

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS JOSÉ KLOSS TELES

ALGORITMOS GENÉTICOS PARA DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS

CURITIBA

2018

MATHEUS JOSÉ KLOSS TELES

ALGORITMOS GENÉTICOS PARA O DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, Área de Concentração Eletrotécnica, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki
Coorientadora: Enga. Thaís Marzalek Blasi

CURITIBA

2018

A deus e aos meus familiares, principalmente a minha mãe, pelo apoio, confiança e motivação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Mara Solange Kloss Teles, que a vida inteira se esforçou para me dar a oportunidade de estudar, que sempre me apoiou nos momentos de dificuldade e que sempre será o meu maior exemplo de determinação, dedicação e garra.

Agradeço à minha família, pelo apoio, carinho e confiança sempre prestados.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki e a minha coorientadora Enga. Thaís Marzalek Blasi, pela orientação, paciência e disposição, para me ajudar no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a minha namorada Hellen da Costa Pereira pela paciência e incentivo.

Agradeço também aos meus amigos e colegas de faculdade, pelo apoio, amizade e companheirismo.

RESUMO

Devido ao aumento do uso da geração de energia a partir de sistemas fotovoltaicos, surgiu a necessidade de aprimorar o dimensionamento deste tipo de geração distribuída, buscando o menor fator de sobre dimensionamento possível, e assim tornando estes sistemas mais eficazes e com melhor aproveitamento da energia solar incidente no local de sua instalação. Neste trabalho será apresentada uma abordagem para este problema de otimização utilizando Algoritmos Genéticos, com objetivo de aprimorar o método de dimensionamento, tornando-o automático e buscando combinação ótima entre painéis solares e inversores utilizados no sistema a partir da minimização do fator de sobre dimensionamento, do custo e da área utilizada, e validar a aplicação deste método de otimização no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição da concessionária local. A partir do algoritmo desenvolvido foram realizados testes para três cenários de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, dois situados na cidade de Curitiba com potências requeridas iguais, um com dimensionamento otimizando o sobre dimensionamento do sistema e o outro otimizando o sobre dimensionamento, custo e área requerida pelo gerador fotovoltaico. O terceiro cenário consistiu em dimensionar a um sistema fotovoltaico na cidade de Fortaleza de potência requerida igual à dos primeiros cenários, com o objetivo de observar com a variação do índice de radiação solar interfere no dimensionamento do sistema fotovoltaico. Com este trabalho foi possível verificar que a utilização de algoritmos genéticos para dimensionamento de sistema fotovoltaicos, é uma técnica válida, pois, os resultados obtidos foram satisfatórios aos objetivos propostos nesse trabalho.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico. Dimensionamento. Algoritmos Genéticos.

ABSTRACT

Due to the increase use of power generation from photovoltaic systems, there is a need to improve the dimensioning of this type of distributed generation, seeking the smallest factor of over dimensioning possible and this way making these systems more efficient and with better use of the solar energy incident on the site of the photovoltaic system. This work will present an approach to this optimization problem using Genetic Algorithms, aiming to improve the over sizing factor, making dimensioning automatic and searching optimal combination between solar panels and inverters used in the photovoltaic system, seeking the minimization of the over dimensioning factor, the minimization of the cost and area used for the systems, and validating the application of this method of optimization in the design of photovoltaic systems connected to the distribution network of the local concessionaire. Based on the developed algorithm, three scenarios for the design of photovoltaic systems were studied, two located in the city of Curitiba with equal power requirements, one with optimization of the over dimensioning factor of the system and the other optimizing the over dimensioning factor, cost and area required by the photovoltaic system. The third scenario was to size a photovoltaic system in the city of Fortaleza with the same power as the previous scenarios, the objective of this scenario was to study the impacts in the dimensioning by varying the solar radiation factor. With this work it was possible to verify that the use of genetic algorithms for the optimal design of photovoltaic systems is a valid technique, since the results obtained were satisfactory to the objectives proposed in this work.

Key words: Photovoltaic System. Sizing. Genetic Algorithm.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL).	12
Figura 2 - Programa Brasileiro de Etiquetagem.	15
Figura 3 - Fluxograma básico do funcionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede.	16
Figura 4 - Inversor TRIO-20.0-TL-OUTD da fabricante ABB.	18
Figura 5 - Fluxograma do funcionamento básico de um AG.	29
Figura 6 - Exemplo de cruzamento com um ponto de corte.	32
Figura 7 – Exemplo de cruzamento com dois pontos de corte.	33
Figura 8 - Exemplo de mutação.	33
Figura 9 - Exemplo do banco de dados dos módulos PV criado.	41
Figura 10 - Exemplo do banco de dados dos inversores criado para o desenvolvimento deste trabalho.	42
Figura 11 - Fluxograma do funcionamento da função Main.	43
Figura 12 - Fluxograma do funcionamento da função fitness do problema.	44
Figura 13 - Resultados obtidos em decodificação binária, para o cenário 1.	47
Figura 14 - Resultados obtidos em decodificação binária, para o cenário 2.	49
Figura 15 - Resultados obtidos em decodificação binária, para o cenário 3.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados necessários dos painéis fotovoltaicos	19
Tabela 2 - Dados necessários dos inversores.....	20
Tabela 3 - Terminologia da biologia comparada aos conceitos dos AG.....	28
Tabela 4 - Comparativo dos softwares de dimensionamento de sistemas PV disponíveis no mercado.	39
Tabela 5 - Dados de entrada da função Main, para o cenário 1.....	46
Tabela 6 - Resultados obtidos para o dimensionamento do cenário 1.....	46
Tabela 7 - Dados de entrada da função Main, para o cenário 2.....	48
Tabela 8 - Resultados obtidos para o dimensionamento do cenário 2.....	48
Tabela 9 - Dados de entrada da função Main, para o cenário 3.....	50
Tabela 10 - Resultados obtidos para o dimensionamento do cenário 3.....	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTO	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.3	JUSTIFICATIVA	14
1.4	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	16
2.2	DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	18
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	24
2.4	ALGORITMOS GENÉTICOS	26
2.4.1	CONCEITOS	26
2.4.2	TERMINOLOGIA	27
2.4.3	ESTRUTURA DE UM AG	28
2.4.4	OPERADORES GENÉTICOS	30
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	34
3	REVISÃO DA LITERATURA E TECNOLÓGICA.....	35
3.1	REVISÃO DA LITERATURA	35
3.2	REVISÃO TECNOLÓGICA	36
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	40
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
4.1	MATERIAL	41
4.2	MÉTODOS.....	42
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1	CENÁRIO 1	46
5.2	CENÁRIO 2.....	48

5.3	CENÁRIO 3.....	50
5.4	DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS	52
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	53

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de tornar a geração de energia mais heterogênea, fez com que a busca por fontes de energias renováveis crescesse exponencialmente com o passar dos anos, destacando-se a geração através de sistemas fotovoltaicos (PV).

Um fator importante em relação aos equipamentos de sistemas fotovoltaicos são as certificações dos componentes através do programa de etiquetagem do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) e do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). O serviço promovido por estes órgãos públicos visa a melhoria contínua dos equipamentos utilizados, nesse caso, nos sistemas fotovoltaicos, certificando e garantindo a qualidade dos sistemas, conforme Figura 1.

Figura 1 – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL).



FONTE: PROCEL (2018).

Junto com o crescimento dessa tecnologia surge a necessidade de estudar questões atreladas ao dimensionamento ideal dos sistemas de geração fotovoltaica e ao aumento da complexidade deste tipo de estudo, devido à grande quantidade de fornecedores de painéis, inversores e demais componentes dos sistemas PV. Com essa grande quantidade de fornecedores e equipamentos a tarefa de dimensionar estes sistemas fica mais difícil, pois cada fornecedor possui equipamentos com características distintas, crescendo a quantidade de variáveis necessárias para o dimensionamento ótimo dos sistemas PV, resultando no aumento da complexidade do dimensionamento ótimo desses sistemas.

Atualmente os softwares disponíveis no mercado não possuem a capacidade de dimensionar de maneira ótima e automática os sistemas fotovoltaicos. Por este motivo passa a ser interessante desenvolver uma ferramenta computacional que permita realizar estudos mais precisos sobre o dimensionamento ótimo do sistema e que possibilite a instalação de sistemas melhor dimensionados, trazendo ao consumidor uma possibilidade maior de se obter o máximo do sistema.

1.1 CONTEXTO

A capacidade instalada de geração de energia elétrica, a partir da energia solar, ultrapassou a marca de 1,5 Gigawatts no Brasil em 2018. Ao todo são cerca de 30.039 microgeradores fotovoltaicos instalados no Brasil, somando cerca de R\$ 2,1 bilhões de investimentos no desenvolvimento e instalação dos sistemas fotovoltaicos no país desde 2012. O Brasil já figura no grupo dos 30 países com mais de 1 GW instalado de energia solar, apesar da fonte representar apenas 1% da geração total, mas que poderá chegar a 10% em 2030, segundo estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (ABSOLAR, 2018).

No Brasil uma série de incentivos tem sido aplicada para expandir a geração de energia elétrica através da energia solar, um exemplo é a possibilidade de gerar créditos de energia para compensação na fatura de energia elétrica em unidades consumidoras pertencente ao mesmo proprietário de um sistema PV. Esses créditos são gerados quando a energia injetada na rede da concessionária local é superior ao consumo da unidade consumidora, ou seja, a energia excedente, que é medida pelo relógio bidirecional instalado na medição da unidade consumidora, torna-se créditos, que ficam disponíveis por até 60 meses para que o consumidor, proprietário do sistema, PV possa utilizar (ANEEL, 2012).

Outra forma de incentivo ao uso de sistemas PV com baterias é a tarifa branca, que entrou em vigor a partir de 2018. Com ela o consumidor terá diferentes tarifações de energia de acordo com o horário de consumo de energia. Desta forma quando o consumidor utilizar a energia elétrica fora do horário de ponta ele pagará uma tarifa mais baixa, já pelo consumo no horário de ponta pagará um valor mais alto pela energia. A possibilidade de se utilizar a tarifa branca em conjunto com sistemas PV torna-se interessante quando, além do sistema de geração solar fotovoltaica o consumidor possua um sistema de armazenamento, nesse caso baterias, pois dessa forma o consumidor poderá utilizar a própria energia gerada pelo sistema PV e que foi estocada durante o período de geração para suprir a sua demanda no horário de ponta, fazendo com que ele utilize a energia da concessionária em horários fora de ponta, diminuindo a tarifa do consumidor (ANEEL, 2017).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver um modelo computacional para o dimensionamento ótimo de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição, através da utilização de algoritmos genéticos.

Para o desenvolvimento deste trabalho são incluídos três objetivos específicos apresentados na sequência.

1. Criar um banco de dados com informações de diversos modelos de inversores elétricos e de painéis fotovoltaicos;
2. Desenvolver um modelo de dimensionamento otimizado para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição;
3. Implementar o modelo desenvolvido na ferramenta computacional Matlab;
4. Validar os resultados encontrados com o modelo desenvolvido.

1.3 JUSTIFICATIVA

Destinado a comunidade em geral, contribuindo para o crescimento do uso de fontes de energia renováveis, em especifica a energia solar fotovoltaica. Este trabalho apresenta o diferencial de utilizar algoritmos genéticos para o dimensionamento ótimo de sistemas fotovoltaicos conectados a rede de distribuição, levando em conta o melhor fator de dimensionamento.

