

JEANE SILVA DE SOUZA

**DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS USANDO ENXAME
DE PARTÍCULAS MODIFICADO PARA REDUZIR AS PERDAS DE ENERGIA E
MELHORAR O PERFIL DE TENSÃO**

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

Orientadores: Prof. Dr. Clivaldo Silva de Araújo
Prof. Dr. Yuri Percy Molina

JOÃO PESSOA

2016

JEANE SILVA DE SOUZA

**DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS USANDO ENXAME
DE PARTÍCULAS MODIFICADO PARA REDUZIR AS PERDAS DE ENERGIA E
MELHORAR O PERFIL DE TENSÃO**

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

Orientadores: Prof. Dr. Clivaldo Silva de Araújo
Prof. Dr. Yuri Percy Molina

JOÃO PESSOA

2016

S729d Souza, Jeane Silva de.
Dimensionamento ótimo de painéis fotovoltaicos usando
enxame de partículas modificado para reduzir as perdas de
energia e melhorar o perfil de tensão / Jeane Silva de Souza.-
João Pessoa. 2016.
120f. : il.
Orientadores: Clivaldo Silva de Araújo, Yuri Percy Molina
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR
1. Engenharia elétrica. 2. Painéis fotovoltaicos. 3. Enxame
de partículas modificado. 4. *DigSILENT*. 5. *PowerFactory*.

UFPB/BC

CDU: 621.3(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS USANDO ENXAME
DE PARTÍCULAS MODIFICADO PARA REDUZIR AS PERDAS DE ENERGIA E
MELHORAR O PERFIL DE TENSÃO**

Elaborada por

JEANE SILVA DE SOUZA

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA

DR. CLIVALDO SILVA DE ARAÚJO (Presidente)

DR. YURI PERCY MOLINA RODRIGUEZ (Examinador Interno)

DR. ALEXANDRE CÉZAR DE CASTRO (Examinador Interno)

DR. ROGÉRIO GASPAR DE ALMEIDA (Examinador Externo)

João Pessoa/PB, 29 de Fevereiro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo preciso dizer que meus agradecimentos não são formais. Eu não me reconheceria neles se assim fora. Confesso que em vários momentos ao longo desta dissertação não pensava em outra coisa que não fosse escrever os agradecimentos, afinal, sempre tive um gosto incomum por agradecimentos e dedicatórias que abrem trabalhos e publicações. Pensava em como compor um texto engraçado que recordasse relações passadas e presentes que contribuíram de diversas formas para que chegasse neste ponto. Quero agradecer a todas as pessoas que se fizeram presentes, que se preocuparam, que foram solidárias, que torceram por mim. Mas bem sei que agradecer é sempre difícil. Posso cometer mais injustiças esquecendo pessoas que me ajudaram do que fazer jus a todas que merecem.

Agradeço primeiramente ao Divino Pai Eterno por tudo, em todos os momentos de minha vida, sem Deus, eu não estaria aqui. Mas meu agradecimento vai além desse simples fato, quando eu não acreditava mais em mim, ele continuou acreditando. E olha que eu dei milhões de motivos para que ele desistisse de mim, mas ele continuou. Obrigada Deus.

Ao meu pai José Raimundo (in memoriam), a minha mãe Terezinha por sempre estarem ao meu lado, e meus irmãos pelo apoio incondicional e por serem os melhores irmãos que alguém pode ter. A minha vó Antônia por ser tão carinhosa e as minhas tias por todo o carinho nesse tempo que passei longe da minha família.

Em especial agradeço a meus orientadores Dr. Clivaldo Araújo onde tive um carinho enorme desde o primeiro encontro, pela atenção e dedicação que me dispensou durante esse mestrado, e Dr. Yuri Molina pela excelente orientação, sendo um orientador muito inteligente e mais paciente do que eu tive a sorte de conhecer.

Aos professores membros da banca examinadora, Dr. Alexandre Castro por todas as sugestões e por me lembrar sempre da minha defesa, principalmente por se tornar meu amigo, ao Dr. Rogério Gaspar, o ser mais paciente que eu tive a sorte de conhecer. Agradeço ambos por suas disponibilidades.

Ao professor Dr. Cicero Souto que é um dos professores mais fantásticos que eu já conheci. Sem contar que é de uma simpatia rara. Obrigada, professor Dr. Darlan por todas as vezes que sempre se mostrou disposto a me auxiliar quando tive dúvidas,

por ser esse professor tão querido e atencioso com todos. Aos professores Helon, Waslon, Protasio e Normando por me ajudarem quando necessitei.

Aos meus amigos que encontrei durante estes anos de caminhada no mestrado, Romerinho, Bruninho, Igor, Carlinhos, Marcos, Rafael, Tati, João, Júnior, Léo, José e Thiago por me ouvirem tantas e tantas vezes. Um agradecimento especial a Iurinho pelo carinho que tem comigo e por andar a universidade inteira coletando os dados para dissertação. Ao vovô mais querido, Wendell, pela contribuição e boa vontade sempre que necessitei, esse trabalho é uma vitória nossa meu amigo. As minhas amigas Pri e Daina pela nossa amizade que supera as circunstâncias. A minha amiga mais linda e especial que alguém pode ter Kelly por ser sempre presente nas minhas conquistas. Aos meus primos André e Raul por estarem presentes em todos os momentos.

As minhas queridas amigas Adriana e Karina que podem ter certeza que foram umas das melhores conquistas do meu mestrado, que nossa amizade seja eterna.

Aos meus amigos do laboratório Grupo de Inteligência Computacional Aplicada (Gica) pela agradável convivência, conversas, cafés e, sobretudo, risadas, Diego, Ricardo, Felipe, Joel, Dennyse, Fer, Rodolfo, Bruninha, Elayne e Gabriel, fui muito feliz no GICA. Enfim, a todos os colegas e professores que contribuíram de alguma forma para o que sou hoje.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VI
RESUMO.....	X
ABSTRACT.....	XI
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 MOTIVAÇÃO	13
1.2 OBJETIVO	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
1.3 PERSPECTIVAS DO TRABALHO	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	19
2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL	21
2.3 MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA	22
2.3.1 Legislação e Regulamentação	23
2.4 FONTES RENOVÁVEIS	24
2.4.1 Energia Hidráulica	25
2.4.2 Energia Eólica	25
2.4.3 Energia da Biomassa	26
2.4.4 Energia Solar.....	27
2.5 MICROCENTRAIS SOLARES.....	28
2.5.1 Painel Fotovoltaico	29
2.5.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede	31
2.6 FLUXO DE CARGA	36
2.6.1 Formulação Matemática do Problema de Fluxo de Carga	36
2.6.1.1 Formulação Básica do Problema	36
2.6.1.2 Expressões Gerais dos Fluxos de Potência.....	38
2.6.2 Método de Solução de Problemas	40
2.6.3 Método de Newton Raphson	41
2.7 O PROGRAMA <i>DIGSILENT POWERFACTORY</i> ®.....	42
2.7.1 Manuais.....	43
2.7.2 Interface Gráfica.....	44
2.7.3 Gerenciador de Dados	45
2.7.4 Simulação.....	46

2.7.5	Linguagem de Programação do <i>DlgSILENT</i> (DPL).....	47
3	PRINCIPAIS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO USANDO INTELIGÊNCIA DE ENXAME	50
3.1	INTELIGÊNCIA DE ENXAME	50
3.1.1	Otimização por Colônia de Formigas	51
3.1.2	Otimização por Colônia de Abelhas	52
3.1.3	Algoritmo Evolutivo (EPSO)	52
3.1.4	Busca por Difusão Estocástica.....	53
3.1.5	Algoritmos Genéticos	53
3.1.6	Otimização por Enxame de Partículas	54
4	OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS.....	56
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS PSO	56
4.1.1	Fluxograma	59
4.2	OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS MODIFICADO (MPSO) ..	59
4.3	ALGORITMO DO MPSO.....	67
4.4	FLUXOGRAMA DO MPSO	68
4.5	TOPOLOGIA E TROCA DE INFORMAÇÕES	69
5	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	73
5.1	MÉTODO PROPOSTO	73
6	RESULTADOS.....	78
6.1	SISTEMA TESTE IEEE 13-BARRAS	78
6.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS DO SISTEMA IEEE 13-BARRAS	80
6.3	SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA UFPB (65 BARRAS).....	86
6.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA UFPB.....	89
7	CONCLUSÃO	96
7.1	TRABALHOS FUTUROS	97
	REFERÊNCIAS.....	98

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1: CONCEITO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	21
FIGURA 2.2: ILUSTRAÇÃO DE UMA USINA HIDRELÉTRICA.	25
FIGURA 2.3: AEROGERADOR EÓLICO DE ELETRICIDADE.	26
FIGURA 2.4: SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA COM BIOMASSA.	27
FIGURA 2.5: GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR USANDO PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS.....	28
FIGURA 2.6: RADIAÇÃO SOLAR MÉDIA PARA REGIÕES BRASILEIRAS.	29
FIGURA 2.7: CÉLULAS FOTOVOLTAICAS, CÉLULAS ASSOCIADAS FORMANDO UM MÓDULO E MÓDULOS ASSOCIADOS DENOMINADOS DE ARRANJOS FOTOVOLTAICO.	31
FIGURA 2.8: USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA.	34
FIGURA 2.9: ORGANIZAÇÃO E COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE ELÉTRICA.....	35
FIGURA 2.10: MODELO Π	38
FIGURA 2.11: INTERFACE PARA CONSTRUÇÃO DE REDES: I - TELA PARA CONSTRUÇÃO DA REDE: II - CAIXA DE FERRAMENTA COM ELEMENTOS QUE PODEM SER USADOS PARA COMPOR A REDE.....	45
FIGURA 2.12: GERENCIADOR DE DADOS.	46
FIGURA 2.13:ESTRUTURA DE COMANDO DPL.	48
FIGURA 4.1: FLUXOGRAMA DO PSO.....	59
FIGURA 4.2: CONCEITO DE MODIFICAÇÃO DE UM AMBIENTE DE BUSCA PELO MPSO	62
FIGURA 4.3: COMPORTAMENTO DO MPSO.	64
FIGURA 4.4: COMUNICAÇÃO DO MPSO.....	65
FIGURA 4.5: EXEMPLO DO MPSO.....	66
FIGURA 4.6: ITERAÇÕES DO MPSO.	66
FIGURA 4.7: FIM DAS ITERAÇÕES.....	67
FIGURA 4.8: FLUXOGRAMA DO ALGORITMO MPSO.	68
FIGURA 4.9: CONTINUAÇÃO DO ALGORITMO DO MPSO.....	69
FIGURA 4.10: TOPOLOGIA LOCAL (A) E TOPOLOGIA GLOBAL(B).....	70
FIGURA 5.1: CARGA E PF CONECTADA A BARRA COM MESMO NÚMERO.	75
FIGURA 6.1: SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO IEEE-13 BARRAS.....	78

FIGURA 6.2: DIAGRAMA DE CLASSES DO MPSO.	79
FIGURA 6.3: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA PRIMEIRA POPULAÇÃO.....	81
FIGURA 6.4: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA POPULAÇÃO CINQUENTA.....	82
FIGURA 6.5: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA POPULAÇÃO SETENTA.	82
FIGURA 6.6: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA POPULAÇÃO DUZENTOS.	83
FIGURA 6.7: FUNÇÃO OBJETIVO.	84
FIGURA 6.8: SISTEMA COM PF E SEM PF.....	85
FIGURA 6.9: SOMA DAS POTÊNCIAS DOS 12 TRANSFORMADORES CONHECIDOS.....	87
FIGURA 6.10: SOMA DA CURVA DE CARGA DA SUBESTAÇÃO PRINCIPAL.....	88
FIGURA 6.11: SOMA DAS CURVA DE CARGA DOS TRANSFORMADORES DESCONHECIDOS.....	88
FIGURA 6.12: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA PRIMEIRA POPULAÇÃO.....	90
FIGURA 6.13: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA POPULAÇÃO 30.....	90
FIGURA 6.14: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA POPULAÇÃO 50.....	91
FIGURA 6.15: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA POPULAÇÃO 70.....	92
FIGURA 6.16: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA POPULAÇÃO 200.....	92
FIGURA 6.17: FUNÇÃO OBJETIVO.	93
FIGURA 6.18: PERFIL DE TENSÃO DA UFPB.	94
FIGURA 7.1: SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA UFPB.	107
FIGURA 7.2: DIMENSIONAMENTO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	<i>Artificial Bee Colony</i>
ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DlgSILENT	<i>Digital Simulation and Electrical Network</i>
DPL	DlgSILENT Programming Language
F.O	Função Objetivo
F.P	Função Penalidade
Fbest	Variável que representa a melhor posição até o momento
GA	<i>Genetic Algorithms</i>
Gbest	Melhor solução da população
GD	Geração Distribuída
IEA	<i>Enhancing the Market Deployment of Energy Technology</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
K	Número de Interação
kW	Quilowatts
MW	Megawatts
Pbest	Melhor solução da partícula
PF	Painel fotovoltaico
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SDC	<i>Stochastic Diffusion Search</i>
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
Wh/m ²	Watt-hora por metro quadrado
MWp	Megawatts de pico
$V_{potência}$	Vetor de potência;
$M_{popGeradores}$	Matriz de população de painéis fotovoltaicos;
V_{perdas}	Vetor de perdas totais;
$V_{DesvioTotal}$	Vetor de desvios de tensão;
$M_{popPbest}$	Matriz de população de <i>Pbest</i> ;

$M_{popGbest}$	Matriz de população de $Gbest$;
$M_{velocidade}$	Matriz de velocidade;
$V_{ultrapassagem}$	Vetor de ultrapassagens de potência.

RESUMO

DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS USANDO ENXAME DE PARTÍCULAS MODIFICADO PARA REDUZIR AS PERDAS DE ENERGIA E MELHORAR O PERFIL DE TENSÃO

Este trabalho apresenta um método de dimensionamento de painéis fotovoltaicos usando enxame de partículas modificado (MPSO), a fim de reduzir as perdas de energia e melhorar o perfil de tensão. Para a implementação é utilizado o *software PowerFactory*[®], especificamente a linguagem de programação em *DlgSILENT* (DPL). O método proposto foi aplicado inicialmente no sistema IEEE 13-barras. Após a validação, foi aplicada a um sistema real, Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Os resultados mostram que o método proposto tem a capacidade de proporcionar as melhores dimensões de módulos fotovoltaicos distribuídos na micro rede da Universidade, melhorando o perfil de tensão e reduzindo as perdas de energia.

Palavras-chave: Painéis Fotovoltaicos, Enxame de Partículas Modificado, *DlgSILENT PowerFactory*[®].

ABSTRACT

OPTIMAL SIZING OF PHOTOVOLTAIC PANELS USING MODIFIED PARTICLE SWARM TO REDUCE POWER LOSSES AND IMPROVE THE VOLTAGE PROFILE

This work presents a method of sizing photovoltaic panels using modified Particle swarm (MPSO) in order to reduce power losses and improve the voltage profile. For implementation was used the PowerFactory[®] software, specifically programming language DigSILENT (DPL). The proposed method was applied at the first time in the IEEE 13-bus system. After validating, it was applied to a real system, Federal University of Paraíba (UFPB). The results show that the proposed method have the ability to provide the best dimensions of photovoltaic panels distributed at the University, improving of the voltage profile and reducing energy losses

Keywords: Photovoltaic panels, Modified Particle Swarm, *DigSILENT PowerFactory[®]*

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

As fontes renováveis são a grande aposta da humanidade para a produção de energia em tempos onde a sustentabilidade e a preocupação com o meio ambiente passaram a ser cada vez mais priorizados, assim como a qualidade de energia elétrica. Dentre as fontes renováveis de energia disponíveis, a energia solar se destaca como uma das mais sustentáveis e que causa menor impacto sobre meio ambiente (VILLALVA, 2013).

A conversão de energia solar em energia elétrica por meio de células fotovoltaicas vem se apresentando como uma das melhores alternativas no aproveitamento da energia proveniente do sol, além de ser, dentre as renováveis, a fonte que apresenta maior expectativa de crescimento para os próximos anos. Sabe-se que no Brasil a principal fonte de geração de eletricidade são as hidrelétricas (ELETROBRAS, 2015).

A Geração Distribuída (GD) de energia elétrica pode vir a ser uma solução para os sistemas elétricos (maior eficiência, menor custo de geração, confiabilidade, descongestionamento de linha de transmissão, diminuição do impacto ambiental etc.), sendo definida como uma fonte de geração conectada diretamente à rede de distribuição ou ao consumidor final.

Uma das formas mais frequentes de geração distribuída é realizada pela inserção de energia solar fotovoltaica e/ou eólica nos sistemas de distribuição. Essa introdução de energia no sistema elétrico pode provocar uma mudança de paradigma (descentralização da geração) na configuração das redes de distribuição que possuem tradicionalmente grandes volumes de geração de forma centralizada (BRAUN-GRABOLLE, 2010).

A expansão da geração distribuída (Microgeração) requer estudos apropriados e análises minuciosas dos sistemas de distribuição para poder conectar as fontes utilizadas na GD (ACKERMANN, ANDERSSON e SODER, 2000). É importante observar que a apropriada conexão destas fontes de geração distribuída à rede deve ser de maneira ordenada com estudos elétricos prévios sobre a localização, potência gerada e/ou horas de atuação. Esses estudos podem determinar uma significativa

melhoria das características técnicas e econômicas em um sistema elétrico, tanto em relação a solução de problemas operacionais já existentes quanto ao planejamento de novas redes elétricas (DUGAN, MCDERMOTT e BALL, 2000) (DUGAN e PRINCE, 2004). Entretanto, a entrada dessas novas fontes de energia sem o devido estudo tende a causar vários transtornos ao sistema, acarretando problemas ambientais, regulatório e operacional, sendo estes aspectos, constantemente, analisados na atual realidade das concessionárias de energia elétrica.

De acordo com Koto (2013) a utilização de geração distribuída conectada à rede elétrica traz benefícios para os consumidores, empresas de energia e todo sistema elétrico (operador do sistema), tais como a redução de perdas técnicas, melhoria na qualidade de energia, o que permite a obtenção de maior eficiência energética, devido a integração da geração distribuída com a geração centralizada (geração convencional). Para que a operação e o planejamento do sistema elétrico de inclusão de geração distribuída possa ser otimizado, confiável e seguro, é necessário o uso adequado de ferramentas para as análises desejadas.

