

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Vitor Augusto Corrêa

**Estimação de parâmetros de Sistemas Fotovoltaicos
usando Otimização de Mapeamento de Média e Variância**

São Carlos

2018

Vitor Augusto Corrêa

**Estimação de parâmetros de Sistemas Fotovoltaicos
usando Otimização de Mapeamento de Média e Variância**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Orientador: Prof. Elmer Pablo Tito Cari

**São Carlos
2018**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C824e Corrêa, Vitor Augusto
 Estimação de parâmetros de Sistemas Fotovoltaicos
 usando Otimização de Mapeamento de Média e Variância /
 Vitor Augusto Corrêa; orientador Elmer Pablo Tito Cari.
 São Carlos, 2018.

 Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
 ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
 Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
 2018.

 1. Estimação. 2. Otimização. 3. Método Heurístico.
 4. MVMO. 5. Energia Fotovoltaica. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Vitor Augusto Corrêa

Título: “Estimação de parâmetros de painéis fotovoltaicos com o MVMO”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 26 / 11 / 2018,

com NOTA 9,2 (nove , dois), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Elmer Pablo Tito Cari - Orientador - SEL/EESC/USP

Mestre Carlos Matheus Rodrigues de Oliveira - Doutorando - SEL/EESC/USP

Mestre Taylon Gomes Landgraf - Doutorando - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

Dedico este trabalho a minha família. Que sempre me motivou para me esforçar, contribuindo na minha evolução, durante minha formação acadêmica.

Este trabalho possuiu apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), relacionado ao processo de Número 2017/09710-1.

“The person who thinks there can be any real conflict between science and religion must be either very young in science or very ignorant in religion. ”

Joseph Henry

RESUMO

CORRÊA, V. A. **Estimação de parâmetros de Sistemas Fotovoltaicos usando Otimização de Mapeamento de Média e Variância.** 2018. 102p. O interesse na geração de energia através de fontes alternativas é mostrada pelo fato de que, ao longo dos últimos anos, ocorreu um aumento no número de instalações de sistemas fotovoltaicos no Brasil.

A tecnologia fotovoltaica é complexa, pois envolve a transformação física da energia térmica, proveniente do sol, em energia elétrica. Para auxiliar no dimensionamento destes tipos de sistemas, é de interesse, de técnicos e especialistas em energia solar, a possibilidade de realizar simulações de sistemas fotovoltaicos. De forma que a simulação possa fornecer informações das características do sistema, principalmente a respeito de sua eficiência e limites de operação.

O presente trabalho visa contribuir na implementação de modelos capazes de representar os painéis fotovoltaicos, com precisão satisfatória. Escolheu-se o modelo de Um Único Diodo Melhorado para representar a célula fotovoltaica e, conseqüentemente, um painel fotovoltaico. Este modelo apresenta, como suas principais características, boa resposta e simplicidade matemática. Estima-se os seguintes parâmetros, para o caso em que irradiação e temperatura atuam como sinais térmicos variantes no tempo: I_{sc} , V_{oc} , a , R_p , R_s .

O algoritmo aplicado, para realizar o processo de estimação, é o MVMO, do inglês "*Mean Variance Method Optimization*". Este método heurístico converge rapidamente, realiza a busca, pelas soluções do problema, no espaço global de soluções definidas e apresenta robustez em relação aos valores iniciais definidos as variáveis do problema.

Os dados, para aplicação do método, foram adquiridos de um sistema fotovoltaico real, instalado no prédio do Departamento de Engenharia Elétrica e Computação. Assim como foram implementadas simulações de painéis fotovoltaicos, de mesmas características que as do painel real, para fins comparativos entre a estimação dos parâmetros do sistema real e dos sistemas simulados.

O MVMO estima os parâmetros, do modelo utilizado ao painel, com baixo erro. Pois, os parâmetros estimados ao modelo, fazem este apresentar uma resposta parecida com a do Sistema Real.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Palavras-chave: MVMO, Estimação parâmetros, Painéis Fotovoltaicos, Energia Solar, Sistema solar, Heurístico

ABSTRACT

CORRÊA, V. A. . 2018. 102p. The interest in the generation of energy through alternative sources is shown by the fact that, over the last years, there has been an increase in the number of installations of photovoltaic systems in Brazil.

Photovoltaic technology is complex because it involves the physical transformation of the thermal energy from the sun into electrical energy. In order to assist in the design of these types of systems, it is in the interest of technicians and specialists in solar energy to carry out simulations of photovoltaic systems. So that the simulation can provide information about the characteristics of the system, mainly regarding its efficiency and limits of operation.

This work aims to contribute to the implementation of models capable of representing the photovoltaic panels with satisfactory accuracy. The One Single Enhanced Diode model was chosen to represent the photovoltaic cell and, consequently, a photovoltaic panel. This model presents, as its main characteristics, good response and mathematical simplicity. The following parameters are estimated for the case where irradiation and temperature act as time-varying thermal signals: I_{sc} , V_{oc} , a , R_p , R_s .

The algorithm applied to perform the estimation process is the MVMO (Mean Variance Method Optimization). This heuristic method converges quickly, it performs the search for the solutions of the problem in the global space of defined solutions and presents robustness in relation to the initial values defined the variables of the problem.

The measured data, for application of the method, were acquired from a real photovoltaic system, installed in the building of the Department of Electrical Engineering and Computing. As well as simulations of photovoltaic panels, with the same characteristics as the real panel, were implemented for comparative purposes between the estimation of the parameters of the real system and the simulated systems.

MVMO estimates the parameters, from the model used to the panel, with low error. For, the parameters estimated to the model, make this present a response similar to that of the Real System. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Keywords: MVMO, Parameter Estimation, Photovoltaic Panels, Solar Energy, Solar System, Heuristic

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Etapas básicas de um Processo de Estimação Genérico	27
Figura 2.2 – Algoritmo do Processo de Estimação aplicado neste trabalho	28
Figura 2.3 – Representação Elétrica do modelo de Um Único Diodo Melhorado, do painel fotovoltaico	30
Figura 3.1 – Ilustração de um Wafer de Silício Monocristalino	34
Figura 3.2 – Ilustração do material utilizado para fabricação de células de silício policristalinas	35
Figura 3.3 – Ilustração do Filme Fino utilizado comercialmente	35
Figura 3.4 – Arranjo de células tipo série suas propriedades (GALDINO, 2014) . . .	36
Figura 3.5 – Arranjo de células tipo paralelo suas propriedades (GALDINO, 2014) .	37
Figura 3.6 – Ilustração do funcionamento de uma Célula Fotovoltaica (VILLALVA et al., 2009)	37
Figura 3.7 – Apresentação de um Sistema Fotovoltaico e seus principais elementos - Fonte: (EB, Acessado em 2018)	39
Figura 3.8 – Ilustração dos principais componentes de um painel fotovoltaico (PS, Acessado em 2018)	40
Figura 3.9 – Curvas características de painéis fotovoltaicos: Curva Tensão x Corrente. E, a Curva Tensão x Potência (M.A.S., 2010)	41
Figura 3.10–Efeito da variação de irradiância nas curvas características de painéis fotovoltaicos. Fonte: (GALDINO, 2014)	42
Figura 3.11–Efeito da variação da Temperatura nas curvas características de painéis fotovoltaicos. Fonte: (GALDINO, 2014)	42
Figura 4.1 – Ilustração abstrata da representação de Indivíduo, para o MVMO . . .	46
Figura 4.2 – Ilustração do funcionamento da função mapeamento do MVMO (RU- EDA JOSE L. E ERLICH, 2013)	48
Figura 4.3 – Ilustração de como interpretar o Arquivo do MVMO	49
Figura 4.4 – Influência da variável Shape no MVMO (RUEDA JOSE L. E ERLICH, 2013).	51
Figura 4.5 – Tipos de seleção de indivíduos para sofrer a mutação, de uma dada popu- lação, tipicamente utilizadas no MVMO (RUEDA JOSE L. E ERLICH, 2013)	52
Figura 4.6 – Ilustração das etapas que o MVMO segue	54
Figura 4.7 – Modelo de Implementação Computacional do MVMO, com característica modular e orientada a Função	57
Figura 4.8 – Item 1 - Modelo Computacional implementado do MVMO	58
Figura 4.9 – Item 2 - Modelo Computacional implementado do MVMO	59

Figura 4.10–Item 3 - Modelo Computacional implementado do MVMO	59
Figura 4.11–Item 4 - Modelo Computacional implementado do MVMO	60
Figura 4.12–Item 5 - Modelo Computacional implementado do MVMO	61
Figura 5.1 – Curva Tensão x Corrente - Sistema 1	64
Figura 5.2 – Curva Tensão x Potência - Sistema 1	64
Figura 5.3 – Modelo implementado no Simulink para o Sistema 1	65
Figura 5.4 – Formas dos sinais de Irradiância e Temperatura utilizados no Sistema 2	66
Figura 5.5 – Curva Tensão x Corrente - Sistema 2	66
Figura 5.6 – Curva Tensão x Potência - Sistema 2	67
Figura 5.7 – Modelo implementado no Simulink para o Sistema 2	67
Figura 5.8 – Sistema fotovoltaico foi instalado no LACOSEP (LOPES, 2018)	69
Figura 5.9 – Diagrama unifilar do Sistema Fotovoltaico foi instalado no LACOSEP (LOPES, 2018)	70
Figura 5.10–Corrente x Tempo amostrado - Sistema Fotovoltaico instalado no LA- COSEP - USP	71
Figura 5.11–Tensão x Tempo amostrado - Sistema Fotovoltaico instalado no LACO- SEP - USP	71
Figura 5.12–Irradiância x Tempo amostrado - Sistema Fotovoltaico instalado no LACOSEP - USP	72
Figura 5.13–Temperatura x Tempo amostrado - Sistema Fotovoltaico instalado no LACOSEP - USP	72
Figura 5.14–Potência x Tempo amostrado - Sistema Fotovoltaico instalado no LA- COSEP - USP	73
Figura 5.15–Funções Aptidões obtidas, variando-se o número de indivíduos, para o Sistema Teste 1 - Utilizou-se 20, 40, 60, 100, 150 e 200 indivíduos para estimar os parâmetros	74
Figura 5.16–Estimação para o Sistema 1 - Utilizando-se 200 indivíduos - O espaço de solução foi definido para uma variação de $\pm 10\%$ em relação aos parâmetros utilizados no Painel Fotovoltaico Simulado	75
Figura 5.17–Funções Aptidões obtidas, variando-se o número de indivíduos, para o Sistema Teste 2 - Utilizou-se 20, 40, 60, 100, 150 e 200 indivíduos para estimar os parâmetros	76
Figura 5.18–Estimação para o Sistema 2 - Utilizando-se 40 indivíduos - O espaço de solução foi definido para uma variação de $\pm 10\%$ em relação aos parâmetros utilizados no Painel Fotovoltaico Simulado	77
Figura 5.19–Funções Aptidões obtidas, variando-se o número de indivíduos, para o Sistema 3 - Utilizou-se 20, 40, 60, 100, 150 e 200 indivíduos para estimar os parâmetros	78

Figura 5.20–Estimação para o Sistema 3 - Utilizando-se 20 indivíduos - O espaço de solução foi definido para uma variação de $\pm 10\%$ em relação aos parâmetros utilizados no Painel Fotovoltaico Simulado do Sistema 3 . Deve-se deixar claro: Não se sabe os parâmetros do Sistema Real. Deseja-se estima-los. Então, para se ter um Espaço de Solução, utiliza-se o mesmo espaço definido para o Sistema 2	80
Figura 5.21–Ilustração comparativa entre a corrente medida, e as correntes geradas utilizando-se dados de Irradiância e Temperatura do dia 5 de Junho, com parâmetros obtidos na condição STC e de valores médios dos parâmetros estimados para os dias 2 e 4 de Junho	82
Figura A.1–Etapas gerais que o MVMO segue	89
Figura A.2–Definições Básicas do MVMO	90
Figura A.3–Algoritmo que computa a variância	91
Figura A.4–Processo de Normalização	92
Figura A.5–Algoritmo para implementar a criação de indivíduos	93
Figura A.6–Passos para Organizar e Criar uma população de indivíduos	94
Figura A.7–Processo de Cruzamento(ou "Cross-over")	95
Figura A.8–Algoritmo para gerar s_1 e s_2	96
Figura A.9–Função Mapeamento	97
Figura A.10–Função Aptidão	98
Figura A.11–Cálculo da Corrente, utilizando os parâmetros estimados, aplicando-se o Método de Newton-Raphson	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos
MVMO	- <i>Mean Variance Method Optimization</i> - Método de Otimização pela Média e Variância
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
FAPESP	- Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo
ONU	- Organizações das Nações Unidas
SEP	- Sistema Elétrico de Potência
ISDM	- " <i>Improved Single Diode Model</i> " - Modelo de Um Único Diodo Melhorado
LACOSEP	- Laboratório de Análise Computacional em Sistemas Elétricos de Potência
STC	- " <i>Standard Temperature Condition</i> " - Condições de Temperatura padrão
CC	- Corrente Contínua
CA	- Corrente Alternada
AG	- Algoritmo Genético

LISTA DE SÍMBOLOS

V : Tensão de saída do painel fotovoltaico

I : Corrente de saída do painel fotovoltaico

I_{pv} : Corrente fotogerada

I_o : Corrente de saturação do Diodo

I_{Rp} : Corrente da resistência paralelo

a : Fator de idealidade do diodo (obs: também pode ser encontrada representada pela letra N)

I_{mp} : Corrente em que ocorre a máxima potência

V_{mp} : Tensão que ocorre a máxima potência = 17.1 V

I_{sc} : Corrente de Curto-Circuito

V_{oc} : Tensão de Circuito-Aberto

K_v : Constante de tensão pela temperatura

K_i : Constante de corrente pela temperatura

N_s : Número de células fotovoltaicas em série

G_n : Irradiância nominal

G : Irradiância sobre a célula fotovoltaica

T_n : Temperatura nominal

T : Temperatura de junção da célula fotovoltaica

$R_{s,inc}$: Incremento de resistência série

f_s : fator shape do MVMO

h : função h do MVMO ou Passo na definição de derivada

\bar{s}_1 e \bar{s}_2 : Parâmetros da função shape do MVMO

Δd : Variável de incremento do MVMO

$k = 1.3806 \cdot 10^{-23} m^2 kg s^{-2} K^{-1}$: Constante de Boltzmann

$q = 1.602 \cdot 10^{-19} C$: Carga Elétrica

E_g : Energia da largura de banda (*gap*)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Importância do Trabalho	21
1.2	Caracterizando o Problema	23
1.3	Organização do Trabalho	24
2	NOÇÕES DE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS	27
2.1	O modelo do painel fotovoltaico	29
3	FUNDAMENTOS GERAIS DA TECNOLOGIA SOLAR	33
3.1	Conhecendo a Célula Fotovoltaica:	33
3.2	Funcionamento Físico da Célula Fotovoltaica:	35
4	APRESENTAÇÃO DO MVMO	45
4.1	Cálculo da Função Aptidão	53
4.1.1	A aplicação do Método de Newton Raphson	54
4.2	Implementação computacional do MVMO	56
5	RESULTADOS DO PROCESSO DE ESTIMAÇÃO	63
5.1	Implementação dos sistemas fotovoltaicos para coleta de dados	63
5.2	Resultados para o Sistema Teste 1: Painel Fotovoltaico Simulado com entradas constantes	74
5.3	Resultados para o Sistema Teste 2: Painel Fotovoltaico Simulado com entradas variáveis no tempo	76
5.4	Resultados para o Sistema Teste 3: Sistema Fotovoltaico instalado no LACOSEP-USP	78
6	CONCLUSÃO	85
	APÊNDICES	87
	APÊNDICE A – EXEMPLOS DE ALGORITMOS UTILIZADOS NAS FUNÇÕES PERTENCENTES AO MVMO	89
	REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância do Trabalho

Nos dias 25-27 de Setembro de 2015, as Organização das Nações Unidas realizou a conferência Rio+20, esta teve, como produto, o documento "Objetivos de Desenvolvimento do Milênio aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável". Este documento apresenta 17 objetivos, que mostram o interesse da ONU em reduzir a desigualmente social, estimular o desenvolvimento sustentável e diminuir as mudanças climáticas (ONU, 2015). Para isso, existe a necessidade do desenvolvimento de tecnologias capazes de gerar energia através de fontes renováveis. Pois estas tecnologias atendem os objetivos de gerar energia limpa e reduzir as mudanças climáticas. Desta forma, é crescente os investimentos realizados em estudos a respeito de geração de energia solar, eólica, hídrica e biotérmica. Visando-se o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais eficientes, na tarefa de gerar energia elétrica, pelo uso de fontes naturais.

Adicionalmente, países desenvolvidos, economicamente importantes e influentes, como a Alemanha, os EUA, a China, o Canadá. Atualmente, trabalham em projetos que visam alterar suas matrizes energéticas, tornando fontes renováveis como as protagonistas na geração de energia.

Exemplos destes casos são encontrados na mídia, como:

- A Dinamarca gera uma quantidade tão elevada de energia elétrica através da fonte eólica, que está exportando energia para países vizinhos;
- A Alemanha possui a meta de atingir 100% do seu consumo energético por meio de fontes renováveis. Sendo que cerca de 87% já é suprimida através da energia solar; (COREN, 2016)
- O Canadá possui metade de sua energia gerada por através da tecnologia fotovoltaica; (WERBER, 2017)

Todos estes países possuem consciência de que a geração de energia, por fontes renováveis, contribui para:

1. Benefícios ambientais: Energia renovável utilizam fontes limpas, o que implica em menor impacto ambiental
2. Energia para gerações futuras: Energia obtida de fontes renováveis dificilmente chegaram a esgotar-se, caso sejam usadas adequadamente;

3. Geração de trabalho e economia: A geração, o transporte e o estudo tecnológico são exemplos de áreas que podem gerar empregos e impactar na economia;
4. Segurança energética: A diversificação da matriz energética assegura fornecimento de energia de maneira contínua;

Dentre as energias renováveis, a energia solar é de grande interesse, pois possui um elevado potencial de fornecimento de energia elétrica. Em 2000, o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, em sua Avaliação Mundial de Energia, avaliou que o potencial de energia solar, anual, é de 1.575 a 49.837 exajoules (EJ). Esta quantidade de energia é superior ao consumo estimado, de energia, pelo mundo em 2012, que foi de 559,8 EJ (UNDP, 2000) (IEA, 2014).

Adicionalmente, a energia solar é capaz de gerar uma grande quantidade de empregos. Pode-se citar as principais vantagens da Energia Solar, em comparação a outras fontes de energia:

1. A energia é adquirida de uma fonte praticamente inesgotável, que é o sol;
2. Não necessita de máquinas com partes rotativas, o que diminui o gasto com manutenção (normalmente, apenas gastos com limpeza). E possui grande período de funcionamento;
3. Em seu processo de geração de energia, não emite poluentes. O que contribui para a preservação do ambiente;

O Brasil é um país com uma elevada taxa de irradiação, comparando-o a irradiação que ocorre em países europeus. A distribuição, desta irradiação, se dá de maneira não uniforme, ao longo da extensão territorial do país (INPE, 2006). Considerando este grande potencial e a nova política externa de inovação para geração de energia, a *Aneel* publicou na resolução de nº482 (ANEEL, 2012), que permite a geração de energia elétrica através de micro e mini geração de energia, conectadas a rede de baixa tensão do país.

Adicionalmente, o projeto "Arranjos técnicos e Comerciais para a Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira"(2011), cuja a meta é a criação de usinas de energia fotovoltaica interligadas ao SEP e que deverão contribuir com a geração de até 25MW.

Com essas considerações a respeito da importância da energia solar, deve-se ter em mente que, para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, é de grande interesse a existência de ferramentas capazes de simular estes sistemas. Pois, desta forma, é possível (VILLALVA et al., 2009):

- Conhecer os limites do sistema, em condições ambientais particulares;

- Determinar o ponto de operação do sistema em que este seja capaz de fornecer a maior quantidade de energia ou potência;

Estas informações são valiosas, por questões de eficiência, durabilidade, segurança e proteção do painel fotovoltaico.

1.2 Caracterizando o Problema

Simular um painel fotovoltaico é tarefa complicada. Pois este, na prática, apresenta um comportamento altamente não linear (CHIN, 2015). Para contornar este problema, diversos modelos são encontrados, na literatura, para representar o painel fotovoltaico, como:

- Modelo de Célula Fotovoltaica Ideal: Um modelo simples
- Modelo de um Diodo com R_p (ou Modelo de Um Único Diodo Melhorado): Foi o modelo escolhido para este trabalho, pois este balanceia uma a capacidade de fornecer resposta realística com o nível de sua complexidade algébrica.
- Modelo de Dois Diodos: Um modelo com respostas próximas da de painéis reais, porém sua complexidade matemática exige um custo computacional, relativamente alto, para trabalhar com este modelo

Neste trabalho, foi escolhido, para representar o uma célula fotovoltaica, o modelo de Um Único Diodo Melhorado (ISDM - do inglês: "*Improved Single Diode Model*"). Devido ao fato de que este modelo é matematicamente simples e apresenta boa resposta (CHIN, 2015). O que significa que este é capaz de representar uma célula fotovoltaica de maneira confiável. E pode ser, sem grandes dificuldades, implementado computacionalmente.

Deve-se ter em mente que um painel fotovoltaico, nada mais é, do que um conjunto de células fotovoltaicas arranjadas de maneira específica. Assim, pode-se ter relacionar os parâmetros obtidos, para uma célula fotovoltaica, como representantes dos parâmetros de um painel fotovoltaico.

O objetivo deste trabalho é utilizar o método heurístico de otimização MVMO (do inglês, "*Mean Variance method Optimization*" ou "*Método de Otimização pela Média e a Variância*"), para estimar os parâmetros relacionados ao modelo ISDM (Um único diodo melhorado). Os parâmetros estimados são, na verdade, resultados de um processo de otimização, onde se testa um conjunto de parâmetros para avaliar o quão próximo o modelo matemático é do sistema real, utilizando-se tais parâmetros.

É interessante mencionar, que existem outros métodos de natureza diferente da de métodos heurísticos que podem ser utilizados para estimação de parâmetros, como

proposto por (VILLALVA et al., 2009). O escopo de discutir as diferenças dos métodos foge ao escopo deste trabalho.

Adicionalmente, este trabalho visa introduzir conceitos básicos, ao leitor, a respeito da tecnologia fotovoltaica e sua importância econômica, social e política.

Este método foi escolhido pois converge rapidamente e apresenta melhor desempenho, em comparação à outros métodos heurísticos, como de Enxame de Partículas ou Algoritmos Genéticos (RUEDA JOSE L. E ERLICH, 2013).

As principais vantagens do MVMO são:

- Dificil violação dos limites dos parâmetros a serem estimados;
- Rápida convergência à valores ótimos;
- Busca pelos parâmetros a serem estimados em todo espaço de candidatos à solução;
- Robustez em relação a valores iniciais dados aos parâmetros;

Para atingir este objetivo do trabalho, é necessário:

1. Ter-se em mãos dados de saída e entrada do sistema fotovoltaico simulado computacionalmente. Em que deseja-se estimar os parâmetros. Esta etapa serviria de teste prévio e comparação, para aplicação do MVMO na estimação do sistema fotovoltaico real;
2. Programar o algoritmo MVMO computacionalmente, para estimar os parâmetros;
3. Montar um sistema fotovoltaico real para aquisição de dados e posterior estimação dos parâmetros pertencentes a este sistema;

Por fim, estima-se os parâmetros dos sistemas desejados.

1.3 Organização do Trabalho

A estrutura do presente trabalho foi realizada da seguinte forma:

1. **Capítulo 1 - Introdução:** Contextualiza o cenário do desenvolvimento da tecnologia de geração de energia elétrica, utilizando como fonte a energia proveniente do sol. Assim como apresenta-se a importância e os objetivos deste trabalho.
2. **Capítulo 2 - Noções de Estimação de Parâmetros:** Neste capítulo, aborda-se uma introdução ao procedimento e a importância da realização de estimação de parâmetros a sistemas físicos. E também discorre-se sobre a metodologia e como foram feitas as implementações dos sistemas deste trabalho.

3. **Capítulo 3 - Fundamentos gerais da Tecnologia Solar :** Comenta-se sobre os processos e materiais empregados na tecnologia fotovoltaica atual. E explica-se o funcionamento e a topologia elétrica dos sistemas fotovoltaicos, tipicamente instalados para geração de energia.
4. **Capítulo 4 - Apresentação do MVMO:** Apresenta-se "*Mean Variance Method Optimization*" (Ou Método de Ótimização pela Média e Variância), que é o algoritmo escolhido para realizar a estimação de parâmetros dos modelo de painel fotovoltaico selecionado. Neste capítulo, mostra-se suas características, formulações matemáticas e passos realizados pelo MVMO.
5. **Capítulo 5 - Resultados da aplicação do MVMO:** Ilustra-se, com gráficos e tabelas, os resultados obtidos pela aplicação do MVMO na estimação de parâmetros dos modelos para os sistemas implementados.
6. **Capítulo 6 - Conclusão:** Recapitula-se, de maneira resumida, os principais aspectos do trabalho. E disserta-se sobre os resultados obtidos do capítulo anterior, de forma a explicar os pontos de interesse dos resultados. Como as particularidades e semelhanças dos resultados para cada sistema. Adicionalmente, comenta-se sobre as perspectivas futuras de pesquisa e apresenta-se a lista de publicações científicas relacionadas a este trabalho.

2 NOÇÕES DE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

O objetivo de identificar sistemas é estudar e construir modelos dinâmicos capazes de representar sistemas reais, a partir de dados experimentais físicos.



Figura 2.1: Etapas básicas de um Processo de Estimação Genérico

A figura 2.1 ilustra os passos para realizar a estimação de um sistema dinâmico geral.

Os passos para identificação de sistemas são (CARI, 2009):

1. Coleta de dados do sistema de interesse:

É a primeira etapa de um processo de identificação genérico. Nesta, obtém-se informações a partir de testes no Sistema Real. No presente trabalho, foram coletados dados via simulação computacional e do sistema fotovoltaico instalado no LACOSEP-USP

2. Escolha do modelo do sistema real:

Nesta etapa, define-se um modelo matemático para representar o sistema real. Neste trabalho, o modelo de um diodo melhorado foi selecionado para representar a célula fotovoltaica e, conseqüentemente, um painel fotovoltaico, pois este modelo apresenta simplicidade em suas equações matemáticas. E resposta aceitável, ou seja, que é capaz de representar um painel fotovoltaico real sem muita diferença na resposta do modelo para o sistema real.

3. Estimação de parâmetros:

Esta etapa visa encontrar o conjunto de parâmetros que melhor caracteriza o sistema real. No caso, selecionou-se o método MVMO para realizar este processo.

Para se avaliar a precisão do modelo (com parâmetros ajustados), em descrever o sistema real, compara-se a saída do sistema real com a do modelo. De forma que a diferença entre as saídas destes, para um mesmo valor de entrada, é considerada, computada. Deseja-se que a somatória das diferenças, entre os pontos da variável de saída, do sistema real com a do modelo, seja mínima. Caso isso seja satisfeito, têm-se um modelo que representa o sistema satisfatoriamente.