Devido à enorme variedade de painéis fotovoltaicos e inversores disponíveis atualmente no mercado, encontrar a combinação ideal de inversor e painéis fotovoltaicos é uma tarefa difícil. Por este motivo muitas vezes sistemas fotovoltaicos são dimensionados de forma errônea, sendo subdimensionados, ou seja, quando a combinação entre painéis e inversor não consegue gerar a potência necessária no sistema que se deseja instalar, ou sobre dimensionados, quando a potência do sistema PV instalado é superior a estimativa de produção de energia, fazendo com que o rendimento do sistema seja baixo.

Atualmente o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE – Figura 2) garante a qualidade e confiabilidade dos módulos e inversores para sistemas fotovoltaicos, possuindo atualmente 857 modelos diferentes de painéis fotovoltaicos homologados (INMETRO, 2017) e 95 modelos de inversores homologados (PBE, 2017).

Figura 2 - Programa Brasileiro de Etiquetagem.



Os softwares para dimensionamento de sistemas PV disponíveis atualmente no mercado não fazem a escolha dos painéis e inversores automaticamente, sendo necessário que o usuário escolha empiricamente os componentes, tornando os sistemas mais suscetíveis a estarem dimensionados de maneira não ótima. Por este motivo o trabalho se torna relevante, uma vez que é proposto nele, um algoritmo que irá selecionar automaticamente, dentre inúmeros inversores e painéis contidos em um banco de dados, a combinação ideal de componentes para o sistema PV, atendendo a demanda de energia solicitada.

1.4 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

Este trabalho está dividido em seis capítulos, o primeiro capítulo é composto pelo propósito do trabalho, onde são apresentados os objetivos e as justificativas para a realização do projeto. O capítulo dois apresenta a fundamentação teórica do trabalho proposto, onde são apresentados conceitos de sistemas fotovoltaicos, dimensionamento de sistemas fotovoltaicos e algoritmos genéticos. O terceiro capítulo é destinado a revisão bibliográfica do trabalho, no qual são apresentados alguns dos artigos mais relevantes ao trabalho nos últimos cinco anos. O capítulo quatro é destinado a explicação dos materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho. O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos com o projeto proposto no trabalho e o último capítulo apresenta as conclusões obtidas com a realização do projeto e também as sugestões para futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

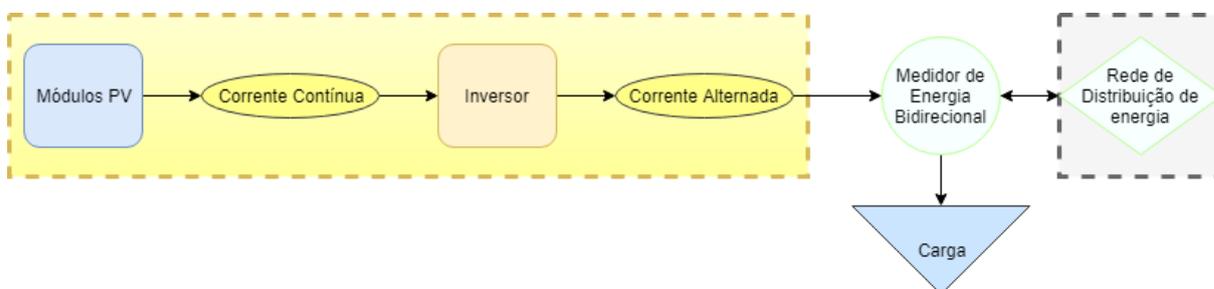
2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Devido a crescente e continua demanda mundial por energia elétrica, a necessidade de buscar fontes alternativas para a geração de energia, juntamente com o aumento da preocupação com os impactos gerados no momento da obtenção de recursos energéticos necessários para a geração de energia elétrica, se tornou uma das maiores preocupações do ser humano nas últimas décadas.

Diferentemente da energia proveniente de recursos fósseis, como carvão mineral e petróleo, ainda principais matrizes energéticas utilizadas no planeta. As fontes de energia consideradas renováveis e limpas não trazem grandes prejuízos ao meio ambiente durante o processo de obtenção de energia elétrica a partir delas, pois a exemplo da geração de energia a partir de sistemas fotovoltaicos, não há a emissão de gases poluentes durante o processo de obtenção de energia.

Uma das fontes de energia renovável com menor impacto ambiental atualmente é a energia solar, uma vez que não gera gases poluentes ao meio ambiente durante a geração de energia, não contribuindo diretamente para a destruição da camada de ozônio e conseqüentemente não agravando o problema do aquecimento global. Dentre as possíveis fontes de energia solar, destacam-se os sistemas fotovoltaicos compostos basicamente por um conjunto de painéis fotovoltaicos e inversores, a topologia e o funcionamento básico de um sistema fotovoltaico pode ser observado no fluxograma apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma básico do funcionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede.



FONTE: O AUTOR (2018).

Os painéis fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas responsáveis pela conversão da energia solar em elétrica, através do efeito fotovoltaico. As células são constituídas por materiais semicondutores dopados, tanto positivamente quanto

negativamente, conhecidos como semicondutor tipo-p e semicondutor tipo-n respectivamente, que são dispostos em camadas, formando junções p-n, caracterizando a fotocélula. Geralmente o semicondutor utilizado para a fabricação destas células é o silício (CERESB, 2014).

O efeito fotovoltaico funciona da seguinte forma: quando a luz solar, que possui uma enorme quantidade de fótons carregados com diversas quantidades de energias distintas e com diferentes comprimentos de onda, atinge a fotocélula, esta é capaz de absorver alguns destes fótons provenientes da luz enviada pelo sol. A absorção de energia permite que os elétrons presentes no semicondutor dopado negativamente se liberem dos átomos, tornando-se móveis, e o espaço que ficou livre no átomo é preenchido com um elétron da camada inferior do semicondutor.

Consequentemente como um dos lados da célula ficara com a quantidade de elétrons maior que no outro lado, origina-se uma diferença de potencial entre os dois lados. Ao se conectar os dois lados através de um condutor elétrico faz com que haja o surgimento de uma corrente elétrica, caracterizando-se assim o efeito fotoelétrico. Combinando as fotocélulas em painéis fotovoltaicos faz com que seja possível fazer com que a corrente e a tensão geradas por uma célula fotovoltaica sejam multiplicadas, para que possam atingir níveis em que poderão ser utilizadas em diversas aplicações (CERESB, 2014).

Uma vez combinadas em sequências em série ou paralelo as fotocélulas constituirão os painéis fotovoltaicos, que também poderão ser combinados em série e paralelos. Quando combinados em série as tensões elétricas geradas pelos painéis combinados se somam, se combinados em paralelo as correntes elétricas geradas pelos painéis serão somadas. Dependendo da necessidade da aplicação dos painéis pode-se combiná-los de forma a se obter a tensão e corrente desejadas na aplicação.

Outro componente necessário nos sistemas fotovoltaicos são os inversores (Figura 4), sendo estes responsáveis pela conversão da energia gerada pelos painéis em corrente contínua em energia em corrente alternada para que possa ser utilizada em diversos equipamentos e aplicações no dia-a-dia.

Figura 4 - Inversor TRIO-20.0-TL-OUTD da fabricante ABB.



FONTE: ABB (2017).

A energia obtida através deste tipo de sistema pode ser armazenada em baterias, tanto para sistema não conectados à rede de distribuição (*grid-off*), quanto para sistemas com baterias conectados à rede de distribuição (*grid-tie*). Esta energia gerada também pode ser injetada diretamente na rede de distribuição da concessionária de energia local, sendo esses sistemas *grid-tie*. Para conectar o sistema fotovoltaico a rede de distribuição de energia da concessionaria local é necessária a troca do medidor comum, unidirecional, de energia na entrada da residência por um medidor bidirecional, capaz de fazer a leitura do quando de energia é fornecida à rede da concessionária pelo sistema fotovoltaicos e também é capaz de medir a quantidade de energia proveniente da concessionária, consumida pela residência que possui o sistema fotovoltaico em horários em que a geração solar não existe ou é insuficiente para atender a demandada (CERESB, 2014).

2.2 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A tarefa de dimensionar sistemas fotovoltaicos com uma boa precisão nos componentes é algo muito difícil, devido a uma enorme quantidade e diversidade de painéis e inversores disponíveis no mercado.

De acordo com (SULAIMAN, 2011) a técnica do dimensionamento de sistemas fotovoltaicos ou também chamados de sistemas PV, deve seguir uma série

de passos, para conhecer a energia total esperada do sistema ao fim do dimensionamento. Para o autor o dimensionamento começa a partir do conhecimento da quantidade de energia anual desejada do sistema, que deve ser informado pelo dono do sistema PV.

O dimensionamento é baseado na expectativa anual de produção energia em kWh, os parâmetros de irradiação anual e de temperatura de acordo com a região que o sistema PV será instalado, para que possa ser feita a estimativa de produção energética anual do sistema. Algumas perdas energéticas do sistema PV, como perdas através de sujeiras, tolerância de fabricação do modulo, eficiência do inversor e perdas nos cabos de energia do sistema, são consideradas na proposta de dimensionamento do autor.

Ainda segundo Sulaiman (2011) o primeiro passo no dimensionamento do sistema PV é elencar as principais características e parâmetros destes componentes, conforme apresentado na tabela 1, que apresenta as características dos painéis solares, necessárias para o dimensionamento do sistema.

Tabela 1 - Dados necessários dos painéis fotovoltaicos

Especificação	Unidade
Potência máxima, P_{mp_stc}	Wp
Tensão na potência máxima, V_{mp_stc}	V
Tensão em circuito aberto, V_{oc_stc}	V
Corrente de curto circuito, I_{sc_stc}	A
Coeficiente de temperatura para a potência máxima, γ_{Pmp}	%/°C
Coeficiente de temperatura para tensão de potência máxima, γ_{Vmp}	%/°C
Coeficiente de temperatura para a tensão de circuito aberto, γ_{Voc}	%/°C
Fator de redução devido a tolerância de potência de saída, f_{mm}	decimais
Tensão máxima do sistema, V_{sys_max}	V

FONTE: SULAIMAN (2011).

Já a tabela 2 apresenta os dados necessários dos inversores para o dimensionamento ótimo do sistema PV.

Tabela 2 - Dados necessários dos inversores

Especificação	Unidade
Potencia nominal de saída, P_{inv}	W
Tensão nominal de entrada, V_{max_inv}	V
Intervalo máximo de tensão de entrada, $V_{max_win_inv}$	V
Intervalo mínimo de tensão de entrada, $V_{min_win_inv}$	V
Máxima corrente de entrada, V_{mp_stc}	A
Máxima eficiência, V_{mp_stc}	%

FONTE: SULAIMAN (2011)

Ao determinar estas especificações através dos manuais dos componentes fornecidos pelos fabricantes, torna-se possível o cálculo da capacidade de geração do sistema fotovoltaico proposto ($P_{array_{stc_{est}}}$), através da equação 1.

$$P_{array_{stc_{est}}} = \frac{E_{sys_req}}{f_{temp} \times f_{mm} \times H_{tilt} \times \eta_{DC_cable} \times \eta_{inv}} \quad (1)$$

Onde:

E_{sys_req} , corresponde a energia requerida do sistema no período de um ano, em kWh;

H_{tilt} , corresponde ao quantitativo de radiação anual, recebida na localidade em que o sistema irá ser instalado. De acordo com Boxwell (2017), para o Brasil adota-se o valor médio igual a 1.549,71 [kWh/m² ano];

η_{DC_cable} , é a eficiência do cabo DC a ser utilizado no sistema PV, nesse caso adota-se o valor de 95%;

f_{temp} , é o fator de redução na saída do painel fotovoltaico em relação a temperatura, calculado pela equação 2:

$$f_{temp} = 1 - [\gamma_{Pmp} \times (T_{cell_avg} - T_{stc})] \quad (2)$$

Sendo T_{stc} a temperatura dos painéis nas condições padrões de temperatura (STC - *Standard Temperature Conditions*), definida em 25°C.