Uma das ferramentas usualmente utilizadas nas análises de redes de distribuição é o fluxo de carga. Recentemente, existem vários métodos para analisar o impacto da GD em sistemas de distribuição. Alguns estudos fazem uso do método de Monte Carlo (MÉNDEZ, 2006), outros utilizam uma metodologia baseada em *Tabu search algorithm* (RAMIREZ-ROSADO e DOMINGUEZ-NAVARRO, 2006), lógica *fuzzy* (EKEL, TERRA e JUNGES, 1999), inteligência por enxame (BARIN, 2007), entre outros. Estes últimos três métodos citados, além de otimizar o sistema, também podem ser usados para buscar a localização mais adequada para instalação de uma fonte de GD (NARA, HAYASHI, *et al.*, 2001) (KIM, LEE, *et al.*, 2002).

Os métodos podem levar em consideração os mais variados critérios de ordem quantitativa e qualitativa. Deve-se observar a importância da correta escolha destes critérios, pois a ausência de um único critério que possua elevada importância para o sistema em questão pode comprometer a validade dos resultados obtidos (BARIN, 2007). Nos critérios quantitativos, é possível considerar, por exemplo, níveis de tensão, qualidade de energia, redução de perdas de potência, custos, etc.

Neste contexto, a presente pesquisa pretende validar a utilização de alguns dos critérios já citados, a partir dos resultados de simulações, obtidos com auxílio do software *DlgSILENT PowerFactory*® (ferramenta de simulação utilizada). Vislumbra-

se encontrar o melhor dimensionamento (painéis fotovoltaicos) em um sistema de distribuição utilizando inteligência artificial (baseado no método de Otimização por Enxame de Partículas - do inglês, *Particle Swarm Optimization (PSO)*), sendo utilizado como estudo de caso a rede de distribuição de energia elétrica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

O software *DigSILENT PowerFactory*® será utilizado para simulação do fluxo de carga, obtendo a Função Objetivo (FO) na linguagem de programação DPL. O algoritmo MPSO é apresentado para dimensionar os painéis fotovoltaicos, considerando critérios de perdas de potências e níveis de tensão em um sistema de distribuição. Objetiva-se com o estudo o melhoramento da qualidade de energia, confiabilidade, melhor perfil de tensão e menores perdas para o sistema.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

A proposta da pesquisa consiste em dimensionar painéis fotovoltaicos na micro rede da Universidade Federal da Paraíba, visando redução de perdas e melhorar o perfil de tensão, usando um método de Inteligência Artificial, especificamente, de Otimização por Enxame de Partículas Modificado (MPSO) para determinar as melhores dimensões dos painéis fotovoltaicos, avaliando o comportamento do mesmo com a integração na rede elétrica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar simulações de fluxo de carga na rede de distribuição da UFPB com e sem a presença de painéis fotovoltaicos;
- Avaliar critérios de tensão e de perdas no sistema com e sem a conexão dos painéis fotovoltaicos;
- Propor um Método de dimensionamento de microgeração distribuída baseado em inteligência artificial utilizando a plataforma *DigSILENT PowerFactory*®;
- Propor o método de Otimização por Enxame de Partículas Modificado.

1.3 PERSPECTIVAS DO TRABALHO

Baseando-se no amplo potencial de energia solar fotovoltaico que o Brasil possui, o país poderá torna-se, futuramente, um dos principais líderes mundiais no emprego de energias renováveis.

A energia solar e eólica são as fontes geralmente empregadas e com maior potencial para utilização na geração distribuída. Com a crescente importância da energia solar, devido a conexão, em particular, dos painéis fotovoltaicos ligados diretamente a rede elétrica, sua utilização deverá ter um aumento considerado nos próximos anos, principalmente, em razão da recente normalização pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) da microgeração e minigeração com sistemas de distribuição conectados à rede e alimentados por fontes renováveis de energia (VILLALVA, 2013).

O percentual de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, próximo ao ponto de consumo, vem crescendo ao longo dos anos, gradativamente, tomando espaço que anteriormente pertencia as aplicações isoladas, e corresponde a mais de 90 % da capacidade instalada (geração de eletricidade) em países líderes do mercado (IEA, 2009).

O Brasil, comparado com outros países detentores da tecnologia dos sistemas fotovoltaicos, está em fase inicial de desenvolvimento. Contudo, o país possui maior disponibilidade de insolação que outros países como a Alemanha, onde a melhor insolação é cerca de 3.500 Wh/m^2 , disponível apenas em uma pequena parte do seu território. Já o Brasil apresenta resultados de insolação diária entre 4.500 e 6.000 Wh/m^2 para a geração de energia fotovoltaica (VILLALVA, 2013).

Um dos diferenciais do presente trabalho consiste em um algoritmo de otimização modificado que identifica o dimensionamento de unidades de geração distribuída (painéis fotovoltaicos) no sistema de distribuição de energia elétrica da Universidade Federal da Paraíba, tendo como finalidade a redução de perdas e a melhoria do perfil de tensão. O algoritmo de otimização por enxame de partículas será desenvolvido na linguagem de programação DPL, visando identificar a melhor dimensionamento com limites de critérios de tensão e os valores de cada painel fotovoltaico fixos pré-estabelecidos. O desempenho desta metodologia proposta é

testado em princípio no sistema radial IEEE 13-barras, para posteriormente usar em um sistema real de distribuição da Universidade.

Atualmente a universidade (UFPB) é atendida pela rede da Energisa de 13,8 kV, valor de fornecimento entregue pela concessionária local para a instituição, que tem como demanda contratada na ponta e fora da ponta 3.580 kW e 4.872 kW, respectivamente. Imagina-se que a partir da solução de otimização proposta pela técnica de otimização por enxame de partículas modificado (MPSO), possa-se dimensionar os painéis fotovoltaicos, identificando-se os locais mais adequados. Através da microgeração distribuída pretendida, supõe-se que haja uma redução das demandas contratadas, o que vem a contribuir diretamente com o sistema elétrico de distribuição (menor potência de transmissão).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica dos assuntos relacionados ao tema e objetivos da pesquisa. Um panorama do Brasil sobre geração distribuída e microgeração com suas respectivas fontes de energia utilizadas são apresentadas, com maior ênfase voltada para energia solar fotovoltaica. Em seguida, uma síntese sobre o método de Fluxo de Carga e características do *software DlgSILENT PowerFactory®*, usando a linguagem de programação DPL, onde serão desenvolvidas as simulações do sistema de distribuição da UFPB para verificar o melhor dimensionamento da conexão de uma microgeração em diferentes pontos do sistema, considerando perdas de potência no sistema.

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Embora na literatura haja diferentes definições sobre geração distribuída, o conceito é praticamente o mesmo entre os autores. Geração distribuída pode ser tratada como a geração de energia em pequena escala (micro ou minigeração) de forma descentralizada, podendo vir de uma variedade de fontes e tecnologia instalada por um consumidor de energia elétrica que está ligado ao sistema de distribuição da rede, ou seja, é uma fonte de energia elétrica ligada diretamente ao sistema de distribuição (ACKERMANN, ANDERSSON e SODER, 2001).

Segundo Braun-Grabolle (2010), a diferença entre GD e geração convencional (geração centralizada) consiste no fato de que a GD entrega a energia diretamente a rede de distribuição onde está localizado o consumidor final, permitindo assim aliviar as linhas de transmissão e os sistemas de distribuição. Além disso, esse tipo de geração não implica em dimensões de geração máxima ou mínima, podendo ser formada por unidades de baixa e/ou alta potência de geração. Logo o consumidor da GD pode estar localizado em uma região industrial, em um prédio comercial ou regiões remotas.

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), define a GD como uma unidade de geração com instalações suficientemente pequena em relação as grandes centrais de geração, permitindo sua conexão em um ponto próximo a rede elétrica existente junto aos centros de carga (IEEE, 2008).

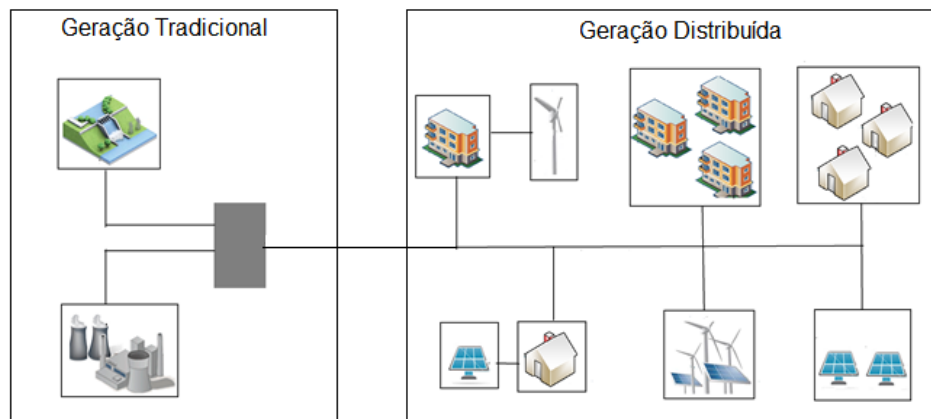
O *Conseil International Grands Réseaux Electriques* (CIGRE) define GD como unidades de geração com capacidade máxima de 50 MW a 100 MW, que geralmente são conectadas as rede de distribuição e que não tem geração centralizada (CIGRE, 2008).

No Brasil, GD é definida por meio do decreto nº 5.163 em 30 de julho de 2004 sendo definida da seguinte forma (PRESIDÊNCIA, 2004):

“Art.14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados (...), conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquele proveniente de empreendimento:

- I- Hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e
- II- Termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, (...)”

A GD oferece inúmeras vantagens ao setor elétrico e benefícios ao usuário para o sistema de abastecimento de eletricidade, visto que a disposição da unidade de geração perto do local de consumo permite a diminuição das perdas associadas ao transporte de energia elétrica e melhoria do perfil de tensão, além de uma maior diversificação das tecnologias empregadas para produção de energia elétrica, principalmente proporcionando bem-estar e melhor qualidade de vida com a introdução de fontes limpas de energia (OLADE, 2011). Na FIGURA 2.1 é ilustrado o conceito geralmente utilizado para geração distribuída demonstrando suas fontes e distribuição para o sistema.

FIGURA 2.1: CONCEITO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA¹.

O esgotamento dos recursos não renováveis pelas usinas convencionais que utilizam combustíveis fósseis faz o uso da geração distribuída como fontes alternativas de energia elétrica crescer em todo o mundo e também no Brasil, incentivando ao uso de recursos renováveis disponíveis localmente (OLADE, 2011). De acordo com Villalva (2013) as fontes de energia solar fotovoltaica e eólica são as fontes alternativas com maior potencial de utilização para geração distribuída de eletricidade em termo ambientais. A utilização das GD, podem e devem contribuir na redução das emissões de gás de efeito estufa.

2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

O incentivo inicial da GD surgiu através dos Estados Unidos por meio de mudanças na legislação, realizadas pelo *Public Utilities Regulatory Policies Act* (PURPA) em 1978 e ampliadas em 1992 pelo *Energy Policy Act*, com a desregulamentação da geração de energia. A expansão da geração distribuída foi facilitada pelo progresso tecnológico mundial no campo da computação, resultando em controle e processamento de dados mais rápidos e com menor custo, e no campo das telecomunicações, oferecendo maior rapidez e menor custo na transmissão do maior volume de informação (INEE, 2015). Até os anos 60, a geração distribuída era

¹ Fonte: Adaptada de (VILLALVA, 2013).

proibida no Brasil e até meados dos anos 90, a GD era destinada apenas a autoprodução de energia e não era permitido ser conectada com a rede elétrica.

O Brasil vem seguindo a tendência mundial, reestruturando o setor elétrico e as principais instituições relacionadas à geração, transmissão, distribuição, em que a comercialização e regulação do setor sofreram profundas mudanças em suas atribuições ou funções (BRAUN-GRABOLLE, 2010). Algumas leis, decretos e resoluções, foram criados com o intuito de regulamentar esse novo mercado.

2.3 MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração e o fornecimento de energia elétrica causam consideráveis danos ambientais, desde seu processo de geração até a efetiva distribuição. Quanto maior for o sistema elétrico, ou seja, quanto maior for o trajeto entre geração e o consumo da energia, maiores serão os impactos em razão da presença de construções e equipamentos de transmissão e distribuição, além de acrescentar uma perda extra de potência ao sistema.

De acordo com Falcão (2013), em países da Europa, Ásia e América do Norte a instalação de unidades de geração, em geral, de pequeno ou médio porte, baseadas em fontes renováveis, têm crescido gradativamente em residências, condomínios, edifícios residências, comerciais ou pequenas indústrias.

O conceito de microgeração surge junto com o conceito de geração distribuída conforme já salientado. A microgeração distribuída pode ser considerada como toda central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 100 kW, porém, esse nível de potência pode variar de acordo com a regulamentação local de cada país. A microgeração de energia elétrica tem como objetivo principal a utilização de fontes renováveis de energia. A minigeração distribuída tem potência instalada maior que 100 kW e menor ou igual a 1 MW.

As centrais de microgerações e minigerações utilizam na sua grande maioria fontes baseadas em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificadas conforme regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e interligadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2012). No Brasil, a geração distribuída é geralmente limitada por uma potência instalada de 30 MW ou de 50 MW. Mas pode existir situações, que

mesmo com potências maiores poderiam ser consideradas geração distribuída (OLADE, 2011) (XAVIER, BOROTNI e HADDAD, 2014).

No Brasil, segundo a ANEEL (2012) microgerador de energia é um consumidor produtor de energia elétrica que basicamente gera para consumo próprio, sendo seu excedente de geração vendido para o gestor da rede elétrica (em forma de crédito). Esse consumidor pode ser residencial ou comercial. Sistemas de microgeração podem possuir uma única fonte, ou combinar duas ou mais fontes renováveis, desde que não seja excedido o limite de produção. São consideradas fontes apropriadas para microgeração, a energia solar fotovoltaica, energia proveniente do vento (microturbinas), hidráulica, biomassa entre outras.

A microgeração e minigeração distribuída podem trazer grandes vantagens, como a redução de perdas, menor complexibilidade em projetos de geração, confiabilidade, etc. Porém, podem trazer alguns problemas técnicos e econômicos que precisam ser bem equacionados e resolvidos para permitir um crescimento adequado desse tipo de geração (FALCÃO, 2013).

2.3.1 Legislação e Regulamentação

A partir do ano de 1996, o setor elétrico brasileiro vem passando por mudanças e reestruturações, como já mencionado anteriormente. A base legal para esta reestruturação é a Lei 9.074/1995, que estabeleceu normas para outorgar e prorrogar as concessões e permissões de serviços públicos, e criou ainda o conceito de Consumidor Livre e o Decreto nº 2/003 de 10/09/1996, que regulamenta a produção de energia elétrica por Produtor Independente de Energia (PIE) e por Autoprodução de Energia (APE). Em particular, o § 6 do Art.15 da Lei 9.074/1995, assegura ao PIE e ao APE o livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição de concessionários, mediante ressarcimento do custo de transporte envolvido (FRIGO, 2013).

A partir da criação da ANEEL pela Lei 9.648/1998, várias resoluções e regulamentos foram criados para formar o atual marco regulatório brasileiro.

Em dezembro de 2012, entrou em vigor a resolução Normativa nº 482, de 17/04/2012, da ANEEL, que estabeleceu as condições gerais para uso de microgeração e minigeração a partir de fontes renováveis e alternativas com sistema

de distribuição conectados a rede elétrica de baixa tensão. A publicação desta resolução constitui um marco regulatório em nosso País, beneficiando a população e obrigando as concessionárias de energia elétrica a adaptar-se à entrada de sistema de geração distribuída com fontes alternativas, dentre elas, a fotovoltaica, em suas redes de distribuição de baixa tensão (VILLALVA, 2013).

Segundo a Resolução Normativa nº 517/2012 da ANEEL, os créditos da quantidade de energia gerada continuam válidos para serem consumidos por um prazo de 36 meses. Esse sistema de compensação transforma consumidor cativo em também um produtor de energia. Para efeito, o sistema de microgeração ou minigeração distribuída, quanto a sua instalação, deve ser analisado previamente pela distribuição local, pois seu funcionamento necessita de alguns requisitos, que incluem também um medidor de energia específico.

2.4 FONTES RENOVÁVEIS

As fontes renováveis de energia são aquelas oriundas de recursos naturais encontrados em abundância na natureza ou que se renovam com facilidade. São exemplos de fontes renováveis, a luz do sol, a energia cinética do vento, a força das águas, marés, geotérmica, etc. Outra característica comumente associada às fontes renováveis é que, não causam danos ao meio ambiente quando comparadas com as fontes não renováveis. As fontes renováveis também podem ser definidas como as que não se utilizam da queima de combustíveis fósseis para produção de energia elétrica (SOUZA, 2009).

Algumas das novas tecnologias de geração distribuída são baseadas em fontes renováveis de energia eólica e energia solar fotovoltaica. Sendo esta última fonte de geração a escolhida, neste trabalho, para microgeração de energia elétrica.

Nas próximas seções serão abordadas as principais fontes de energia renováveis adotadas atualmente na matriz energética mundial para microgeração de eletricidade.

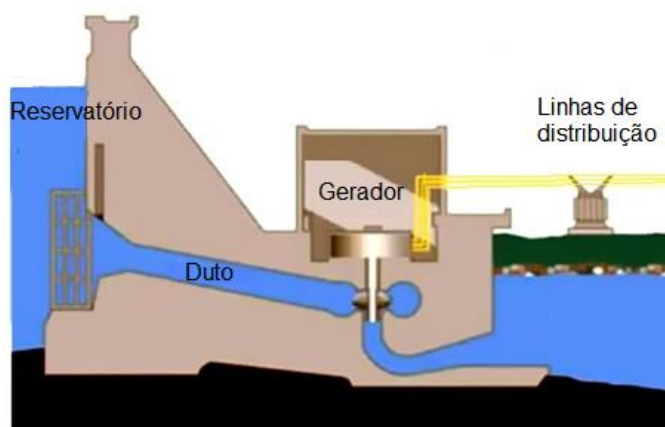
2.4.1 Energia Hidráulica

A energia hidráulica é muito empregada no Brasil. Quase toda a eletricidade gerada no país tem origem nessa fonte (VILLALVA, 2013). Dentre as fontes renováveis, é a que se apresenta em maior proporção na matriz energética mundial.