Adicionalmente, o algoritmo responsável por estimar os parâmetros do modelo trabalha de forma a ajustar os parâmetros conforme a saída do modelo se aproxima do sistema real.

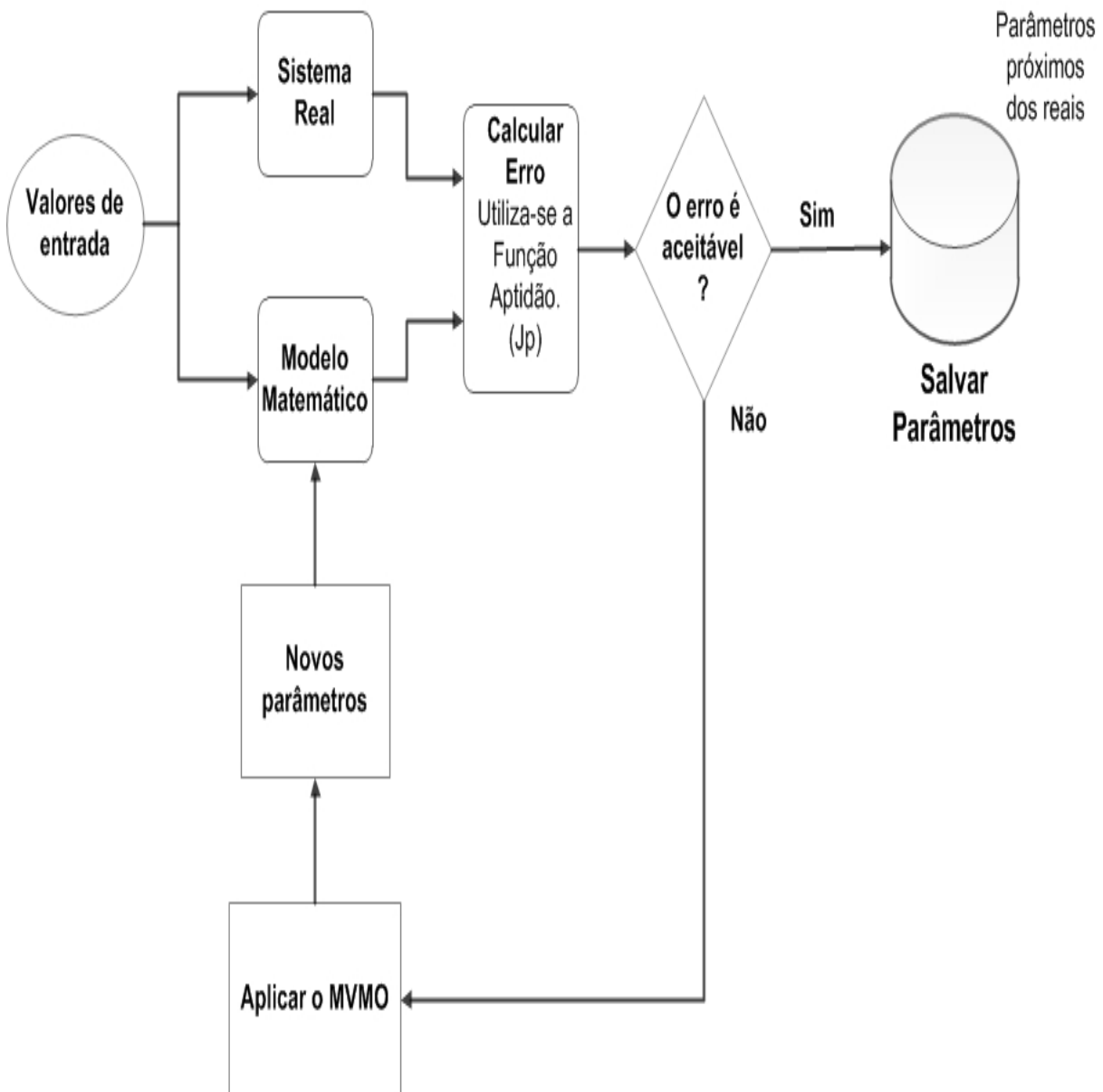


Figura 2.2: Algoritmo do Processo de Estimação aplicado neste trabalho

A Figura 2.2 ilustra um processo de identificação de sistemas genérico:

- **Valores de entrada:** Considera-se a Irradiância e a Temperatura, como sinais que fornecem os valores de entrada

- **Sistema Real:** Neste trabalho, utilizaram-se dados obtidos de um sistema fotovoltaico simulado e de um sistema fotovoltaico instalado no prédio da Engenharia Elétrica da USP - São Carlos

- **Modelo Matemático:** Utiliza-se um conjunto de equações, obtidas no levantamento bibliográfico, capazes de representar um sistema fotovoltaico;

- **Calcular erro:** Compara-se os sinais de saída, no caso, tensão e corrente, fornecidas pelo Sistema Real e Modelo Matemático. Caso o erro seja aceitável, o Modelo Matemático está bem ajustado

- **Aplicar MVMO:** Caso a diferença entre as respostas do Sistema real e do Modelo Matemático seja grande, aplica-se o MVMO.

- **Novos Parâmetros:** Os parâmetros obtidos pelo MVMO são utilizados no Modelo Matemático, para melhorar sua resposta em comparação com a do Sistema real.

2.1 O modelo do painel fotovoltaico

Escolheu-se o modelo de Um Único Diodo Melhorado (ISDM ou do inglês: *"Improved Single Diode Model"*) para representar uma célula e, conseqüentemente, um painel fotovoltaico. Devido a sua simplicidade matemática e resposta razoável (CHIN, 2015).

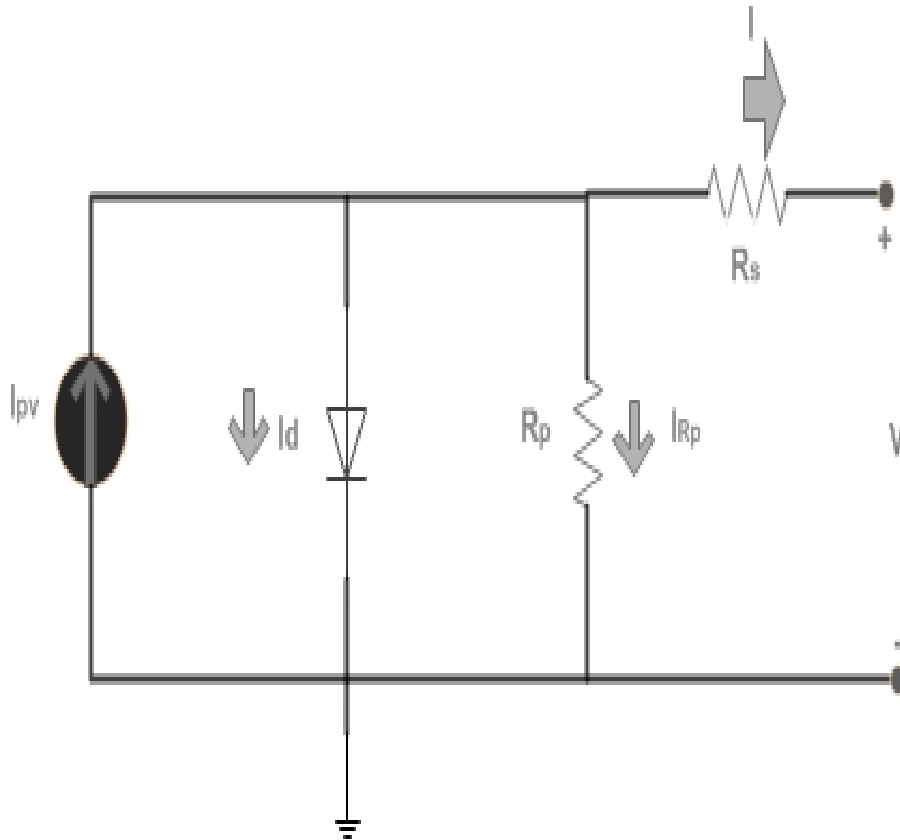


Figura 2.3: Representação Elétrica do modelo de Um Único Diodo Melhorado, do painel fotovoltaico

A topologia elétrica que ilustra o modelo é apresentada na Figura 2.3. E o conjunto de equações que descrevem o sistema são(VILLALVA et al., 2009):

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

$$I_{RP} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2.2)$$

$$I_{PV} = \frac{G}{G_n} \cdot (I_{PV,n} - K_I \cdot (T_n - T)) \quad (2.3)$$

$$I_0 = I_{o,n} \cdot \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \cdot e^{\left(\frac{q \cdot E_g}{n \cdot k} \right)} \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \quad (2.4)$$

$$E_g = E_{go} \cdot (1 - 0.0001677 \cdot (T_n - T)) \quad (2.5)$$

Onde:

- **Corrente fotovoltaica:** : I_{pv}
- **Corrente de saturação do Diodo:** I_o
- **Resistência série:** : R_s
- **Resistência paralelo:** R_p
- **Fator de diodo ideal:** a
- $k = 1.3806 \cdot 10^{-23} m^2 kg s^{-2} K^{-1}$: Constante de Boltzmann
- T : Temperatura de junção da célula
- $q = 1.602 \cdot 10^{-19} C$: Carga Elétrica
- V : Tensão de saída da célula
- E_g : Energia da largura de banda (*gap*)
- I_d : Corrente do diodo
- I_{R_p} : Corrente da resistência paralelo

Os valores com *subíndice n* dizem respeito aos valores **nominais**.

Considerando as equações 2.1 à 2.5, pode-se observar que os parâmetros I_o e I_{pv} **não são constantes**, conforme a **Temperatura**(T) e a **Irradiância**(G) variam.

Conseqüentemente, é importante considerar, adicionalmente, as seguintes equações (VILLALVA et al., 2009)

$$I_{PV} = \frac{G}{G_n} \cdot (I_{sc} + K_I \cdot (T_n - T)) \quad (2.6)$$

$$I_{o,n} = (I_{sc} - V_{oc}/R_p) / (e^{q*V_{oc}/(K*T_{ref}*a)} - 1) \quad (2.7)$$

Observa-se das equações 2.6 à 2.7, que as grandezas pertinentes ao modelo passam a depender de I_{sc} (corrente de curto circuito) e V_{oc} (tensão de circuito aberto).

Com essas considerações, é importante se ter em mente a seguinte ideia: Caso os sinais térmico, temperatura e irradiância, sejam constantes: I_{pv} e I_o são parâmetros de interesse no processo de estimação. Por outro lado, caso estes sinais térmicos sofram variação considerável, ao longo do tempo, os parâmetros que passam a se tornar objetivo, da estimação, serão V_{oc} e I_{sc} .

Ao mesmo tempo, estes parâmetros são fornecidos por fabricantes em catálogos de painéis fotovoltaicos, obtidos em condições particulares de temperatura e irradiância. (STC - do inglês "*Standard Test Condition*"). (VILLALVA et al., 2009)

Que é caracterizada por:

- Irradiância = $1000W/m^2$
- Temperatura = $25^{\circ}C$

Em vista que os painéis fotovoltaicos, muitas vezes, são instalados em locais e sob condições dos quais diferem das condições normais de temperatura e pressão, têm-se que os dados fornecidos por fabricantes as vezes acabam não podendo ser aplicados adequadamente. O que torna importante o processo de estimação, principalmente para casos em que o painel a ter seu modelo ajustado esteja instalado em um local de condições diferentes da STC.

3 FUNDAMENTOS GERAIS DA TECNOLOGIA SOLAR

3.1 Conhecendo a Célula Fotovoltaica:

As células fotovoltaicas são dispositivos semicondutores que convertem energia solar em energia elétrica, pois geram tensão quando expostas a luz solar. Normalmente, este dispositivo é constituído por (GAZOLI, 2013):

- Silício tipo P e N (silício dopado com Boro e Fosforo, respectivamente);
- Grade de coletores metálicos;
- Base metálica;
- Revestimento de material antirreflexo, para aumentar o nível de irradiação que a célula consegue absorver;

Um sistema elétrico, alimentado por dispositivos fotovoltaicos é, normalmente, composto de:

- **Painel (ou módulos) fotovoltaicos:** Este equipamento é responsável por capturar a energia proveniente do sol e transforma-la em energia elétrica. De forma a ser utilizada para realizar trabalho útil ao usuário.
- **Conversores CC-CA:** Elemento responsável por adequar os sinais elétricos gerados pelo painel fotovoltaico. De forma que estes possam ser utilizados pelos equipamentos elétricos conectados à esta rede.
- **Baterias:** É o equipamento responsável por armazenar a energia gerada pelo sistema fotovoltaico e que não foi utilizada pelos instrumentos da rede elétrica que este alimenta.
- **Controlador de Carga:** É o item que possui, como função, a proteção do sistema. Adicionalmente, este também procura otimizar o sistema, fazendo-o operar em seu ponto ótimo, de máxima potência (MPPT - do inglês *Maximum Power Point Tracking*).

As células fotovoltaicas possuem em sua composição molecular, tipicamente o Silício. Este é dopado com doses adequadas de Boro (dopante tipo P) e Fosforo (dopante tipo N). A manufatura das células são feitas em lingotes de Silício, que podem ser (GAZOLI, 2013):

- **Monocristalino:** Células fotovoltaicas monocristalinas são feitas utilizando uma fina camada de bolacha(ou "*wafer*") de silício, cortado (ou serrados) de um único cristal de silício, nos quais são dopados e têm-se as camadas P e N. A seguir, o wafer recebe os eletrodos e a película antirreflexiva.

A vantagem desta tecnologia é que os wafers de silício são excelentes condutores, isso implica que os painéis fotovoltaicos compostos por estas células possuem a maior geração de energia por área do painel. Todavia, custo de sua produção é elevado;



Figura 3.1: Ilustração de um Wafer de Silício Monocristalino

- **Policristalino:**

Assim como as células feitas de silício monocristalino, as células multi cristalinas também são compostas de wafers, finos e cortados. Contudo, neste caso, os wafers são cortados de um único lingote de silício, oriundo de muitos cristais de silício

A característica, do painel fotovoltaico feito por células, deste tipo é um coeficiente de temperatura melhor (o que fornece mais robustez). Além disto, painéis fabricados com este material tendem a ser mais baratos. Porém a eficiência do painel, feito desta composição, é menor;

É comum encontrar painéis compostos por células de silício policristalino. Tal material é caracterizado por ser azul. Uma cor mais escura é característica de um painel de células monocristalinas.

- **Filmes Finos:** Como não há serragem do lingote de silício e as técnicas de fabricação possuem menos complexidade, o custo de fabricação deste material é menor. Todavia, este material é menos eficiente, ou seja, é necessário uma maior área de instalação



Figura 3.2: Ilustração do material utilizado para fabricação de células de silício policristalinas

para gerar a mesma quantidade de energia, em comparação ao Silício Monocristalino ou Policristalino. Além disso, este material se desgasta mais rapidamente.



Figura 3.3: Ilustração do Filme Fino utilizado comercialmente

3.2 Funcionamento Físico da Célula Fotovoltaica:

Como dito, a célula fotovoltaica (ou solar) é o menor dispositivo que compõe um painel fotovoltaico. E pode ser arranjada, tipicamente, de 3 maneiras (GALDINO, 2014):

Material Da Célula Fotovoltaica	Eficiência da Célula obtida Experimentalmente	Eficiência da Célula Comercial	Eficiência dos Painéis Comerciais
Silício Monocristalino	24.7%	18%	14%
Silício Policristalino	19.8%	15%	13%
Silício Cristalino - Filme Fino	19.2%	9.5%	7.9%

Tabela 3.1: Comparação entre os materiais de fabricação de Células Fotovoltaicas (GAZOLI, 2013)

- **Série:**

Neste arranjo, os terminais de cada célula são ligados a célula seguinte. Eletricamente, a corrente que o painel irá fornecer é a mesma que a corrente que atravessa as células e o potencial é dado pela somatória do potencial de cada célula solar;

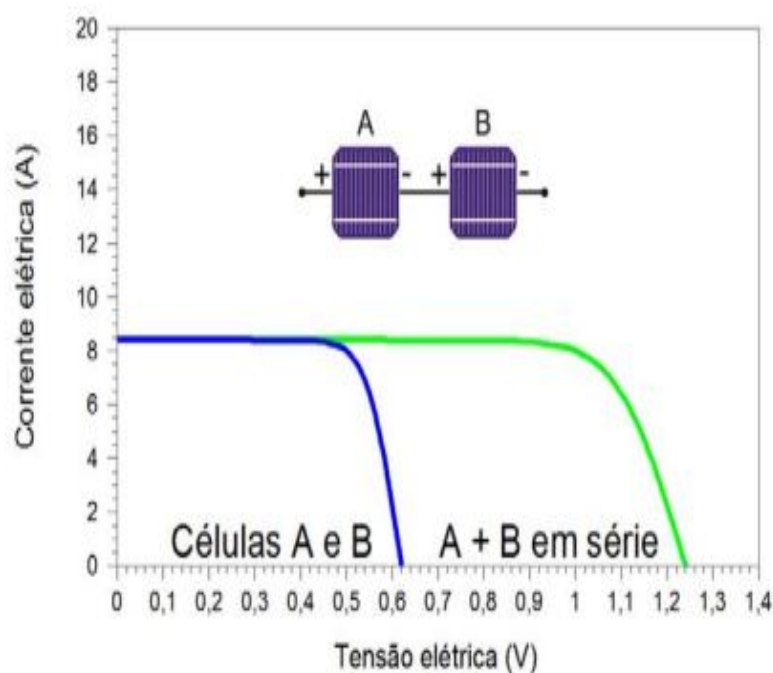


Figura 3.4: Arranjo de células tipo série suas propriedades (GALDINO, 2014)

- **Paralelo:** Neste tipo de arranjo, os terminais das células solares são conectadas a pontos comuns. A característica elétrica neste arranjo é de que as células estão a um mesmo potencial elétrico que o painel e a corrente fornecida por este é igual a somatória de corrente fornecida por cada célula fotovoltaica;
- **Misto:** Consiste na utilização do arranjo Série e Paralelo simultaneamente;

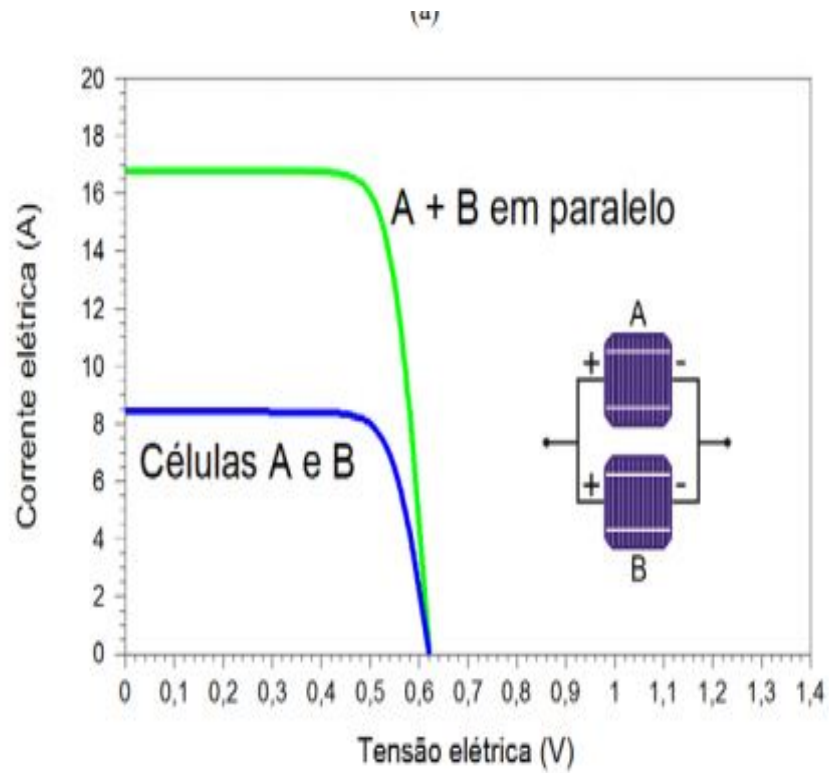


Figura 3.5: Arranjo de células tipo paralelo suas propriedades (GALDINO, 2014)

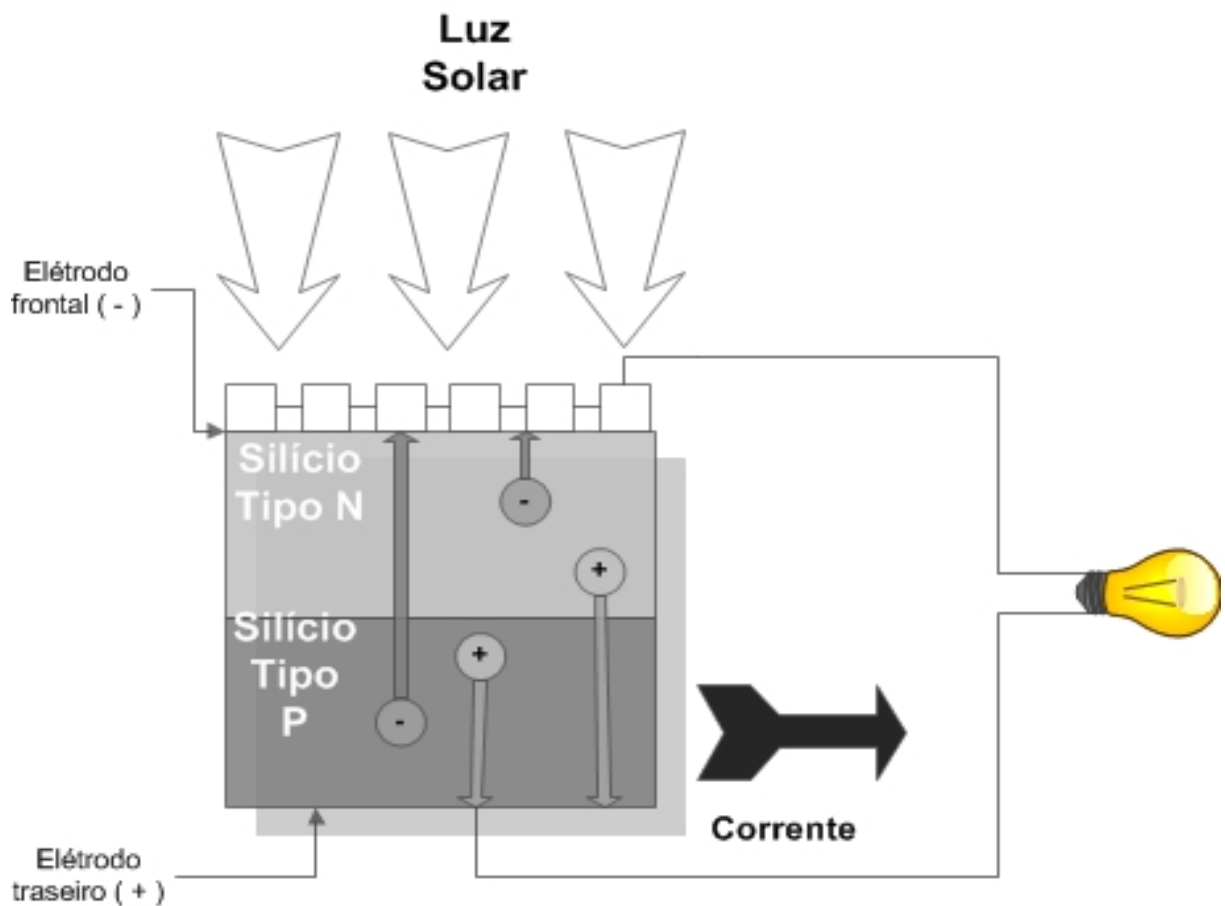


Figura 3.6: Ilustração do funcionamento de uma Célula Fotovoltaica (VILLALVA et al., 2009)

A Figura 3.6 ilustra o funcionamento de uma célula fotovoltaica. O processo ilustrado pela figura é (BANU E.I.VILLALVA. ISTRATE, 2012):

1. A célula fotovoltaica tem uma diferença de potencial de cerca de 0.6V, quando não está conectada a um circuito elétrico externo. Isso se deve a barreira de potencial elétrica, originada pelo equilíbrio de elétrons e lacunas, na junção dos materiais Silício tipo N e P da célula;
2. Quando a irradiação é recebida pela célula fotovoltaica, esta têm seus elétrons, localizados na região dopada com Silício tipo N (utiliza-se o Fósforo para dopagem, pois este possui excesso de elétrons), excitados pelos fótons (fótons são partículas de luz);
3. Quando a energia proveniente dos fótons é superior ou igual a energia de Gap (energia necessária para o elétron saltar para uma camada mais afastada do núcleo do átomo em que este está preso), os elétrons ficam excitados. Desta maneira, estes rompem a ligação com seu átomo de origem;
4. Estes elétrons excitados atravessam o circuito externo (ou a carga), ao passar pelos eletrodos ligados a célula fotovoltaica. Os elétrons vão em direção a região dopada com Silício tipo P. Pois o Silício, dopado com Boro, possui excesso de lacunas. Assim, existe espaço para acomodar os elétrons que deslocam-se da região N para a P;

Este processo é conhecido como **efeito fotovoltaico**.