T_{cell_avg} corresponde a temperatura efetiva de cada célula, sendo calculada pela equação 3.

$$T_{cell_avg} = T_{amb_avg} + T_{stc} \quad (3)$$

Onde T_{amb_avg} corresponde a temperatura média diária do local onde o sistema PV será instalado, sendo definida em 35°C no trabalho proposto por (SULAIMAN, 2011).

As faixas de limites de tensão no inversor podem ser calculadas conforme apresentado nas equações 4, 5 e 6.

$$V_{max_inv_rev} = 0,95xV_{max_inv} \quad (4)$$

$$V_{max_win_inv_rev} = 0,95xV_{max_win_inv} \quad (5)$$

$$V_{min_win_inv_rev} = 1,1xV_{min_win_inv} \quad (6)$$

Onde:

$V_{max_inv_rev}$ é a tensão máxima revisada do controle de tensão do inversor

$V_{max_win_inv_rev}$ é o limite máximo da faixa de tensão revisada do controle de tensão do inversor

$V_{min_win_inv_rev}$ é o limite mínimo da faixa de tensão revisada do controle de tensão do inversor

Com os parâmetros até então calculados, é possível determinar a tensão de saída que esperasse obter do conjunto de painéis fotovoltaicos, através da expressão a 6, onde T_{cell_min} corresponde ao valor mínimo da temperatura efetiva nas células, sendo atribuída em 20°C.

$$V_{max_oc} = V_{oc_stc}x(1 - [\gamma_{Voc}x(T_{cell_min} - T_{stc})]) \quad (7)$$

Onde T_{cell_min} é a temperatura mínima de tensão do sistema, adotando-se o valor de 20°C.

$$V_{max_mp} = V_{mp_stc}x(1 - [\gamma_{Vmp}x(T_{cell_min} - T_{stc})]) \quad (8)$$

$$V_{\min_mp} = V_{mp_stc} \times (1 - [\gamma_{Vmp} \times (T_{cell_max} - T_{stc})]) \quad (9)$$

É possível calcular também a tensão que o módulo apresentará quando estiver operando nesta temperatura, através da equação 10, onde a redução de 5% refere-se as perdas pela corrente contínua através do efeito Joule, existentes nos cabos utilizados no sistema.

$$V_{\min_m_vd} = 0,95 \times V_{\min_vd} \quad (10)$$

O próximo passo para o dimensionamento do sistema consiste em determinar a quantidade de módulos em série e a quantidade de módulos em paralelo, respeitando os limites de tensão e corrente do sistema.

A quantidade máxima de módulos pode ser calculada baseando-se na tensão de circuito aberto do painel fotovoltaico ou na tensão no ponto máximo de potência (Mpp - maximum power point), através das equações 11 e 12 apresentadas abaixo respectivamente.

$$N_{s,max_oc} = \frac{V_{\max_inv_rev}}{V_{\max_oc}} \quad (11)$$

$$N_{s,max_mp} = \frac{V_{\max_win_inv_rev}}{V_{\max_mp}} \quad (12)$$

Para que ambos valores obtidos não excedam os limites de tensão e corrente do inversor, os mesmos devem ser arredondados para baixo. É possível também calcular a quantidade mínima de painéis em série de cada sequência de módulos, através da equação 13.

$$N_{s,min} = \frac{V_{\max_win_inv_rev}}{V_{\min_mp_vd}} \quad (13)$$

Onde:

$N_{s,\min}$ é o número mínimo de módulos PV em série, seu valor deve ser arredondado para cima, pois não é possível utilizar frações de painéis fotovoltaicos.

Já o número máximo de conjuntos em paralelo (N_{tot_est}) pode ser determinado por meio da equação 14.

$$N_{tot_est} = \frac{P_{array_stc_est}}{P_{mp_stc}} \quad (14)$$

Para o cálculo do número total de módulos PV (N_{tot_est}), pode ser determinado pela equação 15.

$$N_{tot_est} = \frac{P_{array_stc_est}}{P_{mp_stc}} \quad (15)$$

A partir dos valores de $N_{s,\min}$, $N_{s,\max}$ e $N_{p,\max}$ são geradas todas as combinações de painéis fotovoltaicos e é determinada a quantidade total de módulos PV (N_{tot_poss}) para cada configuração possível, multiplicando o número de painéis fotovoltaicos em série pela quantidade em paralelo. Se alguma das configurações encontradas tiver o seu valor de N_{tot_poss} menor que N_{tot_est} , esta configuração deve ser descartada, Para cada uma das configurações restantes deve se determinar a máxima tensão (V_{\max_array}) e corrente (I_{\max_array}) conforme as equações 16 e 17 respectivamente.

$$V_{\max_array} = V_{\max_oc} \times N_{s_poss} \quad (16)$$

$$I_{\max_array} = I_{sc_stc} \times N_{p_poss} \quad (17)$$

Se o valor obtido para a tensão máxima da configuração for superior a tensão máxima do sistema (V_{\max_oc}) ou se a corrente máxima da configuração obtida for superior a corrente máxima aceita pelo inversor, os arranjos de painéis que tiverem estas características deverão ser descartados, pois elas superam os parâmetros dos inversores do sistema PV.

Com as configurações já determinadas e com demais arranjos que não se enquadram nos parâmetros predefinidos excluídos, é possível calcular a capacidade

de geração de cada sistema remanescentes ($P_{array_stc_act}$), assim como o fator de dimensionamento ($SF_{inv_pv_act}$) entre os painéis e inversor, a produção anual energia estimada para o sistema (E_{sys_exp}), e também é possível calcular o fator de sobre dimensionamento do sistema (EF) através das equações 18, 19, 20 e 21 respectivamente.

$$P_{array_stc_act} = N_{tot_poss} \times P_{mp_stc} \quad (18)$$

$$SF_{inv_pv_act} = \frac{P_{inv}}{P_{array_stc_act}} \quad (19)$$

$$E_{sys_exp} = P_{array_stc_act} \times H_{tilt} \times f_{mm} \times f_{temp} \times f_{dirt} \times \eta_{pv_inv} \times \eta_{inv} \quad (20)$$

$$EF = \frac{E_{sys_exp}}{E_{sys_req}} \quad (21)$$

A configuração que possuir o menor fator de sobre dimensionamento (EF) deve ser a selecionada como melhor solução de sistema PV (SULAIMAN, 2011).

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados conceitos básicos de sistemas PV conectados à rede de distribuição, dentre estes conceitos foi apresentado o funcionamento básico dos painéis fotovoltaicos e inversores. Foram definidos os processos de dimensionamento ótimo proposto por SULAIMAN et al., (2011), que serão utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

Como apresentado o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos envolve a determinação de quais equipamentos serão utilizados conforme:

- 1) Escolha de um modelo de painel fotovoltaico;
- 2) Escolha de um modelo de inversor;
- 3) Determinação do arranjo de painéis fotovoltaicos de acordo com a energia anual requerida e com os limites operacionais do inversor.

Uma vez que existem no mercado centenas de modelos de equipamentos para esta finalidade há a necessidade de avaliação das diversas opções para se obter um projeto otimizado para uma determinada planta. Para isso, existem diversas abordagens científicas, dentre as quais se destacam as técnicas meta-heurísticas, como por exemplo, os Algoritmos Genéticos.

2.4 ALGORITMOS GENÉTICOS

2.4.1 CONCEITOS

As técnicas tradicionais de otimização e busca, utilizam geralmente métodos determinísticos para a resolução do problema, iniciando a resolução do problema com apenas um candidato que é manipulado através destes métodos até ser encontrada a solução do problema (WINSTON, 1992).

Já as técnicas de computação evolucionária, conseguem operar com uma população de candidatos ao mesmo tempo, conseguindo desta forma operar em um espaço de soluções, alocando um conjunto de soluções adequadas para o conjunto de variáveis analisado. Logo estas técnicas tem uma probabilidade de atingir resultados mais promissores e de forma mais rápida para o problema em que são aplicadas.

Os Algoritmos Genéticos - AG podem ser considerados como as principais técnicas de Computação Evolucionária, assim como outros processos estocásticos também podem ser considerados técnicas de Computação Evolucionária, como por exemplo as Estratégias Evolucionárias e a Programação Genética. Os AG surgiram a partir dos trabalhos pioneiros de John Holland (HOLLAND, 1975), eles foram inspirados na teoria de Seleção Natural. Eles atuam com o mesmo princípio da teoria de Charles Darwin, onde os indivíduos mais aptos têm maior chance de sobrevivência e de produzirem indivíduos mais aptos também. Os AG buscam sempre trabalhar nas áreas mais promissoras do espaço de busca (HAUP e HAUP, 1998; GALVÃO e VALENÇA, 1999). Estes algoritmos são uma classe de procedimentos com um conjunto de passos distintos e bem especificados, na qual cada um dos passos possui várias variações possíveis.

Cada indivíduo da população onde deseja-se aplicar os AG é chamado de cromossomo e corresponde a uma possível solução para o problema. A partir da aplicação de um processo de reprodução na população, baseado no processo evolutivo, tem como objetivo a exploração do espaço de busca e determinação das melhores soluções possíveis para o problema analisado (RABELO e OCHI, 1996).

Dentro do espaço de busca dos AG, são consideradas todas as possibilidades de solução de um determinado problema, e a função de avaliação, ou função de custo,

que é uma maneira de avaliar as soluções no espaço de busca. Existem muitos métodos de busca e funções de avaliação (GOLDBERG, 1997).

Ao contrário dos métodos tradicionais de busca e otimização, os AG diferem nas seguintes formas (GOLDBERG, 1997; REZENDE, 2003):

- Utilizam um sistema de codificação de parâmetros e não os parâmetros em si;
- Trabalham com um espaço de busca, onde estão todas as possibilidades de solução do problema, ao invés de trabalhar com apenas uma solução por vez;
- Utilizam informação de custo ou recompensa e derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- Trabalham com regras de transição probabilísticas e não determinísticas;

Quando se trata de busca por soluções ótimas os AG mostram-se muito eficientes, pois eles baseiam-se na evolução biológica e são capazes de identificar e explorar fatores que ambientais e convergir para soluções ótimas globais, contornando soluções ótimas locais. Os AG seguem uma estratégia de gerar e testar soluções capazes de identificar e explorar os aspectos do ambiente onde o problema está inserido e desta forma convergir de forma global para soluções aproximadamente ótimas ou ótimas.

Como se baseiam em teorias evolucionárias, os AG são técnicas extremamente interessantes em problemas de busca e otimização, pois são capazes de identificar e explorar fatores ambientais e convergir para soluções ótimas em níveis globais, contornando a ocorrência de ótimos locais. Além de seguir uma estratégia de gerar e testar soluções muito elegantes são capazes de identificar e explorar aspectos do ambiente onde o problema está inserido e convergir globalmente para soluções ótimas ou aproximadamente ótimas (HOLLAND, 1975; GOLDBERG, 1997).

2.4.2 TERMINOLOGIA

Assim como ocorre na natureza, pode se dizer que o ambiente é o responsável pela seleção de cada geração de indivíduos na natureza, desta forma somente os mais aptos são capazes de passar suas características para as gerações subsequentes, indivíduos menos aptos tendem a ser eliminados, desaparecendo da

população. A variabilidade de indivíduos na população é resultado da aplicação dos operadores genéticos de mutação e cruzamento, sobre o material genético armazenado nos cromossomos dos indivíduos da população, durante o processo de reprodução. Portanto a sobrevivência do mais apto é determinada através da seleção natural.

Os AG sofrem influência da biologia, em suas definições, isso explica muitos termos semelhantes, utilizados por estes métodos (GALVÃO e VALENÇA, 1999).

