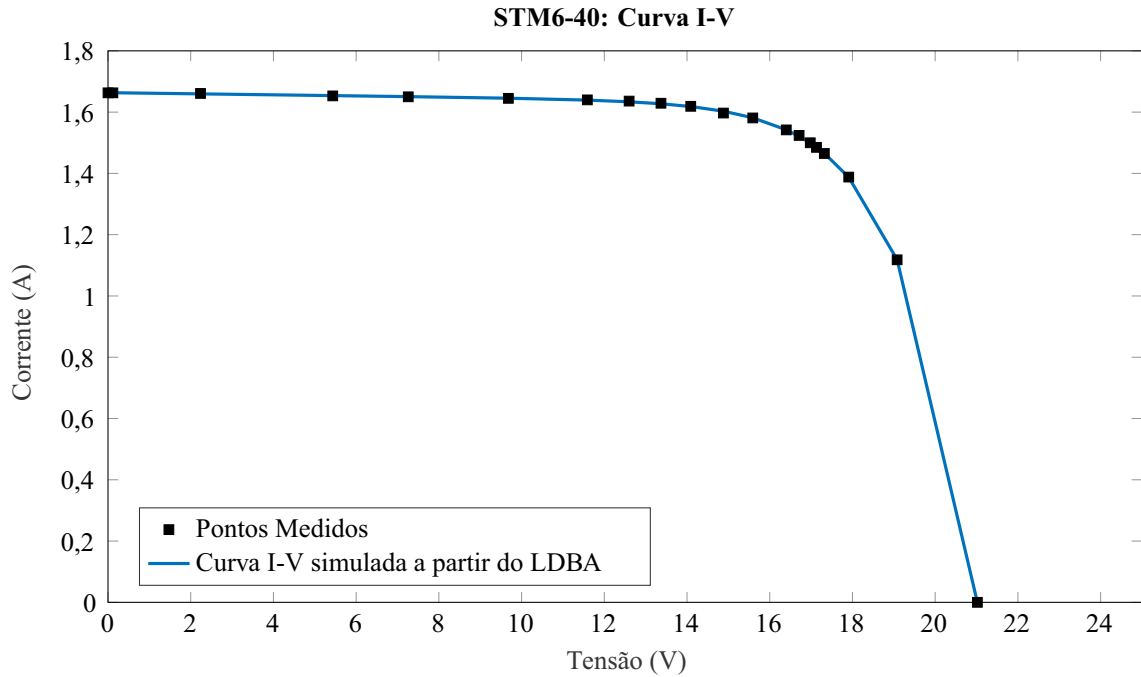


Figura 16 – Comparação entre os pontos medidos nos terminais do módulo fotovoltaico STM6-40 e a curva $I-V$ simulada pelo modelo de um diodo com os valores dos seus parâmetros dados pela melhor solução encontrada pelo LDBA.

Fonte: Próprio autor.

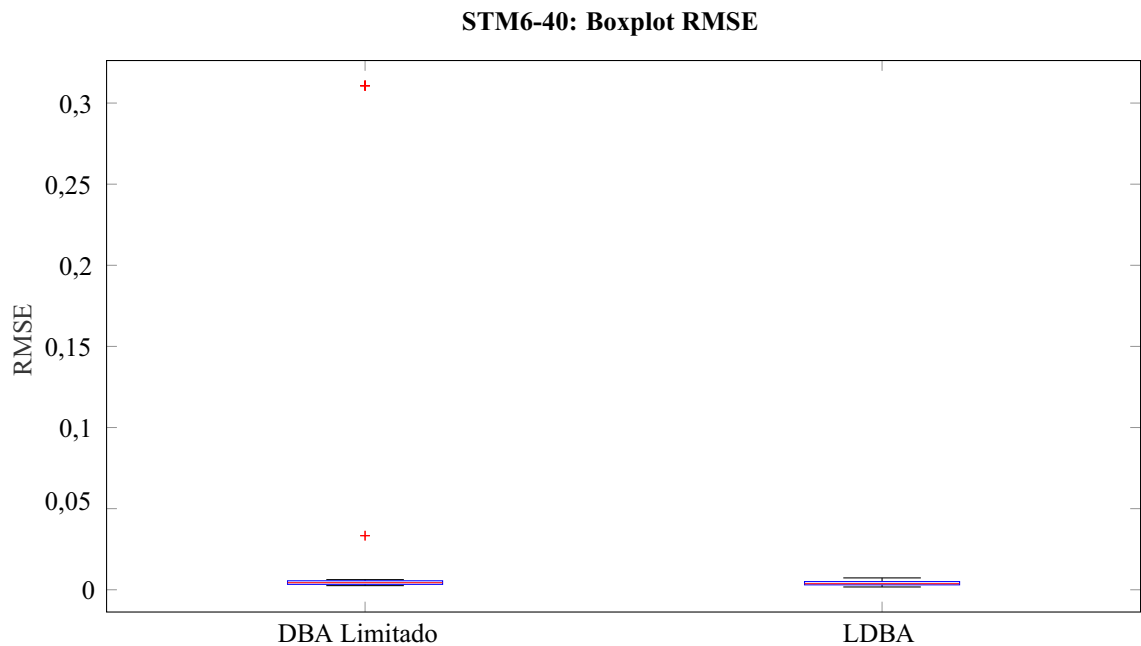


Figura 17 – Boxplot dos valores de RMSE referentes às soluções obtidas por cada técnica metaheurística nas 50 execuções independentes realizadas no estudo do módulo fotovoltaico STM6-40.

Fonte: Próprio autor.

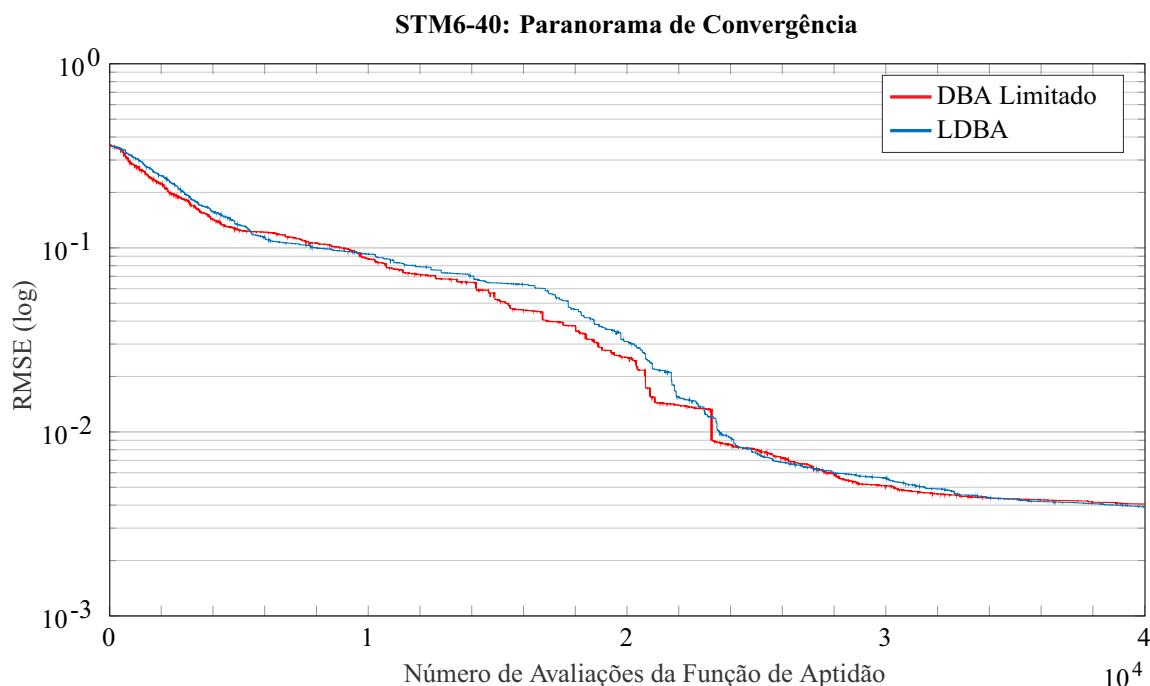


Figura 18 – Gráfico de convergência médio verificado por cada técnica metaheurística nas 50 execuções independentes realizadas no estudo do módulo fotovoltaico STM6-40.

Fonte: Próprio autor.