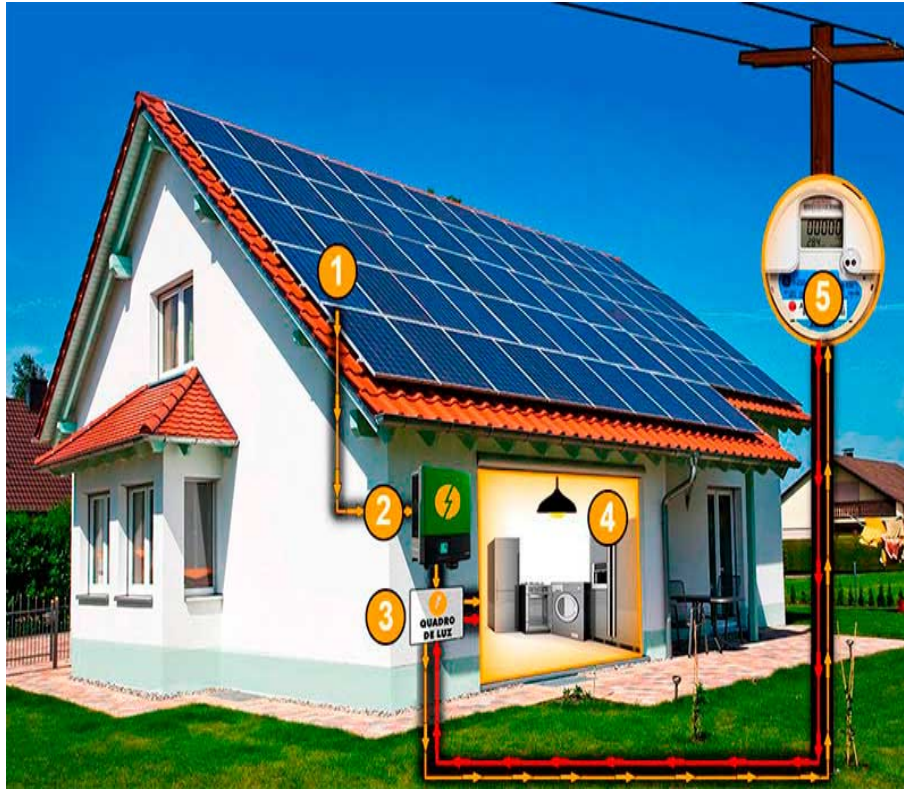


Figura 3.7: Apresentação de um Sistema Fotovoltaico e seus principais elementos - Fonte: (EB, Acessado em 2018)

A Figura 3.7 ilustra um sistema fotovoltaico simples e seus componentes. A energia gerada possui o seguinte fluxo:

1. O painel solar recebe irradiação solar, produzindo energia elétrica, na forma de sinais elétricos contínuos (CC);
2. O inversor fotovoltaico transforma a forma de onda da corrente contínua CC, gerada pelo painel fotovoltaico, para a forma de onda CA (corrente alternada). O objetivo é adequar a energia gerada aos equipamentos conectados a rede local, e a rede elétrica de distribuição;
3. A energia CA fornecida pelo microinversor é transportada ao Quadro de Distribuição do local;
4. Os elementos da rede local poderão utilizar, desta maneira, a energia originada do sistema fotovoltaico instalado;
5. A energia produzida e o consumida pelo sistema é verificada pelo relógio de luz: Caso exista excedente de energia, esta é fornecida a rede pública (o usuário de energia solar terá saldo positivo com a concessionária). Caso contrário, a concessionária fornece ao usuário a energia faltante, necessária à rede e aos equipamentos conectados a ela;

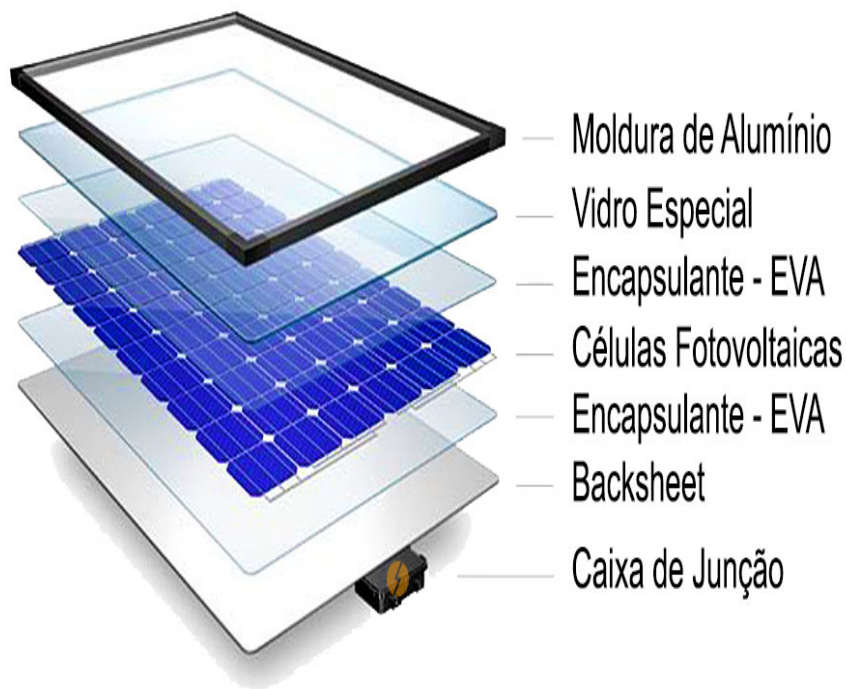


Figura 3.8: Ilustração dos principais componentes de um painel fotovoltaico (PS, Acessado em 2018)

A figura 3.8 apresenta os componentes que formam o painel fotovoltaico. Cada elemento do painel fotovoltaico possui as seguintes características:

- **Moldura de Alumínio:** A função deste material, que é instalado nas laterais do painel fotovoltaico, é de aumentar a robustez do painel, protegê-lo durante sua instalação e manter a integridade da forma do painel fotovoltaico.
- **Filme Encapsulante EVA:** EVA significa Acetato Vinílico de Etileno, sua sigla tem origem da nomenclatura em inglês: "*Ethylene Vinly Acetat*". Este material é responsável por aumentar o tempo de vida da célula, protegendo-a dos raios UVs, alta temperatura e umidade. Evitando, desta forma, o envelhecimento da célula.
- **Célula fotovoltaica:** Elemento responsável por converter a energia solar em energia elétrica. Assim, é o principal agente responsável pela geração de energia e dispositivo mais importante que se encontra no painel fotovoltaico.
- **Backsheet:** Este material é um filme branco, posicionado na parte traseira do painel fotovoltaico. Sua função é a proteção dos elementos internos do painel fotovoltaico. Em especial, prioriza-se a proteção das células fotovoltaicas.
- **Caixa de Junção:** É o local de conexão entre as células fotovoltaicas e o circuito externo ao painel. Sendo, desta maneira, um elemento de grande importância,

para correta operação dos painéis fotovoltaicos quando estes são ligados a um sistema elétrico. Normalmente, este elemento é instalado na parte de trás dos painéis fotovoltaicos.

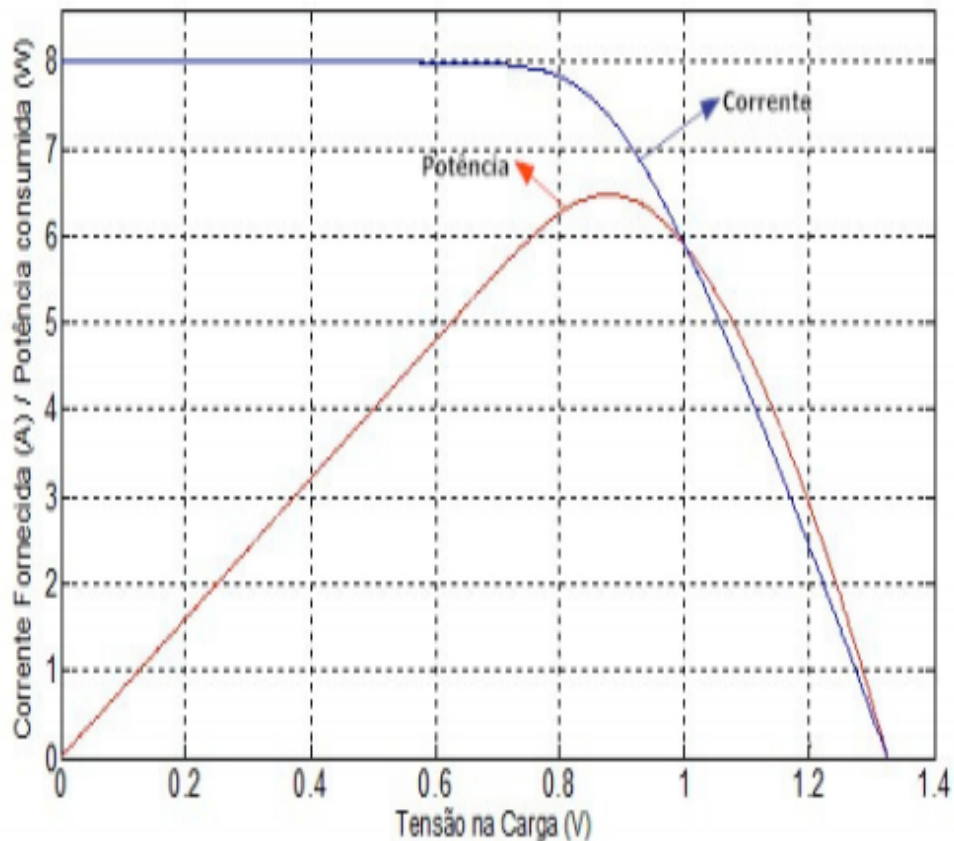


Figura 3.9: Curvas características de painéis fotovoltaicos: Curva Tensão x Corrente. E, a Curva Tensão x Potência (M.A.S., 2010)

A tensão elétrica e a corrente que um painel fotovoltaico pode gerar são **não** linearmente dependentes. Essa característica é visualizada nas curvas apresentadas na Figura 3.9. Nestas, pode-se destacar seguintes pontos de interesse, aos fabricantes de painéis e aos usuários que desejam adquirir um sistema fotovoltaico (GAZOLI, 2013):

- **V_{oc} - Tensão de Circuito Aberto:** Tensão que o painel fornece, quando não há carga conectado a ele;
- **I_{sc} - Corrente de curto-circuito:** Corrente elétrica que o painel fornece quando seus terminais estão conectados a um mesmo ponto;
- **V_{mp} e I_m - Tensão e Corrente de máxima potência:** Valores particulares de tensão e corrente quando o painel fornece sua máxima potência. Este ponto é desejado para operação do painel. De forma que os inversores acoplados ao painel são projetados para rastrear este e ajustar o painel a trabalhar neste ponto;

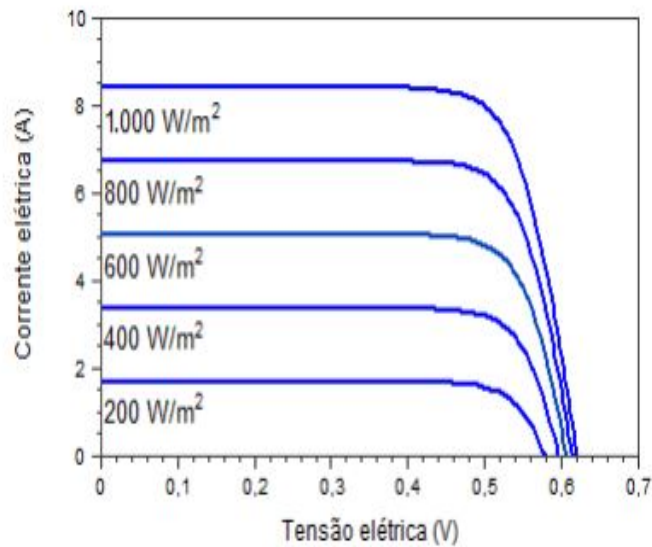


Figura 3.10: Efeito da variação de irradiância nas curvas características de painéis fotovoltaicos. Fonte: (GALDINO, 2014)

Quando a irradiância varia, é possível avaliar, pela Figura 3.10, que quanto menor for a irradiância, mais baixo serão os valores dos pontos onde encontram-se a V_{oc} e a I_{sc} . Consequentemente, o painel fornece menos energia, quando recebe menos irradiação solar. E vice-versa.

Sendo assim, observa-se que o valor da corrente de curto circuito e a tensão de curto circuito diminuem conforme a irradiância recebida pelo painel é menor e vice-versa.

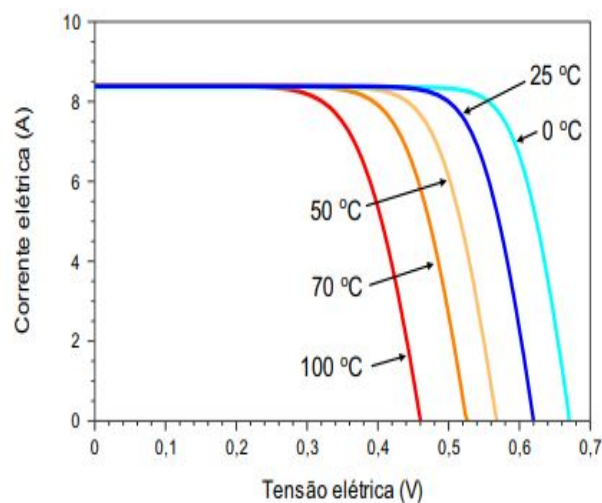


Figura 3.11: Efeito da variação da Temperatura nas curvas características de painéis fotovoltaicos. Fonte: (GALDINO, 2014)

O comportamento da curva I-V, pela variação de temperatura do ambiente que o painel opera, é mostrado na Figura 3.11.

Neste, inspeciona-se que a I_{sc} mantém-se praticamente constante. Por outro lado, V_{oc} aumenta conforme a temperatura diminui. E vice versa.

4 APRESENTAÇÃO DO MVMO

O MVMO, abreviação de "*Mean Variance Method Optimization*" que, em português, traduz-se "*Método de otimização pela média e variância*", é um método heurístico que procura a melhor solução, para um problema particular. Assim como outros métodos heurísticos, de busca-cega por valores ótimos (COLIN, 2007), o MVMO compartilha das seguintes características:

- Baseado em um conjunto de soluções possíveis
- Fácil de ser implementado computacionalmente;
- Busca a melhor solução para o problema. Não a solução exata;
- Não há necessidade de uma equação específica do problema, caso a Função Aptidão definida consiga avaliar os parâmetros da solução satisfatoriamente;
- Cada indivíduo representa uma solução, de maneira abstrata, do problema.
- Método probabilístico e não determinístico. Isso significa que um conjunto de soluções encontradas dificilmente irá se repetir, caso se execute o algoritmo novamente;

Dentre os métodos heurísticos, o MVMO apresenta aspectos similares aos Algoritmos Genéticos (AG). Isso significa que, a simulação computacional, do método, é análogo a um processo evolutivo, de várias gerações de uma população (FABRÍCIO, 2002). Neste processo, cada indivíduo representa uma solução candidata ao problema. E a seleção natural é a condição que contribui na escolha dos melhores indivíduos (soluções). Além disso, o cruzamento e a mutação são operadores genéticos que auxiliam o algoritmo a varrer (ou mapear) o espaço de soluções, na busca pela solução ótima. No caso do presente trabalho, pode-se interpretar um indivíduo como um vetor, que armazena os parâmetros que se deseja estimar.

A Figura 4.1 ilustra esta descrição.

Considerando a inspiração da Genética Evolutiva, pode-se utilizar a seguinte terminologia:

- **População:** Conjunto de indivíduos(ou cromossomos) que, no caso, são as soluções do problema;
- **Cromossomo:** São análogos aos indivíduos, sendo um conjunto de genes. Em outras palavras, são o conjunto de variáveis (no caso deste trabalho, os parâmetros a serem estimados), que solucionam o problema.

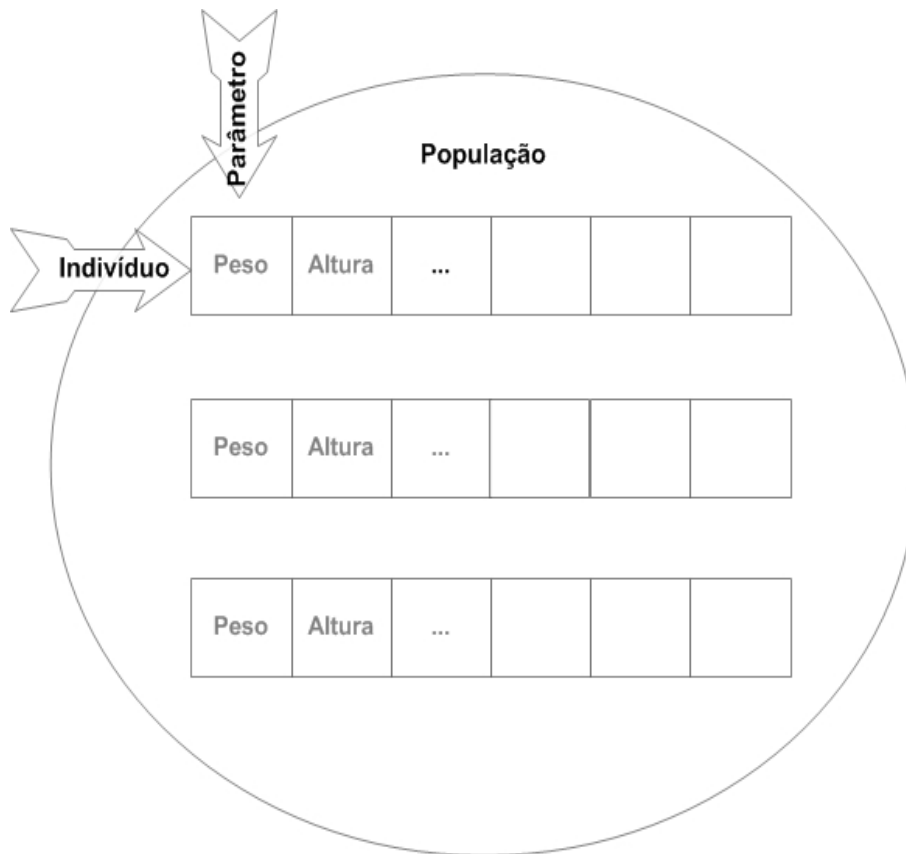


Figura 4.1: Ilustração abstrata da representação de Indivíduo, para o MVMO

- **Gene:** Estes são como os parâmetros que o indivíduo armazena sendo assim, a menor unidade de informação em um cromossomo. Cada gene é como uma única variável da solução do problema;
- **Cruzamento:** Também conhecido como "crossover", este é o processo de reprodução da genética. Podendo ser:
 - **Sexuado:** Há combinação de genes (parâmetros) dos cromossomos (indivíduos/soluções) parentais. Resultando em descendentes que possuem a combinação genética de ambos;
 - **Assexuado:** Os indivíduos descendentes possuem os genes dos seus pais. Normalmente utiliza-se a melhor solução que o algoritmo possui até a última iteração ocorrida, para gerar descendentes;
- **Mutação:** Da genética, são processos anômalos e aleatórios que causam alteração de genes do cromossomo. No contexto de AGs, a mutação é a função responsável por variar um parâmetro de uma dada solução. Na tentativa de torna-lá uma solução melhor;
- **Seleção Natural:** É um critério que seleciona os melhores indivíduos e exclui os indivíduos menos aptos;

- **Geração:** Iteração do método;
- **Função Aptidão (ou "Fitness"):** É a função matemática que classifica, qualitativamente, o quão satisfatório a solução é para o problema;

O MVMO foi selecionado como o método heurístico a ser utilizado por possuir as seguintes características particulares (ERLICH, 2011):

- Utiliza valores normalizados à variável do problema: No caso na aplicação deste presente trabalho, a variável seria os parâmetros a serem estimados. Isso significa que toma-se o limite máximo para o respectivo parâmetro estudado com o valor de 1 e, analogamente, o limite mínimo para o respectivo parâmetro assume o valor 0. Desta forma, qualquer valor no espaço de solução fica restrito entre os valores de 0 e 1;

A normalização é importante para aplicação do MVMO, pois os valores dos parâmetros possuem diferentes Grandezas e Ordem. Existe dificuldades em manipular variáveis de ordem e grandeza diferentes. A normalização busca solucionar este problema.

$$p_{norm} = \frac{(p_{real} - p_{minimo})}{(p_{maximo} - p_{minimo})} \quad (4.1)$$

A equação 4.1 descreve a normalização.

$$p_{real} = p_{minimo} + (p_{maximo} - p_{minimo}) \cdot p_{norm} \quad (4.2)$$

Enquanto que a desnormalização é dada pela equação 4.2.

Onde as variáveis são:

- p_{norm} : Parâmetro com seu valor normalizado;
- p_{real} : Parâmetro com seu valor original;
- p_{maximo} : Valor máximo do parâmetro;
- p_{minimo} : Valor mínimo do parâmetro;
- O MVMO adota um processo de Cruzamento("Crossover") assexuado. Ou seja, utiliza-se a melhor solução (indivíduo) para produzir descendentes da próxima geração(iteração) do método. No algoritmo do MVMO, esta etapa se chama "Offspring" ou Geração de Descendentes.
- Pode-se destacar, como principal recurso do MVMO, a função mapeamento. Que desempenha o papel análogo a "mutação" da genética evolutiva. A função mapeamento

utiliza como entrada os valores médios e variância da melhor solução encontrada até o momento. Por esta razão, o MVMO recebeu este nome, "Mean Variance Method Optimization". (RUEDA JOSE L. E ERLICH, 2013).

- O MVMO é elegante ao pesquisar ao redor da melhor solução encontrada, ao mesmo tempo que o risco é baixo deste ficar aprisionado em pontos de soluções ótimas locais. Assim, encontra os valores ótimos rapidamente, com poucas iterações(ou gerações);

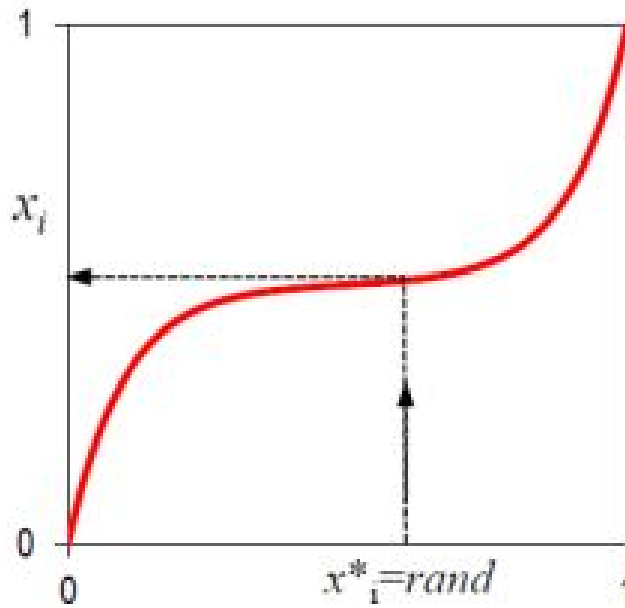


Figura 4.2: Ilustração do funcionamento da função mapeamento do MVMO (RUEDA JOSE L. E ERLICH, 2013)

A função mapeamento do MVMO considera os seguintes parâmetros:

- **Fator Shape** f_s Quando deseja-se aumentar a precisão: Utiliza-se $f_s > 1$. Quando a prioridade é varrer o espaço de solução: Utiliza-se $f_s < 1$. (RUEDA JOSE L. GONZALEZ-LONGATT, 2015)

$$f_s^* = f_s \cdot (1 + rand) \quad (4.3)$$

A equação que descreve o funcionamento deste parâmetro é apresentada em 4.3

Onde f_s^* é o menor valor de f_s e RAND é um valor aleatório, limitado entre 0 e 1.

$$f_s^* = f_{s_i ni}^* + \left(\frac{i}{i_{final}}\right)^2 (f_{s_i final}^* - f_{s_i inicial}^*) \quad (4.4)$$

Pode-se utilizar a expressão 4.4 para melhorar a precisão dos resultados. Observa-se que ela é relacionada a iteração i atual. De forma que, quando chegar ao limite

máximo de iterações, o valor de f_s^* estará próximo do seu valor final, definido inicialmente dentro do método.

$$\Delta d_0 = \Delta d_0^{ini} + \left(\frac{i}{i_{final}}\right)^2 (\Delta d_0^{final} - \Delta d_0^{ini}) \quad (4.5)$$

- **Variável de incremento:** Δd este fator é utilizado como parâmetro na computação do fator shape s_i , da função mapeamento, ao longo das iterações do MVMO. A equação 4.5 mostra como Δd varia ao longo das iterações(gerações) do MVMO. Recomenda-se utilizar valores na faixa de $0.1 < \Delta d < 0.4$. Há também o valor inicial do parâmetro d_i , utilizado no algoritmo que modela a função shape.
- **Tamanho do Arquivo de soluções:** O Arquivo serve como base de conhecimento para guiar o algoritmo na direção de busca, dentro do espaço de soluções. Os melhores n indivíduos encontrados pelo MVMO são salvos no Arquivo e organizados, com auxílio da Função Aptidão ("Fitness"). De maneira que a melhor solução fica mantida no topo do Arquivo;

	Posição	Aptidão(Fitness Function)	x_1	x_2	...	x_n
Melhores Ind.	1º Melhor Ind.					
	2º Melhor Ind.					
	3º Melhor Ind.					
	4º Melhor Ind.					
	5º Melhor Ind.					
	...					
	Último Melhor Ind.					
	Média	...				
	Shape	...				

os "x" são os genes (parâmetros) e cada linha representa um indivíduo. A ordem da tabela é dada pela Função Aptidão.

Figura 4.3: Ilustração de como interpretar o Arquivo do MVMO

A Figura 4.3 ilustra como o Arquivo pode ser interpretado.

- **Método de seleção:** Define-se um método para escolher quais dos descendentes da geração atual ação da função mapeamento. Em outras palavras, indivíduos que irão sofrer a mutação;

- Número máximo de iterações que o MVMO irá utilizar

A função mapeamento é responsável por transformar uma variável do problema (parâmetro), de variação aleatória e distribuição unitária. Em outra variável x_i , que está concentrada em torno do valor médio, da melhor solução do parâmetro em questão.

A equação matemática que descreve o processo de mapeamento x_i é:

$$x_i = h_x + (1 - h_1 + h_0) \cdot x_i^* - h_o \quad (4.6)$$

Onde h é uma função dada por :

$$h(\bar{x}, s_1, s_2, x) = \bar{x} \cdot (1 - e^{-x \cdot s_1}) + (1 - \bar{x}_i) \cdot e^{-x \cdot s_2} \quad (4.7)$$

$$h_x = h(x = x_i^*), h_0 = h(x = 0), h_1 = h(x = 1) \quad (4.8)$$

\bar{x} é a média dos valores de x:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_i(j) \quad (4.9)$$

As variáveis shape (\bar{s}_1 e \bar{s}_2) e a média da variável x determinam o formato da função h.

$$s_i = -\ln(v_i) \cdot f_s \quad (4.10)$$

Calcula-se a função shape através da equação 4.10.

para $i = 1, 2$; Onde f_s é o **fator shape**, este altera a declividade da função h, pois é um parâmetro de s_i , como se pode observar na equação 4.10.

A figura 4.4 mostra como este parâmetro influencia na função mapeamento do MVMO.

$$v_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_i(j) - \bar{x}_i)^2 \quad (4.11)$$

A equação 4.11 apresenta como a *variância* é calculada.

A variância é calculada para diferentes variáveis x do **Arquivo** (matriz que armazena os indivíduos ao longo das gerações) e, quando o valor da variância calculado é zero, utiliza-se o último valor diferente de zero, da variância.