A contribuição da energia hidráulica na matriz energética nacional segundo o Balanço Energético Nacional é de aproximadamente 83% de toda a energia elétrica gerada no País. Apesar da tendência de aumento de outras fontes renováveis, bem como a restrições socioeconômicas e ambientais de projetos hidrelétricos e aos avanços tecnológicos no aproveitamento de fontes não convencionais, tudo indica que a energia hidráulica continuará sendo, por muitos anos, a principal fonte geradora de energia elétrica do Brasil (ANEEL, 2015).

A transformação da energia hidráulica em energia elétrica é realizado por meio de turbinas hidráulicas acopladas a geradores. Na FIGURA 2.2 pode ser visto o esquemático de geração de energia elétrica em uma hidrelétrica.

FIGURA 2.2: ILUSTRAÇÃO DE UMA USINA HIDRELÉTRICA².



2.4.2 Energia Eólica

A energia eólica pode ser definida como uma fonte de energia renovável resultante da força do vento. Para o aproveitamento dessa energia utilizam-se mecanismos denominados aerogeradores (turbinas eólicas), responsáveis pela

² Fonte: < <https://www.precisamosdeenergia.blogspot.com.br> > Acesso em jul. 2015.

conversão da energia mecânica em energia elétrica, que, posteriormente, a esse processo, pode ser aproveitada de forma direta (inserida na rede) ou armazenada em baterias.

Umas das fontes inesgotáveis, a energia eólica, desde 2004, vem sendo explorada com sucesso para geração de eletricidade, tendo como vantagens o pouco impacto ambiental e produção de poucos resíduos (VILLALVA, 2013). O princípio de funcionamento do gerador eólico é similar ao do gerador hidráulico, substituindo água pelo vento. Na FIGURA 2.3 é ilustrado um gerador eólico de eletricidade.

FIGURA 2.3: AEROGERADOR EÓLICO DE ELETRICIDADE³.



2.4.3 Energia da Biomassa

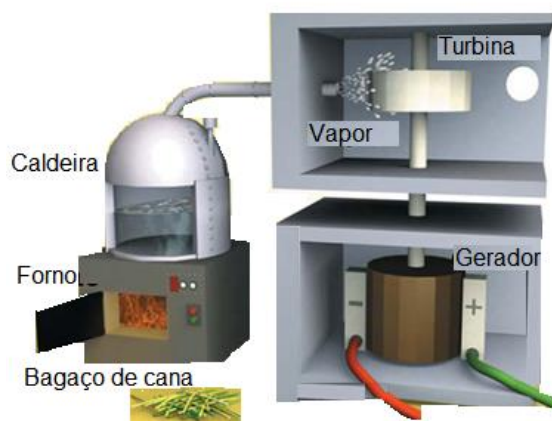
A energia da biomassa é obtida a partir da queima de matéria orgânica de origem vegetal ou animal e processos químicos de fermentação. É importante salientar que os combustíveis fósseis são uma forma de biomassa não renovável.

Uma das principais vantagens da biomassa renovável é que seu aproveitamento pode ser feito diretamente, por meio da combustão em fornos, caldeiras, etc. Essa fonte é considerada uma fonte limpa de energia, pois o carbono emitido na sua queima é depois capturado da atmosfera pelas plantas na produção de fotossíntese dentro de um ciclo fechado de queima e replantio (VILLALVA, 2013).

³ Fonte: < <https://www.wikienergia.pt> > Acesso em jul. 2015.

Atualmente a biomassa vem sendo bastante utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração e no fornecimento de energia elétrica para demandas isoladas da rede elétrica. Na FIGURA 2.4 é ilustrado um sistema de geração de energia elétrica com biomassa.

FIGURA 2.4: SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA COM BIOMASSA⁴.

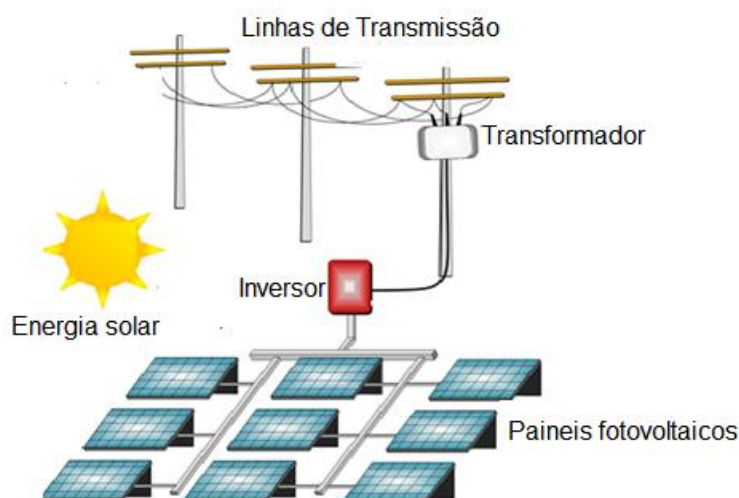


2.4.4 Energia Solar

A energia solar pode ser utilizada para produzir eletricidade pelo efeito fotovoltaico que acontece através da conversão direta da luz solar em energia elétrica (VILLALVA, 2013).

O Brasil possui grande potencial energético solar, algo em torno de 2500 MW, potencial superior à maioria dos países de primeiro mundo (FRIGO, 2013). A energia solar é considerada, limpa, inesgotável, gratuita e silenciosa. A conversão direta de energia solar em energia elétrica pode ser feita basicamente de dois modos, os efeitos termoelétricos e fotovoltaicos. Os sistemas solares térmicos, são empregados para realizar aquecimento ou para produzir eletricidade, os sistemas fotovoltaicos têm a capacidade de captar diretamente a luz solar e produzir corrente elétrica. Essa corrente é coletada e processada por dispositivos controladores e conversores. Na FIGURA 2.5 é apresentada a ilustração de uma central de geração de energia solar fotovoltaica.

⁴ Fonte: < <http://www.prysmianclub.com.br> > Acesso em jul. 2015.

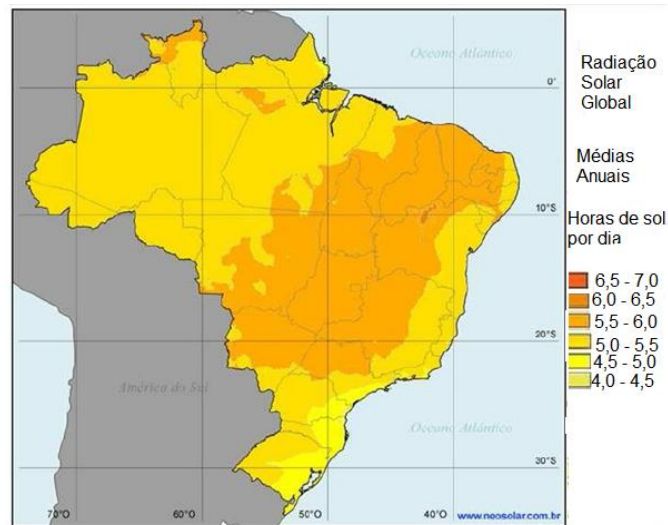
FIGURA 2.5: GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR USANDO PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS⁵.

Por ser um dos objetivos do presente estudo, a energia solar fotovoltaica será tratada com mais detalhes nos próximos tópicos, sendo estudados os aspectos técnicos da geração de energia elétrica. Além disso, é importante salientar que essa fonte tornou-se a mais explorada comercialmente no Brasil em nível de microgeração (FRIGO, 2013).

2.5 MICROCENTRAIS SOLARES

Como mencionado, anteriormente, são várias as fontes alternativas disponíveis para a produção de energia elétrica, a escolha da fonte ideal pode ser obtida através de um estudo adequado, o qual poderá revelar a melhor escolha. Na FIGURA 2.6 é mostrada a radiação solar média para as regiões brasileiras.

⁵ Fonte:< <http://www.eduardoscience.blogspot.com.br> > Acesso em jul. 2015.

FIGURA 2.6: RADIAÇÃO SOLAR MÉDIA PARA REGIÕES BRASILEIRAS⁶.

No Brasil a energia solar fotovoltaico é utilizada em pequenos sistemas isolados instalados em locais onde não possui rede elétrica, lugares de difícil acesso, ou onde a instalação de linhas de distribuição não é viável. Devido os sistemas serem isolados, existe a necessidade de utilização de bancos de bateria a fim de armazenar a energia gerada durante os picos de potência solar, dessa forma, suprindo o sistema durante o período de baixa ou nenhuma geração elétrica (dias chuvosos e o período da noite).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica vêm aumentando no Brasil, principalmente, com a recente aprovação pela ANEEL da microgeração e minigeração em sistemas de distribuição conectados à rede. Nesses sistemas, quando a demanda da unidade for maior que a geração o sistema dispensa banco de baterias. Pode-se dizer que a energia gerada nessa configuração de sistema é armazenada na rede e o balanço entre geração e consumo é feito através de um medidor especial (FRIGO, 2013).

2.5.1 Painel Fotovoltaico

A energia solar fotovoltaica consiste na conversão direta da energia radiante contida na luz solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. Esse fenômeno

⁶ Fonte: < <http://www.neosolar.com.br> > Acesso em jul. 2015.

fotovoltaico ocorre quando a luz solar incide no dispositivo denominado células fotovoltaicas. Estas células são compostas de material semicondutor que convertem diretamente a radiação solar em eletricidade, sendo o silício o material mais usado na sua fabricação, por ser abundante e barato, podendo ser de diferentes tipos: cristais monocristalinos, policristalinos, silício amorfo, entre outros (BRITO, 2015).

O material mais utilizado atualmente em escala industrial é o de silício monocristalino que tem aspectos geralmente uniforme azul escuro ou preto. Essas células são as mais eficientes (larga escala) encontradas no comércio, possuindo eficiência de conversão maior que as de silício policristalino e amorfos. Entretanto as células monocristalinas tem maior custo por exigirem um processo de fabricação mais rigoroso.

As células de silício policristalino têm menor custo em razão do processo de fabricação ser menos rigoroso (complexo), porém, sua eficiência é menor em relação as de silício monocristalino. Já as células de silício amorfo são as que possuem menor custo de fabricação se comparada as outras já mencionadas e a possibilidade de fabricação de células com grande área (FRIGO, 2013). No entanto, conforme Villalva (2013), o uso de silício amorfo apresenta desvantagens de baixa eficiência quando comparada com as células monocristalina e policristalina. Essas células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim, gradativamente, a eficiência ao longo da vida útil. Na Tabela 2.1, faz-se comparações entre as células fotovoltaicas citadas anteriormente, apresentando as maiores eficiências de conversão, em laboratório, célula comercial e módulo comercial.

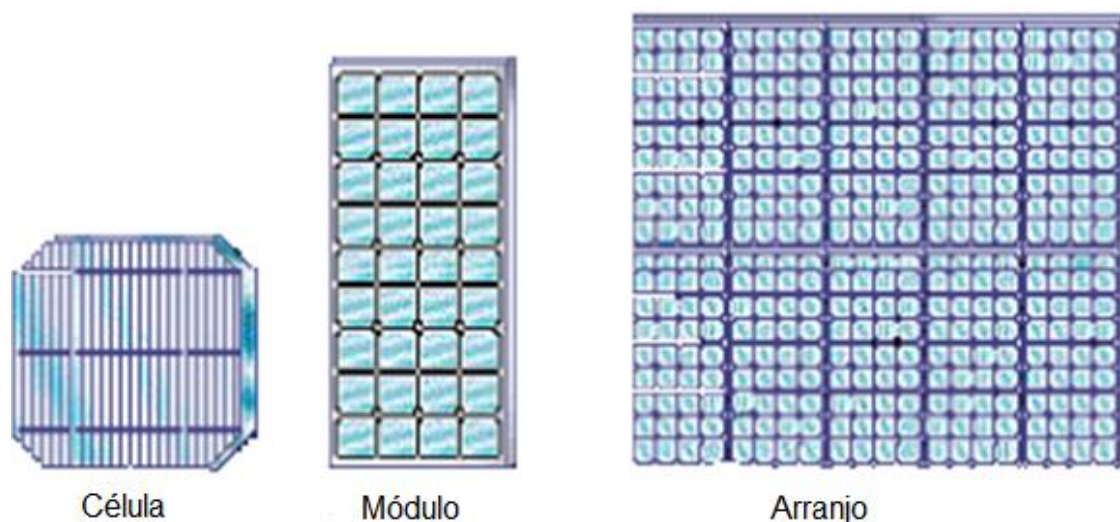
TABELA 2.1: COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS⁷.

Material da célula	Eficiência da célula em laboratório	Eficiência da célula comercial	Eficiência dos módulos comerciais
Monocristalino	24,7 %	18 %	14 %
Policristalino	19,8 %	15 %	13 %
Silício amorfo	13 %	10,5 %	7,5 %

⁷ Fonte: (VILLALVA, 2013).

Uma célula fotovoltaica sozinha produz pouca eletricidade, no entanto, várias células agrupadas podem formar painéis, placas ou módulos. O módulo fotovoltaico é constituído por várias células normalmente conectadas em série ou em paralelo, porém, a conexão mais comumente utilizada é a em série. Um número elevado desses módulos fotovoltaicos conectados em série ou em paralelo é denominado arranjo fotovoltaico. Na FIGURA 2.7 é representado um arranjo formado por módulos e células fotovoltaicas.

FIGURA 2.7: CÉLULAS FOTOVOLTAICAS, CÉLULAS ASSOCIADAS FORMANDO UM MÓDULO E MÓDULOS ASSOCIADOS DENOMINADOS DE ARRANJOS FOTOVOLTAICO⁸.



2.5.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) é uma aplicação da tecnologia de energia solar fotovoltaica, na qual o arranjo fotovoltaico atua como fonte complementar ao sistema elétrico, ao qual, está conectado. Diferente do sistema autônomo (isolado), o sistema conectado é empregado em locais onde existe energia elétrica, com objetivos de reduzir ou eliminar o consumo da rede pública ou gerar excedentes de energia.

⁸ Fonte: (FRIGO, 2013).

Em alguns países, segundo Villalva (2013), os consumidores são incentivados a produzir excedentes de energia e são remunerados pela eletricidade que injetam na rede, passando a serem produtores de eletricidade.

Existem basicamente dois tipos de SFCR: o primeiro é representado pelas grandes centrais fotovoltaicas que geram grandes quantidades de energia de forma centralizada constituindo usinas de geração de energia elétrica, o segundo gera a energia de forma descentralizada micro e minissistemas de geração distribuída instalado próximo ou no local de consumo.

As grandes centrais fotovoltaicas têm sido instaladas obedecendo a duas razões fundamentalmente: (i) como uma alternativa à geração centralizada de energia produzida através de combustíveis de origem fóssil ou nuclear; e (ii) como suporte aos sistemas de distribuição da concessionária, proporcionando-lhe maior estabilidade a tensão elétrica (IEA, 2009). Mas, as grandes centrais fotovoltaicas têm as desvantagem de ocuparem grandes áreas, serem muito afastada do centro de consumo, necessitando de sistema de transmissão e distribuição. Apesar das grandes centrais fotovoltaicas terem potência inferior em comparação as centrais nucleares e hidrelétricas, não há nenhuma barreira técnica ou qualquer restrição quanto a confiabilidade desse sistema (fotovoltaico) que vem crescendo ao longo dos anos.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser usados na construção de usinas de geração de energia elétrica conectadas ao sistema elétrico através de transformadores e linhas de transmissão, da mesma forma de hidrelétricas e outras fontes. Usinas de energia solar fotovoltaica são constituídas com um elevado número de painéis fotovoltaicos e vários inversores centrais conectados à rede de baixa/alta tensão, monofásica/trifásica. Na

FIGURA 2.8 é mostrada uma usina de geração de energia fotovoltaica.

FIGURA 2.8: USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA⁹.

A partir do ano 1995, o sistema de energia solar conectado à rede de forma descentralizada vem cada vez se mostrando presente. Muitas empresas buscam soluções de energia sustentáveis e ambientalmente corretas, pois a preocupação de preservar o planeta está com preferência entre os consumidores (VILLALVA, 2013).

Sistemas fotovoltaicos interligados a rede elétrica representam uma fonte complementar ao sistema elétrico ao qual estão conectados através de inversores. Esses inversores transformam a energia contínua (CC) coletada do sistema fotovoltaico em energia alternada (CA), de modo a satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada, pelo sistema de ilhamento, distorção harmônica, saída CA com forma de onda senoidal pura, proteção contra sobretensões e sobrecorrente (VILLALVA, 2013).

Os sistemas solares fotovoltaicos interligados ao sistema de distribuição oferecem uma série de vantagens para o sistema elétrico, dentre elas, a energia é produzida junto à carga, assim as perdas nas redes de transmissão e distribuição são reduzidas, investimentos em linhas de transmissão e distribuição são minimizadas, além de ser uma fonte de energia inesgotável que está disponível praticamente em todos os locais e produz energia limpa, silenciosa, renovável e sem emitir gases causadores do efeito estufa.

Na FIGURA 2.9, é ilustrado um sistema fotovoltaico típico de microgeração conectado à rede, composto por um conjunto de painéis fotovoltaicos e um inversor especial para conexão com a rede. (sem o inversor não seria possível fazer a injeção da energia produzida pelos módulos), quadros elétricos de proteção de corrente

⁹ Fonte: < <http://www.neosolar.com.br> > Acesso em jul. 2015.

contínua (CC) e proteção de corrente alternada (CA). O quadro de corrente contínua além de possuir os fusíveis para conexão dos *strings* (Painéis ligados em série), incorpora uma chave de desconexão necessária na manutenção dos sistemas fotovoltaicos, permitindo a desconexão dos painéis para garantir a segurança durante manutenções nas instalações e nos inversores e o dispositivo de surto para proteger cabos e equipamentos contra sobretensões ocasionadas por descargas atmosféricas. O quadro de proteção de corrente alternada (CA) faz a conexão entre os inversores do sistema fotovoltaico e a rede elétrica. Os dispositivos e o modo de dimensionamento são semelhantes aos empregados nas instalações elétricas convencionais de baixa tensão, e um medidor de energia, podendo ser conectado à rede monofásica ou trifásica de residências, empresas, prédios e qualquer outro tipo de consumidor que seja atendido pela rede pública de distribuição de energia elétrica.