A Tabela 3 apresenta uma comparação entre a terminologia da biologia em comparação com conceitos utilizados na computação evolucionária, especificamente voltada aos AG.

Tabela 3 - Terminologia da biologia comparada aos conceitos dos AG.

Terminologia	Conceito aplicado nos AG
Cromossomo	Representa a estrutura de dados que codifica uma solução para um problema.
Gene	Parâmetro codificado no cromossomo, ou seja, um elemento do vetor que representa o indivíduo.
População	Conjunto de soluções (indivíduos) no espaço de busca.
Indivíduo	Solução no espaço de busca.
Genótipo	Informação contida em uma solução.
Fenótipo	É a decodificação do indivíduo, especificado por um genótipo, formando um objeto, estrutura ou organismo.
Geração	Iteração completa do AG que produz uma nova população.

FONTE: O AUTOR (2018).

2.4.3 ESTRUTURA DE UM AG

Para os problemas de otimização sempre existe um objetivo a ser alcançado (ou vários, no caso de otimizadores com múltiplos objetivos), que é representado por uma função objetivo ou FO. A avaliação desta função permite calcular a aptidão de cada indivíduo.

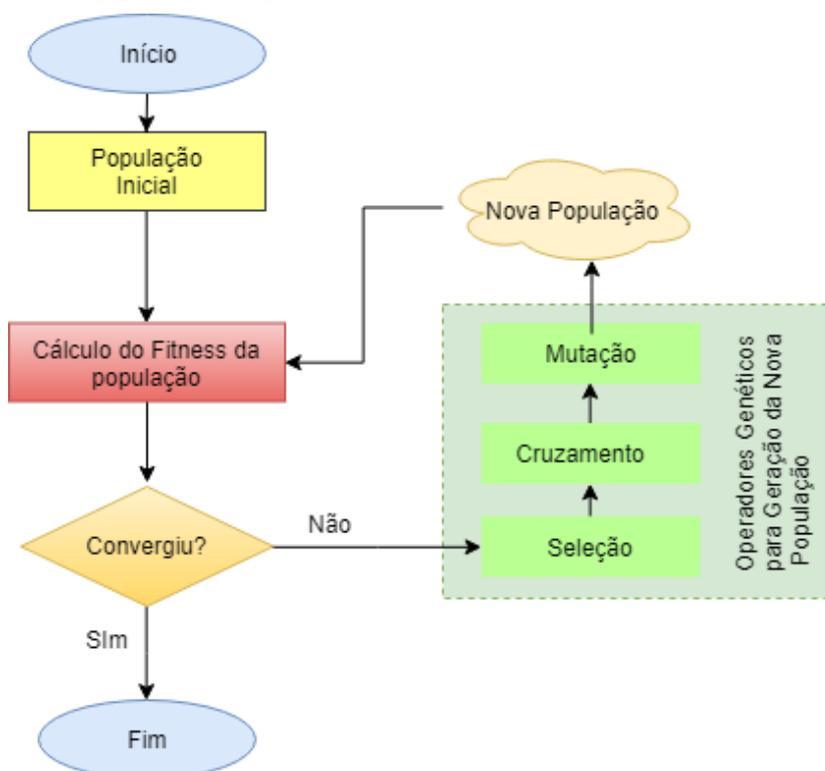
Os AG procuram melhorar a população, ou seja, buscam os indivíduos de melhor aptidão, seja para uma FO de maximização ou minimização, e se utilizam de diversas etapas e operadores genéticos conforme o fluxograma básico apresentado na Figura 5.

De acordo com o fluxograma, observa-se que os AG se baseiam inicialmente na criação de uma população inicial, gerada aleatoriamente ou de forma dirigida empregando alguma heurística especialmente desenvolvida para o problema em questão, composta por indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções do problema.

Durante o processo evolutivo esta população é avaliada: para cada indivíduo é dado um índice através do cálculo do fitness, refletindo, desta forma, sua habilidade de adaptação a determinado ambiente. Uma porcentagem dos mais adaptados é mantida, enquanto os outros são descartados. Os membros mantidos pela seleção podem sofrer modificações em suas características, através de recombinação e mutações, gerando descendentes para a próxima geração, a qual representa uma melhor aproximação da solução do problema de otimização que a população anterior.

Este processo, chamado de reprodução, é repetido até que um conjunto de condições satisfatórias, dado normalmente pela aptidão do melhor indivíduo em conjunto com a limitação do número de gerações ou tempo de simulação ou uma tolerância de erro admissível seja encontrado, caracterizando a convergência para uma solução satisfatória (GOLDBERG, 1997; COELHO, 2003).

Figura 5 - Fluxograma do funcionamento básico de um AG.



FONTE: O AUTOR (2018).

2.4.4 OPERADORES GENÉTICOS

A busca pela melhor solução o problema através dos AG, dentro de uma população, se dá através de operadores genéticos, que transformam a população através de sucessivas gerações. Buscando melhorar a aptidão ou fitness dos indivíduos da população, através dos operadores genéticos a população é diversificada e capaz de manter as características de aptidão da geração anterior. Dentre os operadores genéticos, principais utilizados pelos AG são: seleção, cruzamento e mutação.

2.4.4.1 SELEÇÃO

Os AG simples atuam com um número fixo de indivíduos na população ao longo das gerações, desta forma a cada geração devem ser selecionados indivíduos que possuirão cópias e quais tendem a desaparecer. Por este motivo são necessários os operadores de seleção, eles atuam no processo de escolher quais serão os indivíduos que se propagarão na população dos AG.

A seleção pode ocorrer de maneira probabilística de indivíduos de uma população tendo como base as suas aptidões e, da mesma forma que ocorre no processo de seleção natural, os indivíduos mais qualificados ou aptos, de acordo como a FO, têm mais chances de serem selecionados.

O processo de seleção tende a privilegiar os indivíduos mais aptos no processo de seleção, a cada membro da população é atribuído um valor absoluto dado por uma função denominada função de aptidão. Esta função recebe como entrada os valores do gene do indivíduo e fornece como resultado sua aptidão. A aptidão pode ser vista como uma nota que mede o quão boa é a solução codificada por um indivíduo e é baseada no valor da FO, que é específica para cada problema.

Geralmente as notas atribuídas aos indivíduos devem ser menores que 1, e a soma de todos os valores das notas de aptidão de todos os indivíduos deve ser igual a 1, todos os indivíduos também recebem uma nota de aptidão relativa, que é calculada através da divisão do valor da nota do indivíduo pela soma das notas de todos os indivíduos.

No processo de seleção, após associada uma nota de aptidão a cada indivíduo da população, escolhe-se então um subconjunto de indivíduos da população

atual, gerando uma população intermediária. Vários métodos de seleção têm sido propostos, entre eles se destacam tradicionalmente: Método da Roleta e Método do Torneio (REZENDE, 2003; COELHO, 2003).

a) ROLETA

Para o método de seleção de Roleta é necessário conhecer o valor da aptidão relativa de cada indivíduo da população, pois a probabilidade do indivíduo ser selecionado é proporcional ao valor de sua aptidão relativa. O processo de Roleta consiste em um sorteio aleatório, na qual os setores da Roleta seriam proporcionais ao valor de suas aptidões.

A Roleta então é girada quantas vezes foram necessárias para se obter o número requerido de indivíduos para realizar os processos de cruzamento e mutação. Desta forma os indivíduos com maior aptidão têm maiores chances de serem propagados.

b) TORNEIO

O método de seleção de torneio consiste em selecionar vários indivíduos da população e comparar as suas aptidões respectivas, os indivíduos com maiores aptidões são selecionados para fazer parte da próxima população. Os indivíduos que possuem a maior aptidão relativa são os “vencedores” dos torneios e fazem parte da próxima geração.

Este método oferece a vantagem de não exigir que a comparação seja feita entre todos os indivíduos da população e possui a vantagem da não-geração de super-indivíduos, pois a chance do indivíduo com maior grau de aptidão ser selecionado para um torneio é a mesma de um indivíduo de menor grau, independentemente de seu grau de aptidão ser alto.

2.4.4.2 CRUZAMENTO

O principal objetivo do operador de cruzamento é fazer com que a população seja alterada através de sucessivas gerações, criando novas possíveis soluções no

espaço de busca. Com os operadores de cruzamento a população consegue manter as características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores.

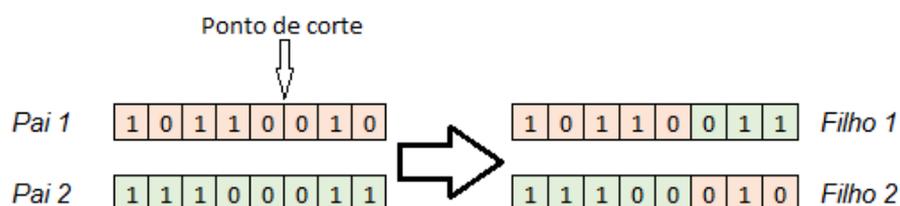
O processo de cruzamento ocorre da seguinte forma, são selecionados, aleatoriamente, durante a fase de reprodução pares de indivíduos que serão cruzados para formar descendentes que constituirão a geração seguinte. Ao selecionar esses indivíduos, os cromossomos deles são mesclados e combinados.

O cruzamento é considerado o operador genético predominante, ou seja, por este motivo ele é aplicado a uma taxa de probabilidade entre 70 e 100% (ÁVILA, 2002). Também é o operador responsável pela recombinação de características dos pais durante o processo reprodutivo, permitindo que as próximas gerações herdem dos pais suas características. Os tipos de cruzamentos mais tradicionais são apresentados a seguir.

a) CRUZAMENTO COM 1 PONTO DE CORTE

Para este tipo de cruzamento seleciona-se um ponto de corte aleatório para o par de cromossomos. A partir desse ponto realiza-se a troca de material cromossômico entre os indivíduos selecionados. Desta forma dois novos indivíduos são gerados na população, cada um carregando parte do material cromossômico de cada um dos pais. Mesmo gerando indivíduos novos na população totalmente diferentes dos indivíduos selecionados para o cruzamento, os novos ainda possuem características em comum com os seus antecessores, conforme pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Exemplo de cruzamento com um ponto de corte.



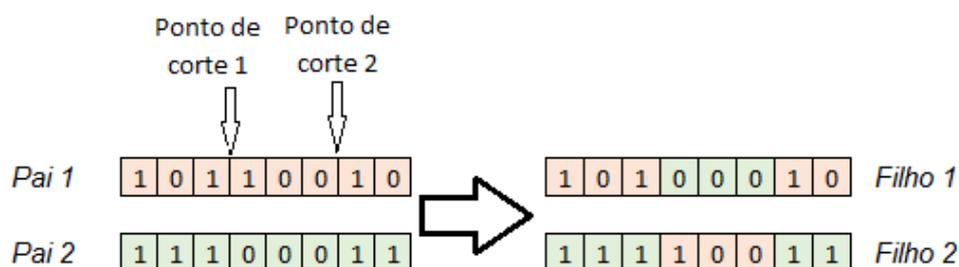
FONTE: O AUTOR (2018).

b) CRUZAMENTO COM DOIS PONTOS DE CORTE

Semelhante ao cruzamento com 1 ponto de corte, para este tipo de cruzamento são escolhidos aleatoriamente dois pontos de corte. Onde serão trocados

os materiais cromossômicos entre os indivíduos do par selecionado, gerando dos novos indivíduos totalmente diferentes aos anteriores.

Figura 7 – Exemplo de cruzamento com dois pontos de corte.



FONTE: O AUTOR (2018).