Outro ponto importante do MVMO refere-se a metodologia, utilizada no processo de seleção de quais indivíduos, dos "n" indivíduos definidos, da geração atual, irão sofrer a

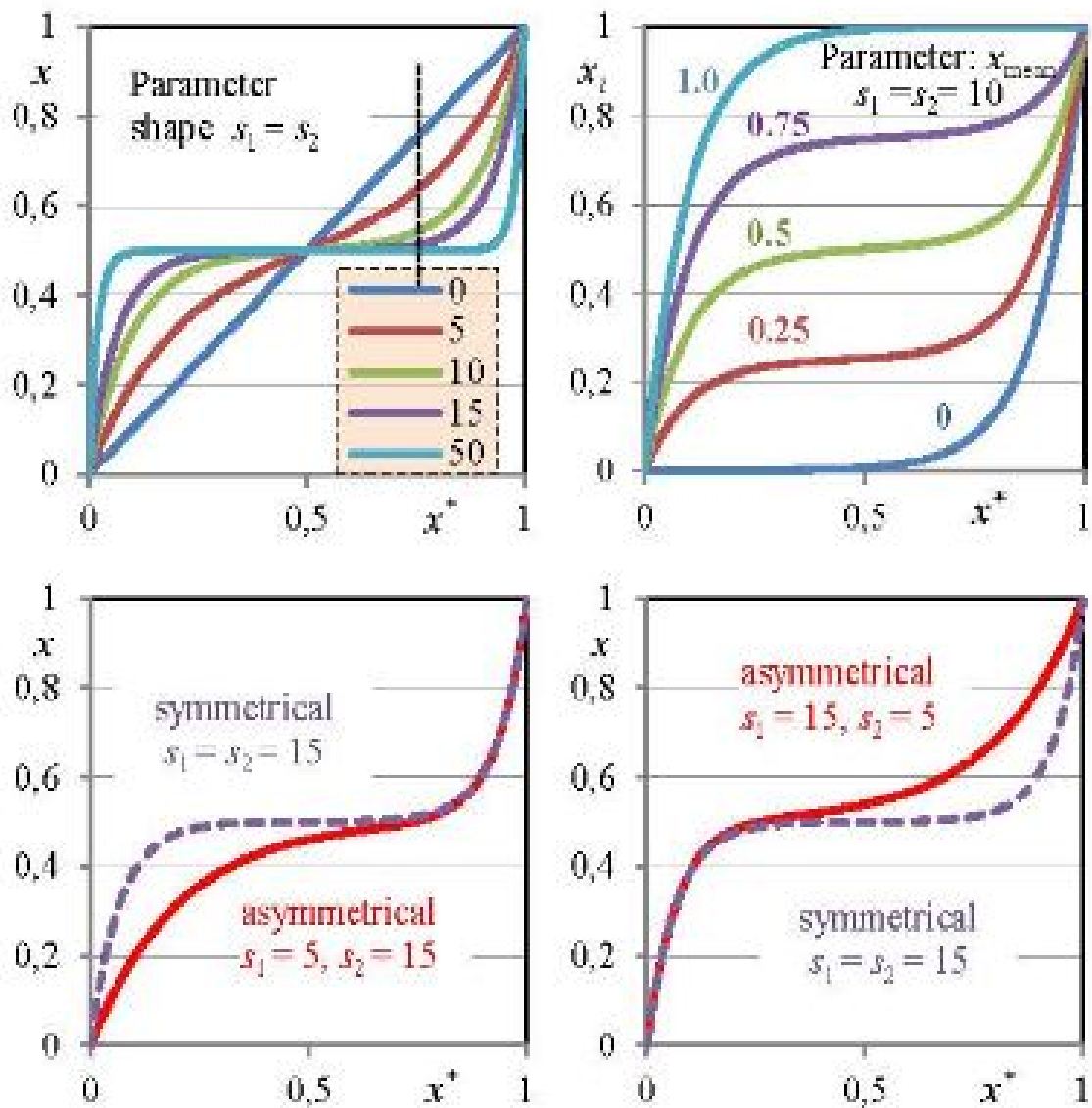


Figura 4.4: Influência da variável Shape no MVMO (RUEDA JOSE L. E ERLICH, 2013).

mutação. Existem 4 estratégias normalmente implementadas. Estas são apresentadas na Figura (RUEDA JOSE L. GONZALEZ-LONGATT, 2015) 4.5

Realizada esta descrição dos pontos particulares do MVMO.

Lista-se as etapas que o método segue:

1. Primeiramente, avalia-se os indivíduos aplicando-se a estes a *Função Aptidão*, indicada pela equação 4.12. Esta, novamente, possui a função de avaliar a melhor solução. Adicionalmente, a Função Aptidão verifica se a solução que está sendo avaliada satisfaz a tolerância definida. Caso o valor calculado pela Função Aptidão, para a solução, esteja abaixo do valor tolerado, têm-se que uma solução satisfatória foi

- 1) Seleção aleatória
- 2) Seleção por grupo vizinho: Movendo um grupo em passos como bloco
- 3) Seleção por grupo vizinho: Movendo um grupo em passos individuais
- 4) Seleção sequencial da primeira variável e seleção aleatória do resto do grupo

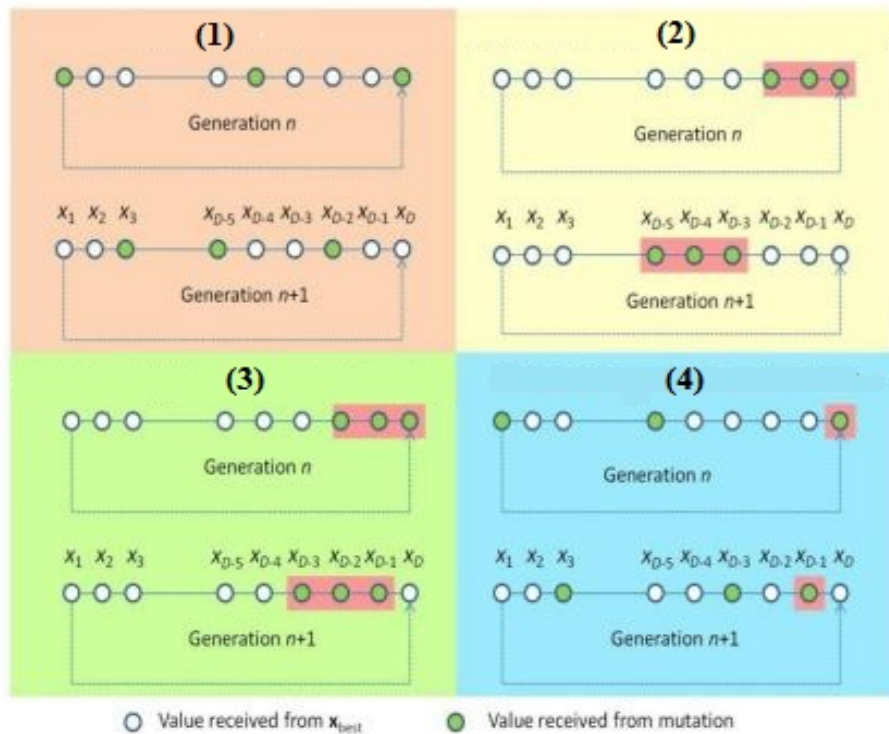


Figura 4.5: Tipos de seleção de indivíduos para sofrer a mutação, de uma dada população, tipicamente utilizadas no MVMO (RUEDA JOSE L. E ERLICH, 2013)

encontrada e o método pode ser encerrado. Caso o contrário, ou seja, a solução não é satisfatória, o método deve prosseguir para o passo seguinte. **Observação:** É interessante explicar que a equação 4.12 se trata de uma integral, que computa o erro entre a saída medida (do sistema real) (y_{med}) e a saída calculada pelo algoritmo (y). Em outras palavras, a integral calcula a diferença de um ponto da saída medida com um ponto da saída obtida pelo algoritmo, em um mesmo instante tempo, ao longo de um intervalo de tempo específico. E soma todas as diferenças obtidas entre estes respectivos pontos. O resultado é o "erro total" (J_P). (Lembrando

que a saída de interesse, neste trabalho, é a Corrente do painel).

$$J_P = \int (y_{med} - y)^T (y_{med} - y) dt \quad (4.12)$$

2. Gera-se o descendente das melhores soluções, ou seja, os melhores indivíduos, (tal processo é denominado *offspring*) e estes são alocados na primeira posição do **Arquivo base**.
3. Seleciona-se, de maneira aleatória, como ilustrada pela Figura 4.5, o conjunto de elementos (no caso, um grupo de indivíduos) que irão ter seus parâmetros transformados pela Função Mapeamento **h**, os elementos que sofreram este processo recebem o nome de " x_{new} ". Este processo, onde soluções têm seus parâmetros modificados pela Função Mapeamento, do MVMO, chama-se *mutação*.
4. Para o restante dos elementos da população e que não sofreram a mutação, substitui-se, cada um de seus parâmetros, pelo valor do respectivo parâmetro que chegou mais próximo de satisfazer a **Função aptidão** (ou seja, recebem o valor de x_{parent} , da iteração anterior). Este processo chama-se *cross-over*. Adicionalmente, neste processo, em particular no MVMO, existe uma analogia a reprodução assexuada, presente na Genética Evolutiva.
5. Levando em conta o elemento " x_{new} ", procede-se ao teste desta nova solução. Assim, desnormaliza-se a solução encontrada pelo método MVMO e retorna-se ao primeiro passo, para aplicação da Função Aptidão.

A Figura 4.6 ilustra as etapas explicadas anteriormente

4.1 Cálculo da Função Aptidão

Considerando no modelo definido, a ideia, para avaliar os indivíduos, é utilizar a Corrente Elétrica fornecida pelo sistema do qual deseja-se estimar os parâmetros. E compara-la com os valores de corrente calculada, utilizando-se o conjunto de equações 2.1 à 2.7. Estas equações consideram os parâmetros sistemas, dados na iteração(ou geração) do método. Assim, compara-se ponto a ponto, entre a corrente do sistema original, com a corrente calculada utilizando-se o conjunto de equações e melhores parâmetros estimados, da iteração atual do MVMO. Soma-se a diferença entre os pontos e, desta forma, quanto menor for o resultado desta somatória, têm-se que os parâmetros são bons. E a solução (ou indivíduo), é satisfatória.

Observa-se que as equação 2.1 é caracterizada por ser não linear. Isso significa que, para se calcular a corrente, é recomendável aplicar um método específico para este fim. Em vista que, manipular equações, desta natureza, não é uma tarefa trivial.

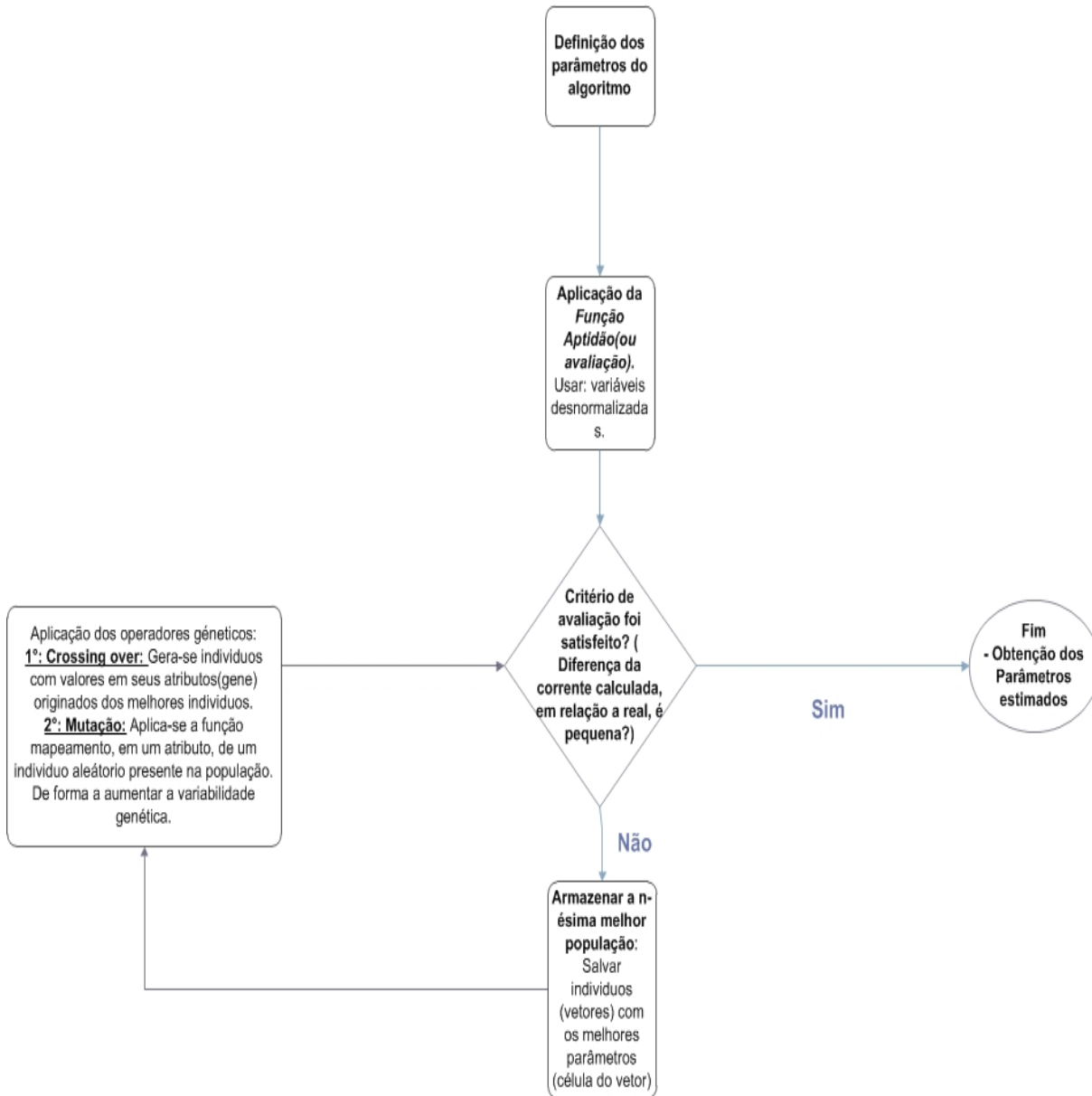


Figura 4.6: Ilustração das etapas que o MVMO segue

No caso, utiliza-se o Método de Newton-Raphson implícito, para o cálculo da corrente I . Utilizando os parâmetros estimados, dados pela iteração atual do MVMO. E as demais variáveis de entradas do sistema original que, no caso, são a Irradiância e a Temperatura.

Adicionalmente, é necessário utilizar a tensão de saída V , gerada do sistema original, para o cálculo da corrente, aplicando-se o método de Newton-Raphson.

4.1.1 A aplicação do Método de Newton Raphson

As características do método de Newton Raphson são:

- Convergência quadrática: O método converge rapidamente;
- É necessário calcular a derivada da função que se está utilizando. Ou utilizar a derivada numérica, da respectiva função;
- Caso o chute inicial não seja bom, em outras palavras, o chute inicial não seja suficientemente próximo da raiz desejada, o método pode não convergir. Ou convergir para um valor incorreto;

O método de Newton-Raphson é definido pela seguinte relação recursiva:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (4.13)$$

Neste trabalho, a variável x_n é a corrente da célula fotovoltaica. E deseja-se encontrar os valores desta corrente que satisfaça a função $f(x_n) = 0$. E a função $f(x_n)$ é dada pela equação 2.1 igualada a 0. Isto é possível subtraindo os termos de um dos lados de 2.1 pelos seus próprios termos presentes no lado oposto.

Adicionalmente, a função é de I, é apresentada na equação, quando esta é igualada a 0. Isto é feito subtraindo os termos de um dos lados da equação 2.1 pelos seus termos presentes no lado oposto. Além disso, o termo representado por $f(x_n)$ em 4.13 é dado pela somatória da corrente I, com as equações 2.1 à 2.7, onde estas equações devem ser derivadas, em relação I. Finalmente, subtrai-se, desta somatória, a derivada de 2.3 por I. Assim, temos as equações derivadas, em relação a corrente I:

$$I'_{PV} = 0 \quad (4.14)$$

$$I' = 1 \quad (4.15)$$

$$I'_o = \left(\frac{R_s}{a \cdot k \cdot T} \right) \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{a \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right) \quad (4.16)$$

$$I'_{RP} = \frac{R_s}{R_p} \quad (4.17)$$

Desta forma, aplica-se estes termos na relação em 2.1, que resulta na derivada $f'(x_n)$, que representa a corrente de saída:

$$I' = 0 = 0 - 1 - \left(\frac{R_s}{a \cdot k \cdot T} \right) \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{a \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{R_s}{R_p} \right) \quad (4.18)$$

$$f'(x_n) = \frac{f(x_n + h) - f(x_n)}{h} \quad (4.19)$$

Outra possibilidade de representar $f'(x_n)$ é realizar a computação desta numericamente. Ou seja, utilizando-se o valor da corrente I como a função a ser derivada. E aplicando-se a **definição formal** de derivada:

Onde **h** é um valor constante qualquer, desde que seja muito pequeno (na ordem de 10^{-6}).

4.2 Implementação computacional do MVMO

Utilizou-se o software Matlab para implementar o algoritmo do MVMO. Pretende-se traduzir o código implementado para a linguagem Python. De forma a tornar possível elaborar um software, para uso comercial pelas concessionárias elétricas ou projetistas de instalações fotovoltaicas.

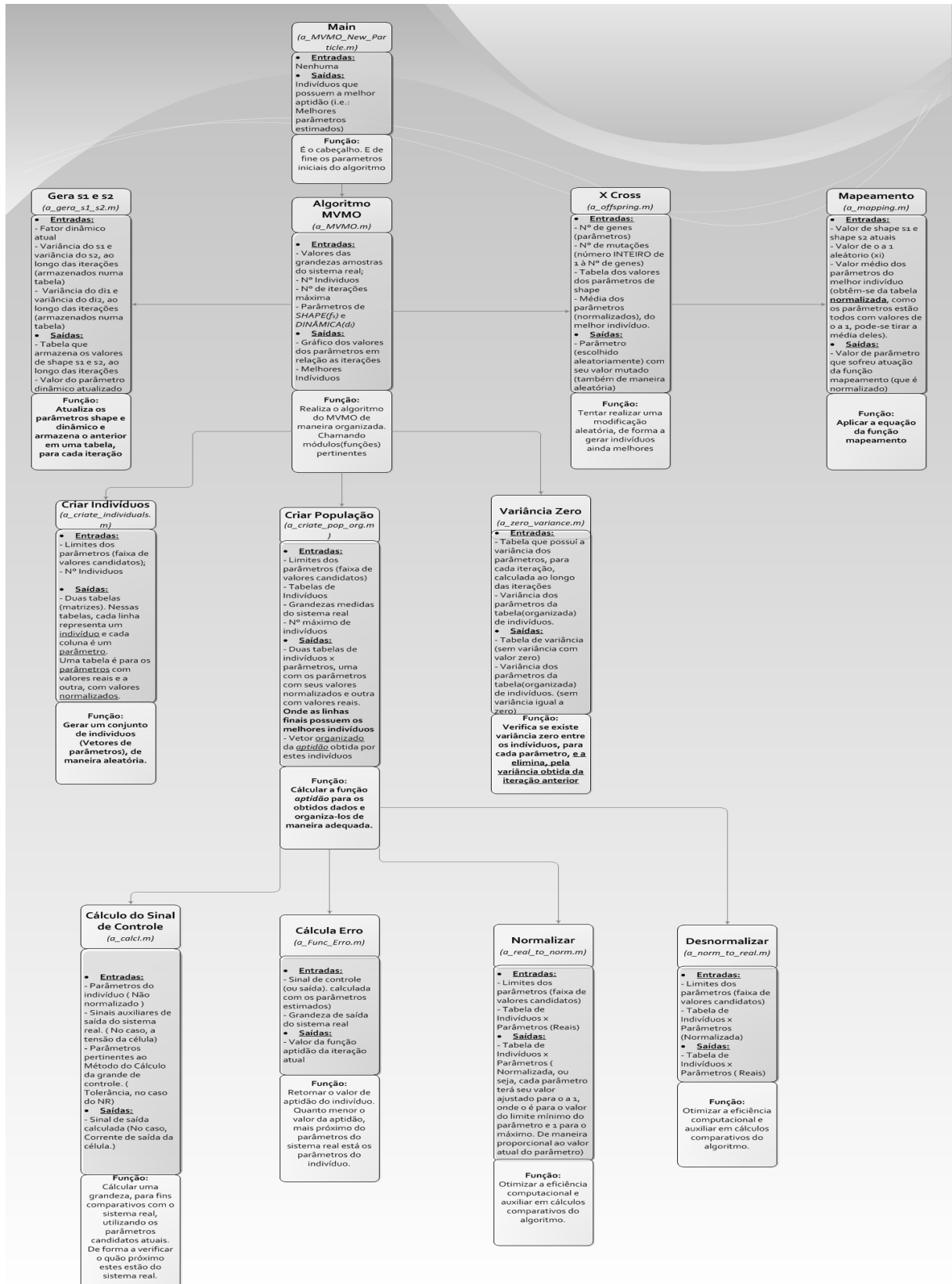


Figura 4.7: Modelo de Implementação Computacional do MVMO, com característica modular e orientada a Função

O diagrama da Figura 4.7 exemplifica a implementação de um programa que aplica o Método MVMO ao painel fotovoltaico, relacionada as etapas ilustradas no diagrama da Figura 2.2, da estimação de parâmetros utilizando o MVMO. A estrutura deste programa é caracterizada por ser *modular*. Ou seja, o programa é **decomposto** em rotinas independentes.

Cada elemento (ou função, no caso) executa uma tarefa específica. Estas são representadas por retângulos, neste diagrama. Na seção 6, encontram-se fluxogramas, que ilustram as etapas gerais para as implementações básicas destas funções.

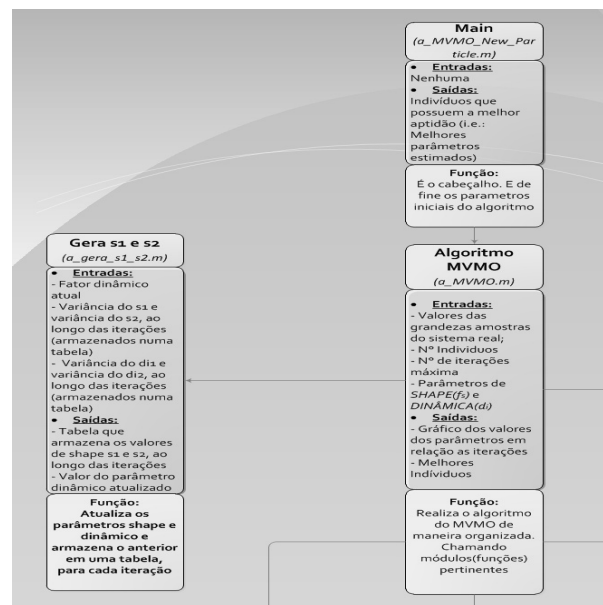


Figura 4.8: Item 1 - Modelo Computacional implementado do MVMO

Na Figura 4.8, são apresentadas 3 funções. A função Main é utilizada para realizar as definições dos parâmetros do algoritmo, assim como organizar as variáveis que armazenam os dados medidos e a especificação do espaço de solução. A função "algoritmo" faz as chamadas das funções, em ordem cronológica, que irão compor os passos que o MVMO realiza. Por fim, a função gera s1, s2 atualiza as funções shape, com os melhores indivíduos da geração atual.

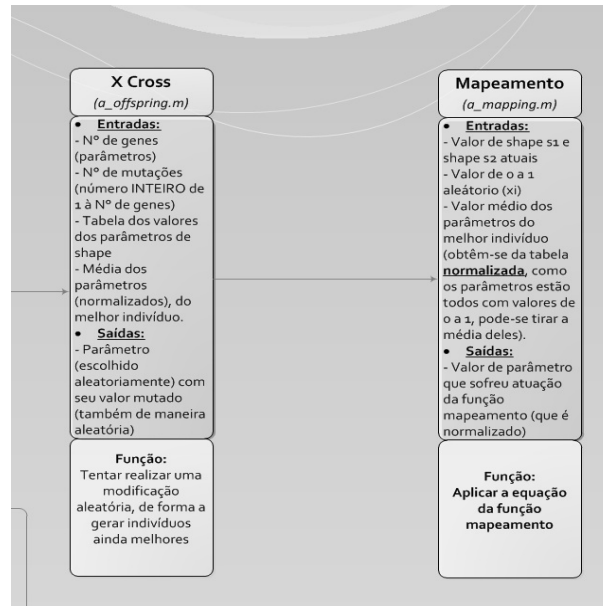


Figura 4.9: Item 2 - Modelo Computacional implementado do MVMO

A Figura 4.9, tem-se a função XCross, que seleciona indivíduos que terão seus parâmetros alterados pela função Mapeamento do MVMO. Na procura por valores melhores de parâmetros ao problema.

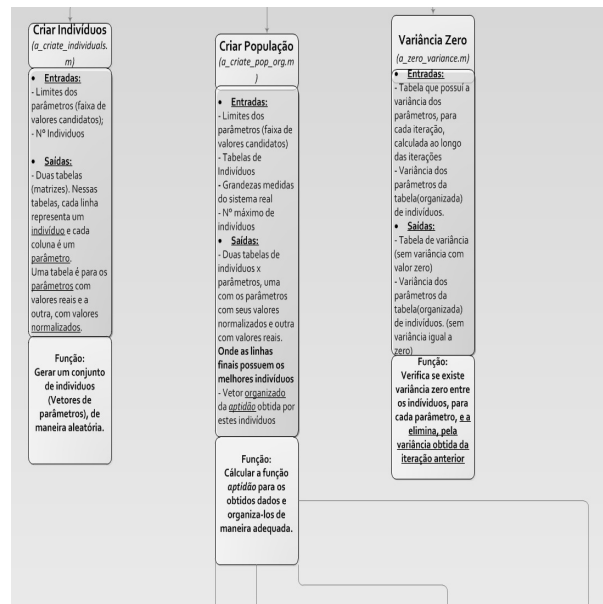


Figura 4.10: Item 3 - Modelo Computacional implementado do MVMO

Na Figura 4.10, encontram-se as funções que cria os indivíduos e a população. A função Cria Indivíduos gera vetores com parâmetros cujo valores são aleatórios. E a função Cria População é responsável por organizar os melhores indivíduos, aplicando a estes a Função aptidão, de maneira adequada. Em último, a função Variância procura garantir

que não exista um valor calculado de variância zero, entre os parâmetros dos indivíduos, armazenados no Arquivo.

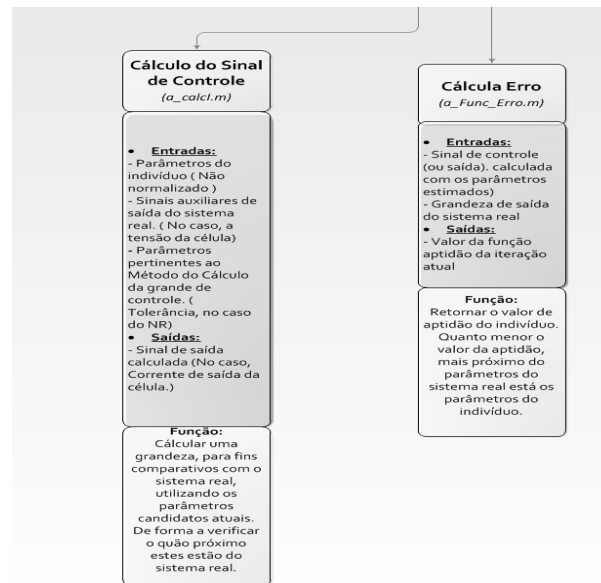


Figura 4.11: Item 4 - Modelo Computacional implementado do MVMO

Na Figura 4.11, têm-se funções importantes para avaliar a qualidade da solução (indivíduo). Primeiramente, a função Cálculo do Sinal de Corrente calcula a corrente utilizando-se o conjunto de equações descritas em 2.1 à 2.7, com os parâmetros atuais. A seguir, a função Calcula Erro utiliza a corrente, computada anteriormente, e a compara com a corrente coletada do sistema em que deseja-se estimar os parâmetros. As diferenças entre os pontos da corrente coletada, e a calculada, para um dado instante de tempo, são somadas.