4.2.3 Estudo de Caso 3: Módulo Fotovoltaico de Silício Policristalino STP6-120

A Tabela 16 apresenta um panorama acerca da melhor solução encontrada por cada técnica metaheurística no contexto das suas 50 execuções independentes. Conforme se observa, o LDBA mais uma vez foi a técnica capaz de retornar a solução mais efetiva para o problema, sendo tal fato complementarmente corroborados pela Figura 19 e pelos dados apresentados na Tabela 28 no Apêndice A. Ao que se refere ao DBA, observa-se que este novamente retornou uma solução infactível para o problema. Além disso, como em somente 6 das 50 execuções realizadas este foi capaz de retornar uma solução factível, tem-se que sua análise foi mais uma vez desconsiderada.

Tabela 16 – Melhores resultados obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 50 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STP-120.

Metaheurística	I_{Ph} (A)	I_0 (μ A)	n	R_p (Ω)	R_s (Ω)	RMSE
DBA	0,01159	-2,66E-03	-1,67E+04	8,90E+01	-8,88E+01	5,27792E-04
DBA Limitado	7,45907	2,12186	1,25357	252,38636	0,00479	1,63089E-02
LDBA	7,44985	1,24787	1,21358	802,47062	0,00527	1,55099E-02

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 17 e a Figura 20 apresentam uma análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística no contexto das suas 50 execuções independentes. Através de seus resultados, é possível verificar que o LDBA se demonstrou significativamente

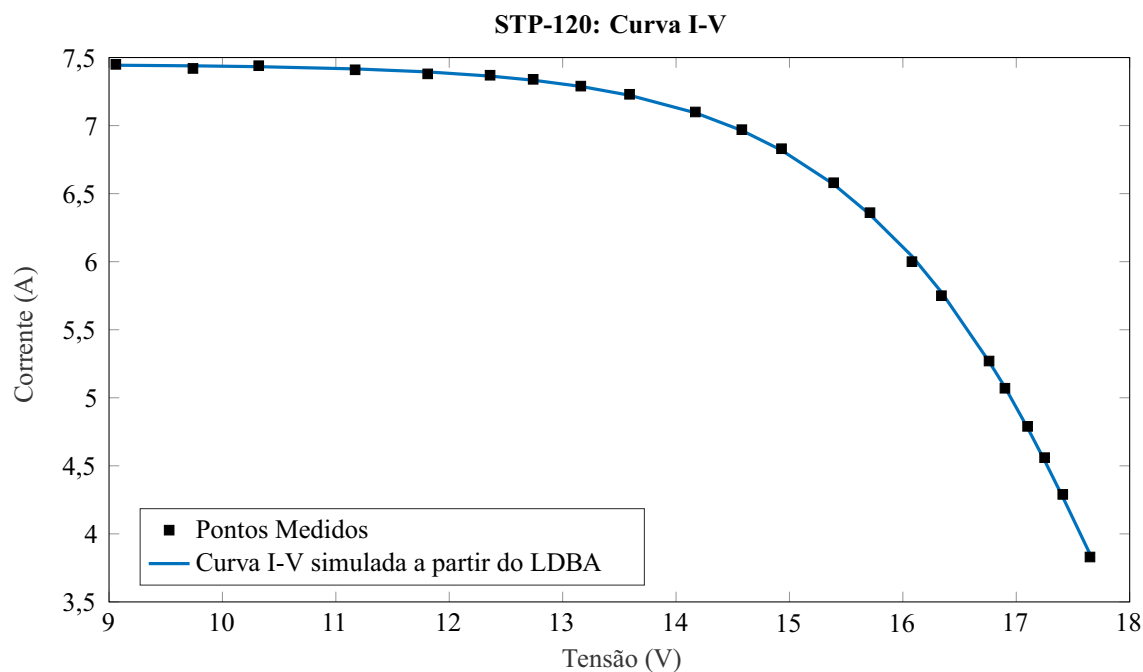


Figura 19 – Comparação entre os pontos medidos nos terminais do módulo fotovoltaico STP6-120 e a curva $I-V$ simulada pelo modelo de um diodo com os valores dos seus parâmetros dados pela melhor solução encontrada pelo LDBA.

Fonte: Próprio autor.

mais robusto que o DBA Limitado. Inclusive, na Figura 20 se destaca a discrepância de dispersão dos valores de RMSE observados na 50 execuções realizadas por cada técnica.

Tabela 17 – Análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 50 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STP-120.

Metaheurística	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Desvio Padrão
DBA	—	—	—	—	—
DBA Limitado	1,63089E-02	3,45920E-02	2,62241E-01	9,15878E-01	3,91947E-01
LDBA	1,55099E-02	2,13646E-02	2,17157E-02	3,28080E-02	4,31648E-03

Fonte: Próprio autor.

Por último, a Figura 21 apresenta um gráfico do perfil de convergência médio desempenhado por cada técnica metaheurística no contexto das suas 50 execuções independentes. Diferentemente dos estudos de casos anteriores, observa-se agora que de modo geral, a partir de 4.000 avaliações da função de aptidão o LDBA acelera em direção as soluções mais efetivas, enquanto o DBA Limitado praticamente se estabiliza em torno de soluções de menor qualidade.

4.2.4 Discussão

O fato do DBA em sua versão original ter preponderantemente retornado soluções infactíveis para os parâmetros do modelo de um diodo nos estudos de casos realizados, mesmo com as posições dos morcegos tendo sido inicialmente sorteadas dentro do espaço de solução

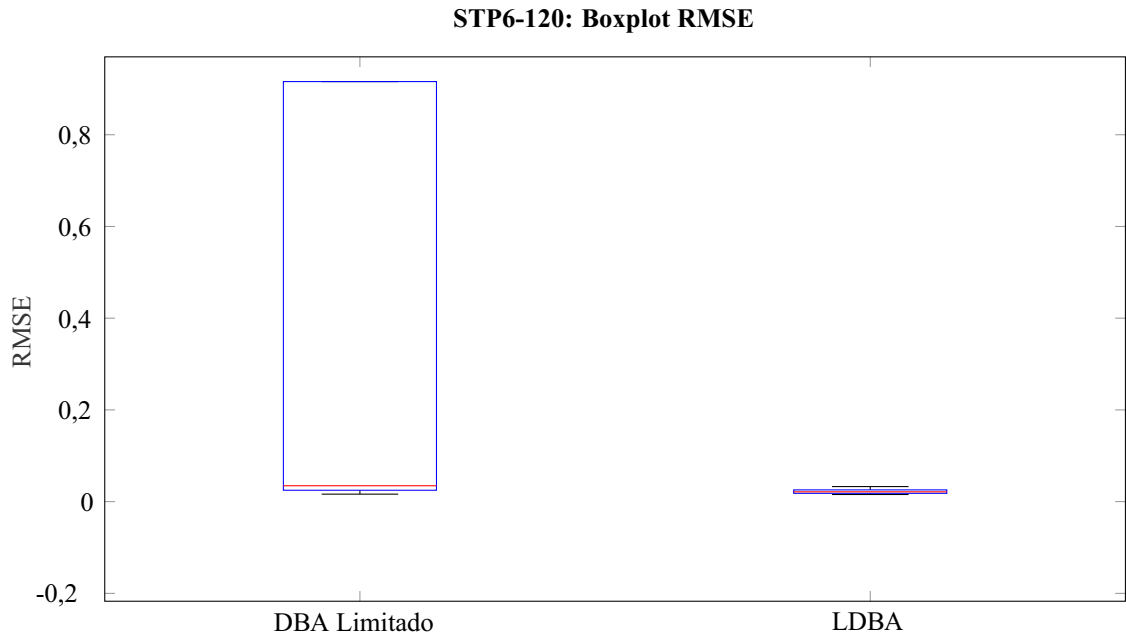


Figura 20 – Boxplot dos valores de RMSE referentes às soluções obtidas por cada técnica metaheurística nas 50 execuções independentes realizadas no estudo do módulo fotovoltaico STP6-120.

Fonte: Próprio autor.