FIGURA 2.9: ORGANIZAÇÃO E COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE ELÉTRICA¹⁰.



No Brasil a tecnologia fotovoltaica vem, ao longo dos anos, inserindo-se gradualmente no mercado. Estima-se que, atualmente, existe aproximadamente 14 MWp de potência instalada em sistemas fotovoltaicos fornecendo energia elétrica para

¹⁰ Fonte: Adaptada por (VILLALVA, 2013).

domicílios, escolas, centros comunitários, telefonia rural e bombeamento de água no país (ANEEL, 2014).

2.6 FLUXO DE CARGA

O cálculo do fluxo de carga é realizado utilizando-se métodos computacionais desenvolvidos, especificamente, para a resolução de sistemas de equações e inequações algébricas que constituem o modelo estático da rede. Os componentes de um sistema de energia elétrica podem ser classificados em dois grupos: os que são ligados entre um nó qualquer e o nó-terra, como é o caso de geradores, cargas, reatores e capacitores; e os que são ligados entre dois nós quaisquer da rede, como é o caso de linhas de transmissão, transformadores e defasadores. Os geradores e cargas são considerados como a parte externa no sistema, e são modelados através de injeções de potência nos nós da rede. A parte interna do sistema é constituída pelos demais componentes, ou seja, linhas de transmissão, transformadores, reatores, etc (MONTICELLI, 1983).

2.6.1 Formulação Matemática do Problema de Fluxo de Carga

Os três problemas mais frequentes em análise de sistemas de potência são fluxo de carga, curto circuito e estabilidade. Cada uma dessas análises engloba uma classe de problemas encontrados em um sistema elétrico de potência.

É comum encontrar na literatura sobre fluxo de carga diversas formulações diferentes para o problema. A formulação básica do problema em termos de potência facilita a utilização do método de solução de Newton Raphson, o mais difundido em estudos de fluxos de carga e por suas inúmeras vantagens de convergência.

2.6.1.1 Formulação Básica do Problema

O problema de fluxo de carga pode ser formulado por um sistema de equações e inequações algébricas não lineares que correspondem, respectivamente, as leis de Kirchhoff e a um conjunto de restrições operacionais da rede elétrica e de seus componentes (MONTICELLI, 1983). Na formulação mais simples do problema,

cada barra da rede está associada a quatro variáveis, sendo que duas delas entram no problema como dados e duas como incógnitas:

V_k = magnitude da tensão nodal (barra k);

θ_k = ângulo da tensão nodal;

P_k = geração líquida (geração menos carga) de potência ativa;

Q_k = injeção líquida de potência reativa;

Dependendo de quais variáveis nodais entram como dados e quais são consideradas como incógnitas, definem-se três tipos de barras:

Barra PQ – são dados P_k e Q_k , e calculados V_k e θ_k ;

Barra PV – são dados P_k e V_k , e calculados Q_k e θ_k ;

Barra de Referência – são dados V_k e θ_k ;

As barras dos tipos PQ e PV são utilizadas para representar, respectivamente, barras de carga e barras de geração. A barra $V\theta$, ou barra de referência, tem uma dupla função, fornece a referência angular do sistema, além disso, é utilizada para fechar o balanço de potência do sistema, levando em conta as perdas de transmissão não conhecidas antes de se ter a solução final do problema (MONTICELLI, 1983). Estes três tipos de barras são as mais frequentes e também as mais importantes.

De acordo com Monticelli e Garcia (2003) o conjunto de equações do problema do fluxo de carga é formado por duas equações para cada barra, cada uma delas representando o fato de as potências ativas e reativas injetadas em uma barra serem iguais a soma dos fluxos correspondentes que deixam a barra através de linhas de transmissão, transformadores, etc. Isso corresponde a imposição da primeira lei de Kirchhoff e pode ser expresso matematicamente de acordo com

(2.1):

$$\begin{aligned} P_k &= \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \\ Q_k + Q_k^{sh}(V_k) &= \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Onde:

$k = 1 \dots NB$, sendo NB o número de barras da rede;

$\Omega_k \rightarrow$ conjunto das barras vizinhas da barra k ;

$V_k, V_m \rightarrow$ magnitudes das tensões das barras terminais do ramo $k \rightarrow m$;

$\theta_k, \theta_m \rightarrow$ ângulos das tensões das barras terminais do ramo $k \rightarrow m$;

$P_{km} \rightarrow$ fluxo de potência ativa no ramo $k \rightarrow m$;

$Q_{km} \rightarrow$ fluxo de potência reativa no ramo $k \rightarrow m$;

$Q_k^{sh} \rightarrow$ componentes da injeção de potência reativa devida ao elemento *shunt* da barra k .

Além das equações referentes a aplicações da LCK das barras, fazem parte do problema de fluxo de potência um conjunto de inequações que representam os limites operacionais da rede dadas por:

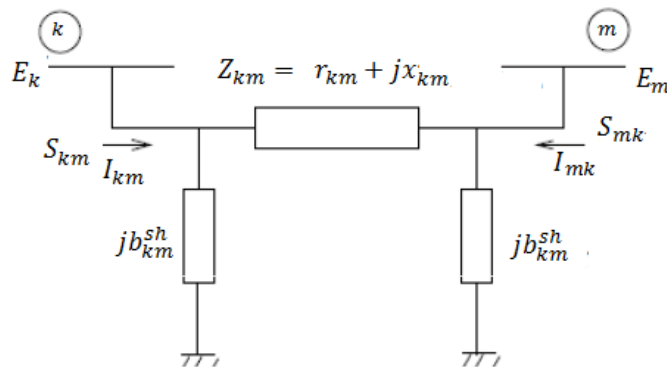
$$\begin{aligned} V_k^{min} &\leq V_k \leq V_k^{max} \\ Q_k^{min} &\leq Q_k \leq Q_k^{max} \end{aligned} \quad (2.2)$$

2.6.1.2 Expressões Gerais dos Fluxos de Potência

Equações básicas são obtidas impondo-se a conservação das potências ativa e reativa em cada nó. Isto equivale a determinar a lei de Kirchhoff das correntes aos nós do sistema. As equações demonstradas são para linha de transmissão (MONTICELLI, 1983):

O Fluxo de carga ativa e reativa saindo de barras $k \rightarrow m$ é ilustrado na Figura 2.10:

FIGURA 2.10: MODELO Π .



O fluxo de potência é dado pela equação (2.3).

$$V_{km}^* = P_{km} - jQ_{km} = E_{km}^* I_{km} \quad (2.3)$$

Sabendo que:

$$I_{km} = (y_{km} + jb_{km}^{sh})E_k + (-y_{km})E_m \quad (2.4)$$

Temos:

$$S_{km}^* = E_k^*[y_{km}(E_k - E_m) + jb_{km}^{sh}] \quad (2.5)$$

$$S_{km}^* = y_{km}V_k^2 - y_{km}E_k^*E_m + jb_{km}^{sh}V_k^2 \quad (2.6)$$

$$S_{km}^* = (g_{km} + jb_{km} + jb_{km}^{sh})V_k^2 - (g_{km} + jb_{km})V_kV_m(\cos \theta_{km} - j \sin \theta_{km}) \quad (2.7)$$

Os fluxos P_{km} e Q_{km} identificando-se as partes reais e imaginárias são mostrados em (2.8) e (2.9):

$$\Re\{S_{km}\} = P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_kV_m(g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.8)$$

$$\Im\{S_{km}\} = Q_{km} = -V_k^2(b_{km} + b_{km}^{sh}) - V_kV_m(g_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.9)$$

De maneira semelhante pode-se obter os fluxos de potência ativa e reativa saindo da barra m em direção a barra k :

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} - V_kV_m(g_{km} \cos \theta_{km} - b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.10)$$

$$Q_{mk} = -V_m^2(b_{km} + b_{km}^{sh}) - V_kV_m(g_{km} \sin \theta_{km} + b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.11)$$

As expressões P_{mk} e Q_{mk} também podem ser obtidas simplesmente trocando os índices k e m nas expressões de P_{km} e Q_{km} e trocando os sinais de susceptância.

A expressão geral das perdas de potência ativa e reativa é dada respectivamente por (2.12) e (2.13):

$$P_{perdas} = P_{km} + P_{mk} = \quad (2.12)$$

$$P_{perdas} = g_{km}(V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km})$$

$$P_{perdas} = g_{km}|E_k - E_m|^2$$

$$Q_{perdas} = Q_{km} + Q_{mk} = \quad (2.13)$$

$$Q_{perdas} = -b_{km}^{sh}(V_k^2 + V_m^2) - b_{km}(V_k^2 + V_m^2 2V_k V_m \cos \theta_{km})$$

$$Q_{perdas} = -b_{km}^{sh}(V_k^2 + V_m^2) - b_{km}|E_k - E_m|^2$$

Em que:

S_{km} = potência;

I_{km} = corrente;

g_{km} = condutância;

b_{km} = susceptância;

$P_{perdas} = g_{km}|E_k - E_m|^2$ = perdas ôhmicas;

$-b_{km}|E_k - E_m|^2$ = perdas reativas no elemento série;

$-b_{km}^{sh}(V_k^2 + V_m^2)$ = geração de potência reativa nos elementos *shunt*;

2.6.2 Método de Solução de Problemas

O fluxo de carga é uma metodologia que tem como objetivo encontrar o estado e as condições operacionais de uma rede em regime permanente. Além disso, possibilita avaliar o comportamento da rede (GÓMEZ-EXPÓSITO, 2011).

A determinação da solução do fluxo de carga em sistema elétrico de potência consiste na resolução de um sistema de equações não lineares através de métodos numéricos. Os métodos evoluíram seguindo os avanços técnicos na capacidade de processamento dos computadores digitais, o que permite a difusão de algoritmos para o cálculo de problemas complexos, como o fluxo de carga, além da possibilidade de testar a eficiência e a convergência dos algoritmos por diferentes pesquisadores (LIU e SALAMA, 2002; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2011). Algumas metodologias são usadas para a resolução do fluxo de carga tais como, Gauss/ Gauss Seidel, Glimn-Stagg, Ward-Halee e outros, tais como o de Newton- Rapson que será o método usado no

projeto por ter uma convergência mais rápida, e por ser o método de fluxo de carga utilizado no programa *DlgSILENT PowerFactory*®.

2.6.3 Método de Newton Raphson

O método de Newton-Raphson é um método geral para a determinação de raízes reais de equações não-lineares. Na essência, o método trabalha utilizando série de Taylor, a partir de uma aproximação inicial, um processo iterativo robusto e de fortes características de convergência. A fórmula básica do problema considera quatro variáveis, V , θ , P e Q (MONTICELLI e GARCIA, 2003).

O método de Newton-Raphson tem como objetivo o cálculo do fluxo de potência ativa e reativa em cada barra, em um processo iterativo, em que o desvio dos valores de referência é calculado em cada iteração dada pelas equações de potências, também chamadas de equações de balanço de potência, representadas por (2.14) e (2.15).

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - P_k = P_k^{esp} - V_k \sum_{j=1}^{n+m+1} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.14)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k = Q_k^{esp} - V_k \sum_{j=1}^{n+m+1} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.15)$$

Sobre o índice “esp” indica valores especificados de potência ativa e reativa, enquanto G e B são a condutância e a susceptância entre as barras k e m , calculadas na matriz de admitância Y . Por definição, as barras de carga ou PQ têm definidos os valores de P e Q , assim os valores de ΔP e ΔQ tendem a zero na solução. O mesmo acontece para ΔP das barras de geração ou PV . Segundo Gómes-Expósito (2011) substituem o termo ΔQ por $\Delta Q/V$ para melhorar a convergência do cálculo iterativo.

O problema representado em (2.14) e (2.15) pode ser formulado em termos de um sistema matricial de equações:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Em que os elementos H , N , M e L representam a matriz Jacobiana J :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Assim, os componentes ΔV e $\Delta \theta$ da tensão nodal podem ser escritos em termos dos desvios ΔP e ΔQ e da matriz Jacobiana. Atualizam-se tensões nas barras e as potências injetadas. Se o critério de convergência dado por (2.18) for satisfeito, então o processo é interrompido e o resultado é dado, em que ε (tolerância) é um número arbitrariamente pequeno.

$$\max(\Delta P, \Delta Q) < \varepsilon \quad (2.18)$$

O resultado obtido após a convergência são as tensões (magnitude e ângulo), permitindo calcular, como exemplo, as perdas de potência ativa e reativa do sistema, dados respectivamente por:

$$P_{perdas}^* = P_{km} + P_{mk} = G_{km}(V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (2.19)$$

$$Q_{perdas}^* = Q_{km} + Q_{mk} = -B_{km}(V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \sin \theta_{km}) \quad (2.20)$$

Em que Q_{km} e P_{km} são respectivamente os fluxos ativo e reativo no ramo de k para m .

2.7 O PROGRAMA DIGSILENT POWERFACTORY®

O programa *DigSILENT PowerFactory*® desenvolvido pela empresa *DigSILENT (Digital Simulation and Electrical Network)*, no ano de 1976, cuja sede localiza-se na cidade de Gomaringen na Alemanha, (GMBH, 2011c) é uma ferramenta de engenharia auxiliada por computador para a análise de sistemas de energia elétrica industriais de transmissão e distribuição.

O *DigSILENT PowerFactory*® foi projetado como um pacote de *software* avançado, integrado e interativo, dedicado ao sistema de energia elétrica e análise de controle, a fim de alcançar os objetivos principais de planejamento e otimização da operação. Foi o primeiro *software* de análise de sistema de potência com uma

interface gráfica unifilar integrada que inclui funções de desenhos, recursos de edição e relevantes características do cálculo estático, e dinâmico dos sistemas de energia (GRAINGER e STEVENSON, 1994).

Dentre as ferramentas disponibilizadas pelo programa destacam-se; análise de fluxos de potência; análise de curto-circuito; análise de harmônicos; fluxo de potência ótimo. Destaca-se ainda o fato de o *DlgSILENT PowerFactory*[®] ser um programa comercial utilizado para estudo de redes de alta potência que permite a simulação e construção de modelos usando diagramas unifilares (GMBH, 2011b). A interface gráfica do programa permite acesso direto ao diagrama unifilar, parâmetros dos elementos relacionados à rede (cargas e linhas de transmissão) e controladores (máquinas).

Dos principais componentes do *DlgSILENT PowerFactory*[®] é importante salientar que este trabalho não pretende descrever minuciosamente todas as funções e modelos do *PowerFactory*, contudo para bom entendimento da implementação proposta é importante o conhecimento dos aspectos relevantes da construção do modelo da rede e do método de otimização a ser utilizado:

2.7.1 Manuais

- Manual para Iniciantes (do inglês *Getting Started*) - Descreve os princípios diretrizes do programa, além de iniciar os passos necessários para construção de projetos de redes com suas respectivas estratégias de controle.
- Manual do Usuário (do inglês *Use's Manual*) - Apresenta instruções para a compreensão da interface do programa, descrevendo as ferramentas disponíveis para o usuário interagir com o programa.
- Manual Técnico (do inglês *Technical Reference*) - Disponibiliza os modelos, como cargas e linhas de transmissão, utilizados para construção da rede e as técnicas escolhidas para realizar o cálculo de fluxo de carga, harmônicos e curto-circuito.

Todos os três manuais citados auxiliaram no desenvolvimento da proposta do presente trabalho, contudo algumas ressalvas devem ser consideradas, relativas a

esta documentação, como por exemplo, a implementação da otimização usando Enxame de Partículas (PSO).

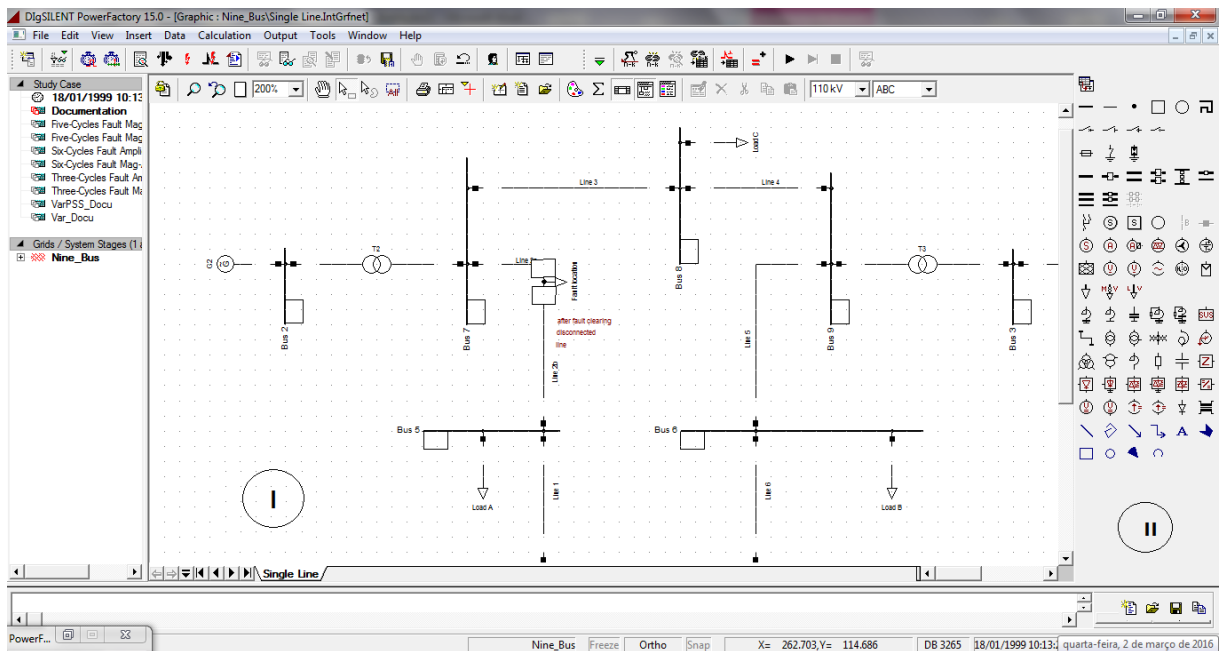
2.7.2 Interface Gráfica

A interface gráfica do *DigSILENT PowerFactory*[®] permite acesso direto, no diagrama unifilar, aos parâmetros dos elementos relacionados a rede (GMBH, 2011c). No programa há três tipos de telas de construção para diferentes aplicações:

- Rede - Interface com ferramentas que permite a construção de redes de sistema de potência, como mostrada na FIGURA 2.11;
- Diagrama de Blocos - Tela usada para implementação dos modelos dos controladores;
- Painel-Construção de Gráficos - Tela usada para construção de gráficos.