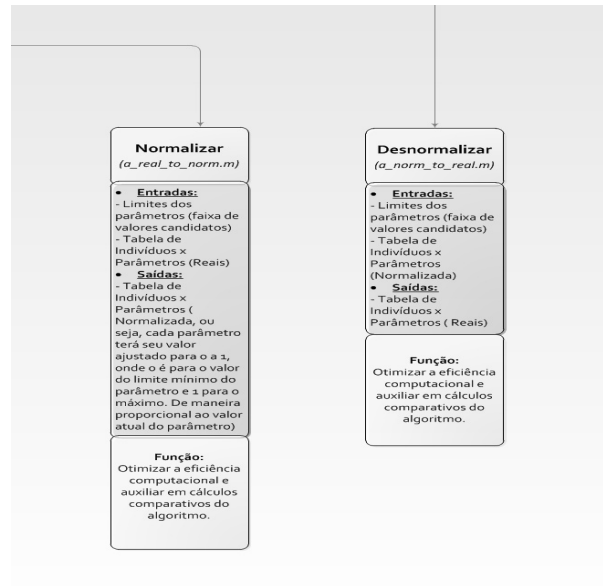


Figura 4.12: Item 5 - Modelo Computacional implementado do MVMO

E na Figura 4.12, têm-se as funções que normalizam e desnormalizam os parâmetros dos indivíduos. Este processo considera o Espaço de Solução definido na função Main. Adicionalmente, é de grande importância para aplicar a função Aptidão, ou seja, avaliar-se a precisão dos parâmetros estimados na iteração atual do MVMO.

5 RESULTADOS DO PROCESSO DE ESTIMAÇÃO

5.1 Implementação dos sistemas fotovoltaicos para coleta de dados

Neste trabalho, foram considerados 3 sistemas fotovoltaicos para a aplicação do MVMO na estimação de parâmetros:

1. **Sistema Teste 1:** Este sistema consiste de um painel fotovoltaico, de modelo *Canadian Solar CS6P-260*, simulado computacionalmente, utilizando-se um elemento presente no Simulink, chamado *Solar Cell*, este possui o conjunto de equações, que definem seu funcionamento, baseadas no trabalho (GOW; MANNING, 1999).

No caso deste sistema, os sinais térmicos de entrada, Irradiância e Temperatura, foram mantidos **constant**, com valores estabelecidos pela *STC* (do inglês: "Standard Test Condition", traduzindo-se: "Condições Padrões de Temperatura"), lembrando:

- **Temperatura** = 25°C
- **Irradiância** = 1000W/m²

Assim, para o caso deste sistema, os parâmetros a serem estimados são:

- a) Corrente Fotovoltaica
- b) Corrente de Saturação do Diodo
- c) Fator de Idealidade de Diodo
- d) Resistência Paralelo
- e) Resistência Série

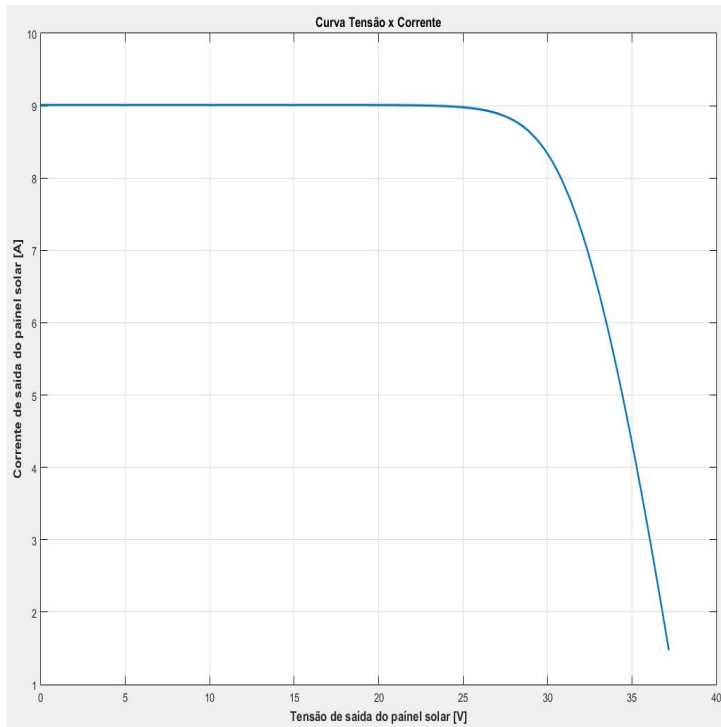


Figura 5.1: Curva Tensão x Corrente - Sistema 1

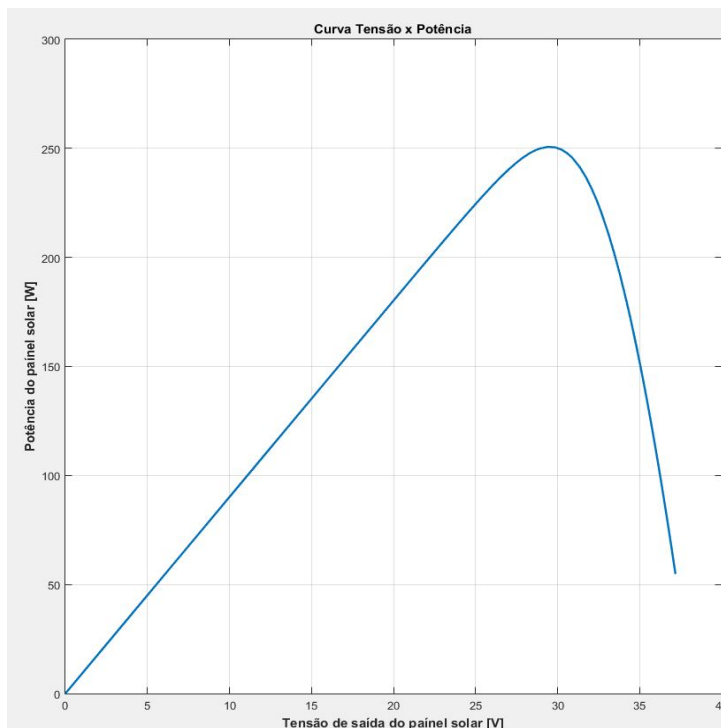


Figura 5.2: Curva Tensão x Potência - Sistema 1

Armazenou-se a Tensão e a Corrente fornecida pela simulação deste painel. As curvas características do painel simulados encontram-se nas Figuras 5.2 e 5.1.

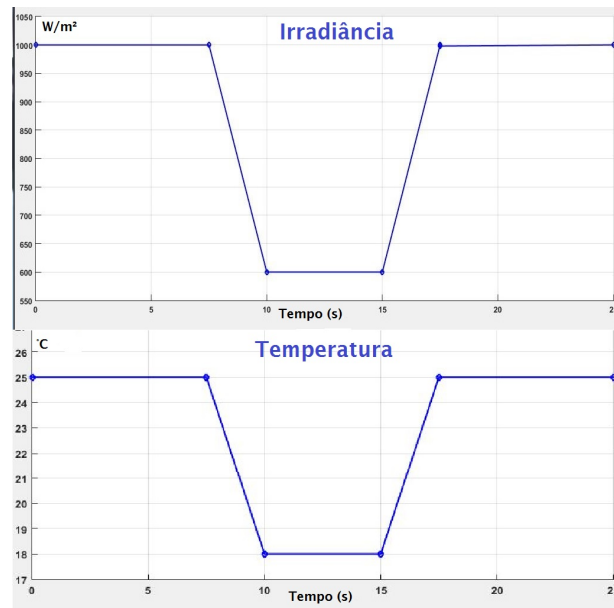


Figura 5.4: Formas dos sinais de Irradiância e Temperatura utilizados no Sistema 2

Sendo estes implementados na forma de um trapézio, como ilustra a Figura 5.4. O objeto de utilizar a irradiância e a temperatura, desta forma, é de simular a passagem de uma sombra.

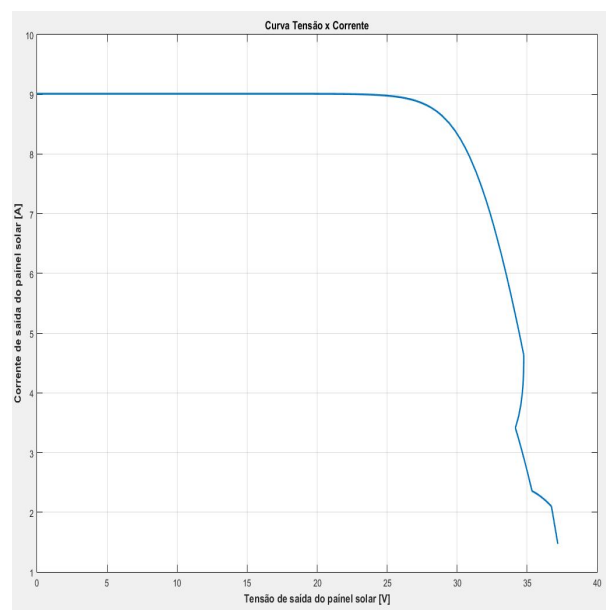


Figura 5.5: Curva Tensão x Corrente - Sistema 2

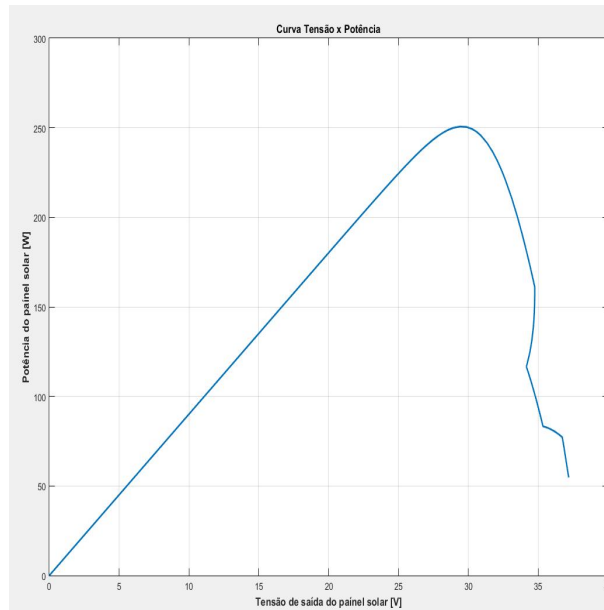


Figura 5.6: Curva Tensão x Potência - Sistema 2

As curvas características do painel simulado estão presentes na Figuras 5.5 e 5.6

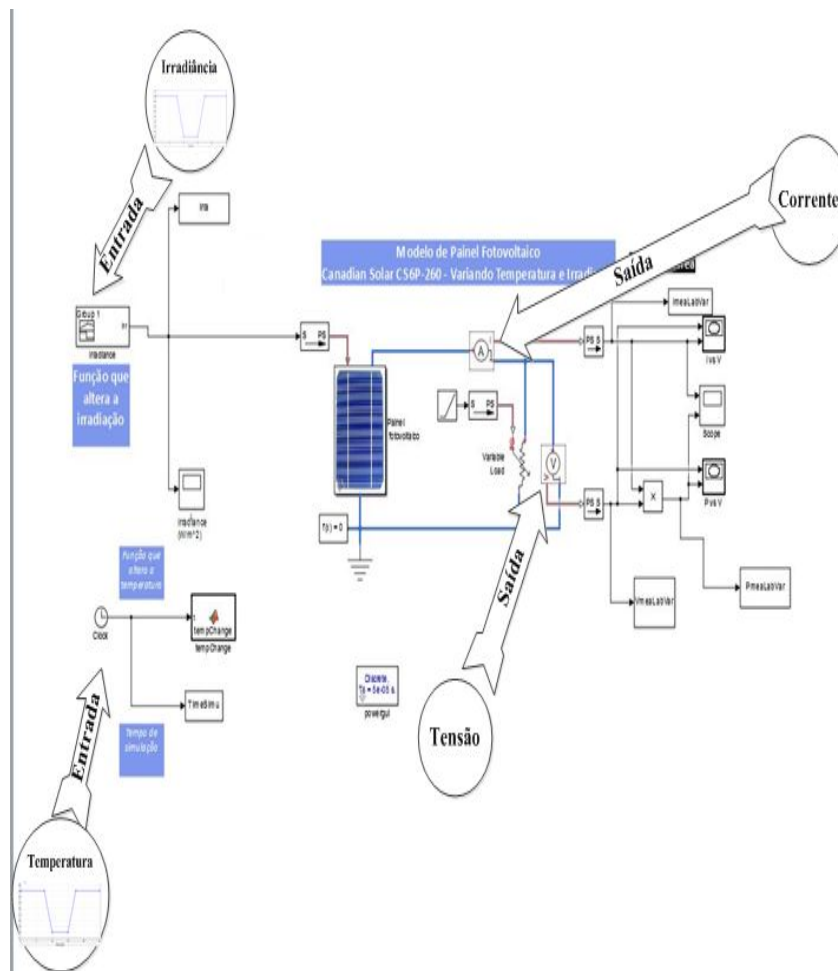


Figura 5.7: Modelo implementado no Simulink para o Sistema 2

A ilustração do modelo construído, através do Simulink, é apresentado na Figura 5.7

3. **Sistema Teste 3:** Este sistema é o painel fotovoltaico *Canadian Solar CS6P-260*, instalado no Laboratório de Análise Computacional em Sistemas Elétricos de Potência (LACOSEP-USP). Novamente, os parâmetros a serem estimados neste sistema são:

- a) Corrente de Curto-Circuito
- b) Tensão de Circuito Aberto
- c) Fator de Idealidade de Diodo
- d) Resistência Paralelo
- e) Resistência Série

Primeiramente, apresenta-se os equipamentos que estruturam o sistema fotovoltaico instalado no laboratório:

- 12 painéis fotovoltaicos, cujo modelo é *Canadian Solar CS6P-260*, cada um destes produz cerca de 260W. Totalizando uma potência total de 3.1kWp. Os dados deste equipamento é mostrado na Tabela
- Inversor Fronius Primo 3.0-1
- Sistema de Aquisição, disponibilizado pela Fronius para se utilizar com o Inversor Fronius Primo 3.0-1

Canadian Solar CS6P-260	
Potência Nominal Máxima	260W
Tensão De Circuito Aberto	37.5V
Corrente de Curto-Circuito	9.12A
Eficiência do Módulo	16.16%

Tabela 5.1: Dados da Placa Fotovoltaica

Fronius Primo 3.0-1	
Potência Nominal	260W
Número de MPPT	2
Máxima Potência do Gerador Fotovoltaico	4.5kWp
Eficiência	98%

Tabela 5.2: Dados do Inversor

O sistema fotovoltaico foi instalado no telhado do Laboratório do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade de São Paulo - Campus São Carlos.

Os dados de Irradiância e Temperatura foram adquiridos acessando o INPE (Estações Automáticas). Enquanto que os dados de Tensão e Corrente foram coletadas do Sistema de aquisição do Inversor Fronius Primo.



Figura 5.8: Sistema fotovoltaico foi instalado no LACOSEP (LOPES, 2018)

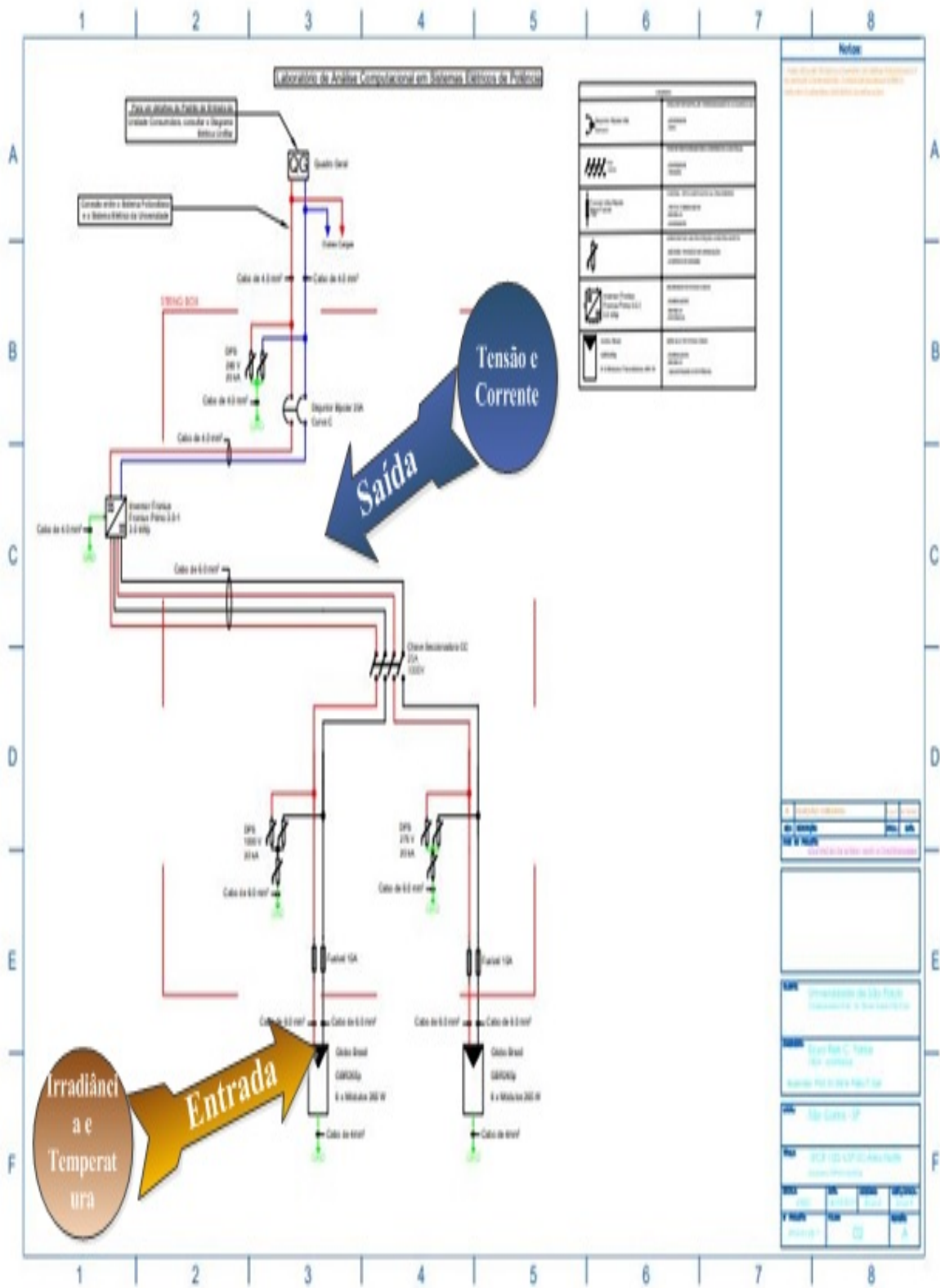


Figura 5.9: Diagrama unifilar do Sistema Fotovoltaico foi instalado no LACOSEP (LOPES, 2018)

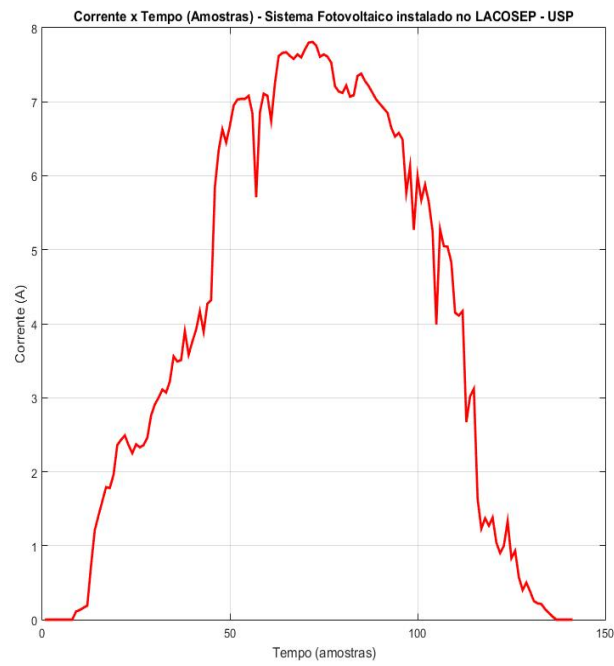


Figura 5.10: Corrente x Tempo amostrado - Sistema Fotovoltaico instalado no LACOSEP - USP

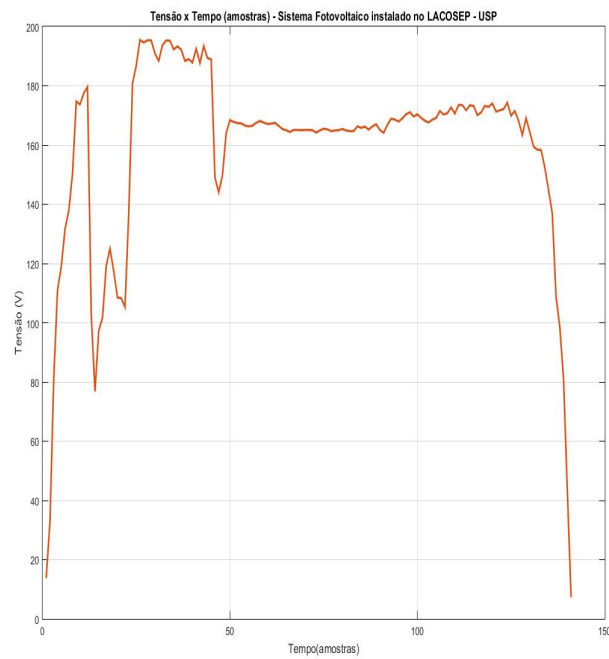


Figura 5.11: Tensão x Tempo amostrado - Sistema Fotovoltaico instalado no LACOSEP - USP

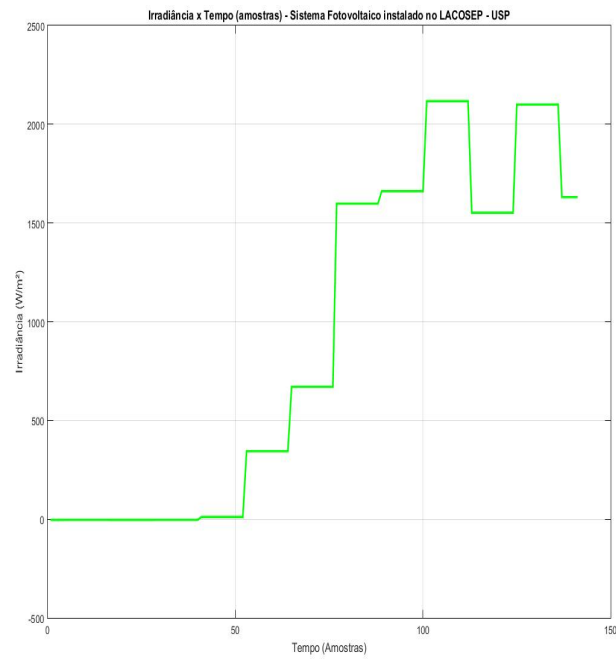


Figura 5.12: Irradiância x Tempo amostrado - Sistema Fotovoltaico instalado no LACOSEP - USP

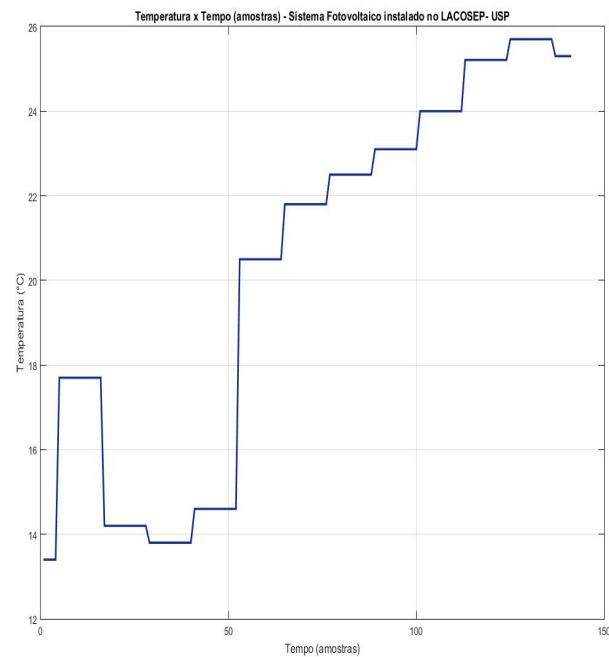


Figura 5.13: Temperatura x Tempo amostrado - Sistema Fotovoltaico instalado no LACOSEP - USP

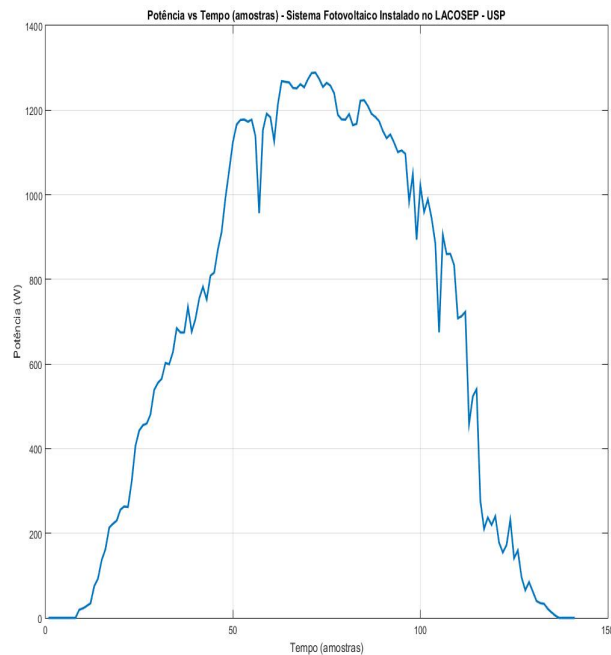


Figura 5.14: Potência x Tempo amostrado - Sistema Fotovoltaico instalado no LACOSEP - USP

As Figuras 5.10 a 5.14 ilustram as curvas de Corrente, Tensão, Irradiância, Temperatura e Potência coletadas, em função do número de amostras obtidas ao longo do tempo. Nestas curvas, em particular na de potência, observa-se que no meio do tempo amostrado esta apresenta elevada amplitude, o que é esperado, em vista que durante o meio-dia ocorre picos de incidência de irradiação solar, o que contribui para geração de potência pelo sistema.

Ao mesmo tempo, percebe-se na figura 5.11 que a tensão se manteve constante, outra característica de painéis fotovoltaicos reais.

Desta forma, é razoável afirmar que as curvas validam os dados como representantes de um painel fotovoltaico real.

É importante informar que o espaço de solução utilizado foi baseado em dados coletados do bloco *PV Array*, presente no software Simulink. Este elemento utiliza dados do Banco de Dados do NREL (do inglês, "National Renewable Energy Laboratory", o que traduzido, significa, "Laboratório Nacional de Energia Renovável"). Os dados armazenados no Banco de Dados deste laboratório são obtidos em condições STC, e possuem seus valores alterados por um algoritmo de otimização específico, quando o painel é submetido a condições variáveis de temperatura e irradiância (MATHWORKS, Acessado em 2018).

Assim, é razoável considerar válido a utilização dos espaços de soluções definidos, com base nesta fonte.