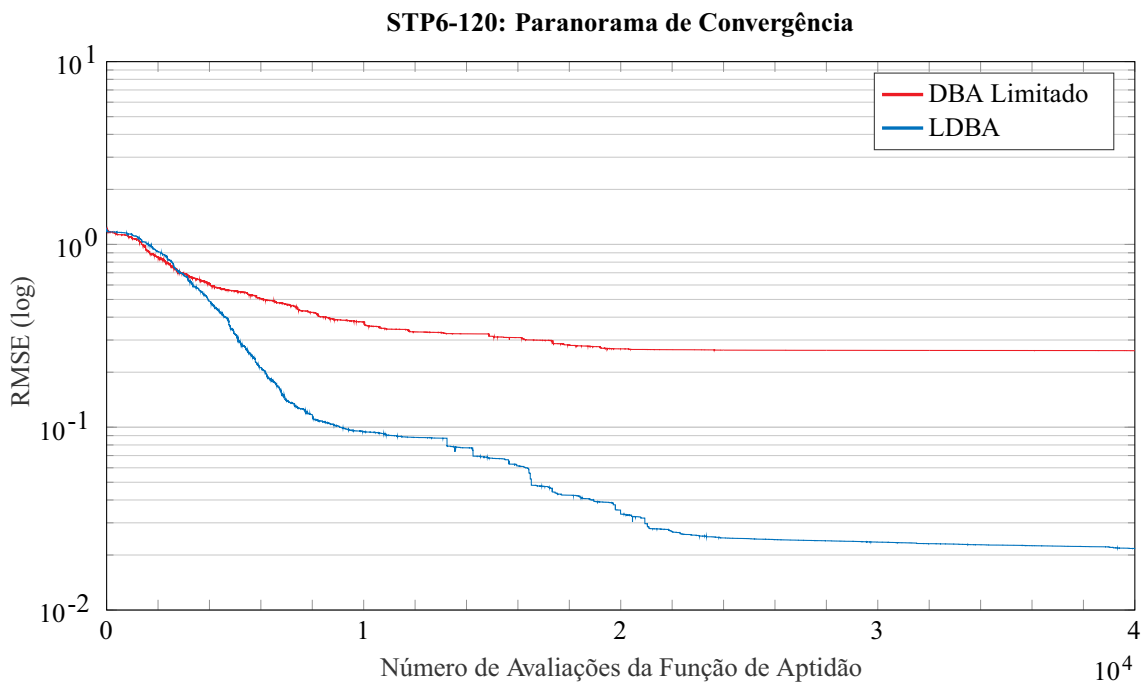


Figura 21 – Gráfico de convergência médio verificado por cada técnica metaheurística nas 50 execuções independentes realizadas no estudo do módulo fotovoltaico STP6-120.

Fonte: Próprio autor.

definido para o problema, se deve em parte a natureza desafiadora do próprio problema de otimização formulado para extração dos parâmetros e em parte à ausência de recursos internos ao seu algoritmo para a realização da análise e tratamento dos limites de valores eventualmente violados pelas variáveis de estado do problema (dimensões das posições dos morcegos).

Todavia, os resultados obtidos demonstram que o DBA quando munido de recursos deste tipo, ainda que simples tal como o tratamento rígido dos limites proposto, já se torna capaz de retornar soluções com boa qualidade para os parâmetros do modelo de um diodo. Esta situação inclusive, revela que a escolha do DBA como algoritmo-base da técnica metaheurística desenvolvida é algo significativamente oportuno.

Nesse âmbito, os competitivos resultados apresentados pelo LDBA em relação ao dito DBA Limitado, confirmam a pertinência dos recursos de diversificação introduzidos no código do DBA, isto é, da fase de voo randômico e das fases de tratamento dinâmico dos limites propostas. Tendo em vista os baixos valores de RMSE apresentados pelas melhores soluções obtidas pelo LDBA nos três estudos de casos realizados, os baixos valores de desvio padrão observados em meio as suas respectivas execuções sistemáticas e o seu bom comportamento de convergência verificado através dos gráficos apresentados nas Figuras 15, 18 e 21, é possível concluir que a introdução desses recursos de diversificação fizeram do LDBA uma técnica metaheurística mais efetiva, robusta e eficiente que o DBA; o que, portanto, ratifica a pertinência do seu desenvolvimento e comprova a sua capacidade de entregar os ganhos computacionais desejados.

É válido comentar que análises não foram realizadas com o intuito de averiguar os ganhos especificamente providos por cada um dos referidos recursos introduzidos, pois, o objetivo primário deste teste era averiguar os ganhos computacionais oferecidos pelo emprego do LDBA na resolução do problema de otimização formulado, em relação ao emprego do DBA. Além disso, tal análise iria requerer que avaliações mais apuradas fossem realizadas em relação aos parâmetros de controle definidos para o LDBA, visto que a lógica por traz do tratamento dinâmico de limites proposto é dependente do parâmetro de amplitude da onda sonora emitida pelos morcegos (vide Tabela 6). Sendo assim, optou-se por deixar tal análise para um estudo posterior.

Por fim, é importante observar que frente ao já esperado insucesso apresentado pelo DBA nos estudos de casos realizados, fica evidente a necessidade de se reportar em publicações a forma como os tratamentos dos limites são considerados durante o emprego de uma técnica metaheurística na resolução do problema de otimização tipicamente formulado para a extração dos parâmetros do modelo de um diodo; prática esta, infelizmente não adotada pelos trabalhos encontrados na literatura, conforme mencionado na seção 2.3 do Capítulo 2.

4.3 COMPARAÇÃO COM METODOLOGIAS PUBLICADAS NA LITERATURA

Uma vez validada a capacidade do LDBA de resolver satisfatoriamente o problema de otimização formulado para extração dos parâmetros do modelo de um diodo, torna-se interessante agora comparar o seu desempenho na realização de tal tarefa, frente aqueles reportados para outros destacados métodos na literatura.

Sendo assim dois estudos comparativos são realizados a seguir. O primeiro tendo em vista as técnicas metaheurísticas tradicionais e o segundo considerando as técnicas metaheurísticas modificadas e híbridas. Vale destacar que ambos os casos, as análises realizadas foram delimitadas pelas características e pela forma de apresentação dos resultados nos trabalhos tomados como referência.

4.3.1 Comparação com Técnicas Metaheurísticas Tradicionais

Em MA et al. (2016), são apresentados os melhores resultados obtidos pelas técnicas metaheurísticas GA, DE, PSO, BFA, ABC e CS, quando estas aplicadas na extração dos parâmetros da célula fotovoltaica RTC France.

No âmbito deste referido trabalho, foram considerados como condições de teste: 40 execuções independentes de cada técnica metaheurística e um número máximo de 5.000 iterações. Sendo assim, ao aplicar novamente o LDBA na extração dos parâmetros desse dispositivo mediante a estas condições, tem-se que os resultados apresentados na Tabela 18 foram obtidos.

Vale destacar que os parâmetros de controle considerados para o LDBA, foram os mesmos definidos anteriormente na Tabela 10. Além disso, o tamanho de sua população foi novamente determinada de modo a garantir que todas as técnicas analisadas tenham realizado um mesmo número de avaliações da função de aptidão a cada iteração processada.

Posto isto, tem-se que os resultados apresentados na Tabela 18 demonstram que o LDBA é capaz de encontrar uma solução melhor para os parâmetros da célula RTC France do que o GA e o BFA, sendo estas similares e, conseqüentemente, tão efetivas quanto aquelas retornadas pelo DE, PSO, ABC e CS.

Tabela 18 – Melhores resultados obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 40 vezes na modelagem da célula fotovoltaica RTC France.

Metaheurística	N_B	I_{ph} (A)	I_0 (A)	n	R_P (Ω)	R_S (Ω)	RMSE
GA	50	0,7599	2,49E-07	1,4553	63,299	0,0377	1,37E-03
DE	50	0,7608	3,23E-07	1,4812	53,719	0,0364	9,86E-04
PSO	50	0,7608	3,23E-07	1,4812	53,719	0,0364	9,86E-04
BFA	10	0,7605	3,75E-07	1,4963	57,410	0,0361	1,30E-03
ABC	25	0,7608	3,21E-07	1,4807	53,930	0,0364	9,86E-04
CS	50	0,7608	3,23E-07	1,4812	53,719	0,0364	9,86E-04
LDBA	25	0,7608	3,23E-07	1,4812	53,719	0,0364	9,86E-04

Fonte: Próprio autor, a partir dos dados tabelados apresentados em MA et al. (2016).