Uma característica importante do *DigSILENT PowerFactory*[®] é a geração de gráficos em tempo real de simulação, isso permite que o usuário faça análise parciais sem a necessidade de aguardar o fim da simulação (OLIVEIRA, 2006). Além disso, o programa torna possível o aumento do tempo total de simulação, mesmo após o tempo previsto.

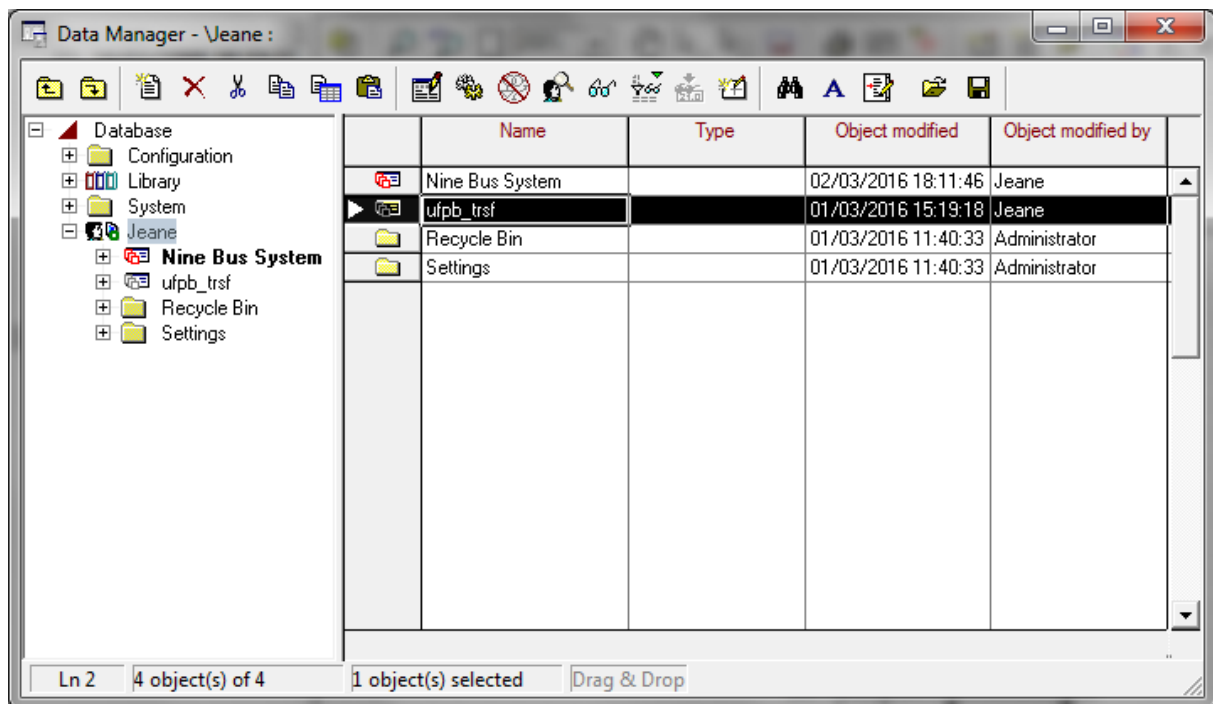
FIGURA 2.11: INTERFACE PARA CONSTRUÇÃO DE REDES: I - TELA PARA CONSTRUÇÃO DA REDE: II - CAIXA DE FERRAMENTA COM ELEMENTOS QUE PODEM SER USADOS PARA COMPOR A REDE¹¹.



2.7.3 Gerenciador de Dados

Todas as construções feitas na interface gráfica são automaticamente identificadas, relacionadas e armazenadas em um banco de dados. Dessa forma é possível a construção de redes de sistema de potência. Na tela do gerenciador de dados são apresentadas duas colunas onde se encontram projetos de diferentes sistemas de potência, os elementos de rede e o controle de projeto, mostrado na FIGURA 2.12.

¹¹ Fonte: print screen interface do software DigSILENT PowerFactory®

FIGURA 2.12: GERENCIADOR DE DADOS¹².

2.7.4 Simulação

Após a montagem do sistema de potência o usuário tem disponibilidade de escolher três tipos de simulações dependendo do que se desejar trabalhar:

- Fluxo de carga - cálculo da rede em regime permanente utilizando o método linear (fluxo de carga cc) ou método de Newton Raphson, possibilitando a simulação de sistemas balanceados ou desbalanceados;
- Cálculo das condições iniciais - possibilita o cálculo das condições iniciais, mesmo sem iniciar a análise dinâmica. Os modelos já existem no *DlgSILENT PowerFactory*®;
- Possuem inicialização automática de suas variáveis, cujos valores são obtidos baseados no cálculo de fluxo de carga;
- Cálculo de estabilidade transitória – cálculo do comportamento dinâmico do sistema. Antes do início do processo de simulação dinâmica, automaticamente

¹² Fonte: *print screen* gerenciador de dados do software *DlgSILENT PowerFactory*®.

calcula-se o fluxo de carga e as condições iniciais. Esse procedimento é padrão em programas utilizados para estabilidade transitória;

2.7.5 Linguagem de Programação do *DlgSILENT* (DPL)

O DPL (do inglês *DlgSILENT Programming Language*) é uma linguagem de programação para uso geral no *DlgSILENT PowerFactory*®, com propósito de oferecer uma interface para automatizar processos e cálculos do projeto.

As características desta linguagem de programação são fornecer acesso a todos os valores de entrada e saída, uso de todos os comandos de cálculo, acesso a arquivos de resultados, gráficos, base de dados, exportação de arquivos, além de uma interface flexível para entradas e saídas, e para objetos acessados.

O DPL acrescenta uma nova dimensão ao programa permitindo a criação de novas funções.

A linguagem *script* DPL usa uma sintaxe muito semelhante à linguagem de programação C ++. Este tipo de linguagem é intuitivo, o conjunto de comando básico tem sido mantido o menor possível (GMBH A, 2011).

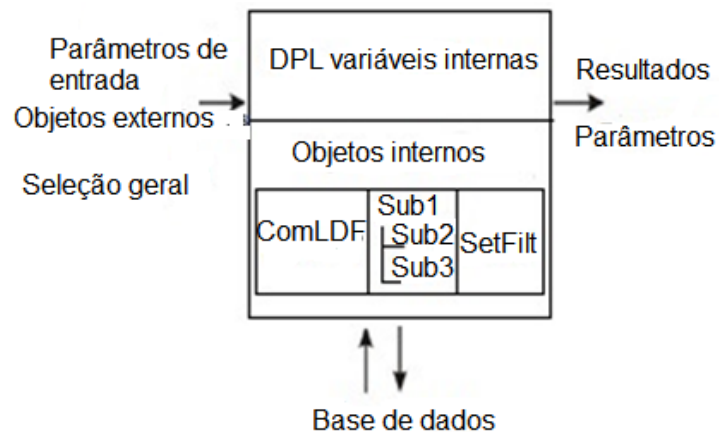
A sintaxe pode ser dividida nas seguintes partes:

- Definições das variáveis;
- Atribuições e expressões;
- Instruções de fluxo de potência;
- Chamadas de métodos.

No código se define as entradas, que podem ser objetos que se encontram na base de dados. Esta seleção é chamada *General Selection*.

A informação de entrada pode ser avaliada com a utilização de função e variáveis internas armazenadas no código-fonte.

O princípio da estrutura de um *script* DPL é mostrado na FIGURA 2.13 (GMBH D, 2011).

FIGURA 2.13:ESTRUTURA DE COMANDO DPL¹³.

Os objetos internos mais comuns que se podem ser tratados na linguagem DPL para serem executados são os comandos: fluxo de potência (ComLdf), executar simulações (ComSim) e cálculo de curto-circuito (ComShc).

O software *DlgSILENT PowerFactory*® foi escolhido para fazer as simulações do fluxo de carga com e sem a inserção de painéis fotovoltaicos na rede, e a otimização do projeto proposto identificando os melhores locais para a conexão desses painéis fotovoltaicos.

¹³ Fonte: *print screen* estrutura de comandos do software *DlgSILENT PowerFactory*®.

3 PRINCIPAIS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO USANDO INTELIGÊNCIA DE ENXAME

3 PRINCIPAIS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO USANDO INTELIGÊNCIA DE ENXAME

A sofisticação dos recursos computacionais desenvolvidos nos últimos anos possibilitou também avanços nas técnicas de otimização. Esses avanços que foram impulsionados com êxito, especialmente, através dos estudos de algoritmos evolutivos, em especial os baseados em enxame, têm tido grande sucesso em solucionar problemas de otimização de múltiplas soluções. No decorrer do capítulo será detalhado com maior ênfase a técnica de otimização por inteligência de enxame.

3.1 INTELIGÊNCIA DE ENXAME

O termo Inteligência de enxame (*Swarm Intelligence*) é o modo utilizado para nomear sistemas de inteligência artificial, onde o comportamento coletivo dos indivíduos em uma população causa simples soluções coerentes ou padrões a surgir (CARACIOLO, 2008).

O termo enxame (população) é utilizado de forma genérica para se referir a qualquer coleção estruturada de agentes capazes de interagir. O exemplo clássico de uma inteligência de enxame é o enxame de abelhas. Entretanto, a metáfora de um enxame pode ser estendida a outros sistemas como uma colônia de formigas ou uma revoada de pássaros. A noção de enxame surgiu como um aspecto de movimento coletivo no espaço (CARACIOLO, 2008).

De acordo com Bonabeu e Théraulaz (2000) a inteligência de enxame inclui qualquer tentativa de projetar algoritmos ou dispositivos distribuídos de solução de problemas inspirados no comportamento coletivo de insetos sociais e outras sociedades animais.

Um enxame possui inteligência se certas características estiverem presentes (MILLONAS, 1994):

- Proximidade: Os agentes do enxame devem ter a noção do espaço e tempo durante seu deslocamento de modo que mudanças possam ser realizadas sem interferir na movimentação de seus vizinhos, (agentes devem ser capazes de interagir);

- **Qualidade:** Afirma que os membros do enxame devem ser capazes de se adaptar aos fatores de qualidade do ambiente, ou seja, a população deve buscar um caminho em que resulta na melhor solução garantindo qualidade para o seu bando, (os agentes devem ser capazes de avaliar seus comportamentos);
- **Diversidade:** Permite ao sistema reagir a situações inesperadas. Isso previne que os membros fiquem presos em um local em que não se encontra a melhor solução (mínimo local). Porém, é desejável que haja ações corretivas caso haja mudanças repentinas;
- **Estabilidade:** Nem todas as variações ambientais devem afetar o comportamento de um agente. O enxame deve ser capaz de avaliar se tal mudança é necessária a fim de aplicar um esforço conjunto de todo o bando;
- **Adaptabilidade:** O enxame deve possuir a capacidade de avaliar as mudanças ocorridas e decidir se é válida a mudanças no comportamento do bando (capacidade de se adequar a variações ambientais);

Algoritmo de otimização baseado em enxames utilizam uma população de possíveis soluções para cada iteração ao invés de apenas uma como os outros algoritmos de busca direta. Alguns algoritmos de otimização baseado em enxame são: Otimização por Colônia de Formigas, Otimização por Colônia de Abelhas, algoritmo evolutivo, Otimização por Enxame de Partículas, Algoritmos genéticos e Busca por difusão estocástica.

3.1.1 Otimização por Colônia de Formigas

Otimização por Colônia de Formigas (do inglês *Ant Colony Optimisation* (ACO)) foi implementado por Marco Dorigo e Colleagues (BONABEAU e THÉRAULAZ, 2000) e inspirado no comportamento de forrageamento da colônia de formigas. No movimento de um lugar para outro (aleatório), cada formiga estabelece certa quantidade de feromônio no caminho. Formigas usam as trilhas de feromônio para comunicar informações entre os indivíduos e com base em que cada formiga decide o caminho mais curto para seguir (KUMAR, 2012).

Técnicas de ACO foram implementadas com sucesso por diversos problemas de otimização combinatória, como Problema do Caixeiro Viajante (MARCO DORIGO) a ordenação sequencial (GAMBARDELLA, MONTEMANNI e WEYLAND, 2012), roteamento em problemas de comunicação (CARO e DORIGO, 1998) etc.

A ideia do algoritmo ACO é a busca de um melhor caminho em um conjunto de rotas baseada no comportamento das formigas procurando um caminho entre o seu formigueiro (enxame) e o local do alimento. Uma técnica probabilística para resolver problemas computacionais de otimização (CARACIOLO, 2008).

3.1.2 Otimização por Colônia de Abelhas

O algoritmo de otimização de colônia de abelhas (do inglês *Artificial Bee Colony (ABC)*) é inspirado pelo comportamento de um enxame de abelhas na coleta de néctar. Otimização por enxame de abelhas foi proposto em 2005 por Karaboga (2005) para a resolução de problemas de otimização multimodal e multidimensional. Consiste de um algoritmo populacional bio-inspirado. O fenômeno natural que foi utilizado como inspiração para o desenvolvimento do ABC foi o comportamento social observado em colônias de abelhas reais, em particular a realização das atividades envolvidas no forrageamento (DUARTE, 2015).

O ABC pode ser descrito basicamente como algoritmo que simula uma colônia de abelhas praticando o forrageamento na busca por uma solução ótima para um problema de otimização (DUARTE, 2015).

3.1.3 Algoritmo Evolutivo (EPSO)

O EPSO é um algoritmo evolutivo (do inglês *Evolutionary Particle Swarm Optimization (EPSO)*), onde a mutação só é aplicada aos parâmetros estratégicos (os parâmetros que condicionam a evolução de uma determinada solução) e a recombinação é não convencional (que é, em verdade, a regra movimento de métodos de Enxame de Partículas).

A recombinação é uma operação que produz a descendência de algum tipo de combinação de indivíduos-mãe, escolhido na população.

- Operação de recombinação em algoritmos genéticos é chamada de “crossover”.
- Operação de recombinação em PSO é chamada de “regra de movimento”, na qual um novo indivíduo foi gerado como uma combinação ponderada de pais que são a melhor ancestral deste indivíduo “pbest” e o melhor antepassado da atual geração “gbest”. Nestes tipos de recombinação em GA e PSO, um novo indivíduo é formado a partir de uma mistura ponderada de ancestrais, e esta mistura ponderada podem variar em cada dimensão e espaço (MIRANDA e MONTEIRO, 2006).

3.1.4 Busca por Difusão Estocástica

O mecanismo de busca por difusão estocástica (do inglês *Stochastic Diffusion Search* (SDS)) foi proposto pela primeira vez por Bishop (1989) como um algoritmo baseado em população para encontrar padrões com melhor ajuste. Geralmente, SDS podem ser aplicados mais facilmente em problemas de otimização onde a função objetivo pode ser decomposta em componentes que podem ser verificados de forma independente. Para encontrar o ótimo de uma função objetivo dada, SDS emprega enxames de agentes, cada um possuindo uma hipótese (ξ) sobre o ótimo. O SDS repete a iteração de testar e difundir até que um enxame de agentes convirja para uma hipótese ótima (AUGUSTUS, 2009).

3.1.5 Algoritmos Genéticos

O algoritmo genético (do inglês *Genetic Algorithms* (GA)) é baseado na seleção natural e recombinação genética. O algoritmo funciona escolhendo soluções dentre as existentes na população atual e então aplicando operadores genéticos, como mutação e crossover, cria uma nova geração (população) (AUGUSTUS, 2009). O algoritmo explora de forma eficiente o histórico de informações para verificar a existência de áreas de pesquisa com melhor desempenho (GOLDBERG, 1989). Quando aplicado a problemas de otimização, o algoritmo genético tem a vantagem de executar uma busca global. O algoritmo genético também pode ser adaptado,

introduzindo outras técnicas heurísticas, específicas para o domínio do problema, para melhorar sua performance em relação aos resultados (AUGUSTUS, 2009).

3.1.6 Otimização por Enxame de Partículas

A técnica de otimização por enxame de partículas (do inglês *Particle Swarm Optimisation* (PSO)) é uma técnica metaheurística introduzida por James Kennedy e Russel Eberhart em 1995 e surgiu a partir de experiências com algoritmos que modelam o “comportamento social” observado em algumas espécies de pássaros e peixes (EBERHART, 2001) (KENNEDY, 1995). Essa técnica está sendo utilizada no trabalho proposto sendo descrita detalhadamente no próximo capítulo.

4 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS MODIFICADO (MPSO)

4 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Enxame de Partículas é uma técnica de computação que pode facilmente otimizar problemas de não linearidade. É uma técnica metaheurística inspirada na natureza, sendo considerada por alguns autores como uma técnica de computação evolutiva. O sistema tem início com uma população de soluções aleatórias e procura por um resultado ótimo melhorando gerações. As técnicas de computação evolutiva são baseadas em mecanismos biológicos, que visam solucionar problemas de otimização combinatória implementados em computador (CARACIOLO, 2008). O capítulo visa explicar os conceitos básicos detalhando os componentes principais e o comportamento do algoritmo.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS PSO

Otimização por enxame de partículas é uma técnica de procura iterativa em que partículas se movem em grandes áreas do espaço de acordo com uma função objetivo. O movimento de cada partícula é baseada na sua própria experiência (KUMAR, 2012).