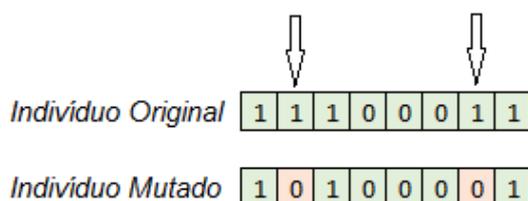
2.4.4.3 MUTAÇÃO

Este é o operador genético necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética da população, ele atua alterando uma ou mais características de uma estrutura escolhida, desta forma ela fornece uma introdução de novos indivíduos na população.

Com a mutação é assegurada que a probabilidade de chegar a qualquer ponto do conjunto nunca seja igual a zero, além de garantir que não haja mínimos locais na otimização do problema, pois ela altera levemente a direção de busca de novos indivíduos.

Uma alta taxa de mutação nos indivíduos faz com que a busca na população seja essencialmente aleatória, todavia ao se aplicar uma baixa taxa de mutação é prevenida a estagnação da busca em sub-regiões da população, possibilitando também que qualquer ponto do espaço de busca possa ser atingido. Desta maneira a taxa de mutação é comumente variada entre 0,1 a 10%.

Figura 8 - Exemplo de mutação.



FONTE: O AUTOR (2018).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, os conceitos de algoritmos genéticos foram apresentados, sendo mostrado a estrutura que os AG devem ter e como fazer a implementação deles para o desenvolvimento do trabalho proposto. Foram definidos também os conceitos dos operadores genéticos que fazem parte dos AG, os operadores de seleção, cruzamento e mutação.

Quando se trata de problemas de otimização os AG apresentam-se como uma ótima ferramenta de solução, pois as operações que ocorrem neles, como a mutação, que contribui para mitigar o problema dos mínimos locais, os cruzamentos, responsáveis pela criação de novos bons indivíduos, e o elitismo que evita que os melhores indivíduos sejam perdidos a cada geração, ajudam a acelerar o processo de solução e fazer com que a solução encontrada se aproxime do ótimo global, ao invés de encontrar máximos locais como acontece com as ferramentas tradicionais de busca e otimização.

3 REVISÃO DA LITERATURA E TECNOLÓGICA

3.1 REVISÃO DA LITERATURA

O processo de busca de artigos para a montagem da revisão da literatura foi montado a partir da definição das seguintes palavras chaves, “PV System”, “Genetic Algorithm” e “Sizing”, que formaram os eixos de pesquisa. Com a definição destas palavras, foi então utilizado o programa Publish or Perish para fazer a primeira busca de artigos no banco de dados do Google Academy, utilizando a combinação das palavras “Sizing e PV System”.

Foram encontrados cerca de 999 artigos que apresentaram os dois eixos de pesquisa, o primeiro processo de filtragem dos artigos foi através da leitura dos seus títulos e seleção dos artigos relevantes para o trabalho, após esse processo o número de artigos relevantes caiu para 247. O segundo passo para selecionar os artigos da revisão de literatura, foi realizar a leitura dos resumos dos 247 artigos restantes, com a leitura realizada foram selecionados os artigos mais relevantes, chegando a um total de 57. Para a filtragem final para a pesquisa com essa combinação de palavras, foram escolhidos os três artigos com mais citações, desta forma conclui-se a seleção de artigos através das palavras chaves “Sizing e PV System”.

A segunda busca no banco de dados do Google Scholar, também ocorreu através do Publish OR Perish, porem desta vez foi feita a pesquisa com a combinação de palavras “Sizing e Genetic Algorithm”. Foram encontrados 979 artigos através da pesquisa. O processo de seleção ocorreu de maneira idêntica à pesquisa anterior.

Por fim, após análise do portfólio bibliográfico foram selecionados dois artigos relevantes a este trabalho, os quais contemplavam o problema de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos empregando a técnica de algoritmos genéticos. A seguir são apresentados breves resumos dos artigos selecionados.

A possibilidade de utilizar AG para realizar a reconfiguração de arranjos de painéis fotovoltaicos é apresentado em (CAMARILLO-PEÑARANDA; RAMÍREZ-QUIROZ, 2015). Neste trabalho é comparada a utilização de AG para realizar a reconfiguração dos arranjos fotovoltaicos, em relação ao método de força bruta, que consiste em um algoritmo que testa todas as possíveis soluções para o problema. Ao contrário aos AG, que buscam de forma inteligente encontrar a solução mais próxima do ideal, sem ter que testar cada solução. Os resultados apresentados pelo autor

mostram que os AG atingem um resultado satisfatório muito mais rapidamente que o método de força bruta, porém como o processo de reconfiguração física dos arranjos PV é um processo lento, isto faz com que a utilização dos AG seja limitada, mesmo que eles consigam encontrar a solução ótima para o problema de maneira muito mais rápida.

Já no trabalho de (SYAFARUDDIN; NARIMATSU, 2015) é apresentada a utilização de AG não binários para a determinação do fator de capacidade ótimo de uma instalação fotovoltaica no Japão. Segundo o autor a determinação desse fator é necessária para a previsão da energia produzida acumulada, de acordo com a previsão meteorológica. Os resultados obtidos pelo autor mostram que os AG não binários conseguem prever a produção de energia do sistema PV observado, por um dia de antecedência ou até uma semana, dependendo da previsão meteorológica.

3.2 REVISÃO TECNOLÓGICA

Nesta seção é apresentado um breve resumo sobre alguns softwares de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos disponíveis no mercado atualmente.

SOLARGIS

É um software desenvolvido pela Solargis s.r.o. que tem como principal objetivo estimar a produção de energia através de sistemas PV em locais onde se deseja instalar um desses sistemas. Este software apresenta apenas dados estimados para a produção de energia, não apresentando quais seriam os painéis e os inversores a serem utilizados no sistema.

SOLERGO

Desenvolvido pela empresa francesa Eletrografics, o Solergo está disponível em duas plataformas, para computadores e aparelhos móveis. Ele é um dos softwares mais completos no quesito de dimensionamento de sistemas PVs, pois com ele é possível ter uma estimativa detalhada da produção anual estimada dos sistemas, além da análise de sombreamento e perdas de tensão nos cabos do sistema, devido ao efeito Joule. O lado negativo do software é a necessidade do usuário ter que escolher o painel e inversor que deseja instalar, além da topologia do sistema, este é um fator

negativo, pois torna o dimensionamento do sistema empírico, tornando o mais suscetível a um mal dimensionamento.

PVsyst

O software PVsyst é uma das ferramentas para o dimensionamento de sistemas PV mais completas disponível atualmente no mercado. Com ele é possível fazer a previsão da produção de energia do sistema PV, dimensiona-lo buscando a otimização em produção de energia do sistema. Possui uma ampla variedade de módulos PV e inversores, porem o processo de seleção desses componentes ocorre de forma manual, ou seja, o usuário deve escolher quais painéis e qual inversor deseja utilizar, além de também ter que determinar a topologia do sistema de maneira intuitiva, para que consiga atingir as especificações de corrente e tensão do inversor selecionado.

SIMULADOR SOLAR – CALCULADORA SOLAR FOTOVOLTAICA

Software desenvolvido pela empresa NeoSolar, que faz a instalação e venda de sistemas PV. O software tem como principal objetivo demonstrar ao futuro proprietário do sistema fotovoltaico, qual seria o tempo de retorno do investimento na obtenção de um sistema de geração de energia fotovoltaica, não levando em conta qual modelo de painel solar utilizar e nem o inversor, apresentando valores totalizados de estimativa de produção de energia do sistema PV dimensionado.

WEG PAYBACK SOLAR

Muito semelhante ao software apresentado anteriormente, este tem o mesmo objetivo de informar o tempo do retorno do investimento. Desenvolvido pela empresa WEG, a principal característica do software é fornecer o contado de empresas instaladoras de sistemas PV, que trabalhem com os inversores fabricados pela WEG, ou seja, é um software com cunho totalmente voltado para vendas, não apresentando um dimensionamento detalhado do sistema fotovoltaico, sem apresentar quantidade de painéis, inversores e nem a topologia que o sistema fotovoltaico deve ter.

PLANILHA SOLAR NORTHSUN

O software desenvolvido pela empresa NorthSun Engenharia, é voltado para vendas de sistemas PV, pois os resultados apresentados em suas simulações,

apenas trazem ao usuário uma estimativa de retorno de investimento. O programa não leva em conta a topologia e nem o modelo dos painéis e inversores a serem utilizados, apenas dá a possibilidade para o cliente entrar em contato com o fornecedor, para assim poder ter um projeto de sistema fotovoltaico.

A tabela 4 apresenta uma comparação entre diversos softwares de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. As características dos softwares são as seguintes, a coluna 3 traz uma comparação entre as características do dimensionamento de cada software, sendo dividido entre totalizado, apresenta apenas os valores finais de potência estimada e custo de instalação do sistema PV, e detalhado, que apresenta o dimensionamento com o modelo do painel e inversor a ser utilizado, além de apresentar também a topologia do sistema.

A quarta coluna da tabela 4 apresenta um comparativo entre os dados de entrada requeridos por cada software, sendo eles a localização do sistema fotovoltaico a ser dimensionado, a energia anual requerida pela instalação onde o sistema PV irá ser instalado, a área disponível para o sistema PV a ser dimensionado, o custo do kW/h na concessionária onde o sistema irá ser ligado e tipo de entrada de energia do local da instalação do sistema PV, por exemplo, monofásico, bifásico ou trifásico.

A coluna do processo de análise apresenta um comparativo da forma de como o software faz o dimensionamento do sistema PV, sendo esta coluna dividida entre manual, onde o usuário escolhe o painel e o inversor a ser utilizado no dimensionamento, automático, onde o software escolhe o painel e o inversor utilizados no dimensionamento, e valores totalizados, que seria quando o software apenas apresenta os valores totais de potência a ser gerada não levando em conta os painéis e o inversor utilizado.

Por fim, a última coluna da tabela 4, apresenta uma comparação entre o processo de otimização de cada software, divididos entre custo e energia. A otimização de energia seria a o dimensionamento levando a maior quantidade de energia que o sistema PV poderá gerar já a otimização de custo leva em conta o tempo de retorno do investimento na instalação do sistema PV.

Tabela 4 - Comparativo dos softwares de dimensionamento de sistemas PV disponíveis no mercado.

Software	Fabricante	Dimensionamento	Dados de entrada	Processo de Análise	Diversos fabricantes	Otimização
Solargis	Solargis s.r.o..	Detalhado com topologia	Localização, potência a instalar desejada	Apresenta valores totalizados	Não	Energia
SOLergo	Hiperenergy	Detalhado com topologia	Localização, potência anual requerida em kW.	Manual	Sim	Energia
PVsyst	PVsyst SA	Detalhado com topologia	Localização, irradiação anual do local, potência anual requerida, área total disponível.	Manual	Sim	Energia
Simulador Solar - Calculadora Solar Fotovoltaica	NeoSolar	80% da potência anual requerida	Localização, consumo de energia mensal e custo do kW/h.	Apresenta valores totalizados	Não	Custo
Weg Payback Solar	WEG	80% da potência anual requerida	Localização e consumo de energia mensal.	Apresenta valores totalizados	Não	Custo
Planilha NorthSun	NorthSun Engenharia	80% da potência anual requerida	Localização, consumo de energia elétrica mensal em kW/h e irradiação solar anual do local a ser instalado o sistema PV.	Apresenta valores totalizados	Não	Custo

FONTE: O AUTOR (2018).

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi observado através da revisão da literatura, que a utilização de algoritmos genéticos para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos e análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos é uma área de pesquisa ainda a ser explorada, pois os artigos analisados mostram que a capacidade que os AG têm de solucionar problemas de otimização é muito grande, além de também conseguirem fazer isso de forma simples, atingindo resultados muito bons.