No entanto, os resultados apresentados na Tabela 19, revelam que o LDBA é expressivamente mais robusto do que estas técnicas metaheurísticas tradicionais. Nas 40 execuções realizadas, este praticamente encontrou em todas as vezes a melhor solução descrita na Tabela 18, enquanto as demais técnicas, não.

Portanto, através dessa análise comparativa é possível constatar que o LDBA, ao menos para o caso deste dispositivo, se apresenta como uma técnica metaheurística tão efetiva quanto o DE, PSO, ABC e CS, sendo, porém, consideravelmente mais confiável.

Tabela 19 – Análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 40 vezes na modelagem da célula fotovoltaica RTC France.

Metaheurística	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Desvio Padrão
GA	1,37E-03	—	> 0,14	—	—
DE	9,86E-04	—	> 0,14	—	—
PSO	9,86E-04	—	> 0,14	—	—
BFA	1,30E-03	—	> 0,14	—	—
ABC	9,86E-04	—	> 0,14	—	—
CS	9,86E-04	—	> 0,14	—	—
LDBA	9,86E-04	9,86E-04	9,86E-04	9,86E-04	3,23E-17

Fonte: Próprio autor, a partir dos dados gráficos apresentados em MA et al. (2016).

4.3.2 Comparação com Técnicas Metaheurísticas Modificadas e Híbridas

Em CHEN; YU (2019), são apresentados os resultados obtidos por diversas técnicas metaheurísticas tradicionais, modificadas e híbridas quando estas aplicadas na modelagem dos três dispositivos de geração fotovoltaica descritos na seção 4.1. Este trabalho, por sua vez, considera como condições de teste: 30 execuções independentes de cada técnica metaheurística e um número máximo de 50.000 avaliações da função de aptidão.

Entretanto, nem todos os resultados apresentados por este podem ser considerados para realização de um estudo comparativo. Diferentemente do critério adotado por MA et al. (2016) e o qual foi incorporado no contexto desta pesquisa, tal trabalho não faz ponderações em relação ao número de avaliações da função de aptidão realizadas em uma iteração por cada técnica; de modo que este somente fixa as referidas condições de teste e determina o tamanho da população de cada técnica conforme recomendado por seus desenvolvedores.

Assim, dentre os resultados apresentados por CHEN; YU (2019), os únicos que podem ser considerados sem desrespeitar o critério de comparação estabelecido no contexto desta pesquisa, são os que se referem às técnicas metaheurísticas modificadas de *otimização por dispersão de partículas com aprendizagem compreensiva* (em inglês, "*comprehensive learning PSO*" - CLPSO) e de *otimização por dispersão de partículas com aprendizagem baseada em biogeografia* (em inglês, "*biogeography-based learning PSO*" - BLPSO), e à técnica declaradamente híbrida BHCS.

Dessa forma, tem-se que o LDBA foi novamente aplicado na extração dos parâmetros dos referidos dispositivos de geração fotovoltaica, tendo em vista agora, as condições de teste consideradas por tal trabalho. Destaca-se que novamente os seus parâmetros de controle foram mantidos tal como anteriormente definido na Tabela 10.

Os resultados obtidos para o caso da célula fotovoltaica RTC France são apresentados nas Tabelas 20 e 21. Através destes, é possível constatar que o LDBA se demonstra superior ao CLPSO e ao BLPSO, e tão efetivo quanto o BHCS na extração dos parâmetros da célula. No entanto, apesar do desvio padrão verificado nos valores de RMSE das soluções encontradas nas 30 execuções do LDBA indicar uma satisfatória robustez, tem-se que o desvio padrão associado ao BHCS revela sua superioridade neste quesito.

Tabela 20 – Melhores resultados obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 30 vezes na modelagem da célula fotovoltaica RTC France.

Metaheurística	N_B	I_{ph} (A)	I_0 (μ A)	n	R_P (Ω)	R_S (Ω)	RMSE
CLPSO	40	0,76064	0,33454	1,48469	56,03420	0,03623	9,92075E-04
BLPSO	40	0,76063	0,42518	1,50940	62,58528	0,03523	1,12390E-03
BHCS	20	0,76078	0,32302	1,48118	53,71852	0,03638	9,86022E-04
LDBA	20	0,76078	0,32302	1,48119	53,71853	0,03638	9,86022E-04

Fonte: Próprio autor, a partir dos dados tabelados apresentados em CHEN; YU (2019).

Tabela 21 – Análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 30 vezes na modelagem da célula fotovoltaica RTC France.

Metaheurística	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Desvio Padrão
CLPSO	9,92075E-04	1,04638E-03	1,05871E-03	1,18724E-03	5,01090E-05
BLPSO	1,12390E-03	1,40625E-03	1,40911E-03	1,70774E-03	1,61610E-04
BHCS	9,86022E-04	9,86022E-04	9,86022E-04	9,86022E-04	2,61254E-17
LDBA	9,86022E-04	9,86022E-04	9,89598E-04	1,01902E-03	9,45091E-06

Fonte: Próprio autor, a partir dos dados gráficos apresentados em CHEN; YU (2019).

Por outro lado, os resultados encontrados para o caso do módulo fotovoltaico STM6-40 são apresentados nas Tabelas 22 e 23. A exemplo do caso anterior, o LDBA novamente se demonstra superior ao CLPSO e ao BLPSO, e tão efetivo quanto o BHCS na extração dos parâmetros. Porém, agora se observa em meio as métricas estatísticas apresentadas na Tabela 23, que o LDBA alcança um nível de robustez idêntico ao reportado para o BHCS, sendo tal característica entretanto, ainda ligeiramente inferior.

Finalmente, os resultados obtidos para o caso do módulo fotovoltaico STP6-120 são apresentados nas Tabelas 24 e 25. Diferentemente dos casos anteriores, esses resultados demonstram que o LDBA foi a técnica metaheurística capaz de prover a melhor solução para os valores dos parâmetros deste módulo, sendo portanto, mais efetiva que o CLPSO, o BLPSO e o BHCS. Além disso, a qualidade dos resultados obtidos nas 30 execuções realizadas de cada técnica, revelam uma maior robustez do LDBA frente as estas técnicas.

Em vista desses resultados, é possível concluir que o LDBA apresenta um desempenho superior ao CLPSO e ao BLPSO na extração dos parâmetros do modelo de um diodo. Já em relação ao BHCS, verifica-se que estes apresentam um nível de desempenho similar, sendo o LDBA no entanto, mais efetivo.

Tabela 22 – Melhores resultados obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 30 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STM6-40.

Metaheurística	N_B	I_{Ph} (A)	I_0 (μ A)	n	R_P (Ω)	R_S (Ω)	RMSE
CLPSO	40	1,65953	3,71285	1,60812	26,48992	0,00197	2,81059E-03
BLPSO	40	1,66014	6,40784	1,67848	31,83647	0,00000	3,65883E-03
BHCS	20	1,66390	1,73866	1,52030	15,92829	0,00427	1,72981E-03
LDBA	20	1,66390	1,73866	1,52030	15,92829	0,00427	1,72981E-03

Fonte: Próprio autor, a partir dos dados tabelados apresentados em CHEN; YU (2019).

Tabela 23 – Análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 30 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STM6-40.

Metaheurística	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Desvio Padrão
CLPSO	2,81059E-03	4,60132E-03	4,77023E-03	8,32222E-03	1,51852E-03
BLPSO	3,65883E-03	4,31558E-03	4,79399E-03	4,79399E-03	1,26862E-03
BHCS	1,72981E-03	1,72981E-03	1,83648E-03	3,32985E-03	4,05942E-04
LDBA	1,72981E-03	2,75854E-03	2,85680E-03	5,92824E-03	9,07245E-04

Fonte: Próprio autor, a partir dos dados gráficos apresentados em CHEN; YU (2019).

Tabela 24 – Melhores resultados obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 30 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STP6-120.

Metaheurística	N_B	I_{Ph} (A)	I_0 (μ A)	n	R_P (Ω)	R_S (Ω)	RMSE
CLPSO	40	7,45596	2,67067	1,27147	1070,90119	0,00454	1,71932E-02
BLPSO	40	7,49643	10,81803	1,40302	990,91204	0,00377	2,97469E-02
BHCS	20	7,47253	2,33499	1,2601	22,21991	0,00459	1,66006E-02
LDBA	20	7,44970	1,24337	1,21331	581,94995	0,00527	1,55133E-02

Fonte: Próprio autor, a partir dos dados tabelados apresentados em CHEN; YU (2019).