5.2 Resultados para o Sistema Teste 1: Painel Fotovoltaico Simulado com entradas constantes

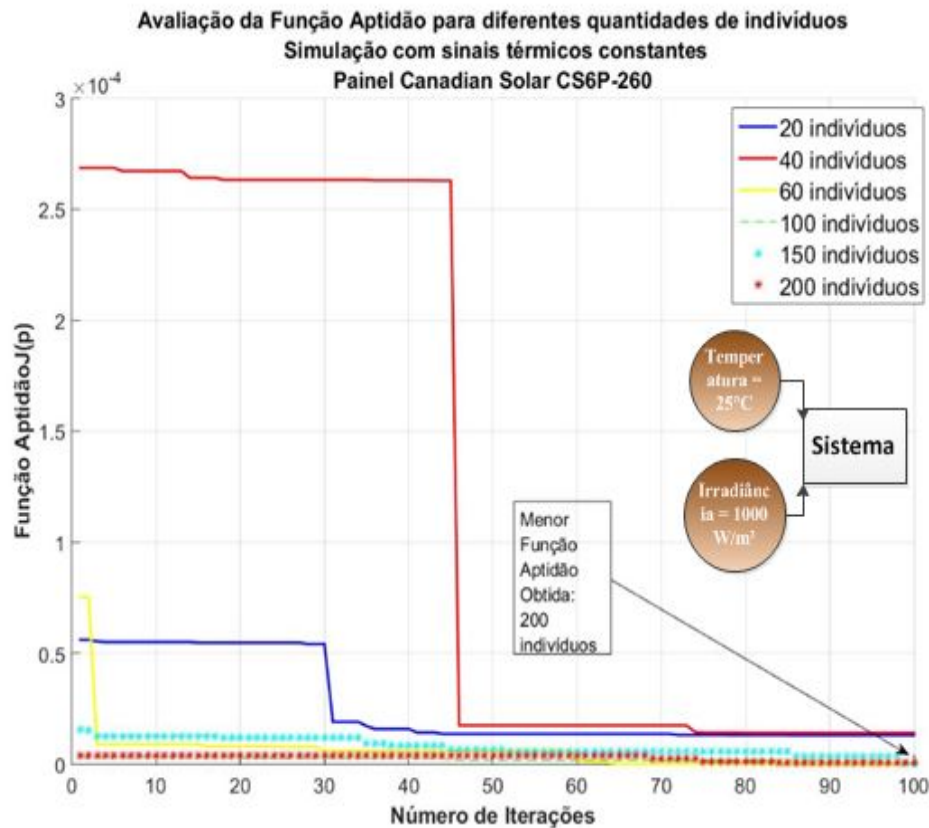


Figura 5.15: Funções Aptidões obtidas, variando-se o número de indivíduos, para o Sistema Teste 1 - Utilizou-se 20, 40, 60, 100, 150 e 200 indivíduos para estimar os parâmetros

A Figura 5.15 apresenta a Função Aptidão obtida, utilizando-se diferentes valores para o parâmetro Números de Indivíduos do MVMO: 20, 40, 60, 100, 150, 200.

Processo de Estimação do Sistema 1				
Parâmetro	Lim. Inferior	Lim. Superior	Valor Estimado	Valor Real
$I_{pv}[A]$	8.109	9.911	9.023	9.01
$I_o[10^{-10}A]$	1.403	1.714	1.4729	1.558
$R_s[\Omega]$	0.272	0.337	0.27621	0.302
$R_p[\Omega]$	370.762	453.154	417.317	411.95
a	0.9	1.1	0.9598	1

Tabela 5.3: Estimação de Parâmetros do Sistema Teste 1

Observa-se que o melhor resultado, a Função Aptidão com mais baixo valor, foi obtida utilizando-se uma população de 200 indivíduos. E o tempo de processamento da estimação foi de 27.82 segundos. O que é um valor baixo, comparado com o tempo de 147.43 segundos para o Sistema 2 e 79.64 segundos para o Sistema 3.

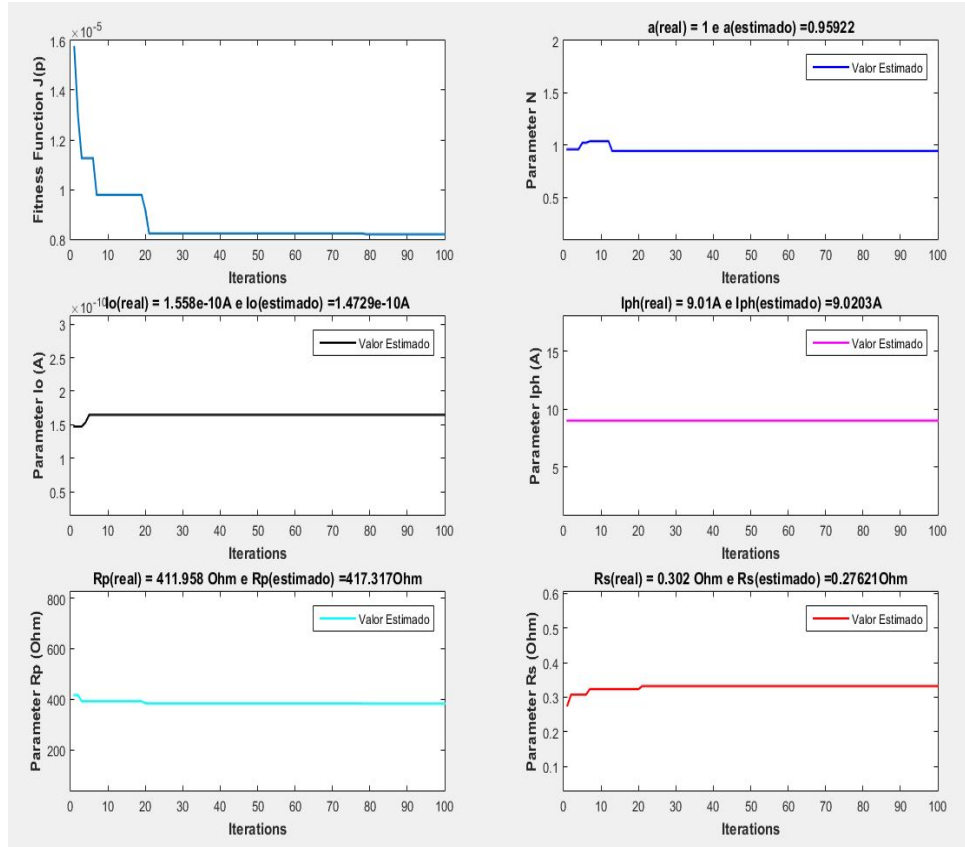


Figura 5.16: Estimação para o Sistema 1 - Utilizando-se 200 indivíduos - O espaço de solução foi definido para uma variação de $\pm 10\%$ em relação aos parâmetros utilizados no Painel Fotovoltaico Simulado

Desta forma, a Tabela 5.16 apresenta os resultados obtidos na estimação de parâmetros. Assim como os limites dados ao espaço de solução das variáveis do problema.

Variação do Espaço de Solução - Sistema Teste 1					
Parâmetro	Valor Definido	10%	20%	30%	40%
$J_p [10^{-5}]$	-	1.6	0.45	0.25	0.01
$I_{pv} [A]$	9.01	9.0203	9.014	9.0138	9.0142
$I_o [10^{-10} A]$	1.558	1.473	1.4237	1.333	1.416
$R_s [\Omega]$	0.302	0.27621	0.28146	0.28664	0.290
$R_p [\Omega]$	411.958	417.317	347.176	301.286	545.136
a	1	0.9592	1.137	1.18	1.20

Tabela 5.4: Resultados da estimação ao variar o Espaço de Solução - Sistema Teste 1

A Tabela 5.4 ilustra a estimação de parâmetros realizada com 200 indivíduos, variando-se o espaço de solução.

Era esperado que o Sistema Simulado com Sinais Térmicos Constantes Sistema 1 apresentasse a menor Função Aptidão. Isso se deve a simplicidade do sistema, o que torna

menos árdua a tarefa de estimar os parâmetros para representa-lo.

5.3 Resultados para o Sistema Teste 2: Painel Fotovoltaico Simulado com entradas variáveis no tempo

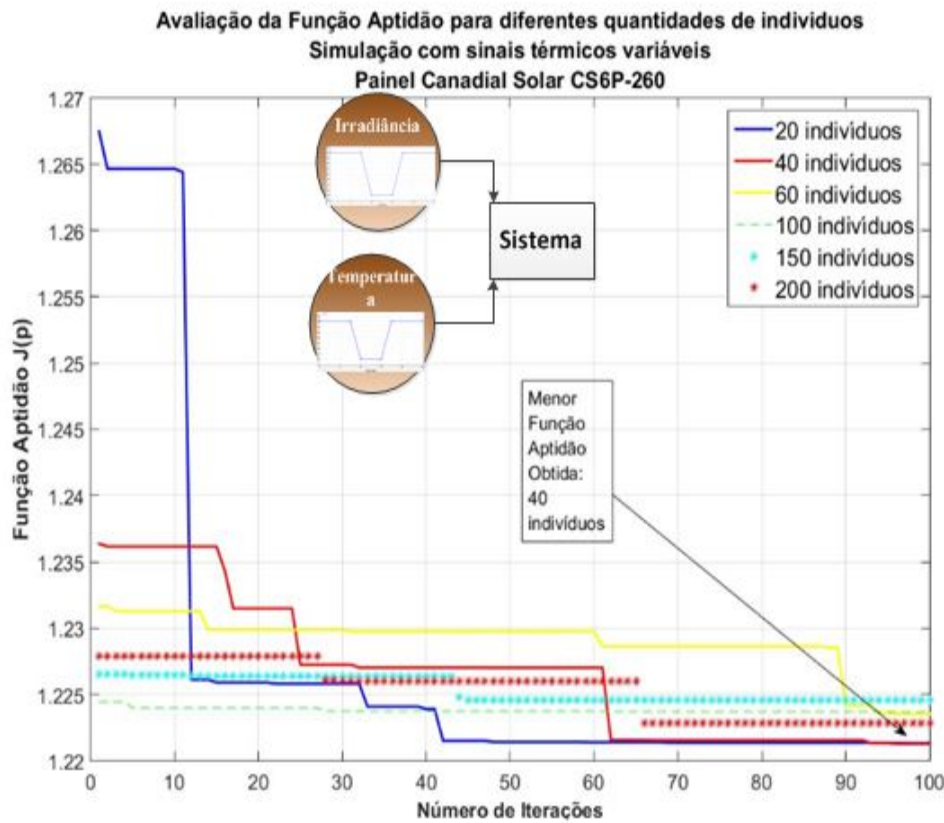


Figura 5.17: Funções Aptidões obtidas, variando-se o número de indivíduos, para o Sistema Teste 2 - Utilizou-se 20, 40, 60, 100, 150 e 200 indivíduos para estimar os parâmetros

A Figura 5.17 apresenta a Função Aptidão obtida, utilizando-se diferentes valores para o parâmetro Números de Indivíduos, do MVMO: 20, 40, 60, 100, 150, 200.

Processo de Estimação do Sistema 2				
Parâmetro	Lim. Inferior	Lim. Superior	Valor Estimado	Valor Real
Isc[A]	8.091	9.889	9.728	8.99
Voc[V]	34.02	41.58	34.36	37.8
Rs[Ω]	0.272	0.337	0.277	0.302
Rp[Ω]	370.762	453.154	374	411.95
a	0.9	1.1	0.9221	1

Tabela 5.5: Estimação de Parâmetros do Sistema Teste 2

Observa-se que o melhor resultado, a Função Aptidão com mais baixo valor, foi obtida para uma população de 40 indivíduos.

Como o sistema 2 é mais complexo, em relação ao 1, pois os sinais térmicos aplicados na entrada deste variam, e nota-se um contraste: Enquanto o sistema 1 utilizou 200 indivíduos para realizar a melhor estimativa, o melhor resultado deste veio apenas utilizando-se 40 indivíduos. Conseqüentemente, surge a ideia de que, para sistemas mais difíceis de se modelar, ou que há mais incertezas nos dados coletados, deve-se utilizar uma menor quantidade de indivíduos.

Com essa consideração, a Tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos na estimativa de parâmetros, utilizando-se essa quantidade de indivíduos. Assim como os limites dados ao espaço de solução das variáveis do problema.

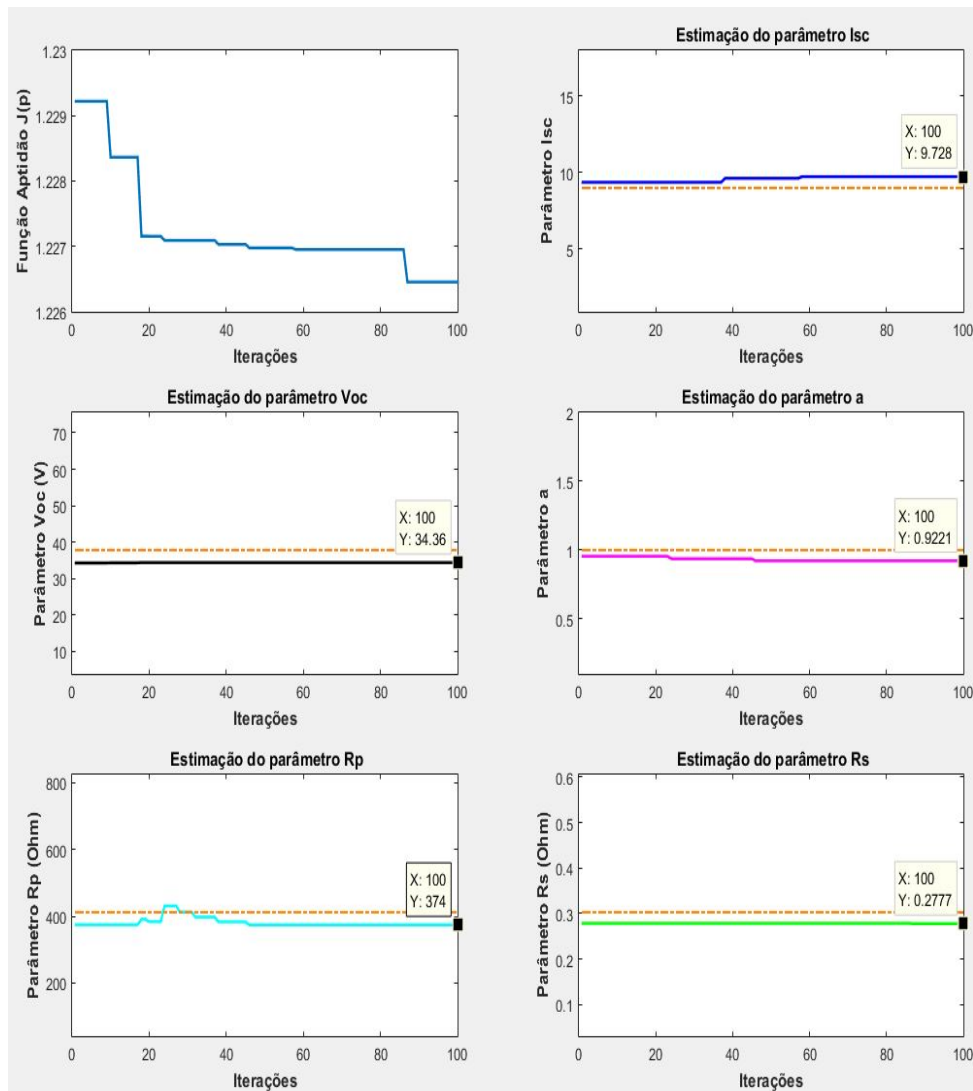


Figura 5.18: Estimativa para o Sistema 2 - Utilizando-se 40 indivíduos - O espaço de solução foi definido para uma variação de $\pm 10\%$ em relação aos parâmetros utilizados no Painel Fotovoltaico Simulado

Variação do Espaço de Solução - Sistema Teste 2					
Parâmetro	Valor Definido	10%	20%	30%	40%
J_p	-	1.227	1.1125	0.9443	0.82
$I_{sc}[A]$	8.99	9.728	9.979	9.618	11.52
$V_{oc}[V]$	37.8	34.36	30.79	27.21	52.46
$R_s[\Omega]$	0.3027	0.2777	0.2516	0.2187	0.2082
$R_p[\Omega]$	411.958	374	485.8	498.8	476
a	1	0.9221	0.9098	0.8109	0.8338

Tabela 5.6: Resultados da estimação ao variar o Espaço de Solução - Sistema Teste 2

A Tabela 5.6 ilustra a estimação de parâmetros realizada com 40 indivíduos, variando-se o espaço de solução.

5.4 Resultados para o Sistema Teste 3: Sistema Fotovoltaico instalado no LACOSEP-USP

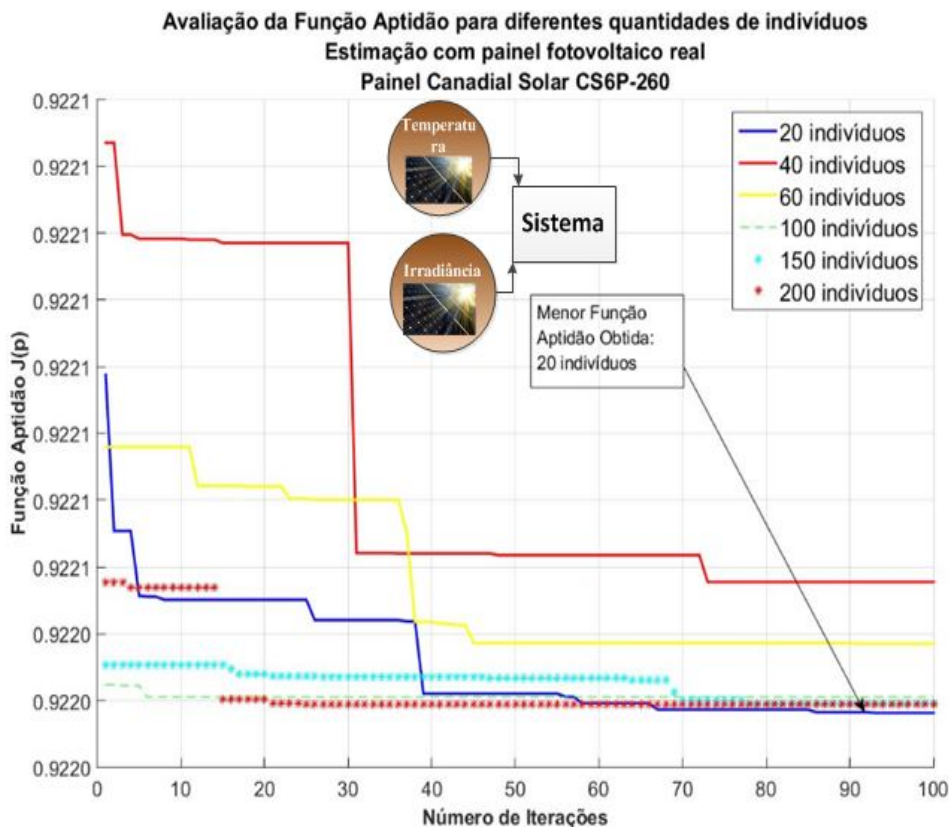


Figura 5.19: Funções Aptidões obtidas, variando-se o número de indivíduos, para o Sistema 3 - Utilizou-se 20, 40, 60, 100, 150 e 200 indivíduos para estimar os parâmetros

A Figura 5.19 apresenta a Função Aptidão obtida, utilizando-se diferentes valores para o parâmetro Números de Indivíduos do MVMO: 20, 40, 60, 100, 150, 200.

Processo de Estimação do Sistema 3				
Parâmetro	Lim. Inferior	Lim. Superior	Valor Estimado	Valor STC
Isc[A]	8.091	9.889	8.520	8.99
Voc[V]	34.02	41.58	34.02	37.8
Rs[Ω]	0.272	0.337	0.333	0.302
Rp[Ω]	370.762	453.154	387.8	411.95
a	0.9	1.1	0.964	1

Tabela 5.7: Estimação de Parâmetros do Sistema 3

Observa-se que o melhor resultado, a Função Aptidão com mais baixo valor, foi obtida para uma população de 20 indivíduos. Assim, há mais um indicativo, além como mostrado no Sistema 2, de que uma menor quantidade de indivíduos é mais recomendável para estimar os parâmetros com mais exatidão, quando se lida com Sistemas mais complexos e se possui menos conhecimento do funcionamento e dados deste. Desta forma, a Tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos na estimação de parâmetros. Assim como os limites dados ao espaço de solução das variáveis do problema.

Variação do Espaço de Solução - Sistema 3					
Parâmetro	Valor Definido	10%	20%	30%	40%
Jp	-	0.9220	0.9218	0.9217	0.9216
Isc[A]	-	8.391	8.216	7.594	7.826
Voc[V]	-	34.08	30.32	27.21	22.8
Rs[Ω]	-	0.331	0.3591	0.3892	0.4143
Rp[Ω]	-	418.9	479.3	430.4	467.4
a	-	0.9147	0.8945	0.7144	0.6286

Tabela 5.8: Resultados da estimação ao variar o Espaço de Solução - Sistema 3

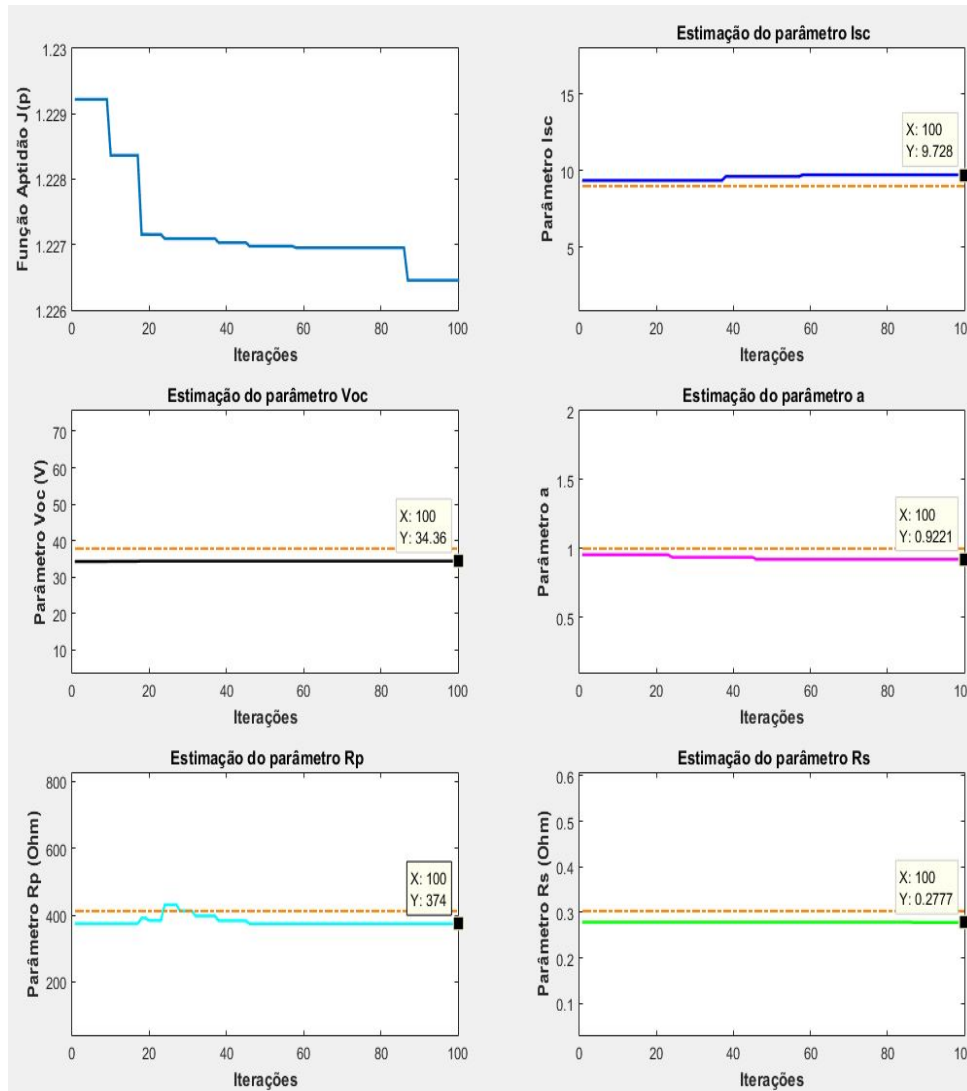


Figura 5.20: Estimação para o Sistema 3 - Utilizando-se 20 indivíduos - O espaço de solução foi definido para uma variação de $\pm 10\%$ em relação aos parâmetros utilizados no Painel Fotovoltaico Simulado **do Sistema 3**. Deve-se deixar claro: Não se sabe os parâmetros do Sistema Real. Deseja-se estima-los. Então, para se ter um Espaço de Solução, utiliza-se o mesmo espaço definido para o Sistema 2

A Tabela 5.8 ilustra a estimação de parâmetros realizada com 20 indivíduos, variando-se o espaço de solução.

Comparando-se os resultados do Sistema simulado com Sinais Térmicos Variantes (Sistema 2), com os resultados do Sistema Real (Sistema 3), pode-se observar que a Função Aptidão do Sistema 2 é MAIOR do que a do Sistema 3. Em outras palavras, o MVMO estimou parâmetros que melhor representam o modelo do Sistema Real do que o modelo do Sistema Simulado. Um fato interessante, uma explicação possível é que a não linearidade imposta no Sistema Simulado foi agressiva o bastante para torna-lo mais difícil de representar do que o Sistema Real (Sistema 3).

Estimação de parâmetros do Sistema Fotovoltaico instalado no LACOSEP			
- Utiliza-se dados dos dias 2, 4 e 5 de Junho de 2018 - Variação no Espaço de Solução em 10%			
	2 de Junho de 2018	4 de Junho de 2018	5 de Junho de 2018
Voc [V]	34.08	34.07	34.9
Isc [A]	8.391	8.382	8.91
a	0.915	0.914	0.94
Rp [Ω]	418.9	418.63	435.5
Rs [Ω]	0.331	0.331	0.282
Jp	0.922	0.403	0.975

Tabela 5.9: Comparação dos resultados da estimação de parâmetros, utilizando dados coletados para os dias 2, 4 e 5 de Junho de 2018

Para reforçar a validação da estimação de parâmetros, do sistema fotovoltaico real, utilizado neste trabalho, a Tabela 5.9 utiliza os valores coletados de tensão, corrente, temperatura e irradiância, para os dias 4 e 5 de Junho de 2018. Além, dos dados utilizados anteriormente para o dia 2 de Junho de 2018.

Observa-se que os parâmetros possuem valores ligeiramente diferentes. O que sugere que a variação dos valores de entrada dos sistemas não compromete a estimação.