Com a revisão tecnológica, foi possível observar que as ferramentas de dimensionamento de sistemas PV disponíveis no mercado atualmente, não atuam de maneira automática em busca da melhor combinação entre painéis e inversores para sistemas fotovoltaicos, sendo a escolha dos painéis feita na maioria dos casos pelo usuário do software. Portanto o dimensionamento acaba sendo realizado de maneira empírica, o que ocasiona sub dimensionamentos e sobre dimensionamentos.

Foi observado também que os softwares atuais não possuem ferramentas para a otimização do dimensionamento em busca da correlação ótima entre painéis e inversores, sendo levado em conta somente a otimização de custo e energia, também observou-se que nenhum software fornece a topologia ideal para o sistema fotovoltaico, deixando para o usuário tentar encontrar a topologia ótima de maneira empírica, dos seis softwares analisados, três deles possuem apenas cunho comercial, dando apenas estimativas de tempo de retorno e não estabelecendo um dimensionamento detalhado do sistema PV.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados para a realização do projeto e os também os métodos utilizados para sua execução.

4.1 MATERIAL

Para o desenvolvimento do trabalho foi inicialmente criado um banco de dados com as características dos painéis solares e inversores, conforme a proposta de dimensionamento proposta no trabalho.

O banco de dados foi criado numa planilha do Excel, conforme as Figuras 9 e 10. Para o preenchimento desta planilha com as informações necessárias foi feita uma busca nos catálogos fornecidos pelos fabricantes de painéis e inversores. Para alguns casos onde alguns dos dados não estavam apresentados nos catálogos, foi necessário entrar em contato com os fabricantes, solicitando as informações, para que fosse possível completar a planilha do banco de dados.

A busca dos modelos dos inversores e painéis foi feita através de consulta da tabela de componentes de sistemas fotovoltaicos homologados pelo INMETRO, via programa brasileiro de etiquetagem, que garante a qualidade e segurança dos componentes a serem utilizados em sistemas fotovoltaicos.

Atualmente o existem 857 modelos de painéis solares etiquetados pelo INMETRO, com 148 empresas fabricantes, e 725 fabricantes de inversores, com 95 modelos etiquetados.

Figura 9 - Exemplo do banco de dados dos módulos PV criado.

Dados PVs	Maximum Power (Pmp_stc) - Wp	Voltage at Maximum Power (Vmp_stc)	Open circuit Voltage (Voc_stc)	Short Circuit Current (Isc_stc)	Tem for max power	Temp for max power voltage	Temp for max power open circuit voltage	Reduction factor	Maximum System Voltage (Vsys_max)	Marca	Custo (R\$)	Largura [m]	Comprimento [m]
1	50	17,2	21,6	3,23	-0,5	-0,055	-0,065	0,5	600	AMRTEC	290	0,75	0,51
2	80	17,2	21,6	5,17	-0,5	-0,055	-0,065	0,5	600	AMRTEC	350	0,94	0,67
3	100	17,2	21,6	6,03	-0,5	-0,055	-0,065	0,5	600	AMRTEC	400	1,01	0,66
4	120	34,4	43,2	3,86	-0,5	-0,055	-0,065	0,5	600	AMRTEC	670	1,6	0,8
5	130	17,2	21,6	7,9	-0,5	-0,055	-0,065	0,5	600	AMRTEC	670	1,6	0,8
6	150	17,2	21,6	9	-0,5	-0,055	-0,065	0,5	600	AMRTEC	670	1,6	0,8
7	260	29,7	38,1	9,35	-0,42	-0,3	-0,4	0,5	1000	Yingli	899	1,966	0,997
8	280	31,3	39,1	9,5	-0,42	-0,3	-0,4	0,5	1000	Yingli	899	1,966	0,997
9	140	18,1	22,5	8,44	-0,44	-0,3	-0,4	0,5	1000	3T Solar	670	1,6	0,8
10	260	30,7	38,1	9,14	-0,44	-0,3	-0,3	0,5	1000	3T Solar	899	1,966	0,997
11	310	36,38	45,79	8,99	-0,39	-0,31	-0,07	0,5	1000	3T Solar	1030	1,966	0,997
12	315	36,58	46,09	9,07	-0,39	-0,31	-0,07	0,5	1000	3T Solar	1030	1,966	0,997
13	320	36,78	46,39	9,15	-0,39	-0,31	-0,07	0,5	1000	3T Solar	1030	1,966	0,997
14	325	36,98	46,69	9,23	-0,39	-0,31	-0,07	0,5	1000	3T Solar	1030	1,966	0,997

FONTE: O AUTOR (2018).

Figura 10 - Exemplo do banco de dados dos inversores criado para o desenvolvimento deste trabalho.

Modelo	Nominal Power Input (P _{inv})	Max Input Voltage (V _{max_inv})	Max Input window voltage (V _{max_win_inv})	Min Input window voltage (V _{min_win_inv})	Max Input current (I _{dc_max_inv})	Max Efficiency (η _{inv})	Marca	Custo [R\$]
1	6000	1000	800	240	18	0,98	Fronius Primo	10000
2	3000	1000	800	200	18	0,979	Fronius Primo	4200
3	2000	420	335	120	17,8	0,96	Fronius Primo	3300
4	4000	1000	800	210	12	0,98	Fronius Primo	8000
5	3000	600	530	160	10	0,968	PVI-3.0-TL-OUTD	4200
6	3600	600	530	120	16	0,968	PVI-3.6-TL-OUTD	8000
7	4200	600	530	140	16	0,968	PVI-4.2-TL-OUTD	8000
8	5000	600	530	150	18	0,97	PVI-5000-TL-OUTD	8000
9	6000	600	530	180	18	0,97	PVI-6000-TL-OUTD	10000
10	2000	520	470	200	12,5	0,963	UNO-2.0-I-OUTD	3300

FONTE: O AUTOR (2018).

O software utilizado para o desenvolvimento do trabalho, foi o Matlab, versão R2015a (8.5.0.197613) e para aplicação dos algoritmos genéticos para o dimensionamento ótimo de sistemas PV propostos no trabalho foi utilizada a ferramenta de otimização do Matlab, Optimtool (Optimization Toolbox), versão 7.2, na qual o método selecionado para a resolução do problema proposto deste trabalho, forma os AG.

4.2 MÉTODOS

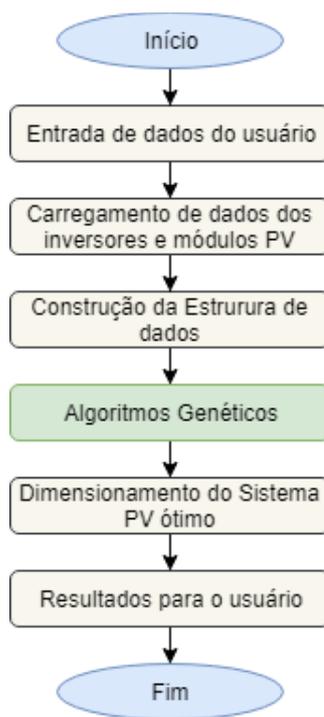
Para o desenvolvimento deste trabalho foi determinada uma função chamada “Main”, que tem o seu funcionamento representado pelo fluxograma na Figura 11.

A primeira etapa da função Main é habilitar a entrada de dados do usuário, para que possa ser inserida nos algoritmos a demanda energética anual do sistema a ser dimensionado. Após esta etapa a função faz o carregamento dos dados dos módulos PV e dos inversores contidos no banco dados, através do comando “load” do Matlab. Com os dados carregados é construída uma estrutura dos com os dados de cada um dos componentes do banco de dados, esta estrutura será utilizada na função fitness do AG.

Após esta etapa a função Main aciona os AG construídos através da função Optimtool do Matlab, através desta função foram definidas as dos algoritmos genéticos do problema, nela foram definidas as taxas dos operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação. Para este trabalho o valor utilizado para as taxas foi o padrão do Optimtool do Matlab. Ainda no processo de definição dos AG, é informada

aos algoritmos qual é a função fitness a ser minimizada. O funcionamento básico pode ser observado no fluxograma da Figura 5, no capítulo 2.4.3. Com os resultados obtidos após a aplicação dos AG a função Main, faz os cálculos do sistema PV ótimo e apresenta os resultados obtidos ao usuário.

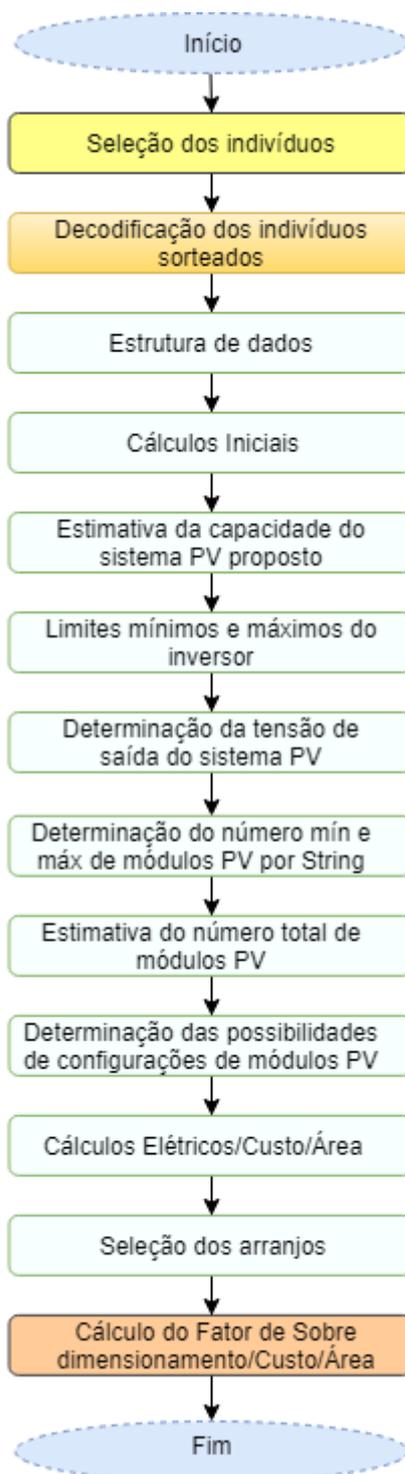
Figura 11 - Fluxograma do funcionamento da função Main.



FONTE: O AUTOR (2018).

A função fitness para os AG do problema de otimização proposto neste trabalho, pode ser observada no fluxograma apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma do funcionamento da função fitness do problema.



FONTE: O AUTOR (2018).

A primeira etapa da função fitness do problema inicia-se com o recebimento dos dados informados pelo usuário, para este trabalho os dados informados serão a demanda energética anual em kWh, do sistema PV que se deseja dimensionar. Em seguida os indivíduos escolhidos aleatoriamente pelos AG, modulo PV e inversor, têm

o seu número do código do seu modelo no banco de dados decodificado a partir do número binário com 13 dígitos, sendo os sete primeiros dígitos para os códigos dos módulos PV, pois o banco de dados construído possui 122 modelos diferentes de painéis, e os outros seis dígitos restantes fazem parte da codificação dos inversores, que somam um total de 44 modelos diferentes no banco de dados desenvolvidos para este trabalho. Esta decodificação é necessária para que seja obtida as demais características dos componentes do sistema PV, utilizadas nos cálculos do dimensionamento.

O próximo passo da função fitness é realizar os cálculos iniciais dos limites do fator de sobre dimensionamento do sistema. As etapas seguintes da função fitness do problema obedecem ao processo de dimensionamento de sistemas PV proposto por (SULAIMAN, 2012), já apresentado na seção 2.2 deste trabalho. Nessas etapas são calculadas as características do sistema PV com os dados dos módulos e inversores selecionados para a análise, sendo calculada a estimativa de capacidade do sistema PV proposto, limites do inversor selecionado, a tensão de saída do sistema PV, a determinação de do número máximo de módulos por string no sistema, a estimativa de total de módulos a serem utilizados e a determinação das configurações dos arranjos dos módulos PV.