Tabela 25 – Análise estatística dos valores de RMSE obtidos por cada técnica metaheurística, quando estas executadas 30 vezes na modelagem do módulo fotovoltaico STP6-120.

Metaheurística	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Desvio Padrão
CLPSO	1,71932E-02	2,65921E-02	2,71432E-02	4,45544E-02	7,63878E-03
BLPSO	2,97469E-02	4,05E-02	4,03323E-02	4,03323E-02	4,09791E-03
BHCS	1,66006E-02	1,66006E-02	2,43602E-02	1,34824E-01	2,60620E-02
LDBA	1,55133E-02	2,10159E-02	2,07652E-02	2,55174E-02	2,46086E-03

Fonte: Próprio autor, a partir dos dados gráficos apresentados em CHEN; YU (2019).

4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo apresentou os testes realizados para validação da técnica metaheurística desenvolvida, bem como os respectivos resultados obtidos nestes.

Através da análise realizada da metodologia proposta apresentada na seção 4.2, ficou demonstrado que os recursos de diversificação e tratamento dos limites introduzidos na construção do LDBA realmente são capazes de lhe prover uma maior eficácia e eficiência frente ao DBA. Portanto, tal fato corrobora a pertinência de desenvolvimento do LDBA para alcance dos objetivos gerais pretendidos por esta pesquisa.

Já a partir das análises comparativas realizadas na seção 4.3, ficou comprovado que o LDBA é capaz de solucionar satisfatoriamente o problema de otimização tipicamente formulado para extração dos parâmetros do modelo de um diodo; se apresentando inclusive, como uma técnica bastante competitiva frente outras nove destacadas técnicas metaheurísticas tradicionais, modificadas e híbridas reportadas na literatura.

Em vista destas constatações, é possível concluir que a pesquisa realizada cumpriu os seus objetivos com êxito.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, uma nova técnica metaheurística fundamentalmente baseada no algoritmo de morcego foi desenvolvida para resolução do problema de otimização tipicamente formulado para extração dos parâmetros do modelo de um diodo a partir de dados experimentais de uma curva característica de um gerador fotovoltaico.

Assim como apresentado no Capítulo 3, esta técnica foi construída a partir do algoritmo que caracteriza uma versão modificada do BA, o qual é chamado DBA. A justificativa para tanto, reside no fato deste último, ao contrário do primeiro, possuir recursos que lhe permitem lidar ao longo do processo de busca da solução ótima, de maneira simples e conveniente com as diferentes ordens de grandeza comumente verificadas entre os parâmetros do modelo de um diodo. Complementarmente, é observado ainda que este oferece recursos adicionais associados principalmente ao processo de intensificação de busca da solução ótima, os quais são interessantes para o contexto de aplicação almejado.

Todavia, a partir de uma análise realizada no seu algoritmo foi constatado que diferentemente do BA, este não possuía como recurso de diversificação do processo de busca da solução ótima uma etapa de voo randômico ou de qualquer outro tipo que lhe permitisse realizar uma exploração mais independente do espaço de solução do problema, fato este que colocou em xeque o sucesso do seu emprego sobre o problema de otimização formulado, visto a sua peculiar natureza. Além disso, foi constatado ainda que este assim como BA, não dispunha originalmente de recursos para o tratamento dos limites de valores assumidos pelas variáveis de estado do problema.

Dessa forma, com intuito de se obter uma técnica suficientemente efetiva e robusta para a extração dos parâmetros do modelo de um diodo, tem-se que dois instrumentos de diversificação inéditos foram introduzidos no algoritmo do DBA. O primeiro diz respeito a uma fase de voo randômico baseada no chamado voo de Lévy. Conforme destacado, esta estratégia de randomização se apresenta como uma das mais eficientes da literatura, sendo inclusive significativamente superior àquela adotada pelo BA. Já o segundo, se refere a etapas de tratamento dinâmico dos limites. Estas além corrigirem os valores inadequados eventualmente assumidos pelas variáveis de estado, ainda conferem ao algoritmo um recurso adicional de exploração do espaço de solução do problema, visto que durante a fase de maior predomínio dos processos de diversificação, estas realizam tal correção sorteando aleatoriamente um novo valor dentro da faixa permitida à variável em questão.

Feito isso, no Capítulo 4, uma sequência de testes foi realizada com intuito de validar o algoritmo resultante destas modificações, o qual foi denominado de LDBA. Seguindo as melhores práticas de análise levantadas no Capítulo 2, tais testes foram realizados tendo em vista os dados experimentais de curvas características de dispositivos de geração fotovoltaica comumente adotados na literatura; sendo os resultados obtidos, analisados numericamente e graficamente em

termos de efetividade, robustez e, quando possível, de velocidade de convergência.

A partir destas análises ficou provada(o):

- A pertinência dos recursos ineditamente introduzidos na construção do LDBA, visto que a qualidade das suas soluções retornadas para os parâmetros do modelo de um diodo, bem como o seu próprio desempenho computacional, foram observados serem expressivamente superiores aos apresentados pelo DBA;
- O sucesso do LDBA em solucionar o problema de otimização tipicamente formulado para extração dos parâmetros do modelo de um diodo via dados experimentais, visto que, com uma reduzida população de morcegos e com configurações padrões de seus parâmetros de controle, este conseguiu alcançar as melhores soluções reportadas na literatura para os dispositivos de geração fotovoltaica considerados, com uma satisfatória robustez.
- A sua boa competitividade frente algumas das mais destacadas técnicas metaheurísticas tradicionais (GA, DE, PSO, ABC, BFA e CS), modificadas (CLPSO e BLPSO) e híbrida (HBCS), já empregadas na extração dos parâmetros do modelo de um diodo, visto que nos estudos de caso realizados, esta se mostrou mais efetiva e/ou robusta que as demais então analisadas.

Portanto, é possível concluir que o presente trabalho cumpre os seus objetivos traçados no Capítulo 1 com o devido êxito e, nesse sentido, contribui para o desenvolvimento do setor fotovoltaico oferecendo aos seus agentes um novo método capaz de realizar a extração dos parâmetros do modelo de um diodo via dados experimentais de maneira efetiva e confiável.

5.1 PROPOSTA DE CONTINUIDADE

Tendo em vista as ponderações apresentadas no decorrer deste trabalho, é sugerido para continuidade da sua pesquisa a realização dos seguintes estudos:

- Ampla análise dos parâmetros de controle do LDBA e verificação das contribuições individuais oferecidas por cada um dos recursos de diversificação que o caracteriza;
- Avaliação do desempenho do LDBA na resolução do problema de otimização tipicamente formulado para extração dos parâmetros de modelos físicos de geradores fotovoltaicos mais complexos, tal como o modelo de dois diodos (sete parâmetros desconhecidos);
- Validação dos métodos de extração dos parâmetros do modelo de um diodo via dados da ficha técnica, tendo em vista as soluções retornadas pelo LDBA para as curvas características experimentais que originam estes dados;

- Validação dos métodos de traslação dos parâmetros do modelo de um diodo, tendo em vista as soluções retornadas pelo LDBA para as curvas características experimentalmente obtidas para diversas condições de operação de um dado gerador fotovoltaico.