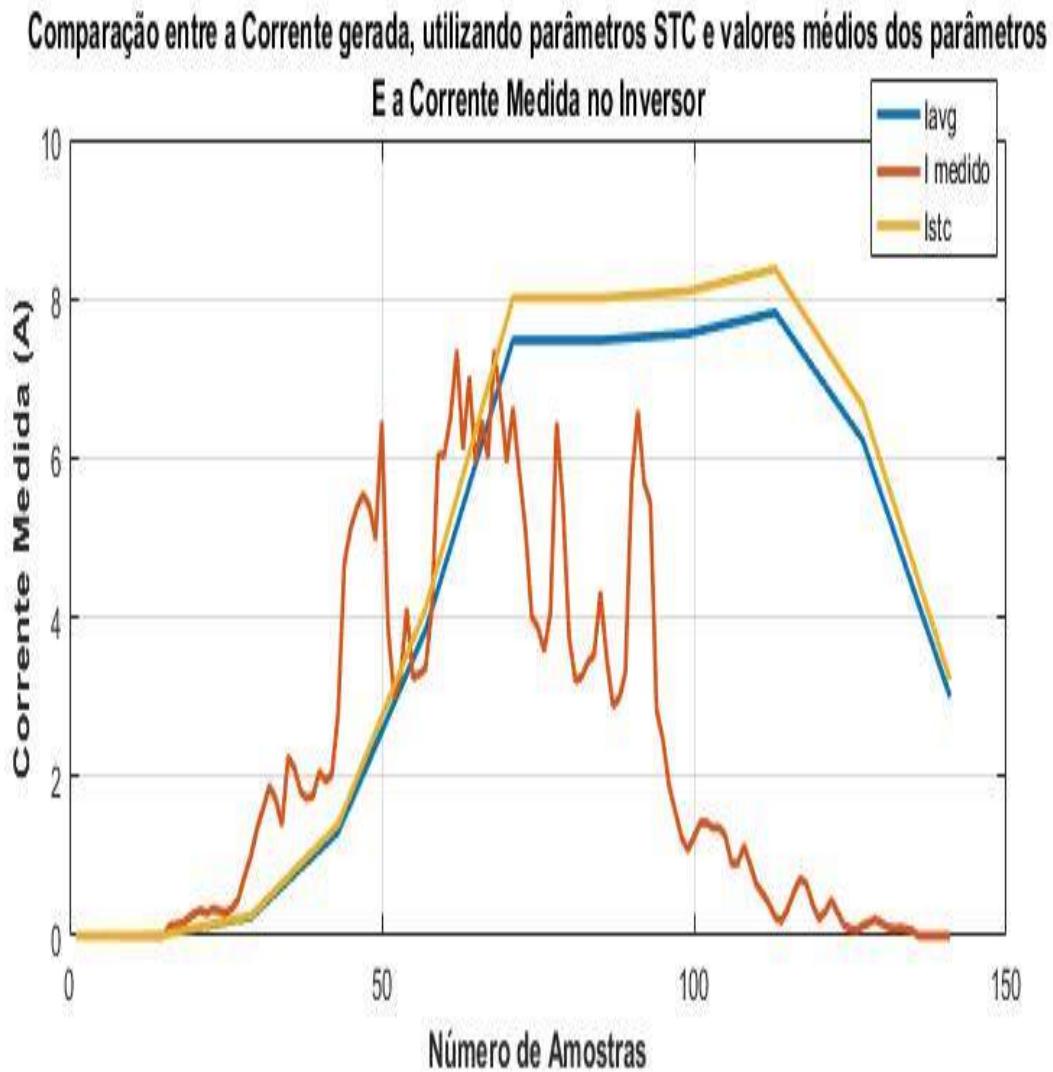


Figura 5.21: Ilustração comparativa entre a corrente medida, e as correntes geradas utilizando-se dados de Irradiância e Temperatura do dia 5 de Junho, com parâmetros obtidos na condição STC e de valores médios dos parâmetros estimados para os dias 2 e 4 de Junho

A Figura 5.21 ilustra as correntes geradas, utilizando, como valores de entrada, a Irradiância e a Temperatura do dia 5 de Junho, e como parâmetros, os seguintes casos:

- I_{stc} : Esta corrente foi gerada utilizando os parâmetros do modelo adotado quando este está submetido a condições STC
- I_{avg} : Esta corrente foi gerada utilizando os parâmetros com valores médios da estimativa realizada para os dias 2 e 4 de Junho de 2018.
- I_{medido} : Esta corrente é a corrente medida no inversor para o dia 5 de Junho.

Ao observar estas formas de onda, verifica-se que a forma geral, de uma que: É crescente no início do dia, mantém-se com valores razoavelmente constantes, durante o meio-dia e, no fim do dia, volta a decrescer. Adicionalmente, os valores de pico destas ondas são parecidos.

É importante destacar que as correntes geradas na Figura 5.21 foram calculadas utilizando-se um número pequeno de amostras de Irradiância e Temperatura, comparando-se com o número de amostras medidas no Inversor Fronius Primo. Assim, é necessário um processo de interpolação, para adequar os pontos das correntes geradas com a medida.

Esse fato implica numa certa dificuldade em gerar a corrente com valores parecidos com a medidas, mas, mesmo assim, os resultados, ao comparar as correntes geradas com a medida, apresentam uma coerência satisfatória. Desta forma, têm-se mais um indicativo de que os parâmetros estimados podem representar um sistema real com uma resposta razoavelmente confiável.

6 CONCLUSÃO

Avaliando-se as Funções Aptidões obtidas, para os 3 sistemas fotovoltaicos implementados, pode-se observar uma característica em comum: Todas apresentam um baixo valor para a Função Aptidão.

Desta forma, infere-se que o MVMO é capaz de encontrar valores satisfatoriamente bons para os parâmetros do modelo de Um Diodo Melhorado, adotado para representar o painel fotovoltaico.

Além disto, em relação aos tempos de processamento para a realização da estimação, observa-se que a solução é obtida em uma velocidade satisfatória, dado o contexto e objetivo desta aplicação. E pode-se inferir que a complexidade do sistema, a quantidade de amostras e o número de indivíduos, utilizados no algoritmo, são fatores que influenciam na velocidade em que o programa irá fornecer os resultados finais. Onde, no caso, sugere-se que a complexidade dos dados, a serem aplicados na função aptidão para avaliar os indivíduos, é a etapa que possui maior custo computacional e, assim, demanda mais tempo para ser realizada.

Outra característica pertinente do MVMO é sua robustez. Pois os valores das funções aptidões, mesmo aumentando-se o espaço de soluções possíveis, não cresceu substancialmente. Isso significa que o MVMO é capaz de estimar os parâmetros satisfatoriamente com um espaço de solução vasto.

Pode-se avaliar a importância do processo de estimação dos parâmetros do modelo do painel fotovoltaico real, pela seguinte maneira: Recapitulando: a Função Aptidão, nada mais é, do que a somatória das diferenças entre as amostras de corrente do sistema real, com a corrente calculada utilizando-se os parâmetros estimados (através do método de Newton-Raphson). Assim, como teve-se 141 amostras e o valor Função Aptidão obtida foi de cerca de 0.950, temos:

$$\frac{0.950}{141} = 0.0067$$

O que significa: Dadas entradas de irradiância e temperatura, é possível aplicar as equações 2.1 à 2.7, com os parâmetros estimados do modelo, que a corrente resultante terá um erro de, para cada amostra, $\pm 0.0067A$, em relação a corrente gerada do sistema real.

Considerando que a corrente gerada, pelo painel fotovoltaico, quando este opera em boas condições, possui valor de cerca de 9 Amperes. E que o erro, para cada amostra, gira em torno de 6.7mA. Pode-se calcular o erro amostral em porcentagem:

$$\frac{0.0.0067}{9} \cdot 100\% = 0.074\%$$

Em outras palavras, o valor de corrente, gerado pelo modelo do painel fotovoltaico, com os parâmetros estimados. Dadas medidas adquiridas Irradiância e Temperatura, como entrada:

Valor de Corrente do painel fotovoltaico real $\pm 0.074\%$

Isto sugere a possibilidade de simular o painel fotovoltaico real, com os parâmetros devidamente estimados, sendo que a resposta deste modelo simulado terá pouca diferença em comparação ao sistema real.

Adicionalmente, existe a possibilidade de diminuir mais o erro do processo de estimação. Como apresentando no trabalho ([RUEDA JOSE L. E ERLICH, 2013](#)), a implementação do MVMO, aplicando múltiplas partículas, através de processamento computacional paralelo (*MVMO Multiple Particles - MVMO-SH*), pode fornecer resultados mais precisos. Esta implementação pode ocorrer em um futuro trabalho de Mestrado, do aluno que está escrevendo este trabalho.

Outro ponto que pode melhorar nos resultados do trabalho é utilizar uma fonte de dados medidas de maneira direta. No caso, os dados de irradiância e temperatura foram coletados através do INPE e, pretende-se, em trabalhos futuros, utilizar dados da condição ambiente medidos localmente. Uma maior precisão de dados medidos locais e, uma maior quantidade destes, pode contribuir na geração de resultados mais realísticos.

É necessário que a estimação tenha, como produto, parâmetros satisfatórios. Em vista que existe interesse em desenvolver um software para uso comercial, para técnicos e especialistas em energia fotovoltaica.

A geração de energia fotovoltaica é de grande interesse, essa afirmação foi justificada no capítulo 1 e o estado geral da tecnologia fotovoltaica é ilustrada no capítulo 3. Para auxiliar na modelagem de sistemas fotovoltaicos, aplicou-se as ideias e procedimentos apresentados no capítulo 2.

O MVMO foi o algoritmo responsável para encontrar valores ótimos aos modelo de Um Diodo Melhorado (ISDM), escolhido para representa, matematicamente, um painel fotovoltaico. Este método é apresentado no capítulo 4.

Por fim, com os resultados mostrados no capítulo 5, infere-se que o método cumpre sua função satisfatoriamente, pois consegue estimar os parâmetros do modelo do painel fotovoltaico com boa precisão. Desta forma, o objetivo principal do trabalho foi atingido com sucesso.