Após a realização destes cálculos é realizado o cálculo do fator de sobre dimensionamento do sistema, do custo aproximado da instalação do gerador e a área estimada que os módulos PV irão ocupar. Com estes cálculos realizados, os seus respectivos resultados normalizados são aplicados a função objetivo do problema, que consiste em minimizar o fator de sobre dimensionamento, o custo do sistema e área ocupado pelos painéis PV.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento do trabalho proposto e as suas respectivas análises de acordo com os objetivos pré-definidos para a realização do trabalho.

5.1 CENÁRIO 1

Este cenário contemplou o dimensionamento de sistema PV com demanda anual de 30.000kWh, para a cidade de Curitiba, com apenas otimização do fator de sobre dimensionamento.

Os dados de entrada do algoritmo, para simulação deste cenário são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados de entrada da função Main, para o cenário 1.

Energia Anual Requerida do Sistema	30000 kWh
------------------------------------	-----------

FONTE: O AUTOR (2018).

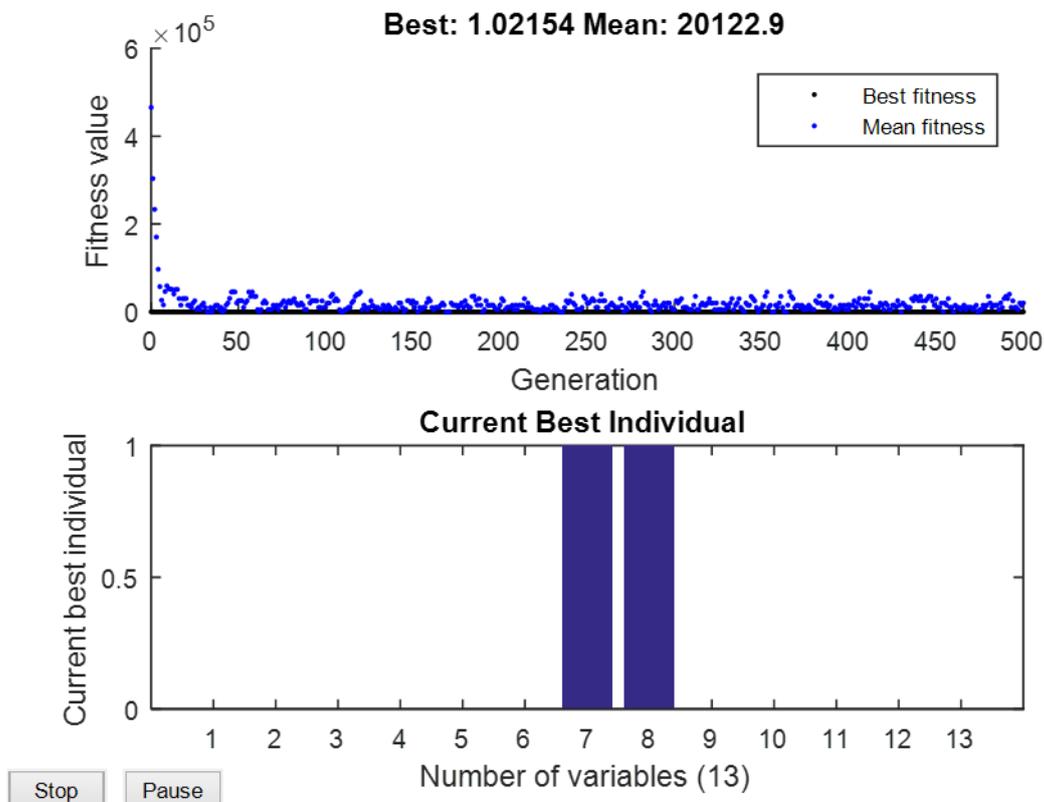
Os resultados obtidos após a simulação do cenário 1 são apresentados na Tabela 6 e na Figura 13.

Tabela 6 - Resultados obtidos para o dimensionamento do cenário 1.

Código do módulo PV selecionado	2
Potência do módulo PV selecionado	80 W
Código do Inversor Selecionado	33
Potência do Inversor Selecionado	2300 W
Quantidade total de Módulos PV no sistema	29
Configuração do arranjo dos módulos PV selecionados ($N_s \times N_p$)	29x1
Potência da Geração fotovoltaica instalada	2320,00 Wp
Fator de sobre dimensionamento	0,9914
Energia Anual do Sistema Dimensionado	30646 kWh
O sistema PV é sobre dimensionado	1,0215 vezes
Custo aproximado do Sistema PV	R\$ 14.350,00
Área aproximada do Sistema PV	18,26 m ²

FONTE: O AUTOR (2018).

Figura 13 - Resultados obtidos em decodificação binária, para o cenário 1.



FORNE: O AUTOR (2018).

A simulação do cenário um consistia em dimensionar um sistema PV com demanda anual de 30.000 kWh anualmente, com apenas a otimização de sobre dimensionamento do sistema. Os resultados apresentados na Tabela 6 mostram que o algoritmo de dimensionamento encontrou que a solução ótima para o sistema proposto foi a combinação de 29 painéis fotovoltaicos de potência igual a 80 W, com o código de número oito no banco de dados, conectados em série. O inversor escolhido foi com o código do banco de dados numero 33, com potencia nominal de 2300 W.

O sistema ideal dimensionado possui potencia igual a 2320,00 Wp, como para este cenário foi utilizada apenas a otimização de potencia o sistema PV tem o seu fator de sobre dimensionamento igual à 1,0215 vezes, valor considerado ótimo, pois a função fitness do problema conseguiu ser minimizada a um valor muito próximo de um. Para este cenário a área aproximada dos painéis fotovoltaicos foi de 18,26 m² e o custo estimado para a aquisição de todos os equipamentos foi de R\$14350,00. A Figura 13 mostra a representação binária dos painéis e inversores selecionados,

realizada pelo algoritmo, onde os primeiros sete dígitos são destinados a escolha dos módulos PV e os outros seis restantes para os inversores.

5.2 CENÁRIO 2

O cenário 2 é composto pelo dimensionamento de sistema PV com demanda anual de 30000kWh, para a cidade de Curitiba, com otimização do fator de sobre dimensionamento, do custo do sistema PV e da área ocupada pela instalação dos módulos PV.

Os dados de entrada do algoritmo genético, para simulação deste cenário são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados de entrada da função Main, para o cenário 2.

Energia Anual Requerida do Sistema	30000 kWh
------------------------------------	-----------

FONTE: O AUTOR (2018).

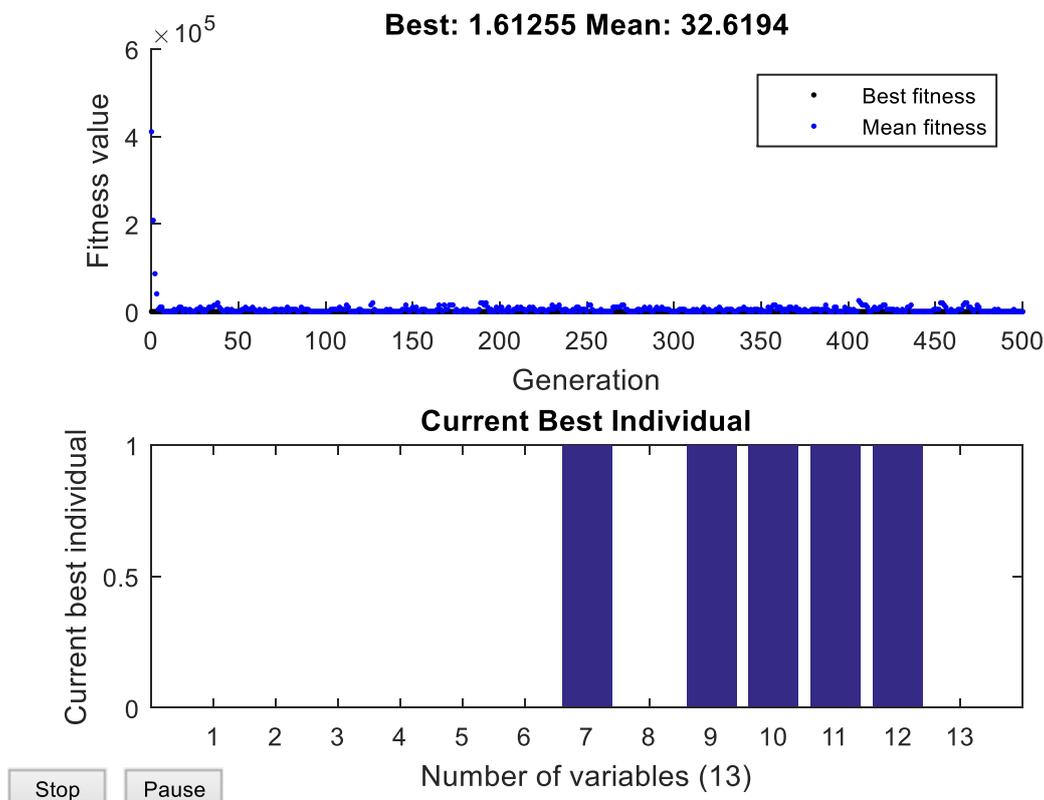
Os resultados obtidos após a simulação do cenário 2 são apresentados na Tabela 8 e na Figura 14.

Tabela 8 - Resultados obtidos para o dimensionamento do cenário 2.

Código do módulo PV selecionado	2
Potência do módulo PV selecionado	80 W
Código do Inversor Selecionado	31
Potência do Inversor Selecionado	1300 W
Quantidade total de Módulos PV no sistema	29
Configuração do arranjo dos módulos PV selecionados ($N_s \times N_p$)	29x1
Potência da Geração fotovoltaica instalada	2320,00 Wp
Fator de sobre dimensionamento	0,5603
Energia Anual do Sistema Dimensionado	30646 kWh
O sistema PV é sobre dimensionado	1,0215 vezes
Custo aproximado do Sistema PV	R\$ 13.450,00
Área aproximada do Sistema PV	18,26 m ²

FONTE: O AUTOR (2018).

Figura 14 - Resultados obtidos em decodificação binária, para o cenário 2.



FONTE: O AUTOR (2018).

Para o cenário 2 foram otimizados o fator de sobre dimensionamento, o custo e a área aproximada do sistema PV, para a mesma potência anual requerida e localidade do cenário 1. Os resultados apresentados na Tabela 8 mostram que o algoritmo de dimensionamento encontrou que a solução ótima para o sistema proposto foi a combinação de 29 painéis fotovoltaicos de potência igual a 80 W, com o código de número oito no banco de dados, conectados em série, mesma combinação ótima de módulos encontrada na simulação do cenário 1. Porém o inversor escolhido neste caso foi diferente, foi selecionado o inversor com o código do banco de dados número 31 e com potência nominal de 1300 W.

O sistema ideal dimensionado possui potência igual a 2320,00 Wp, como para este cenário foi utilizada a otimização do fator de sobre dimensionamento, de custo e de área, o sistema PV tem o seu fator de sobre dimensionamento reduzido à 0,5603, valor considerado ótimo, pois a função fitness do problema conseguiu reduzir o custo do sistema PV para o valor de R\$ 13.450,00, a área requerida pelo sistema foi a

mesma, pois não houve alteração nos módulos PV. A Figura 14 mostra a representação binária dos painéis e inversores selecionados.

5.3 CENÁRIO 3

O cenário 3 contempla o dimensionamento de sistema PV com demanda anual de 30000kWh, para a cidade de Fortaleza, com apenas otimização do fator de sobre dimensionamento.