Complementarmente, destaca-se que o LDBA pode ser empregado em qualquer tipo estudo de engenharia que necessite realizar a extração dos parâmetros do modelo de um diodo via dados experimentais, como nominalmente, aqueles que se dedicam a avaliar o impacto do envelhecimento sobre o comportamento elétrico dos geradores fotovoltaicos, ou mesmo, otimizar os aspectos construtivos de certa célula fotovoltaica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASSI, R. et al. Identification of unknown parameters of solar cell models: A comprehensive overview of available approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 90, p. 453–474, 2018.
- ADAMS, W. G.; DAY, R. IX. the action of light on selenium. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, The Royal Society London, n. 167, p. 313–349, 1877.
- ARAB, A. H.; CHENLO, F.; BENGHANEM, M. Loss-of-load probability of photovoltaic water pumping systems. *Solar energy*, Elsevier, v. 76, n. 6, p. 713–723, 2004.
- ARAUJO, G.; SANCHEZ, E. Analytical expressions for the determination of the maximum power point and the fill factor of a solar cell. *Solar Cells*, Elsevier, v. 5, n. 4, p. 377–386, 1982.
- ASKARZADEH, A.; REZAZADEH, A. Extraction of maximum power point in solar cells using bird mating optimizer-based parameters identification approach. *Solar energy*, Elsevier, v. 90, p. 123–133, 2013.
- BABU, T. S. et al. Parameter extraction of two diode solar pv model using fireworks algorithm. *Solar Energy*, Elsevier, v. 140, p. 265–276, 2016.
- BAI, J. et al. Development of a new compound method to extract the five parameters of pv modules. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 79, p. 294–303, 2014.
- BATZELIS, E. Non-iterative methods for the extraction of the single-diode model parameters of photovoltaic modules: A review and comparative assessment. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 3, p. 358, 2019.
- BATZELIS, E. I. Simple pv performance equations theoretically well founded on the single-diode model. *IEEE Journal of Photovoltaics*, IEEE, v. 7, n. 5, p. 1400–1409, 2017.
- BATZELIS, E. I. et al. Computation of the lambert w function in photovoltaic modeling. 2019.
- BECQUEREL, M. Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, v. 9, p. 561–567, 1839.
- BENDIB, B.; BELMILI, H.; KRIM, F. A survey of the most used mppt methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 45, p. 637–648, 2015.
- BISHOP, J. Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits. *Solar cells*, Elsevier, v. 25, n. 1, p. 73–89, 1988.
- BOUZIDI, K.; CHEGAAR, M.; BOUHEMADOU, A. Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Elsevier, v. 91, n. 18, p. 1647–1651, 2007.
- BOYD, M. T. et al. Evaluation and validation of equivalent circuit photovoltaic solar cell performance models. *Journal of solar energy engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 133, n. 2, p. 021005, 2011.

- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. *Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos*. [S.l.]: São Paulo: Pearson, 2013.
- BRANO, V. L.; CIULLA, G. An efficient analytical approach for obtaining a five parameters model of photovoltaic modules using only reference data. *Applied Energy*, Elsevier, v. 111, p. 894–903, 2013.
- BRANO, V. L. et al. An improved five-parameter model for photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Elsevier, v. 94, n. 8, p. 1358–1370, 2010.
- CHAKRI, A. et al. New directional bat algorithm for continuous optimization problems. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 69, p. 159–175, 2017.
- CHAN, D.; PHILLIPS, J.; PHANG, J. A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters. *Solid-State Electronics*, Elsevier, v. 29, n. 3, p. 329–337, 1986.
- CHATTERJEE, A.; KEYHANI, A.; KAPOOR, D. Identification of photovoltaic source models. *IEEE Transactions on Energy conversion*, IEEE, v. 26, n. 3, p. 883–889, 2011.
- CHEGAAR, M.; OUENNOUGHI, Z.; HOFFMANN, A. A new method for evaluating illuminated solar cell parameters. *Solid-state electronics*, Elsevier, v. 45, n. 2, p. 293–296, 2001.
- CHEN, X.; YU, K. Hybridizing cuckoo search algorithm with biogeography-based optimization for estimating photovoltaic model parameters. *Solar Energy*, Elsevier, v. 180, p. 192–206, 2019.
- CHIN, V. J.; SALAM, Z.; ISHAQUE, K. Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review. *Applied Energy*, Elsevier, v. 154, p. 500–519, 2015.
- CIULLA, G. et al. A comparison of different one-diode models for the representation of i–v characteristic of a pv cell. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 32, p. 684–696, 2014.
- CORDEIRO, J. A.; PARPINELLI, R. S.; LOPES, H. S. Análise de sensibilidade dos parâmetros do bat algorithm e comparaç ao de desempenho. 2012.
- COSTA, W. T. da et al. Identification of photovoltaic model parameters by differential evolution. In: IEEE. *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*. [S.l.], 2010. p. 931–936.
- CUEVAS, A. The recombination parameter j_0 . *Energy Procedia*, Elsevier, v. 55, p. 53–62, 2014.
- DEOTTI, L. M. P.; GOMES, F. V. Análise de viabilidade técnica e econômica de um sistema de microgeração solar fotovoltaica residencial com autoconsumo remoto. In: *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*. [S.l.: s.n.], 2018.
- DOBOS, A. P. An improved coefficient calculator for the california energy commission 6 parameter photovoltaic module model. *Journal of solar energy engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 134, n. 2, p. 021011, 2012.
- DUCK, B. C. et al. Comparing standard translation methods for predicting photovoltaic energy production. In: IEEE. *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. [S.l.], 2013. p. 0763–0768.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

DUNN, L.; GOSTEIN, M.; EMERY, K. Comparison of pyranometers vs. pv reference cells for evaluation of pv array performance. In: IEEE. *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. [S.l.], 2012. p. 002899–002904.

EASWARAKHANTHAN, T. et al. Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers. *International journal of solar energy*, Taylor & Francis, v. 4, n. 1, p. 1–12, 1986.

FILHO, G. L.; FRANCO, R. A. P.; VIEIRA, F. H. T. Estimação de parâmetros de painéis fotovoltaicos utilizando o algoritmo firefly com atualização em função da irradiância e temperatura. In: *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*. [S.l.: s.n.], 2018.

FRAUNHOFER, I. Photovoltaics report. 2019.

FREEMAN, J. et al. Using measured plane-of-array data directly in photovoltaic modeling: Methodology and validation. In: IEEE. *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. [S.l.], 2016. p. 2653–2656.

GILMAN, P. et al. Sam photovoltaic model technical reference update. *NREL: Golden, CO, USA*, 2018.

GONG, W.; CAI, Z. Parameter extraction of solar cell models using repaired adaptive differential evolution. *Solar Energy*, Elsevier, v. 94, p. 209–220, 2013.

GREEN, M. A. *Solar cells: operating principles, technology, and system applications*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, Inc., 1982. 288 p., 1982.

HÄBERLIN, H. *Photovoltaics: system design and practice*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.

HEJRI, M.; MOKHTARI, H. On the comprehensive parametrization of the photovoltaic (pv) cells and modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, IEEE, v. 7, n. 1, p. 250–258, 2016.

HEYDENREICH, W.; MÜLLER, B.; REISE, C. Describing the world with three parameters: a new approach to pv module power modelling. In: *23rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 2786–2789.

HONSBURG, C.; BOWDEN, S. Pv education. *ORG*. Disponível em: <<http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/sun-position-calculator/>> [Acessado em 22 de maio de 2019], 2019.

HULD, T. et al. A power-rating model for crystalline silicon pv modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Elsevier, v. 95, n. 12, p. 3359–3369, 2011.

IBRAHIM, H.; ANANI, N. Variations of pv module parameters with irradiance and temperature. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 134, p. 276–285, 2017.

INPE, A. B. d. E. S. Instituto nacional de pesquisas espaciais. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*. Disponível em: <<http://labren.ccst.inpe.br/index.html/>> [Acessado em 15 de maio de 2019], 2019.

- JAIN, A.; KAPOOR, A. A new method to determine the diode ideality factor of real solar cell using lambert w-function. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Elsevier, v. 85, n. 3, p. 391–396, 2005.
- JENA, D.; RAMANA, V. V. Modeling of photovoltaic system for uniform and non-uniform irradiance: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 52, p. 400–417, 2015.
- JORDEHI, A. R. Parameter estimation of solar photovoltaic (pv) cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 61, p. 354–371, 2016.
- KANCHEV, H. et al. Energy management and operational planning of a microgrid with a pv-based active generator for smart grid applications. *IEEE transactions on industrial electronics*, IEEE, v. 58, n. 10, p. 4583–4592, 2011.
- KARABOGA, D. *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*. [S.l.], 2005.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization (pso). In: *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 1942–1948.
- KENNERUD, K. L. Analysis of performance degradation in cds solar cells. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, IEEE, n. 6, p. 912–917, 1969.
- KING, D. L.; KRATOCHVIL, J. A.; BOYSON, W. E. *Photovoltaic array performance model*. [S.l.]: United States. Department of Energy, 2004.
- KUMAR, M.; KUMAR, A. An efficient parameters extraction technique of photovoltaic models for performance assessment. *Solar Energy*, Elsevier, v. 158, p. 192–206, 2017.
- KUMARI, P. A.; GEETHANJALI, P. Parameter estimation for photovoltaic system under normal and partial shading conditions: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 84, p. 1–11, 2018.
- LAUDANI, A.; FULGINEI, F. R.; SALVINI, A. High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental i–v curves by using reduced forms. *Solar Energy*, Elsevier, v. 103, p. 316–326, 2014.
- LAUDANI, A. et al. Reduced-form of the photovoltaic five-parameter model for efficient computation of parameters. *Solar Energy*, Elsevier, v. 97, p. 122–127, 2013.
- LINDEN, R. *Algoritmos genéticos (2a edição)*. [S.l.]: Brasport, 2008.
- MA, J. et al. Comparative performance on photovoltaic model parameter identification via bio-inspired algorithms. *Solar Energy*, Elsevier, v. 132, p. 606–616, 2016.
- MA, J. et al. Parameter estimation of photovoltaic models via cuckoo search. *Journal of applied mathematics*, Hindawi, v. 2013, 2013.
- MA, T.; YANG, H.; LU, L. Development of a model to simulate the performance characteristics of crystalline silicon photovoltaic modules/strings/arrays. *Solar Energy*, Elsevier, v. 100, p. 31–41, 2014.
- MA, T.; YANG, H.; LU, L. Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 36, p. 304–315, 2014.