Apêndices

APÊNDICE A – EXEMPLOS DE ALGORITMOS UTILIZADOS NAS FUNÇÕES PERTENCENTES AO MVMO

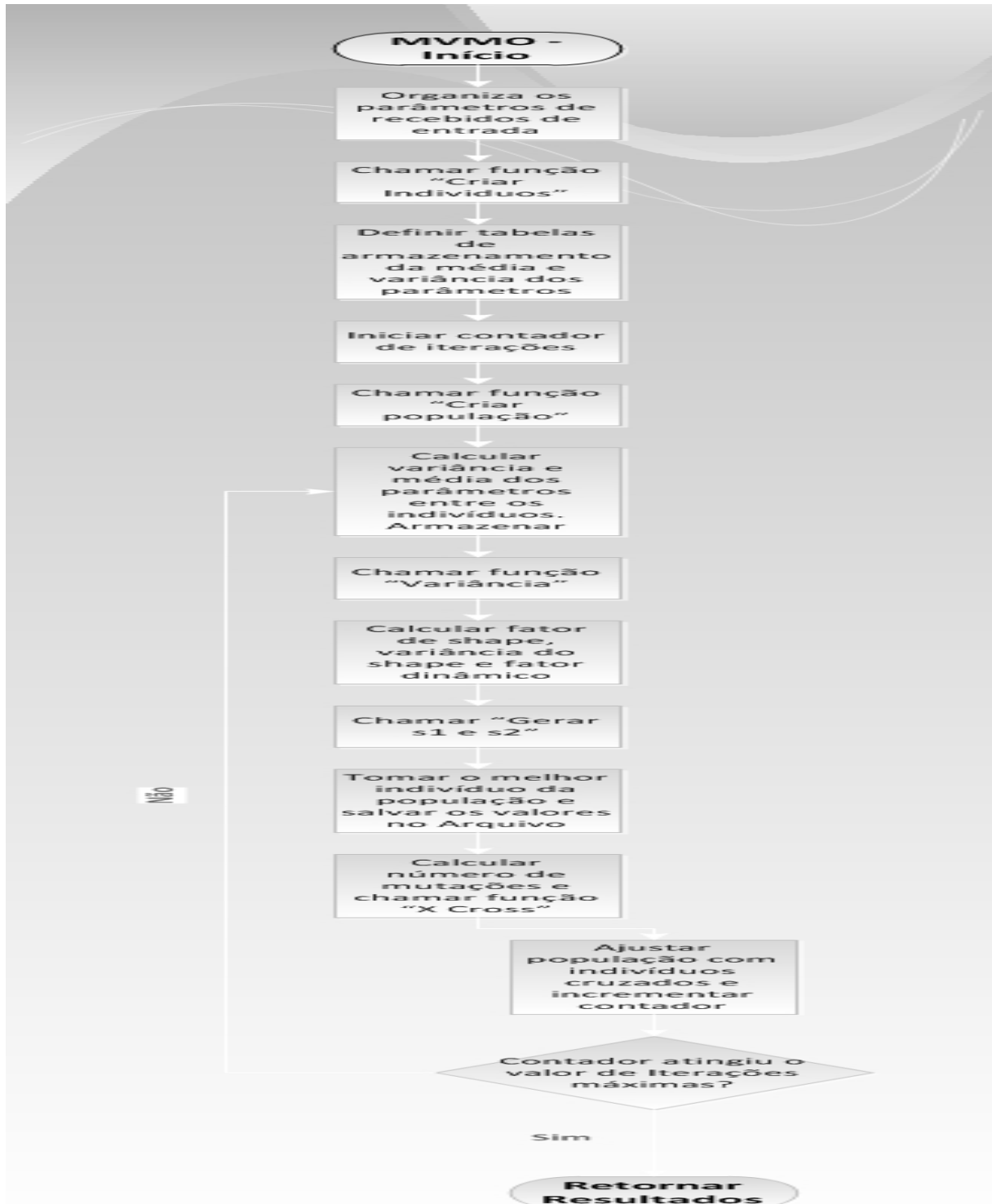


Figura A.1: Etapas gerais que o MVMO segue

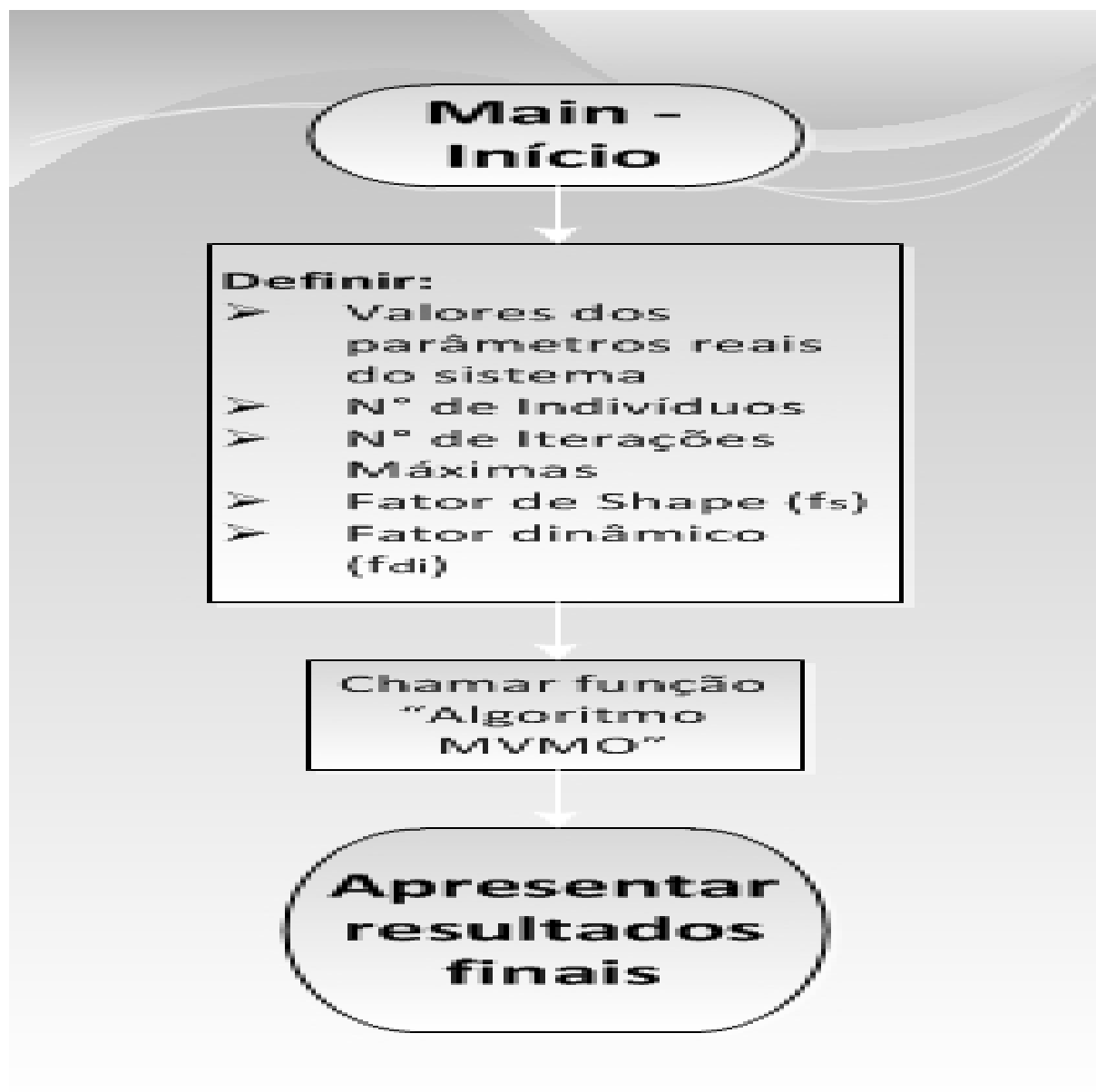


Figura A.2: Definições Básicas do MVMO

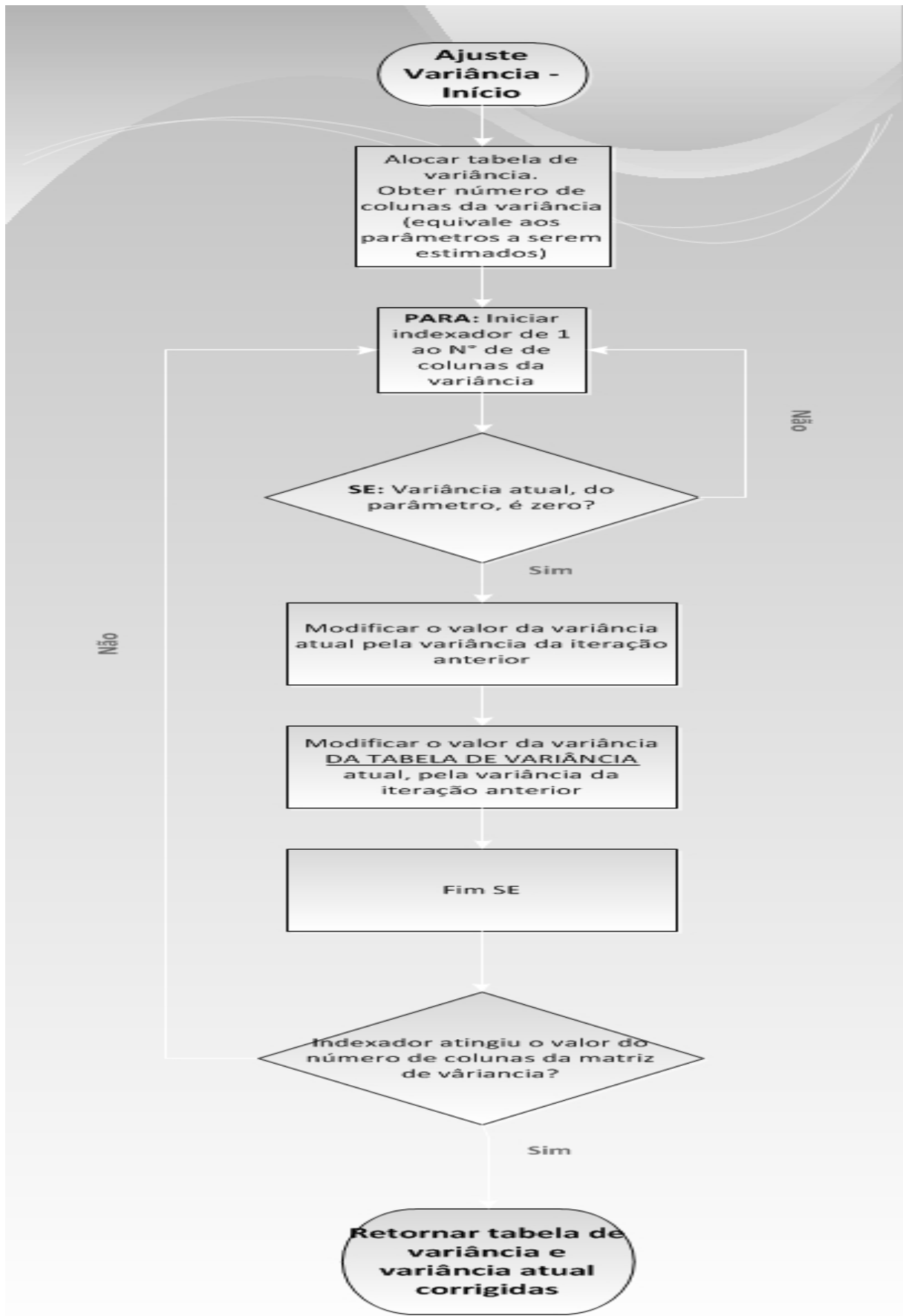


Figura A.3: Algoritmo que computa a variância

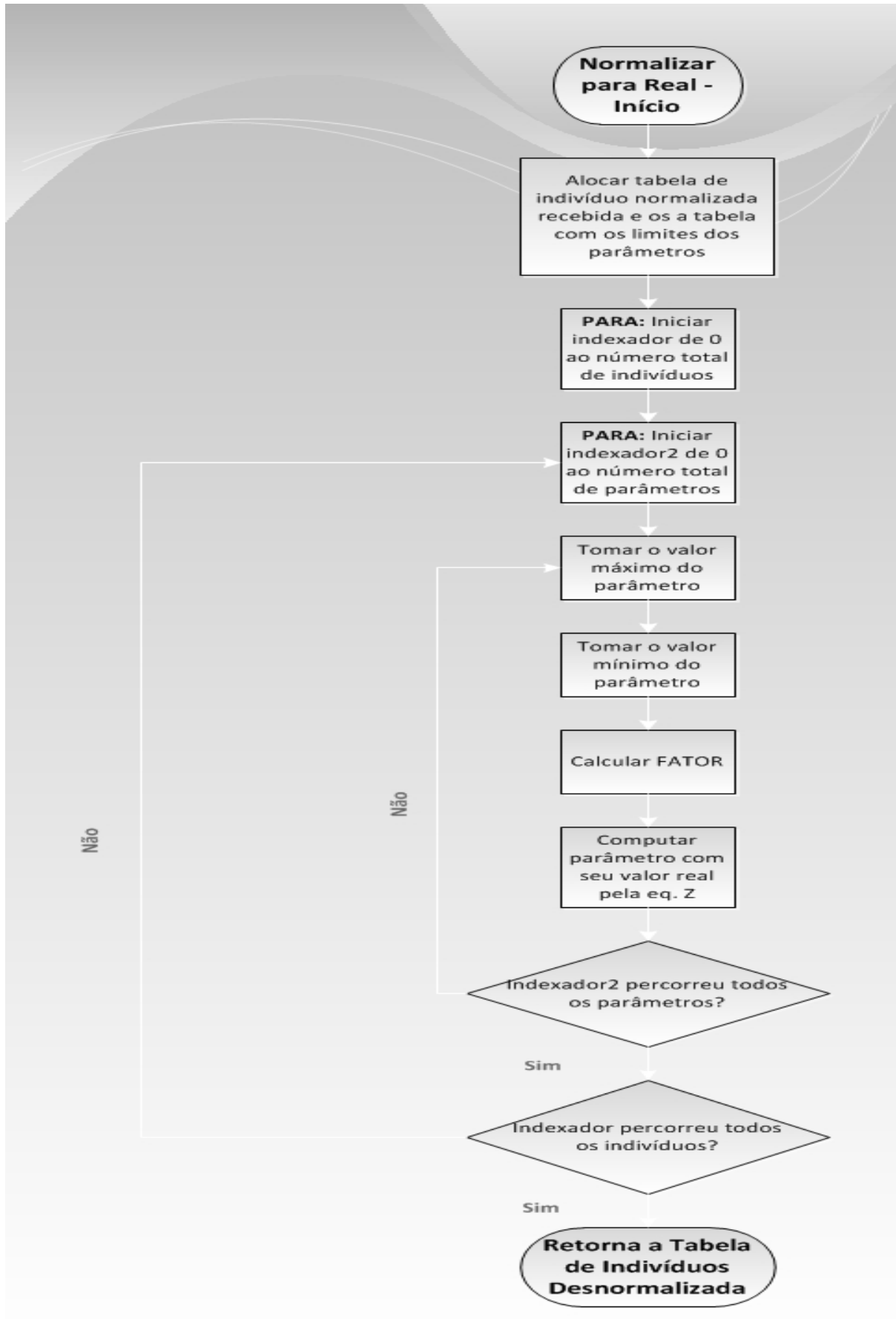


Figura A.4: Processo de Normalização

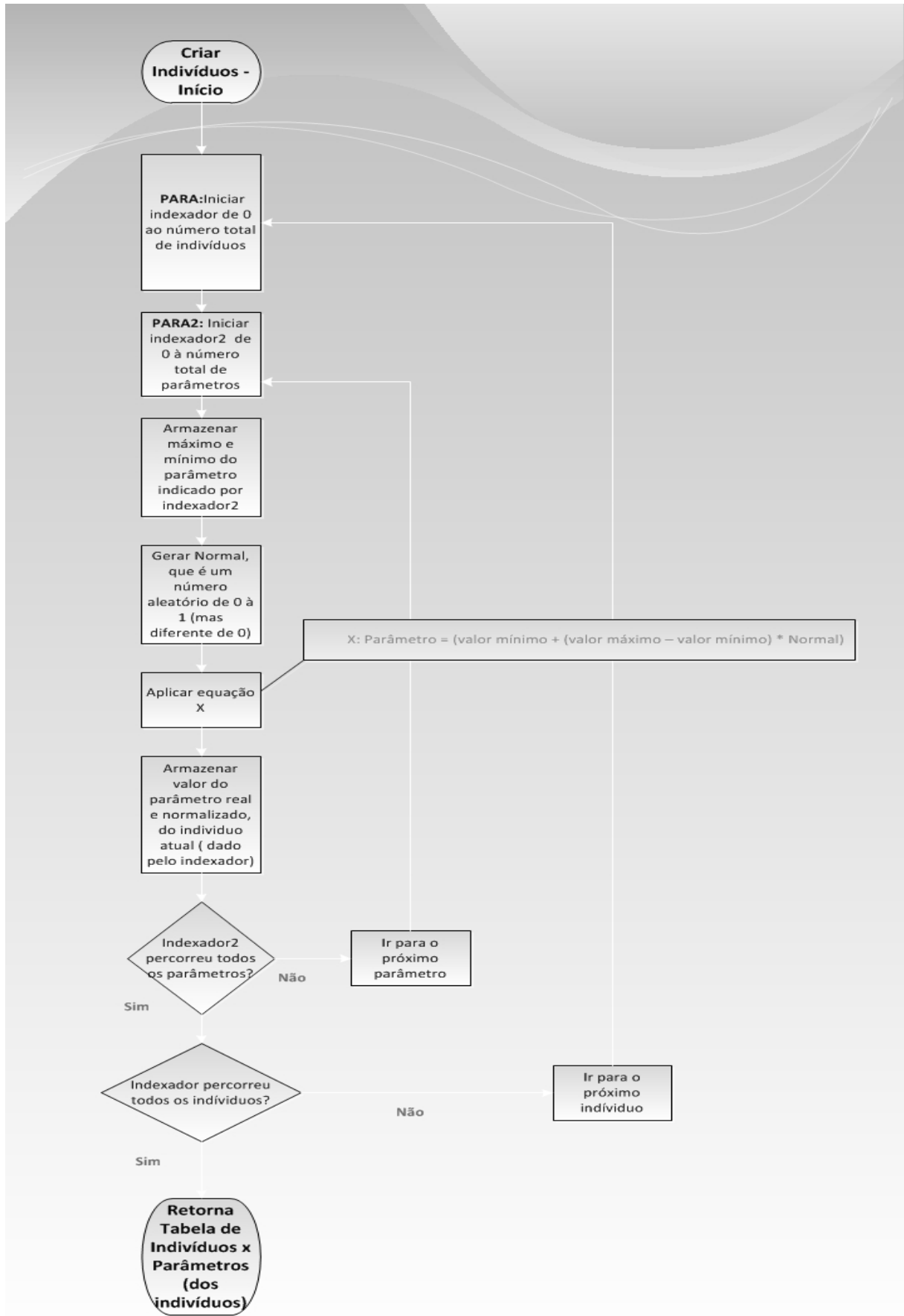


Figura A.5: Algoritmo para implementar a criação de indivíduos

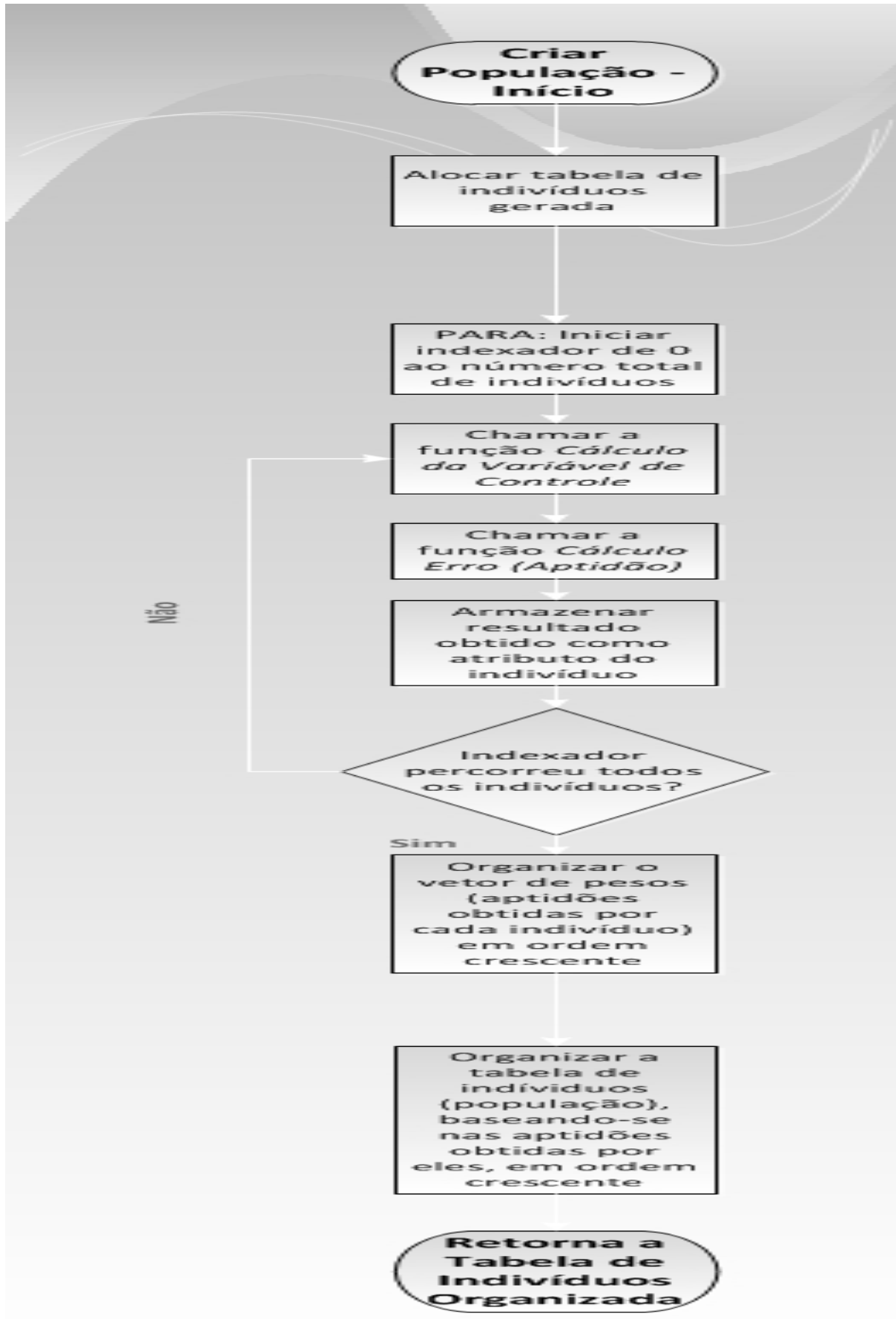


Figura A.6: Passos para Organizar e Criar uma população de indivíduos

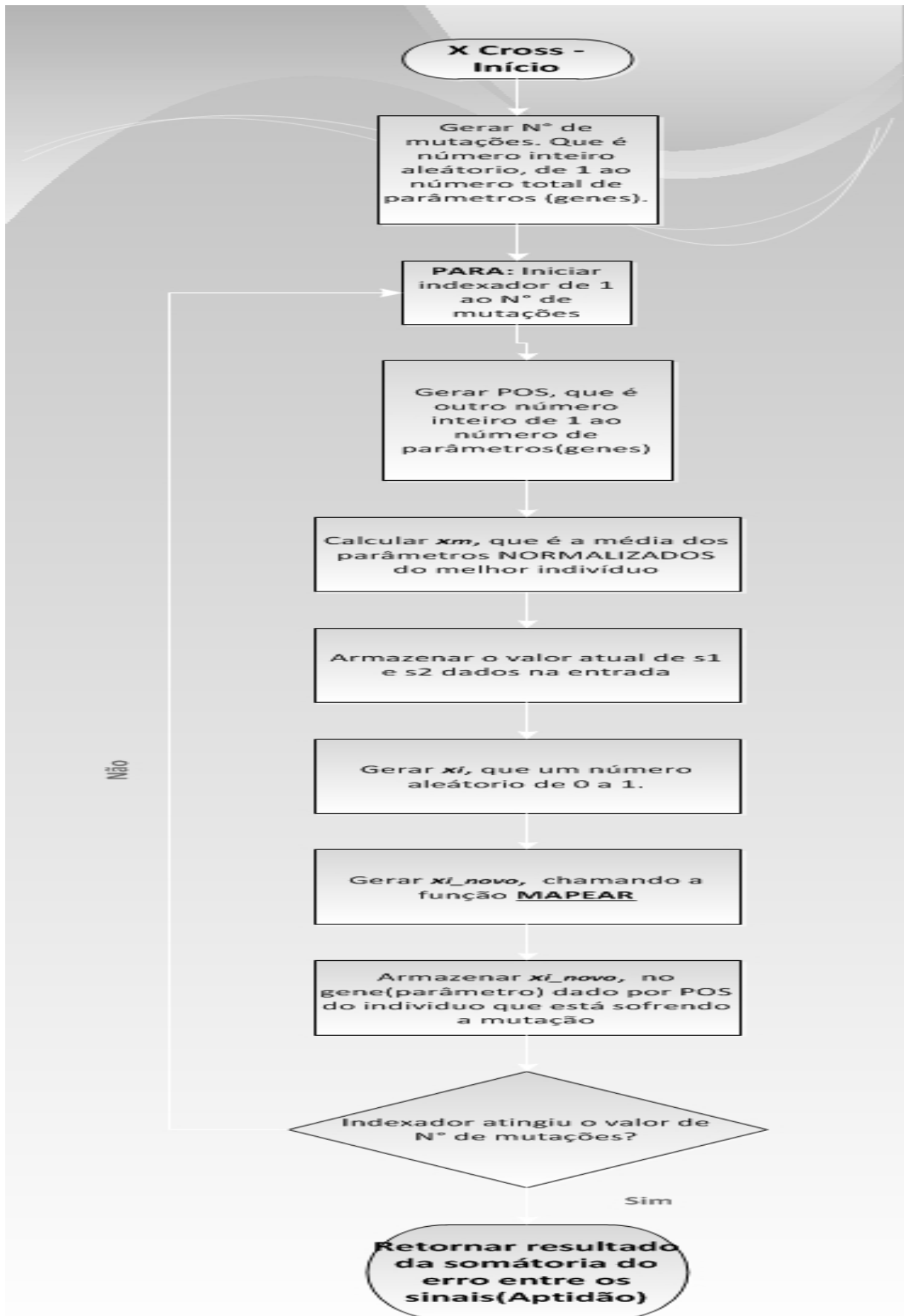
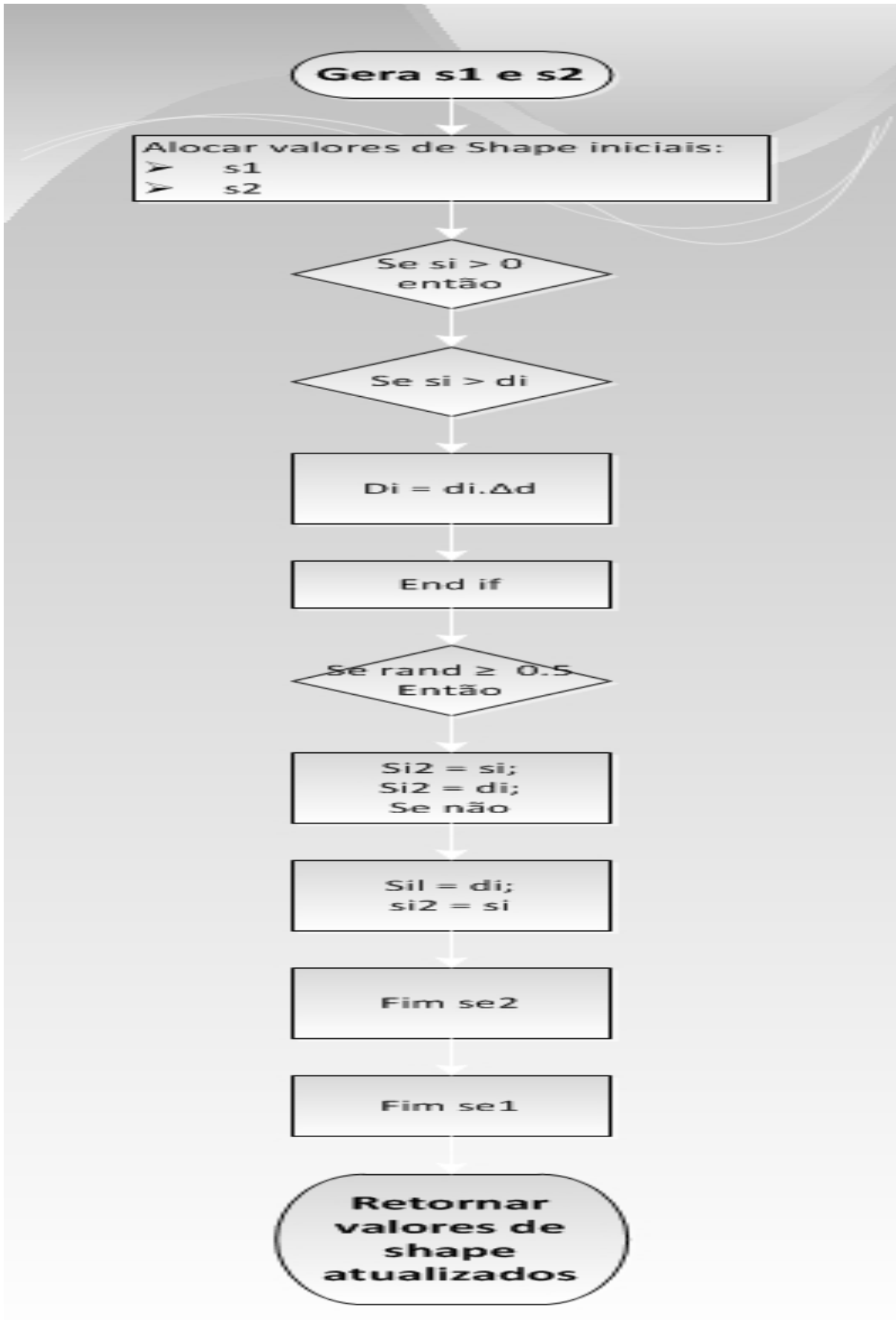


Figura A.7: Processo de Cruzamento(ou "Cross-over")

Figura A.8: Algoritmo para gerar s_1 e s_2

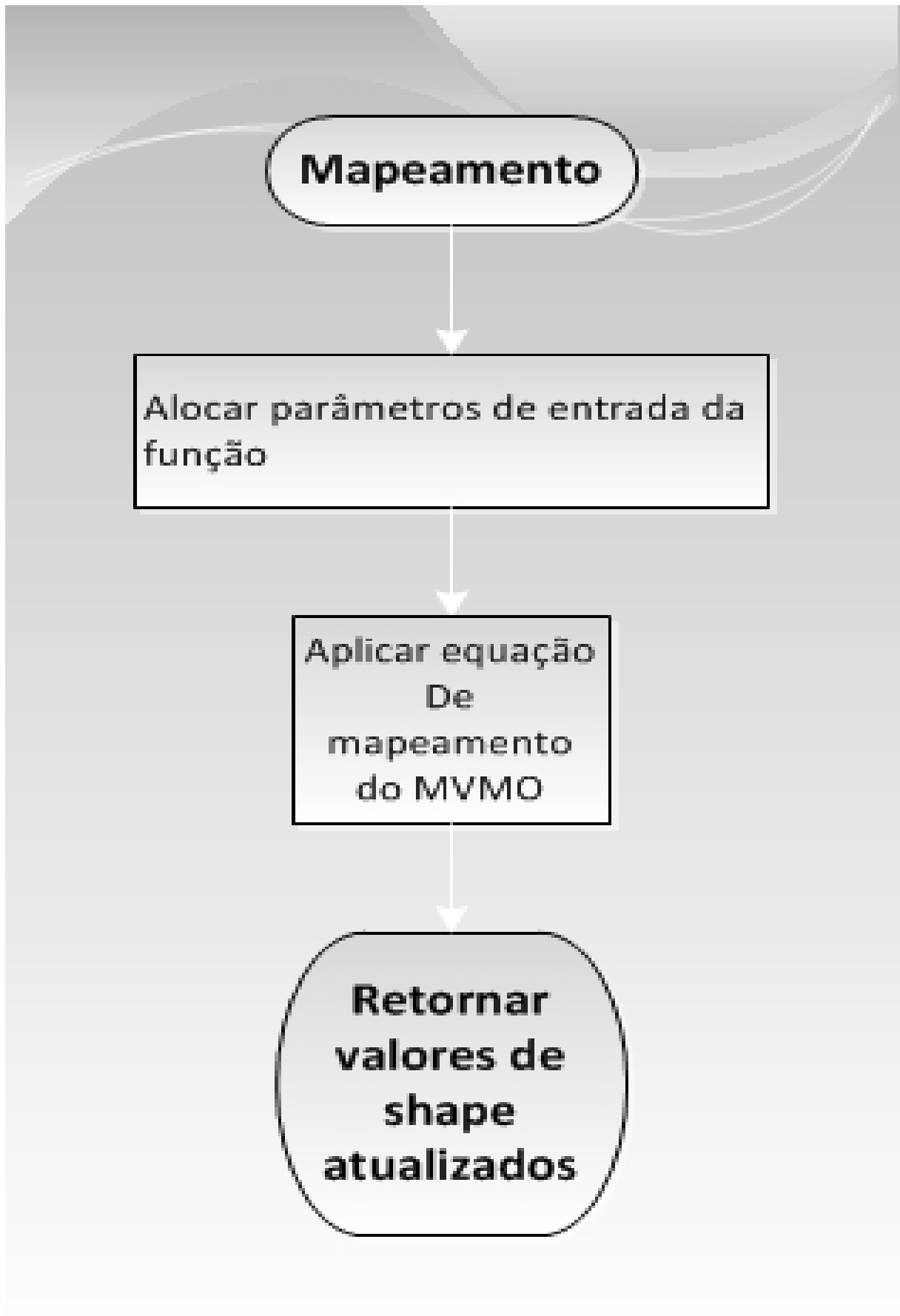


Figura A.9: Função Mapeamento

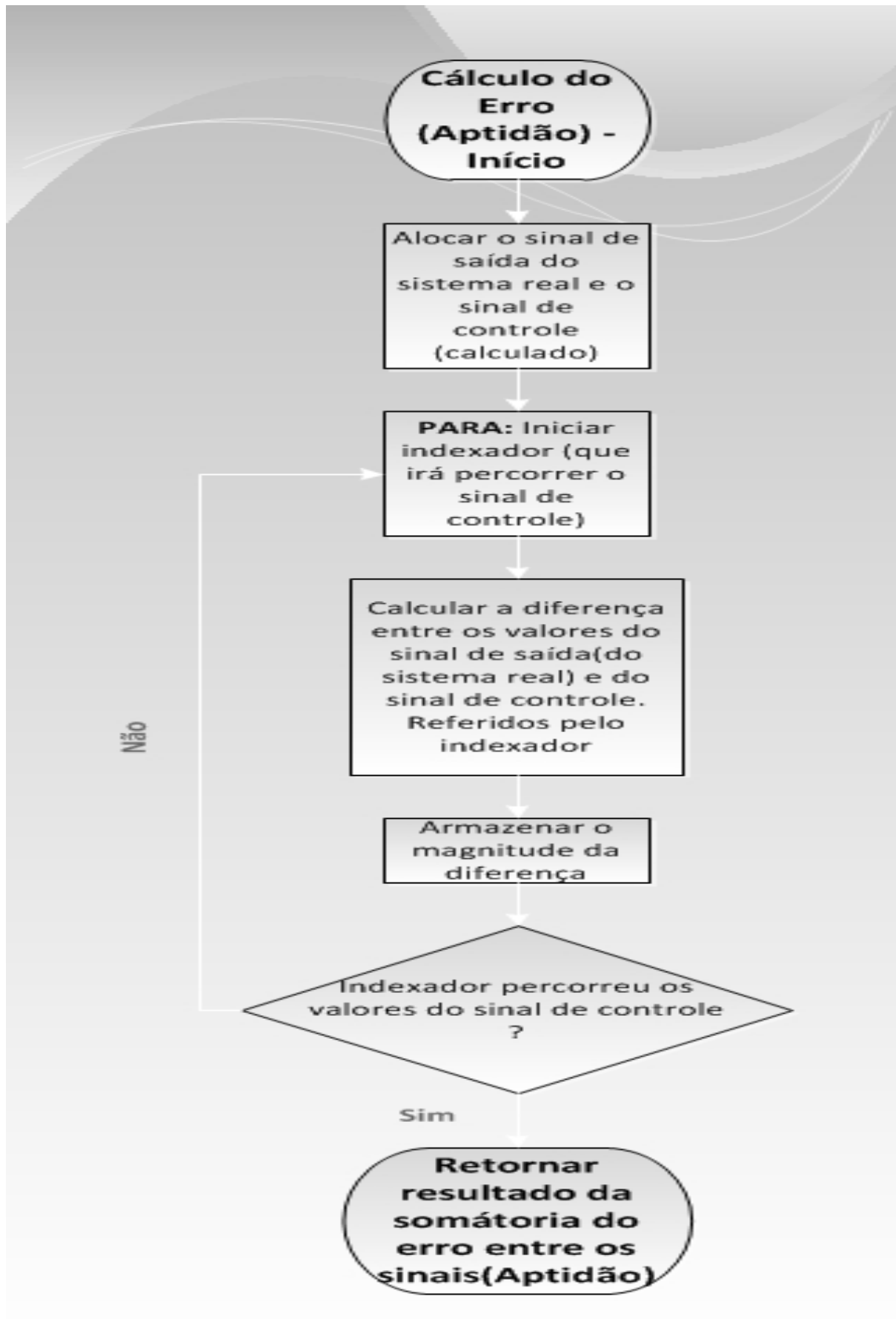


Figura A.10: Função Aptidão

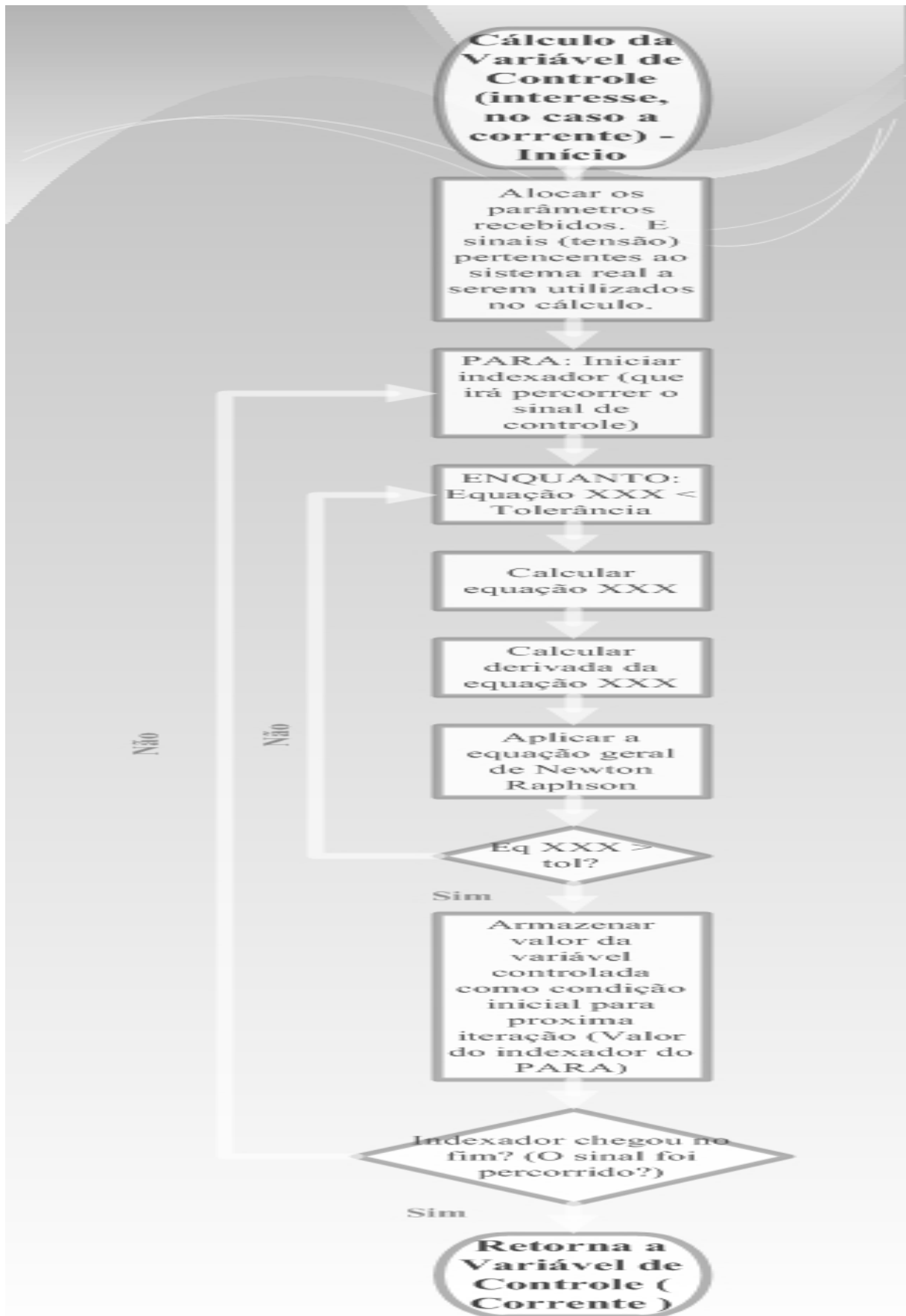


Figura A.11: Cálculo da Corrente, utilizando os parâmetros estimados, aplicando-se o Método de Newton-Raphson

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Resolução normatiza nº482 de 17 de abril de 2012. Aneel D, 2012.
- BANU E.I.VILLALVA. ISTRATE, M. Modeling and simulation of photovoltaic arrays. World Energy System Conference (WESC), 2012.
- CARI, E. P. T. **Metodologia de estimação de parâmetros de sistemas dinâmicos não lineares com aplicação em geradores síncronos**. 2009. Dissertação (Doctor Thesis) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009. Doctor Thesis.
- CHIN, V. J. e. a. Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review. Applied Energy, vol. 154, 2015.
- COLIN, E. C. **Pesquisa Operacional: 170 Aplicações em Estratégia, Finanças, Logística, Produção, Marketing e Vendas**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2007.
- COREN, M. J. **Germany had so much renewable energy on Sunday that it had to pay people to use electricity**. 2016. Quartz.
- EB. Acessado em 2018. [Http://www.energybras.com.br/energia-solar/sistema-energia-solar-grid-tie](http://www.energybras.com.br/energia-solar/sistema-energia-solar-grid-tie). SISTEMA DE ENERGIA SOLAR GRID TIE.
- ERLICH, I. e. a. A novel optimization algorithm for optimal reactive power dispatch: A comparative study. 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011.
- FABRÍCIO. Implementação eficiente de busca em plataforma paralela. In: **XXII Congresso da Sociedade Brasileira de Computaçã**. [S.l.: s.n.], 2002.
- GALDINO, J. T. P. e M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPTEL-CRESESB, 2014.
- GAZOLI, M. G. V. e. J. G. onas R. Energia solar fotovoltaica - introdução. Researchgate, 2013.
- GOW, J.; MANNING, C. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. IEEE Proceedings of Electric Power Applications, Vol. 146, No. 2, pp. 193–200, 1999.
- IEA. **2014 Key World Energy Statistics**. 2014. [Http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf).
- INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2006. PEREIRA, E. B; MARTINS, F.R.; ABREU, S. L. de; RÜTHER, R.
- LOPES, S. M. A. **A Photovoltaic Power Forecasting Method using Artificial Neural Networks**. 2018. Monografia.

M.A.S., S. **DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA UMA CASA DE VAREIO EM POUSO DA CAJAÍBA-PARTY**. 2010. Monografia.

MATHWORKS. Acessado em 2018.

<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pvarray.html>.
PV Array.

ONU. Objetivos do desenvolvimento sustentável. In: **O Futuro que Queremos**. [S.l.: s.n.], 2015.

PS. Acessado em 2018. <https://www.portalsolar.com.br/passos-a-passos-da-fabricacao-do-painel-solar.html>. Passo a Passo da Fabricação do PAINEL Solar.

RUEDA JOSE L. E ERLICH, I. Hybrid mean-variance mapping optimization for solving the IEEE-CEC 2013 competition problems. IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2013.

RUEDA JOSE L. GONZALEZ-LONGATT, F. Application of swarm mean-variance mapping optimization on location and tuning damping controllers. Proceedings of the 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, ISGT ASIA, 2015.

UNDP. **United Nations Development Programme and World Energy Council**. 2000.

<http://www.undp.org/content/dam/aplaws/publication/en/publications/environment-energy/www-ee-library/sustainable-energy/world-energy-assessment-energy-and-the-challenge-of-sustainability/World20Energy20Assessment-2000.pdf>.

VILLALVA, M.; GAZOLI, J.; FILHO. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, 2009.

WERBER, C. **California is getting so much power from solar that wholesale electricity prices are turning negative**. 2017. Quartz.