Os dados de entrada do algoritmo genético, para simulação deste cenário são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados de entrada da função Main, para o cenário 3.

Energia Anual Requerida do Sistema	30000 kWh
------------------------------------	-----------

FONTE: O AUTOR (2018).

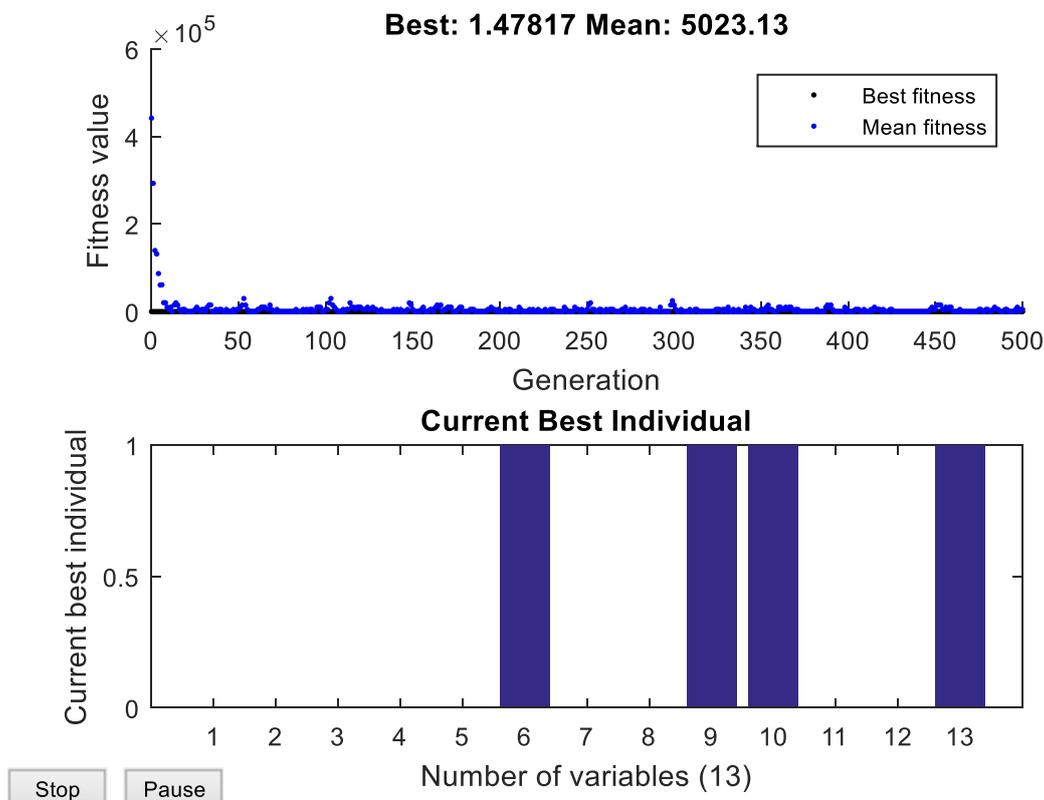
Os resultados obtidos após a simulação do cenário 3 são apresentados na Tabela 10 e na Figura 15.

Tabela 10 - Resultados obtidos para o dimensionamento do cenário 3.

Código do módulo PV selecionado	3
Potência do módulo PV selecionado	100 W
Código do Inversor Selecionado	26
Potência do Inversor Selecionado	1500 W
Quantidade total de Módulos PV no sistema	25
Configuração do arranjo dos módulos PV selecionados ($N_s \times N_p$)	25x1
Potência da Geração fotovoltaica instalada (STC)	2500,00 Wp
Fator de sobre dimensionamento	0,6000
Energia Anual do Sistema Dimensionado	44,345 kWh
O sistema PV é sobre dimensionado	1,4782 vezes
Custo aproximado do Sistema PV	R\$ 13.300,00
Área aproximada do Sistema PV	16,66 m ²

FONTE: O AUTOR (2018).

Figura 15 - Resultados obtidos em decodificação binária, para o cenário 3.



FONTE: O AUTOR (2018).

Para a simulação do cenário 3, foi necessário alterar na função fitness do AG o índice de radiação solar anual para o valor igual à 2104,85 kWh/m², referente a cidade de Fortaleza. Após esta alteração foi possível dimensionar o sistema PV para as condições propostas no cenário.

Os resultados apresentados na Tabela 10 mostram que o algoritmo de dimensionamento encontrou que a solução ótima para o sistema proposto foi a combinação de 25 painéis fotovoltaicos de potência igual a 100 W, com o código de número cinco no banco de dados, conectados em série. O inversor escolhido foi com o código do banco de dados número 26, com potência nominal de 1500 W.

O sistema ideal dimensionado possui potência igual a 2500,00 Wp, como para este cenário foi utilizada apenas a otimização do fator de sobre dimensionamento, valor obtido para este fator otimizado foi de 0,6000. Para este cenário a área aproximada dos painéis fotovoltaicos foi de 16,66 m² e o custo estimado para a aquisição de todos os equipamentos foi de R\$ 13.300,00. A Figura 15 mostra a representação binária dos painéis e inversores selecionados realizada pelo algoritmo.

5.4 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

Comparando os resultados obtidos nas simulações dos cenários 1 e 2, foi possível observar que o algoritmo para o dimensionamento ótimo de sistemas PV conectados à rede de distribuição desenvolvido neste trabalho, conseguiu realizar a otimização de custo, área e de sobre dimensionamento ao mesmo tempo. O algoritmo conseguiu otimizar o custo do sistema, reduzindo o seu valor de R\$ 14.350,00 para R\$ 13.450,00 e em relação a área aproximada dos painéis PV e o sobre dimensionamento o algoritmo apresentou os mesmos valores para os dois casos. Não houve melhoria no fator área e sobre dimensionamento devido a quantidade e modelo dos módulos PV serem os mesmos nos dois cenários.

E comparando os resultados obtidos nos cenários 1 e 3, é possível observar com a mudança da localidade do sistema PV dimensionado e respectivamente o seu índice radiação solar anual, no terceiro cenário, o algoritmo conseguiu encontrar uma solução para a mesma demanda anual requerida, com o sobre dimensionamento maior, o que acarretou uma capacidade de geração de energia anual aproximadamente 45% maior que a do cenário 1, com um custo de aquisição dos componentes reduzido em R\$ 1.050,00 e a área requerida aproximada para o sistema reduzida em 1,6 m². Desta forma foi observado que o algoritmo é sensível a mudanças no índice de radiação solar dos locais das instalações dos sistemas PV.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com o desenvolvimento do banco de dados com as informações mais relevantes dos painéis fotovoltaicos e dos inversores, foi possível a realização deste trabalho. O principal objetivo da criação deste banco de dados era ter uma quantidade de painéis e inversores suficientemente grande para testar o algoritmo desenvolvido. Devido a dificuldade de encontrar alguns dos catálogos dos modelos de módulos PV presente no PBE, a quantidade de elementos contidos no banco de dados não foi tão elevada, porém foi suficientemente grande para a realização dos testes deste trabalho.

O um modelo de otimização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição, desenvolvido neste trabalho, foi baseado na aplicação da metodologia dos algoritmos genéticos. No modelo desenvolvido além do processo de otimização minimizar o sobre dimensionamento de sistemas PV, conforme mostrado na fundamentação teórica do trabalho, foram inseridas também funções no modelo para a otimização do custo e da área utilizada pelos sistemas fotovoltaicos.

Após a análise dos resultados obtidos nas simulações dos cenários propostos, para a validação da utilização dos algoritmos genéticos com ferramenta para o dimensionamento de sistemas PV ótimos. Verificou-se que este método de análise computacional possui uma grande capacidade dimensionar sistemas PV ótimos, de acordo com a metodologia adotada neste trabalho, pois os resultados obtidos comprovam que os AG possuem a capacidade de encontrar a solução ótima dentro de um conjunto de possíveis soluções, bem como, conseguem encontrar a solução que irá fazer com que o sobre dimensionamento do sistema PV a ser instalado seja o melhor possível.

Os resultados também mostraram que quando aplicados três fatores para a otimização (sobre dimensionamento, custo do sistema PV e a área requerida pelos módulos PV), os AG conseguiram dimensionar o sistema de maneira a minimizar estes três fatores. Mostrando que a aplicação deste tipo de abordagem computacional para a otimização de sistemas PV é válida, pois os resultados obtidos foram satisfatórios e comprovatórios.

Como trabalhos futuros tem-se as seguintes possibilidades:

- 1) Ajuste dos métodos e parâmetros envolvidos nos Algoritmos Genéticos;

- 2) Aumentar o banco de dados através de pesquisa e inclusão de mais modelos de painéis fotovoltaicos e inversores;
- 3) Testar e validar o modelo desenvolvido para outras localidades com valores de irradiação diferentes; e
- 4) Determinação de parâmetros para operação ótima dos inversores, bem como da instalação física dos painéis fotovoltaicos, por exemplo, o ângulo de inclinação.

REFERÊNCIAS

- ABB. 2017. **ABB string inverters TRIO-20.0/27.6-TL-OUTD 20 to 27.6 kW**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://new.abb.com/power-converters-inverters/solar/string/three-phase/trio-20-0kw-27-6kw>
- ANEEL. **Resolução Normativa no 482 de 2012 da Aneel**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>.
- ANEEL. 2017. **Tarifa Branca**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>
- ÁVILA, S. L.; 2002. **Algoritmos Genéticos Aplicados na Otimização de Antenas Refletores**. Florianópolis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.
- BOXWELL, M. **Solar Electricity Handbook** – 2017 Edition. Greenstream Publishing: United Kingdom. 2017, 177p.
- CAMARILLO-PEÑARANDA, J. R.; RAMÍREZ-QUIROZ, F. A.; ... **Reconfiguration of photovoltaic arrays based on genetic algorithm**. Revista Facultad de ... [scielo.org.co](http://www.scielo.org.co), 2015. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302015000200010&script=sci_arttext&tlng=pt
- COELHO, L. S.; 2003. **Fundamentos, Potencialidades e Aplicações de Algoritmos Evolutivos. Notas em Matemática Aplicada**, Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, São Carlos, SP.
- GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. [s.l.] CEPEL - CRESESB, 2014. Pub Co.
- GALVÃO, C. O.; VALENÇA, M. J. S.; **Sistemas Inteligentes -Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais**, Vol. 1. ABRH. Porto Alegre, RS. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.
- GOLDBERG, D. E.; 1997. **Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning**. John Wiley & Sons, United States of America.
- HAUP, R. L.; HAUP, S. E.; 1998. **Practical Genetic Algorithms**. Wiley-Interscience - John Wiley & Sons, Vol. 1.
- HOLLAND, J. H.; 1975. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. University of Michigan Press.
- RABELO, P. G.; OCHI, L. S.; 1996. **Um Novo Algoritmo Genético Híbrido para o Problema do Caixeiro Viajante com Grupamento**. Anais do Simpósio Brasileiro de Redes Neurais, Vol. 1, p. 83–90.
- REZENDE, S. O.; 2003. **Sistemas Inteligentes - Fundamentos e Aplicações**, Vol. 1. Manole, Bariri

SULAIMAN, S. I. et al. **An intelligent method for sizing optimization in grid-connected photovoltaic system**. Solar Energy, v. 86, n. 7, p. 2067–2082, 2012.

SYAFARUDDIN; NARIMATSU, H.; ... **Optimal energy utilization of photovoltaic systems using the non-binary genetic algorithm**. Energy Technology & ..., 2015.

WINSTON, P.H.; 1992. **Artificial Intelligence**, Vol. 1. Addison-PINHO, J. T.;