- MANTEGNA, R. N. Fast, accurate algorithm for numerical simulation of levy stable stochastic processes. *Physical Review E*, APS, v. 49, n. 5, p. 4677, 1994.
- MARION, B. et al. New data set for validating pv module performance models. In: IEEE. *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. [S.l.], 2014. p. 1362–1366.
- MERMOUD, A.; WITTMER, B. Pvsyst user's manual. Switzerland. Disponível em: <<http://files.pvsyst.com/help/>> [Acessado em 10 de junho de 2019], 2019.
- MERTEN, J. et al. Improved equivalent circuit and analytical model for amorphous silicon solar cells and modules. *IEEE Transactions on electron devices*, IEEE, v. 45, n. 2, p. 423–429, 1998.
- MERTENS, K. *Photovoltaics: fundamentals, technology, and practice*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- MIRJALILI, S.; MIRJALILI, S. M.; LEWIS, A. Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, Elsevier, v. 69, p. 46–61, 2014.
- MIRZAPOUR, O.; ARPANAHI, S. K. Photovoltaic parameter estimation using heuristic optimization. In: IEEE. *2017 IEEE 4th International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI)*. [S.l.], 2017. p. 0792–0797.
- MYERS, D. R. *Solar radiation: practical modeling for renewable energy applications*. [S.l.]: CRC press, 2013.
- NAYAK, B.; MOHAPATRA, A.; MOHANTY, K. Parameters estimation of photovoltaic module using nonlinear least square algorithm: A comparative study. In: IEEE. *2013 Annual IEEE India Conference (INDICON)*. [S.l.], 2013. p. 1–6.
- NIU, Q.; ZHANG, H.; LI, K. An improved tlbo with elite strategy for parameters identification of pem fuel cell and solar cell models. *International journal of hydrogen energy*, Elsevier, v. 39, n. 8, p. 3837–3854, 2014.
- NIU, Q.; ZHANG, L.; LI, K. A biogeography-based optimization algorithm with mutation strategies for model parameter estimation of solar and fuel cells. *Energy conversion and management*, Elsevier, v. 86, p. 1173–1185, 2014.
- OLIVA, D.; CUEVAS, E.; PAJARES, G. Parameter identification of solar cells using artificial bee colony optimization. *Energy*, Elsevier, v. 72, p. 93–102, 2014.
- ORTIZ-CONDE, A.; SÁNCHEZ, F. J. G.; MUCI, J. New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated i–v characteristics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Elsevier, v. 90, n. 3, p. 352–361, 2006.
- OSTERWALD, C. R. Translation of device performance measurements to reference conditions. *Solar cells*, Elsevier Science, v. 18, n. 3-4, p. 269–279, 1986.
- PARRA, I. De la et al. Pv performance modelling: A review in the light of quality assurance for large pv plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 78, p. 780–797, 2017.
- PASSINO, K. M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. *IEEE control systems magazine*, IEEE, v. 22, n. 3, p. 52–67, 2002.
- PEARSALL, N. *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems: Modelling, Measurement and Assessment*. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2016.

- PERLIN, J. *From space to earth: the story of solar electricity*. [S.l.]: Earthscan, 1999.
- PETRONE, G.; RAMOS-PAJA, C. A.; SPAGNUOLO, G. *Photovoltaic sources modeling*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017.
- PIAZZA, M. C. D.; VITALE, G. *Photovoltaic sources: modeling and emulation*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Rio de Janeiro*, v. 1, p. 47–499, 2014.
- RAJASEKAR, N.; KUMAR, N. K.; VENUGOPALAN, R. Bacterial foraging algorithm based solar pv parameter estimation. *Solar Energy*, Elsevier, v. 97, p. 255–265, 2013.
- RANSOME, S.; SUTTERLUETI, J. Adaptable pv performance modelling for industrial needs. 35th EUPVSEC, 2018.
- REINDERS, A. et al. *Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017.
- ROSSA, C.; MARTÍNEZ-MORENO, F.; LORENZO, E. *Reducing uncertainty in outdoors PV module characterization*. [S.l.]: 35th EUPVSEC, 2018.
- SAHA, C.; AGBU, N.; JINKS, R. Review article of the solar pv parameters estimation using evolutionary algorithms. *MOJ Solar Photoenergy Systems.*, IEEE, v. 2, n. 2, p. 66–78, 2018.
- SANTIAGO, I. et al. Modeling of photovoltaic cell temperature losses: A review and a practice case in south spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 90, p. 70–89, 2018.
- SAWIN, J. L. et al. Renewables 2018. global status report 2018. 2018.
- SEGADO, P. M.; CARRETERO, J.; CARDONA, M. Sidrach-de. Models to predict the operating temperature of different photovoltaic modules in outdoor conditions. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Wiley Online Library, v. 23, n. 10, p. 1267–1282, 2015.
- SELLAMI, A.; BOUAÏCHA, M. Application of the genetic algorithms for identifying the electrical parameters of pv solar generators. *Solar cells-silicon wafer-based technologies*, p. 349–364, 2011.
- SENTURK, A.; EKE, R. A new method to simulate photovoltaic performance of crystalline silicon photovoltaic modules based on datasheet values. *Renewable energy*, Elsevier, v. 103, p. 58–69, 2017.
- SERA, D.; TEODORESCU, R.; RODRIGUEZ, P. Pv panel model based on datasheet values. In: IEEE. *2007 IEEE international symposium on industrial electronics*. [S.l.], 2007. p. 2392–2396.
- SILVESTRE, S. et al. New procedure for fault detection in grid connected pv systems based on the evaluation of current and voltage indicators. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 86, p. 241–249, 2014.
- SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable energy*, Elsevier, v. 34, n. 1, p. 23–29, 2009.
- SMITH, W. Effect of light on selenium during the passage of an electric current. *Nature*, 1873.

- SOTO, W. D.; KLEIN, S.; BECKMAN, W. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar energy*, Elsevier, v. 80, n. 1, p. 78–88, 2006.
- STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, Springer, v. 11, n. 4, p. 341–359, 1997.
- TIAN, H. et al. A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels. *Solar energy*, Elsevier, v. 86, n. 9, p. 2695–2706, 2012.
- TOLEDO, F. J.; BLANES, J. M.; GALIANO, V. Two-step linear least-squares method for photovoltaic single-diode model parameters extraction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 65, n. 8, p. 6301–6308, 2018.
- TOLMASQUIM, M. T. et al. Energia renovável: Hidráulica. *Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica, Empresa de Pesquisa Energética, EPE, Ministério das Minas e Energia: Rio de Janeiro*, 2016.
- TONG, N. T.; PORA, W. A parameter extraction technique exploiting intrinsic properties of solar cells. *Applied energy*, Elsevier, v. 176, p. 104–115, 2016.
- VALENTIN, G. Pv*sol expert help documentation. *Valentin Software GmbH. Disponível em: <<https://help.valentin-software.com/pvsol/calculation/>> [Acessado em 10 de junho de 2019]*, 2019.
- VDMA. International technology roadmap for photovoltaic. 2017.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on power electronics*, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009.
- WENHAM, S. R. et al. *Applied photovoltaics*. [S.l.]: Routledge, 2006.
- XIAO, W. *Photovoltaic power system: modeling, design, and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017.
- YANG, B. B.-Y. Introduction to photovoltaics failure analysis and reliability. *Electronic Device and Failure Analysis*, Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), v. 17, n. SAND-2014-19711J, 2015.
- YANG, X.-S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm. In: *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)*. [S.l.]: Springer, 2010. p. 65–74.
- YANG, X.-S. *Nature-inspired optimization algorithms*. [S.l.]: Elsevier, 2014.
- YANG, X.-S. *Nature-inspired algorithms and applied optimization*. [S.l.]: Springer, 2017. v. 744.
- YANG, X.-S.; DEB, S. Cuckoo search via lévy flights. In: *IEEE. 2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)*. [S.l.], 2009. p. 210–214.
- YANG, X.-S.; DEB, S. Multiobjective cuckoo search for design optimization. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 40, n. 6, p. 1616–1624, 2013.
- YE, M.; WANG, X.; XU, Y. Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization. *Journal of Applied Physics*, AIP, v. 105, n. 9, p. 094502, 2009.