Há alguns anos vêm sendo estudado o comportamento social de alguns grupos de animais como enxame de abelhas, formigas e pássaros na busca de alimentos ou novos locais para estabelecer sua nova moradia. Esse último grupo (pássaros), em especial despertou um grande interesse de alguns pesquisadores, que após diversas observações sobre o comportamento de bando de pássaros em revoada, decidiu modelar aquela inteligência coletiva para usá-la em método de busca para solução de problemas. Entre os pesquisadores, destaca-se o biólogo Frank Heppner, que considerava que o comportamento de várias espécies de pássaros, em bando ao longo do voo, fazia o uso de algumas lógicas e de algumas formas de comunicação. Após vários estudos e observações. Heppner descreveu o raciocínio por trás daquele comportamento, qualificando-o como comportamento social.

De acordo com James Kennedy e Russel Eberhart (1995) inspirados no comportamento social dos pássaros estudados por Heppner, desenvolveram uma técnica de otimização que veio a ser conhecida como enxame de partículas. Essa denominação se deu ao se notar que o modelo escrito por Heppner demonstrava

característica de um enxame inteligente, onde seus membros que apresentavam tal comportamento foram generalizados para o termo partículas.

PSO é inicializado com um grupo de partículas aleatórias procurando melhorar suas gerações com a solução ótima. O conjunto de todas as partículas é chamado população inicial ou enxame inicial. Depois de geradas as velocidades aleatórias para cada partícula de acordo com a função objetivo, o valor objetivo é avaliado. Em cada iteração, cada partícula é melhorada seguindo dois “melhores” valores, o primeiro é o melhor resultado que esta partícula encontrou anteriormente, chamado de *Pbest*, o outro valor seguido pela partícula é o melhor valor obtido por qualquer outra partícula da população, é chamado de *Gbest* (CARACIOLO, 2008).

Não só o nome do algoritmo, como os demais aspectos do modelo estudado por Heppner ganharam uma nova conotação. A Tabela 4.1 apresenta de forma resumida as nomenclaturas descritas.

TABELA 4.1: IDENTIFICAÇÃO DOS TERMOS DE PSO¹⁴.

Termo	Significado
Partículas	Pássaro
Enxame	Bando de pássaros
Espaço de Busca	Área sobrevoada pelos pássaros
Posição	Localização de cada pássaro durante o voo
Solução Ótima	Localização do pássaro onde ele encontrou o alimento ou ninho
<i>Fitness</i>	Função objetivo
<i>Pbest</i>	Melhor posição conhecida pelo pássaro (Experiência)
<i>Gbest</i>	Melhor posição conhecida pelo enxame (Experiência coletiva)

Logo, a evolução do algoritmo do PSO está associada à trajetória percorrida pelo enxame e ao tempo gasto para encontrar a melhor solução do problema. O vetor

¹⁴ Fonte: (CARACIOLO, 2008).

velocidade é representado pela equação matemática **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Após a utilização da velocidade da partícula, sua posição atual é atualizada de acordo com **Erro! Fonte de referência não encontrada.**):

$$V_i^{(t+1)} = \underbrace{V_i^{(t)}}_{\text{Velocidade}} + \underbrace{\Phi_1 * rand() * (Pbest_i^{(t)} - X_i^{(t)})}_{\text{Componente Cognitivo}} + \underbrace{\Phi_2 * rand() * (Gbest_i^{(t)} - X_i^{(t)})}_{\text{Componente Social}} \quad (4.1)$$

$$X_i^{(t+1)} = X_i^{(t)} + V_i^{(t+1)} \quad (4.2)$$

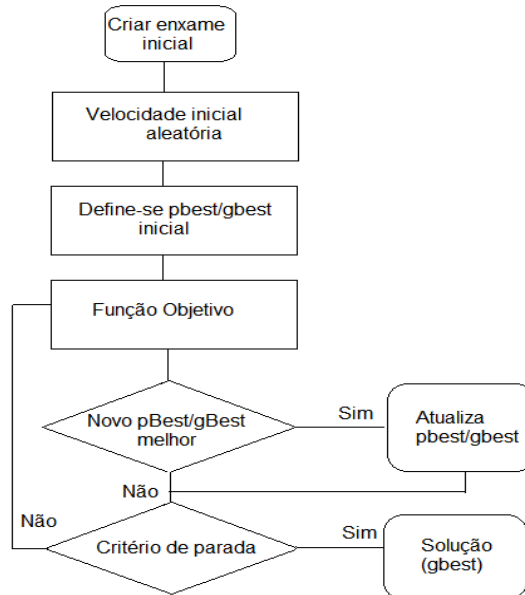
Em que:

- i : Índice de partícula;
- t : Índice de tempo discreto;
- $V_i^{(t)}$: Velocidade da partícula;
- $X_i^{(t)}$: Posição da partícula;
- Φ_1 : Parâmetro cognitivo;
- Φ_2 : Parâmetro social;
- $rand()$: Número aleatório no intervalo de (0,1) aplicada à enésima partícula;
- $Pbest$: Melhor posição da partícula até o momento;
- $Gbest$: Melhor posição da população até o momento.

O vetor velocidade é um dos itens mais importantes no algoritmo PSO, pois as mudanças da posição das partículas durante a execução do processo são guiadas pela atualização da velocidade. As partículas voam pelo espaço de busca tendo suas velocidades atualizadas dinamicamente de acordo com o histórico das experiências individuais e coletiva de todo o enxame (SHI, 2004).

4.1.1 Fluxograma

FIGURA 4.1: FLUXOGRAMA DO PSO¹⁵.



Existem algumas modificações da velocidade proposta por alguns autores em artigos e trabalhos que podem vir a influenciar o desempenho do algoritmo PSO, assim como a estrutura da topologia de comunicação de partículas e como as partículas do enxame trocam informações.

A seguir será apresentada detalhadamente a proposta da dissertação, que é desenvolver o método de otimização por enxame de partículas modificado (MPSO) usando variáveis inteiras.

4.2 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS MODIFICADO (MPSO)

O MPSO é uma variação do método PSO, que trata de um algoritmo de otimização e busca inspirado no comportamento social dos pássaros procurando comida, trabalhando com variáveis inteiras pré-estabelecidas.

Esses pássaros não sabem onde tem comida, mas começam a se movimentar de acordo com as variáveis inteiras no espaço de busca, se comunicando uns com os outros, por meio de um processo de comunicação chamado topologia global (topologia

¹⁵ Fonte: (KUMAR, 2012).

usada no MPSO). Inicialmente os pássaros estão posicionados nesses valores inteiros, porém nesse espaço de locomoção os pássaros só podem se locomover com um passo de duas posições para frente ou para trás. Esse passo é referente aos parâmetros cognitivo (taxas) (Φ_1) e social (Φ_2) e que dependendo da aplicação, caso queira aumentar ou diminuir esse passo é só mudar os valores de (Φ_1) e (Φ_2). Ambos não precisam ser iguais, porém o ideal é que a soma das duas taxas seja ≥ 4 . A partir da definição da função objetivo que avalia se o pássaro melhorou ou não de posição, cada pássaro tem um vetor velocidade (V) que atualiza o vetor posição (X). O MPSO tem posições de movimentação inteiras referente às variáveis pré-estabelecida, ou seja, nesse ambiente de busca há faixa com valores de potência predefinidas, com isso os pássaros só se locomovem entre essas faixas.

Cada partícula é representada por um vetor com n objetos, que indica a posição da partícula, e uma velocidade, vetor utilizado para atualizar a posição que ajusta o seu deslocamento. Esta mantém o controle de suas coordenadas no espaço de busca por variáveis inteiras que são associados com a melhor função objetivo que tem alcançado até o momento, cujo valor é chamado de melhor posição da partícula até o momento, ou $Pbest$. Outro valor que é monitorado pelo MPSO é o melhor valor obtido pela população no conjunto de partículas, este valor é chamado $Gbest$.

A partícula indica uma possível solução para o problema de otimização. A velocidade é a responsável em fazer com que a partícula tente ir para uma região mais promissora, pois se trata de um vetor que está sempre em busca de uma melhor solução momentaneamente.

NO MPSO A EQUAÇÃO MODIFICADA DA VELOCIDADE É DESCRITA MATEMATICAMENTE POR (4.3). Após a utilização da velocidade da partícula, sua posição é atualizada de acordo com (4.4).

$$V_i^{(t+1)} = \underbrace{V_i^{(t)}}_{\text{Velocidade}} + \underbrace{\Phi_1 * rand() * (Pbest_i^{(t)} - X_{iF}^{(t)})}_{\text{Componente Cognitivo}} + \underbrace{\Phi_2 * rand() * (Gbest_i^{(t)} - X_{iF}^{(t)})}_{\text{Componente Social}} \quad (4.3)$$

$$X_{iF}^{(t+1)} = X_{iF}^{(t)} + V_i^{(t+1)} \quad (4.4)$$

Em que:

i : Índice de partícula;

t : Índice de tempo discreto;

$V_i^{(t)}$: Velocidade da partícula;

$X_{iF}^{(t)}$: Posição de valores inteiros da partícula;

$\Phi 1$: Parâmetro cognitivo;

$\Phi 2$: Parâmetro social;

$rand()$: Número aleatório no intervalo de (0,1) aplicada à enésima partícula;

$Pbest$: Melhor posição da partícula até o momento;

$Gbest$: Melhor posição da população até o momento.

Nas equações a seguir são ilustradas como se obteve o algoritmo no *software DlgSILENT PowerFactory 15.2*, usando a linguagem DPL, que referência a posição dos números inteiros. Caso o valor seja superior aos valores pré-estabelecidos, o algoritmo manterá o valor da faixa mais próxima. Essas faixas são responsáveis pelos valores inteiros de potência.

Seja,

$$\begin{array}{l} \text{Posição} \rightarrow \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \\ V_{Potencia} = [0, 10, 40, 60, 80, 100, 120] \end{array} \quad (4.5)$$

O índice do vetor é dado por (4.6).

$$indice = rand(1,8) \quad (4.6)$$

Em que, o *indice* é um valor real entre 1 e 8.

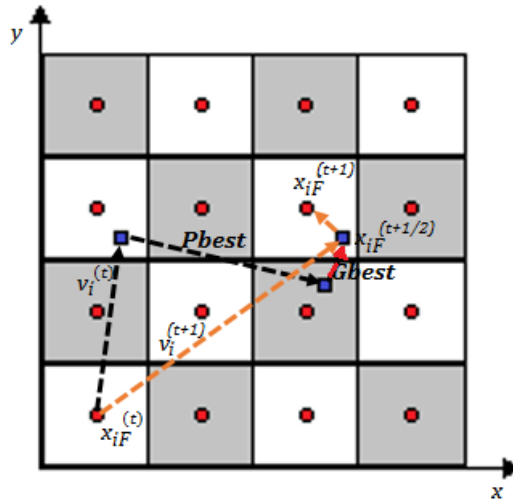
Para associar o *índice* a posição do vetor de potência, define-se as faixas pré-estabelecidas de acordo com (4.7).

$$Posição = \begin{cases} 1 < índice < 2 = Posição 1 \\ 2 < índice < 3 = Posição 2 \\ \dots \\ 7 < índice < 8 = Posição 7 \end{cases} \quad (4.7)$$

O MPSO diferente do PSO, depois de calcular a velocidade, atualiza a posição atual $X_{iF}^{(t)}$ com uma velocidade $V_i^{(t)}$, que pode está em qualquer ponto no espaço de busca, porém sempre irá para os pontos relacionados às variáveis inteiras mais próximas do ponto ótimo.

Na Figura 4.2 é possível observar que as posições com valores inteiros representados por cada ponto em vermelho são referentes a um vetor de potência no espaço de busca. Vale ressaltar que o MPSO só encontra seu ponto ótimo em valores inteiros, porém, caso venha a se locomover para posição $X_{iF}^{(t+1/2)}$, que é a soma da velocidade atual no espaço de busca com o individual da partícula $Pbest$ atualizado e o melhor do enxame o $Gbest$, o pássaro vai automaticamente para a posição referente à faixa de valor inteiro mais próximo do valor real, $X_{iF}^{(t+1)}$.

FIGURA 4.2: CONCEITO DE MODIFICAÇÃO DE UM AMBIENTE DE BUSCA PELO MPSO¹⁶.



O rand() são componentes aleatórios no intervalo de (0,1) aplicada à enésima partícula, responsáveis por uma busca natural, durante o processo de otimização. Os coeficientes de aceleração geralmente possuem valores fixos e iguais, responsáveis por controlar a distância do movimento de uma partícula em apenas uma iteração. Os parâmetros cognitivo (Φ_1) e social (Φ_2) foram configurados com valores iguais a 2,

¹⁶ Fonte: Autoria Própria

com isso o passo pode se deslocar até duas posições de cada partícula para frente ou para trás.

O peso de inércia (w) que multiplica a velocidade não era utilizado no PSO original, mas se tornou padrão. No trabalho proposto a inércia não é considerada, pois a inercia é para que a busca seja mais explorativa no início e menos explorativa no final para um valor inércia linearmente decrescente como sugerido por (KENNEDY, 1995).

Assim sendo, como apresentado em Kennedy e Eberhart (1995), nota-se que o MPSO compreende um conceito que necessita apenas de operadores matemáticos primitivos, existindo várias variações do PSO e melhorias relacionadas ao critério de convergência.

Depois da introdução sobre o MPSO, na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** é ilustrada a identificação do MPSO relacionado a painéis fotovoltaicos, mostrando os termos de forma resumida as nomenclaturas descritas anteriormente.

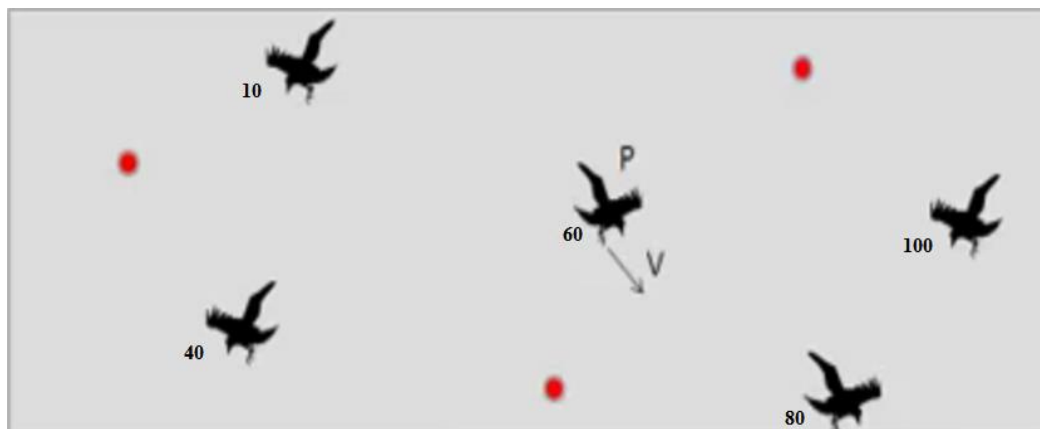
Tabela 4.2: Identificação dos Termos do MPSO¹⁷.

Termo	Significado
Partículas	Painéis fotovoltaicos
Enxame	Conjunto de Painéis fotovoltaicos
Espaço de Busca	Área pré-estabelecida pelos valores inteiros de potência do MPSO
Posição	Localização de cada potência dos painéis fotovoltaicos durante a procura
Solução Ótima	Melhor dimensionamento dos painéis fotovoltaicos onde se encontra o melhor tamanho do painel fotovoltaico.
<i>Fitness</i>	Função objetivo
<i>Pbest</i>	Melhor dimensionamento conhecida pela partícula (painéis fotovoltaicos) até o momento
<i>Gbest</i>	Melhor dimensionamento conhecida pelo conjunto de painéis fotovoltaicos (Experiência coletiva)

¹⁷ Fonte: Adaptado de (CARACIOLO, 2008).

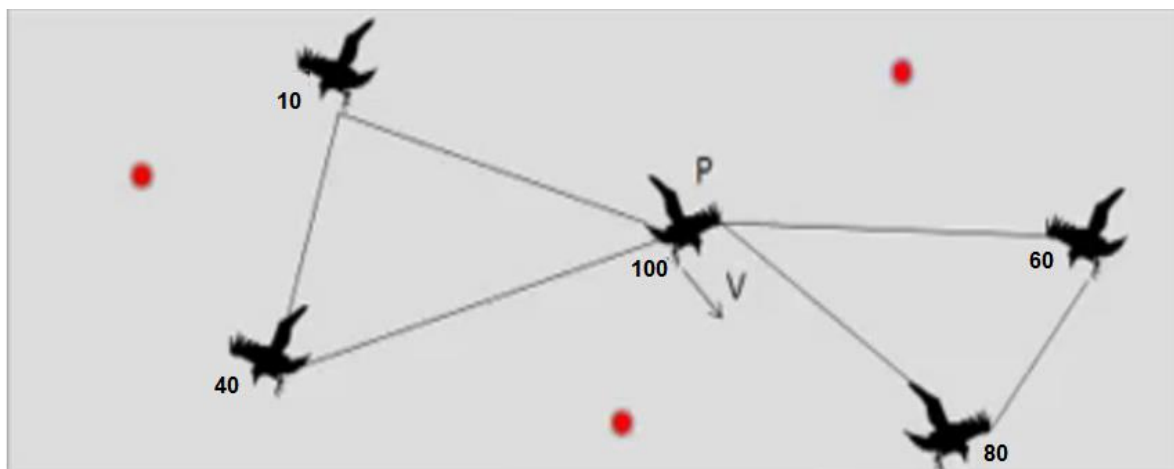
O MPSO baseia-se no grupo de partículas que irá interagir diretamente para identificar a informação da melhor partícula no espaço de busca. Na FIGURA 4.3 é ilustrado o funcionamento do MPSO inspirado no comportamento de pássaros. Cada pássaro representa um painel fotovoltaico com seus valores inteiros de potência (número referente ao pássaro). Imagina-se que existe um ambiente onde os pássaros estão localizados e esse ambiente possui comida (representa o tamanho ótimo do painel fotovoltaico) que são os pontos vermelhos ilustrados. A ideia do MPSO é que esses pássaros comecem a se movimentar por esse espaço de busca com variáveis inteiras com valores predefinidos (valores de potência fixos), podendo se locomover de acordo com esses valores.

FIGURA 4.3: COMPORTAMENTO DO MPSO¹⁸.