YU, K. et al. Parameters identification of photovoltaic models using self-adaptive teaching-learning-based optimization. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 145, p. 233–246, 2017.

ZAGROUBA, M. et al. Identification of pv solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: Application to maximum power extraction. *Solar energy*, Elsevier, v. 84, n. 5, p. 860–866, 2010.

ZHOU, W.; YANG, H.; FANG, Z. A novel model for photovoltaic array performance prediction. *Applied energy*, Elsevier, v. 84, n. 12, p. 1187–1198, 2007.

ZILLES, R. et al. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. 2012.

APÊNDICE A – DADOS DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

Este Apêndice descreve os dados experimentais disponibilizados na literatura para os dispositivos de geração fotovoltaica, os quais foram adotados como objetos de estudo para a validação da metodologia proposta no presente trabalho.

Além disso, alguns resultados encontrados no contexto dos testes apresentados na seção 4.2 do Capítulo 4, são aqui convenientemente descritos visando facilitar a realização de suas comparações com os referidos dados experimentais.

Nesse âmbito, é pertinente destacar que os resultados destacados na cor vermelha são inválidos, uma vez que estes foram obtidos a partir de simulações que consideram valores inadequados para os parâmetros do modelo de um diodo. E, em contrapartida, os resultados destacados em negrito assinalam aqueles que apresentam a melhor qualidade.

Posto isto, tem-se que estes dados e resultados são propriamente descritos nas tabelas apresentadas a seguir.

Tabela 26 – Comparação entre os pontos medidos da curva I - V levantada experimentalmente para a célula fotovoltaica RTC France e os pontos reproduzidos pelo modelo de um diodo, quando este habilitado pelas melhores soluções obtidas por cada técnica metaheurística para os valores dos seus parâmetros.

V_{esp} (V)	I_{esp} (A)	DBA I_{est} (A)	DBA Limitado I_{est} (A)	LDBA I_{est} (A)
-0,2057	0,764	0,764145	0,764088	0,764088
-0,1291	0,762	0,762121	0,762663	0,762663
-0,0588	0,7605	0,760598	0,761355	0,761355
0,0057	0,7605	0,760577	0,760154	0,760154
0,0646	0,76	0,760059	0,759055	0,759055
0,1185	0,759	0,759041	0,758042	0,758042
0,1678	0,757	0,757025	0,757092	0,757092
0,2132	0,757	0,757011	0,756141	0,756141
0,2545	0,7555	0,755497	0,755087	0,755087
0,2924	0,754	0,753985	0,753664	0,753664
0,3269	0,7505	0,750473	0,751391	0,751391
0,3585	0,7465	0,746462	0,747354	0,747354
0,3873	0,7385	0,738452	0,740117	0,740117
0,4137	0,728	0,727941	0,727382	0,727382
0,4373	0,7065	0,706429	0,706972	0,706973
0,459	0,6755	0,675418	0,675280	0,675280
0,4784	0,632	0,631906	0,630758	0,630758
0,496	0,573	0,572896	0,571928	0,571928
0,5119	0,499	0,498890	0,499607	0,499607
0,5265	0,413	0,412891	0,413649	0,413649
0,5398	0,3165	0,316402	0,317510	0,317510
0,5521	0,212	0,211925	0,212155	0,212155
0,5633	0,1035	0,103461	0,102252	0,102251
0,5736	-0,01	-0,00999	-0,00872	-0,00872
0,5833	-0,123	-0,12293	-0,12551	-0,12551
0,59	-0,21	-0,20987	-0,20847	-0,20847
RMSE		7,85747E-05	9,86022E-04	9,86022E-04

Fonte: Próprio autor, utilizando os dados providos por EASWARAKHANTHAN et al. (1986).

Tabela 27 – Comparação entre os pontos medidos da curva I - V levantada experimentalmente para o módulo fotovoltaico STM6-40 e os pontos reproduzidos pelo modelo de um diodo, quando este habilitado pelas melhores soluções obtidas por cada técnica metaheurística para os valores dos seus parâmetros.

V_{esp} (V)	I_{esp} (A)	DBA I_{est} (A)	DBA Limitado I_{est} (A)	LDBA I_{est} (A)
0	1,663	1,662987	1,661515	1,663472
0,118	1,663	1,662987	1,661363	1,663266
2,237	1,661	1,660988	1,658619	1,659563
5,434	1,653	1,652991	1,654399	1,653926
7,26	1,65	1,649993	1,651806	1,650576
9,68	1,645	1,644995	1,647465	1,645439
11,59	1,64	1,639997	1,641448	1,639238
12,6	1,636	1,635998	1,635699	1,633714
13,37	1,629	1,628999	1,628870	1,627284
14,09	1,619	1,61900	1,619307	1,618308
14,88	1,597	1,597003	1,603176	1,603079
15,59	1,581	1,581005	1,580711	1,581573
16,4	1,542	1,542008	1,540351	1,542310
16,71	1,524	1,524010	1,518904	1,521171
16,98	1,5	1,500012	1,496696	1,499172
17,13	1,485	1,485013	1,482706	1,485252
17,32	1,465	1,465015	1,463066	1,465632
17,91	1,388	1,388021	1,385561	1,387571
19,08	1,118	1,118035	1,121393	1,118405
21,02	0	4,28E-06	0,001238	2,23E-05
RMSE		1,25027E-05	2,54928E-03	1,72991E-03

Fonte: Próprio autor, utilizando os dados providos por TONG; PORA (2016).

Tabela 28 – Comparação entre os pontos medidos da curva I - V levantada experimentalmente para o módulo fotovoltaico STP-120 e os pontos reproduzidos pelo modelo de um diodo, quando este habilitado pelas melhores soluções obtidas por cada técnica metaheurística para os valores dos seus parâmetros.

V_{esp} (V)	I_{esp} (A)	DBA I_{est} (A)	DBA Limitado I_{est} (A)	LDBA I_{est} (A)
17,65	3,83	3,830790	3,843022	3,851804
17,41	4,29	4,290386	4,270718	4,270335
17,25	4,56	4,560176	4,541819	4,538365
17,1	4,79	4,790014	4,783354	4,778574
16,9	5,07	5,069838	5,083131	5,078029
16,76	5,27	5,269723	5,271566	5,266097
16,34	5,75	5,749516	5,779209	5,776531
16,08	6	5,999446	6,041526	6,040996
15,71	6,36	6,359376	6,345093	6,346194
15,39	6,58	6,579382	6,565683	6,568687
14,93	6,83	6,829438	6,814210	6,818731
14,58	6,97	6,969507	6,959174	6,963993
14,17	7,1	7,099604	7,089703	7,094051
13,59	7,23	7,229761	7,219918	7,222701
13,16	7,29	7,289886	7,286529	7,287853
12,74	7,34	7,340010	7,333684	7,333525
12,36	7,37	7,370125	7,365246	7,363817
11,81	7,38	7,380296	7,397552	7,394493
11,17	7,41	7,410493	7,421169	7,416561
10,32	7,44	7,440756	7,438950	7,432858
9,74	7,42	7,420939	7,445929	7,439125
9,06	7,45	7,451149	7,450903	7,443498
RMSE		5,27792E-04	1,63089E-02	1,55099E-02

Fonte: Próprio autor, utilizando os dados providos por TONG; PORA (2016).