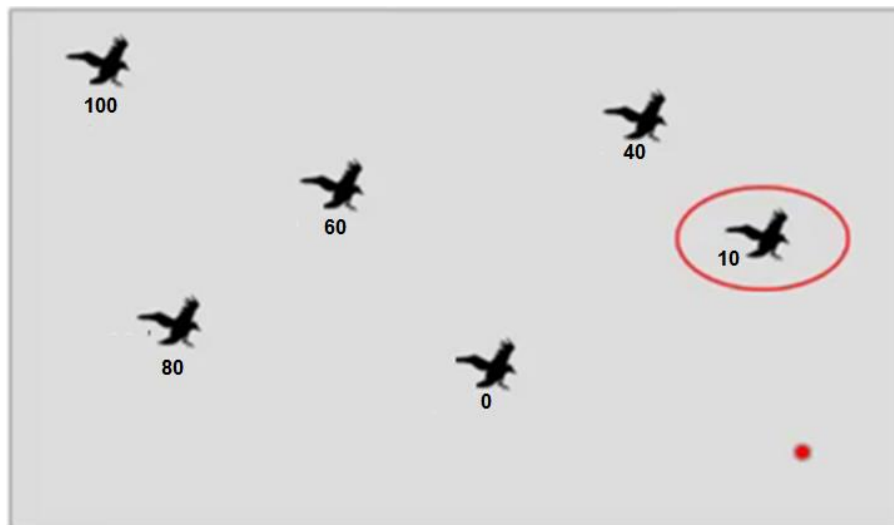
Na FIGURA 4.4 é mostrado o processo de comunicação dos pássaros. Cada pássaro tem uma velocidade que atualiza a posição com seus respectivos valores inteiros de potência. No MPSO a comunicação é feita pela topologia global onde todos os pássaros se comunicam uns com os outros. A partir desta comunicação é que os pássaros começam a se locomover nesse espaço de busca pré-estabelecido. Se um pássaro estiver próximo de uma comida ele vai informar aos demais pássaros para que os outros possam ser influenciados por essa informação e irem todos em direção da comida, ou seja, o ponto ótimo.

¹⁸ Fonte: Adaptada pelo autor.

FIGURA 4.4: COMUNICAÇÃO DO MPSO¹⁹.

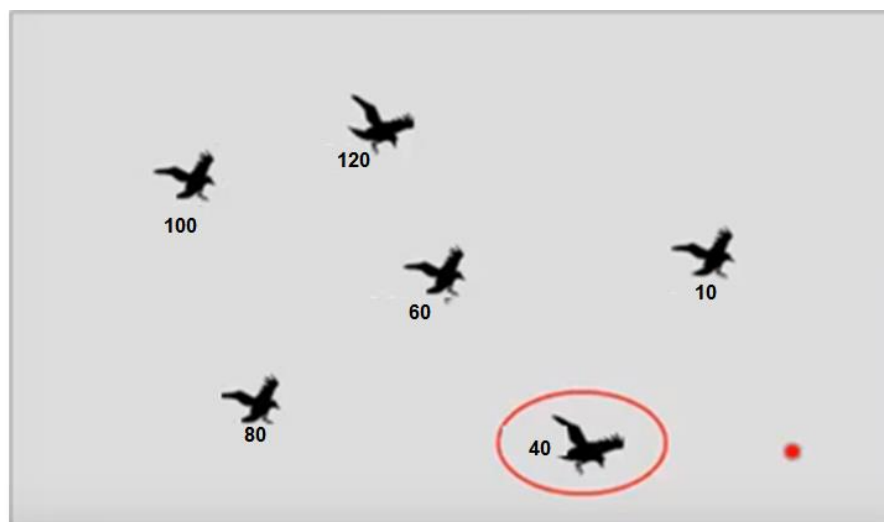
Para facilitar o entendimento do MPSO foi desenvolvido um exemplo onde os pássaros, posicionados em seus respectivos valores de potência, estão em um espaço de busca, área pré-estabelecida pelos valores inteiros de potência, variando o passo de 2 posições para mais ou para menos, devido as taxas cognitivas. Supondo que a função objetivo seja à distância do pássaro para o alimento, ponto vermelho mostrado na FIGURA 4.5, o melhor resultado dessa população é o pássaro (painel fotovoltaico) que está na posição mais próximo do alimento, que é o pássaro com potência de (10 kW) em vermelho. Então o pássaro que atingiu a melhor informação (melhor dimensionamento) vai compartilhar sua informação com os demais para que todos se locomovam para essa mesma potência (10 kW).

¹⁹ Fonte: Adaptada pelo autor.

FIGURA 4.5: EXEMPLO DO MPSO²⁰.

Com o passar das iterações, mostrados na FIGURA 4.6 os pássaros já tendem a se locomover baseado na melhor informação que foi passada pra ele. Pode-se observar que os pássaros estão mais próximos, porém o líder (Gbest) mudou, estando em uma região melhor, com isso todos os outros pássaros tendem a serem influenciados para a posição (40 kW).

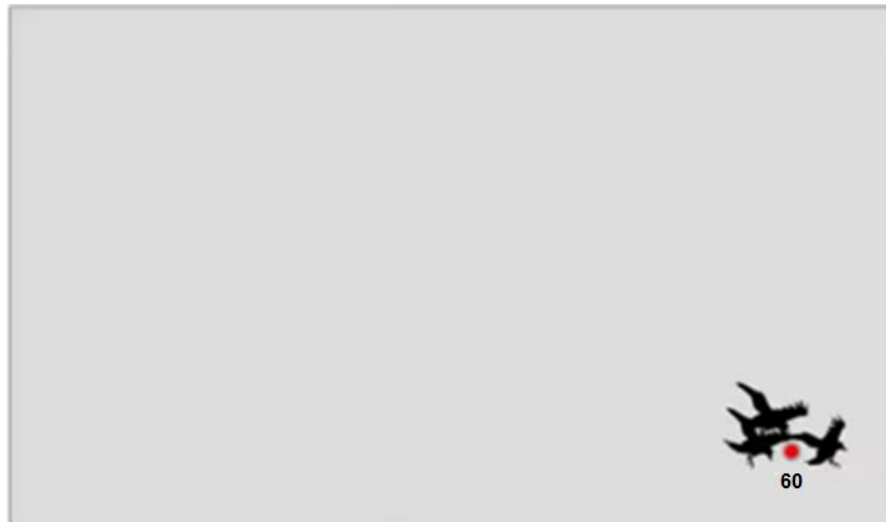
FIGURA 4.6: ITERAÇÕES DO MPSO.



²⁰ Fonte: Adaptada pelo autor.

Na FIGURA 4.7 todos os pássaros encontraram seu dimensionamento ótimo e estão com a mesma função objetivo (ou seja o dimensionamento ótimo é um painel fotovoltaico de 60 kW).

FIGURA 4.7: FIM DAS ITERAÇÕES²¹



4.3 ALGORITMO DO MPSO

O Algoritmo básico foi dividido em sete passos para a otimização de enxame de partículas modificado:

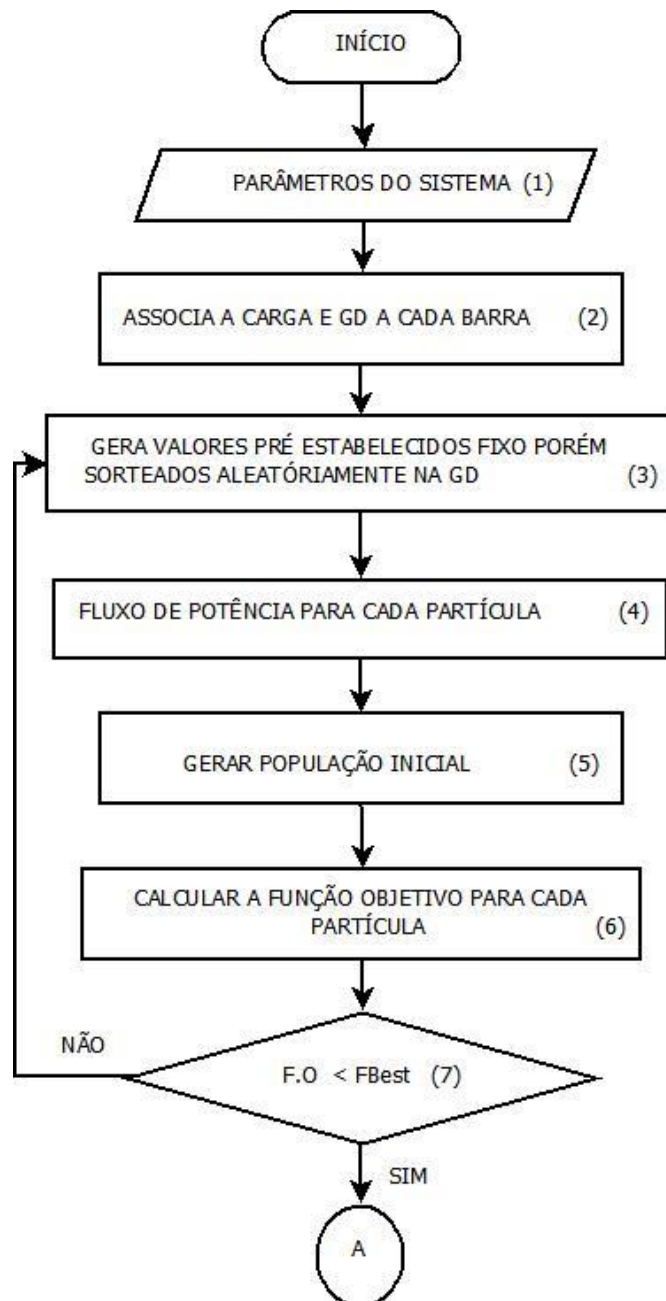
1. Inicialmente gera-se n partículas com posições e velocidades aleatórias;
2. Define-se a função objetivo a ser minimizada;
3. Ajuste do $pbest$ de cada partícula: compara-se a melhor posição encontrada pela respectiva partícula;
4. Ajuste do $gbest$: compara-se a melhor posição encontrada na população;
5. Atualize a velocidade a partir de **Erro! Fonte de referência não encontrada.**;
6. Atualize a posição da partícula a partir **Erro! Fonte de referência não encontrada.**;
7. Volte para o passo 2, repetir até o passo 6 enquanto o critério pré- estabelecido não é alcançado.

²¹ Fonte: Adaptada pelo autor.

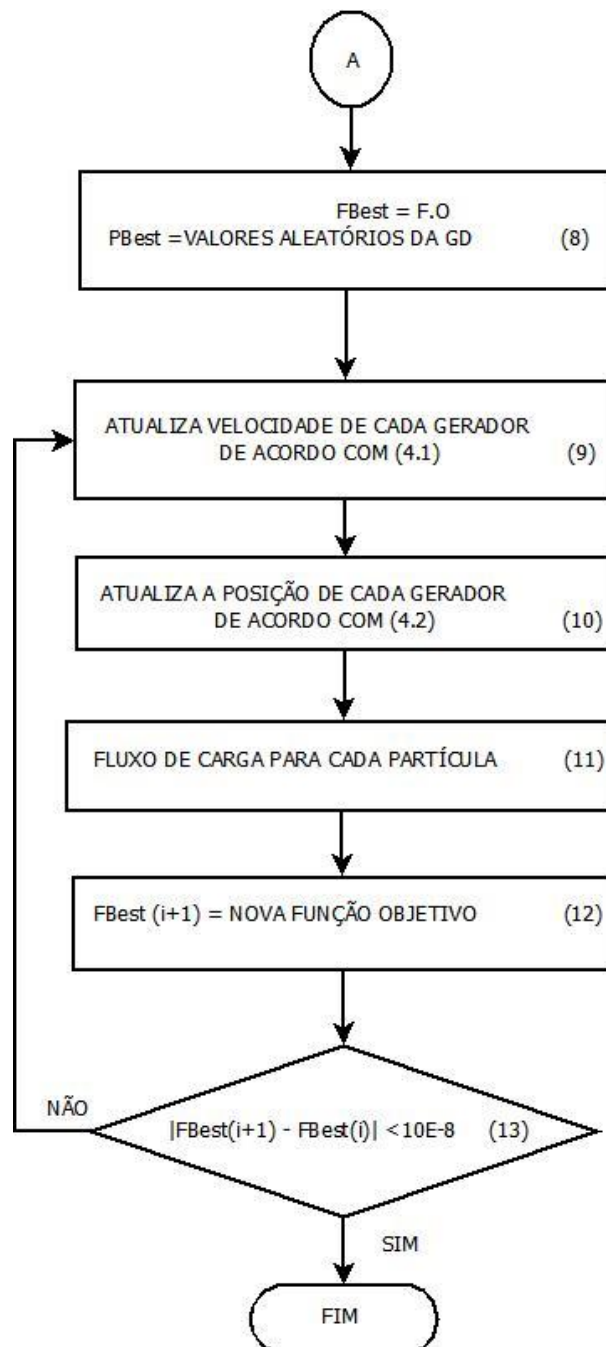
4.4 FLUXOGRAMA DO MPSO

Para facilitar o entendimento do algoritmo MPSO e proporcionar uma visualização em blocos, gerou-se um fluxograma composto por elementos de decisão, blocos de condição e laços de repetição mostrados nas FIGURA 4.8 e FIGURA 4.9.

FIGURA 4.8: FLUXOGRAMA DO ALGORITMO MPSO²².



²² Fonte: Autoria Própria.

FIGURA 4.9: CONTINUAÇÃO DO ALGORITMO DO MPSO²³.

4.5 TOPOLOGIA E TROCA DE INFORMAÇÕES

A troca e disseminação de informação entre as partículas do enxame é um dos principais componentes de qualquer enxame inteligente baseado no algoritmo de

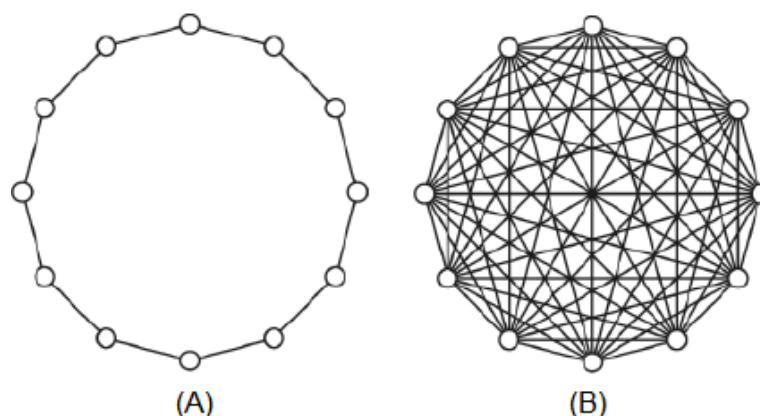
²³ Fonte: Autoria Própria.

otimização por enxame de partículas. O PSO, assim com os outros algoritmos de otimização tem mecanismos próprios para disseminar as melhores posições encontradas durante a execução do algoritmo (SUTTON e D. WHITLEY, 2006) (SUGANTHAN. P.N., 1999). A topologia é um mecanismo utilizado pelo enxame para distribuir informações.

A escolha da topologia influencia na avaliação da velocidade das partículas. Dependendo de como as partículas se comunicam entre si e do problema a ser tratado, a busca pela solução ótima pode priorizar tanto a velocidade de convergência, como a qualidade da solução ou ambas (CARACIOLO, 2008).

As principais topologias utilizadas como mecanismos de comunicação entre as partículas são conhecidas como topologia global e a topologia local. Na FIGURA 4.10 são ilustradas essas topologias.

FIGURA 4.10: TOPOLOGIA LOCAL (A) E TOPOLOGIA GLOBAL(B)²⁴.



Na topologia local o enxame é organizado em formato de anel e cada partícula possui dois vizinhos. Logo, a partícula troca informações apenas com seus vizinhos diretos (CARACIOLO, 2008).

A troca de informações entre as partículas acontece de forma lenta devido a distância existente entre as partícula e esta estrutura provê uma melhor qualidade de soluções para problemas multimodais (ENGELBRECHT, 2005).

²⁴ Fonte: (CARACIOLO, 2008).

Na topologia global o enxame está organizado em formato estrela e todas as partículas estão conectadas entre si. Esta topologia utiliza o mecanismo de vizinhança global, também denominado de gbest para a troca de informação.

Diferente da topologia local essa topologia permite uma convergência mais rápida, visto que a informação da melhor posição é disseminada rapidamente entre todas as partículas do enxame, porém não garante a qualidade da solução obtida. Nestes caso o algoritmo pode atingir um mínimo local devido a sua convergência precoce (CARACIOLO, 2008).

Diversos aspectos de diversas topologias foram analisados por Kennedy e Mendes originando novas propostas na modificação do comportamento do enxame (EBERHART, 1998). O foco dessas modificações demonstra que a melhora de desempenho no algoritmo está relacionada diretamente em como as partículas se interagem dinamicamente dentro do enxame.

5 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

5 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Como abordado anteriormente, a instalação da microgeração distribuída com dimensionamento adequado é uma tarefa muito importante para ser solucionada. Com isso tem sido proposto conceitos, teorias e métodos de técnicas de otimização. Neste método proposto, os painéis fotovoltaicos serão instalados em um sistema teste IEEE 13-Barras e no sistema real da Universidade Federal da Paraíba.

5.1 MÉTODO PROPOSTO

Nos sistemas de micro rede, a redução de perdas e os níveis de tensão podem ser melhorados por meio da geração distribuída, para isso, diferentes técnicas vêm sendo estudadas e analisadas para encontrar o dimensionamento de painéis fotovoltaicos. A complexidade do problema leva a introduzir algumas premissas como:

- Fatores de penalidades fixo;
- Limites de tensão estabelecidos entre 0,95 p.u. e 1,05 p.u.;
- Valores da geração distribuída são fixos preestabelecidos em 0 kW, 200 kW, 400 kW, 600kW, 800 kW, 1000 kW e 1200 kW para o sistema IEEE 13-Barras e 0 kW, 10 kW, 40 kW, 60 kW, 80 kW, 100 kW e 120 kW para o sistema real de distribuição da UFPB.

Para obter a Função Objetivo (FO), inicialmente deve-se calcular o fluxo de carga (*LoadFlow*), e as informações obtidas serão recuperadas e processadas. Como o objetivo do trabalho é minimizar as perdas de potência na rede, diminuir os desvios de tensão e limitar as potências nas linhas aos valores máximos, a função objetivo deve ser composta por três componentes.

a) Componente das perdas: são as perdas totais multiplicadas por um fator de penalidade ($FP_{per} = 100$) para manter uma proporção entre os valores de desvios de tensão e desvios de potência, obtidas da seguinte maneira:

$$Perdas = FP_{per} * (\Sigma PG - \Sigma PC) \quad (5.1)$$

b) Componente para diminuir os desvios de tensão: a segunda componente da F_o é diminuir os desvios de tensão, sendo os limites de

tensão nas barras avaliados verificando o critério estabelecido. Caso estiver fora desse critério, às diferenças de tensões em relação à tensão da rede são somadas e multiplicadas por um fator de penalidade ($FP_{ten} = 1000$), de acordo com (5.2):

$$\Delta V = FP_{ten}(\Sigma \Delta V) \quad (5.2)$$

c) Componente para limitar a potência nas linhas: a potência que ultrapassar o limite de 100 % é diminuída pelo valor 100 e multiplicado por uma fator de penalidade ($FP_{desv} = 10$), dos valores máximos, dado por (5.3):

$$\Delta P = FP_{desv}(\Sigma \Delta P) \quad (5.3)$$

Com isso se obtém a função objetivo aplicado no sistema proposto em (5.4):

$$Fo = FP_{per}(\Sigma PG - \Sigma PC) + FP_{ten}(\Sigma \Delta V) + FP_{desv}(\Sigma \Delta P) \quad (5.4)$$

Em que:

$(\Sigma PG - \Sigma PC)$ = perdas totais;

PG = Potência gerada;

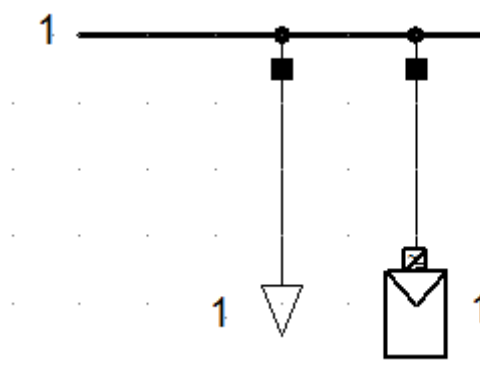
PC = Potência na carga;

FP = Fator de penalidade fixa;

ΔV_k = Desvio de tensão;

ΔP_k = Desvio de potência.

Após a obtenção da função objetivo foi feito um *script* para ordenar as cargas e painéis fotovoltaicos distribuídos de acordo com a numeração das barras, de forma que a barra n (sendo n o número da barra) está conectada a carga e a um possível gerador distribuído de mesma numeração. Isso é necessário para gerar os vetores de posições que se referem as possíveis potências da geração distribuída. Na FIGURA 5.1 é demonstrado um exemplo.

FIGURA 5.1: CARGA E PF CONECTADA A BARRA COM MESMO NÚMERO²⁵.

Aplicando o fluxograma apresentado nas FIGURAS 4.8 e 4.9 observamos que a configuração dos parâmetros do sistema (1) inclui: os dados de barras (tensão nominal), linhas (resistência, reatância e corrente nominal), cargas (potências ativas e reativas) e painéis fotovoltaicos (potência nominal). A associação dos painéis fotovoltaicos e cargas as barras (2) é para certificar-se que as cargas e painéis fotovoltaicos estejam associados a sua respectiva barra de origem.

A subrotina que gera a população inicial inclui a inserção dos dados de entrada, número de partículas, taxas cognitivas (particular e social) e número de painéis fotovoltaicos. É gerado um vetor do tamanho do número de partículas obedecendo aos critérios de valor de geração preestabelecidos de 0 kW, 200 kW, 400 kW, 600kW, 800 kW, 1000 kW e 1200 kW para o sistema IEEE 13-Barras e 0 kW, 10 kW, 40 kW, 60 kW, 80 kW, 100 kW e 120 kW para o sistema real de distribuição da UFPB, porém sorteados aleatoriamente (3). Igualmente é criado o vetor aleatório de velocidade. Os valores do P_{best} , potências dos painéis fotovoltaicos, são aplicados na função objetivo por meio do comando DPL para gravar um novo valor nos painéis fotovoltaicos e então é calculado o fluxo de potência (4). Como resultado são obtidos os valores necessários (5) para se obter a resposta da função objetivo para inésima partícula (6). Após a geração de cada partícula, essa partícula é avaliada em relação a partícula anterior (7). Se a partícula atual for menor que a partícula anterior, o valor dessa partícula é armazenada no vetor F_{best} . As posições associadas a cada F_{best}

²⁵ Fonte: *print screen* carga e painéis fotovoltaicos referente a barra do software *DigSILENT PowerFactory*®.

é armazenada na matriz *Gbest*, que será utilizada em conjunto com o *Pbest* na equação de velocidade do PSO (8).

Para o algoritmo MPSO, os dados de entrada necessários são: número de iteração K , número de partículas i , taxas cognitivas, matriz velocidade, valores *Pbest*, valor *Fbest* e *Gbest*. Em seguida calcula-se a equação da velocidade (9) em **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a velocidade é incrementada ao valor de posição (10) em **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, gerando novos valores e potência das gerações distribuídas para então realizar um novo cálculo de fluxo de carga (11), resultando em novos valores de perda total, desvio de tensão e desvio de potência. Foi definido o máximo de iterações em $K = 200$ (13), supondo um erro para que possa dar continuidade à simulação.

6 RESULTADOS

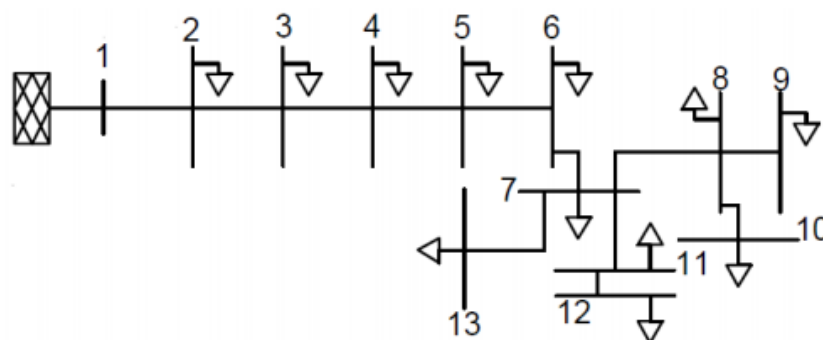
Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados das simulações realizadas no sistema teste de distribuição radial IEEE 13 barras, e uma micro rede real, a Universidade Federal da Paraíba (João Pessoa) que possui 65 pontos de alimentação, cujos dados foram gentilmente fornecido pela Prefeitura Universitaria da UFPB.

6.1 SISTEMA TESTE IEEE 13-BARRAS

O sistema teste IEEE 13-barras é o proposto por (AREF, DAVOUNDI, *et al.*, 2012). Com o uso desse sistema verifica-se a funcionalidade do algoritmo MPSO.

Este sistema radial possui 13 barras com tensão nominal de 12,66 kV, carga total ativa de 10,54 MW e reativa de 5,99 MVar, composto por 12 linhas, cujos dados (resistência e reatância) estão fornecidos no Anexo 1, Tabela 7.1. Nesse sistema, a rede externa, (que é uma barra infinita), está ligado na primeira barra considerando-se como *slack* (Barra de referência). Todas as barras possuem cargas, porém apenas a primeira não possui painel fotovoltaico. Na FIGURA 6.1 é apresentado o sistema IEEE-13 Barras para melhor entendimento.

FIGURA 6.1: SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO IEEE-13 BARRAS²⁶.

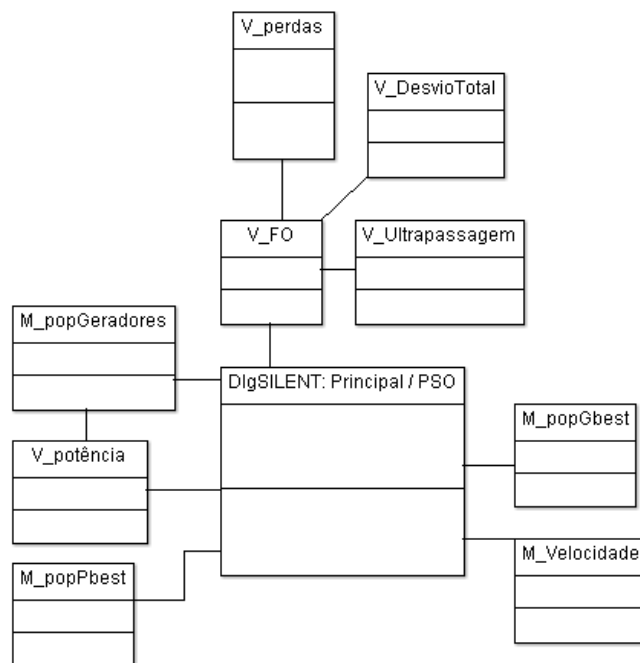


Para facilitar a compreensão do método e proporcionar uma visualização do algoritmo desenvolvido, foi criado um diagrama de classes no DPL mostrando como foram organizadas as classes, representando as especificações dos artefatos que

²⁶ Fonte: (AREF, DAVOUNDI, *et al.*, 2012).

serão manipulados em memória computacional. Na FIGURA 6.2 é ilustrado o diagrama de classes do MPSO.

FIGURA 6.2: DIAGRAMA DE CLASSES DO MPSO²⁷.



As variáveis usadas no programa serão descritas a seguir:

- a) A matriz $M_{popGeradores}$ deve ser preenchida com valores pré-definidos, porém aleatoriamente, para isso foram sorteados os valores de 0 kW, 200 kW, 400 kW, 600 kW, 800 kW, 1000 kW, 1200 kW para o sistema 13-Barras e 0 kW, 10 kW, 40 kW, 60 kW, 80 kW, 100 kW, 120 kW para o sistema da UFPB. Vale salientar que o *software* trabalha com *megawatts* e os valores predefinidos são em *quilowatts*, então, no *script*, esses valores foram divididos por 1000 para obter a matriz de painéis fotovoltaicos e seus respectivos valores em *megawatts*.
- b) Ao rodar o fluxo de carga obtém-se um vetor V_{perdas} com as perdas totais do sistema.

²⁷ Fonte: Autoria Própria

* M_=matriz; V_=vetor

- c) As tensões nas barras também são avaliadas pelo vetor que contém os valores de tensões nas barras, sendo que tensões menores que 0,95 p.u e maiores que 1,05 p.u são multiplicadas por um fator de penalidade.
- d) A matriz $V_{Ultrapassagem}$ contém os valores que ultrapassaram os limites de 100 % de potência nas linhas.
- e) A matriz $M_{popPbest}$ obtém os valores entre a população atual e a melhor partícula, sendo o $PBest$ o melhor valor individual de cada partícula.
- f) A matriz $M_{popGbest}$ relata o histórico dos melhores resultados ocorrido entre as populações.
- g) A matriz $M_{Velocidade}$ inicial é obtida por meio de um número randômico entre (0,1), tendo uma velocidade para as 50 partículas de todas as 200 populações.

Para permitir uma boa convergência os parâmetros cognitivo (ϕ_1) e social (ϕ_2) foram configurados com valores iguais a (2,5), com isso o passo pode se deslocar até duas posições de cada partícula para frente ou para trás.

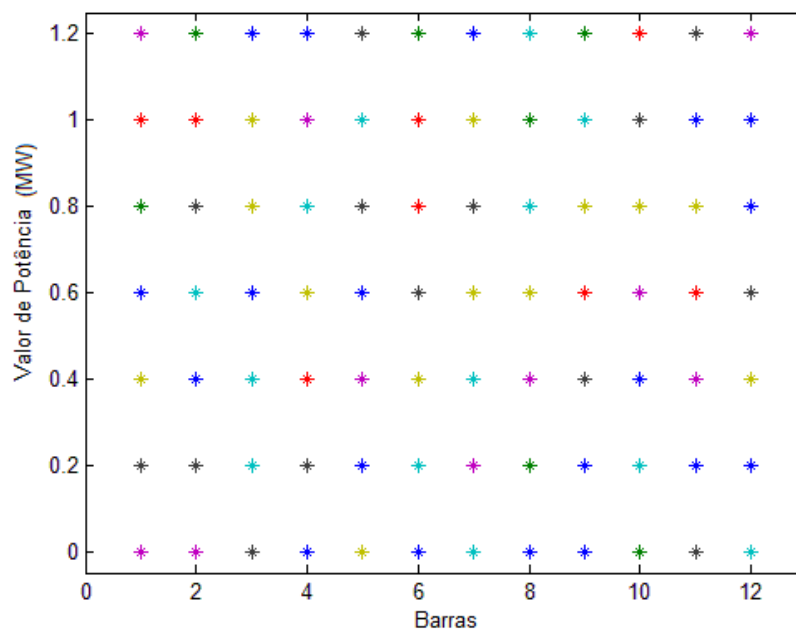
No trabalho proposto serão dimensionados painéis fotovoltaicos com valores predefinidos, porém o algoritmo vai identificar quais os melhores valores, com a finalidade de minimizar as perdas e melhorar o perfil de tensão.

6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO SISTEMA IEEE 13-BARRAS

Os resultados obtidos via simulação são calculados para 200 populações, cada população possui 50 partículas e cada partícula é composta de 12 painéis fotovoltaicos, que representam a microgeração injetadas em cada uma das 12 barras. Na FIGURA 6.3 é ilustrada a simulação do dimensionamento de painéis fotovoltaicos na primeira população com seus respectivos valores preestabelecidos de cada painel fotovoltaico. É possível observar apenas 7 partículas pelo fato das demais estarem sobrepostas devido o MPSO trabalhar com variáveis inteiras fixas. O algoritmo desenvolvido irá selecionar a melhor função objetivo que é responsável por avaliar se a partícula melhorou ou não de posição a cada iteração. As partículas representadas por asteriscos coloridos são as que possuem as melhores soluções conhecidas pelas partículas (painel fotovoltaico) até o momento ($Pbest$) e os asteriscos azuis são as que

possuem a melhor solução conhecida pelo conjunto de partículas (painéis fotovoltaicos), experiência coletiva (*Gbest*).

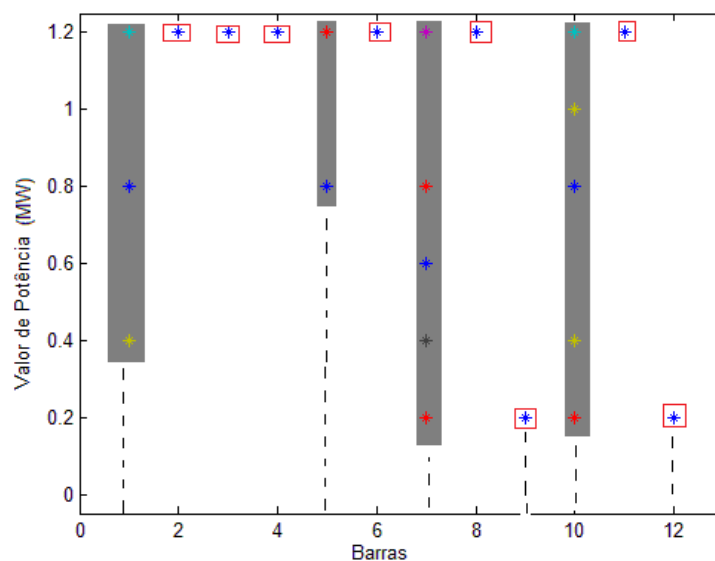
FIGURA 6.3: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA PRIMEIRA POPULAÇÃO²⁸.



Na FIGURA 6.4 é ilustrado o resultado do dimensionamento de painéis fotovoltaicos na população cinquenta onde a microgeração das barras que se encontram no retângulo vermelho (02, 03, 04, 06, 08, 09, 11 e 12) já encontraram seu ponto ótimo de dimensionamento de painéis fotovoltaicos, porém o dimensionamento dos painéis nas barras que se encontram pontilhadas nos retângulos cinza (01, 05, 07, e 10) ainda não convergiram devido a existência de algumas partículas diferentes, ou seja, não conseguiu alcançar a solução ótima do problema de minimização.

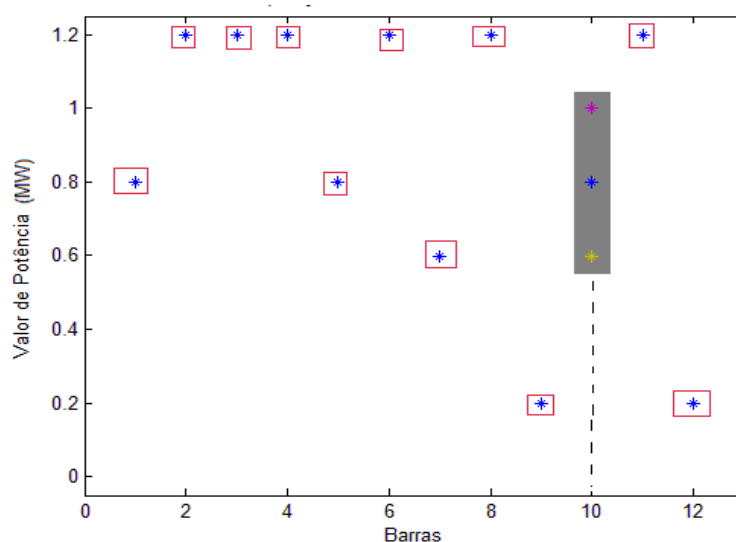
²⁸ Fonte: Autoria Própria

FIGURA 6.4: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA POPULAÇÃO CINQUENTA²⁹.



Na FIGURA 6.5 é mostrado o dimensionamento de painéis fotovoltaicos na população setenta, onde é possível observar que o sistema está convergindo, porém apenas a microgeração da barra (10) possui ainda partículas diferentes. Isto significa que o sistema está muito próximo da solução ótima de convergência.

FIGURA 6.5: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA POPULAÇÃO SETENTA³⁰.

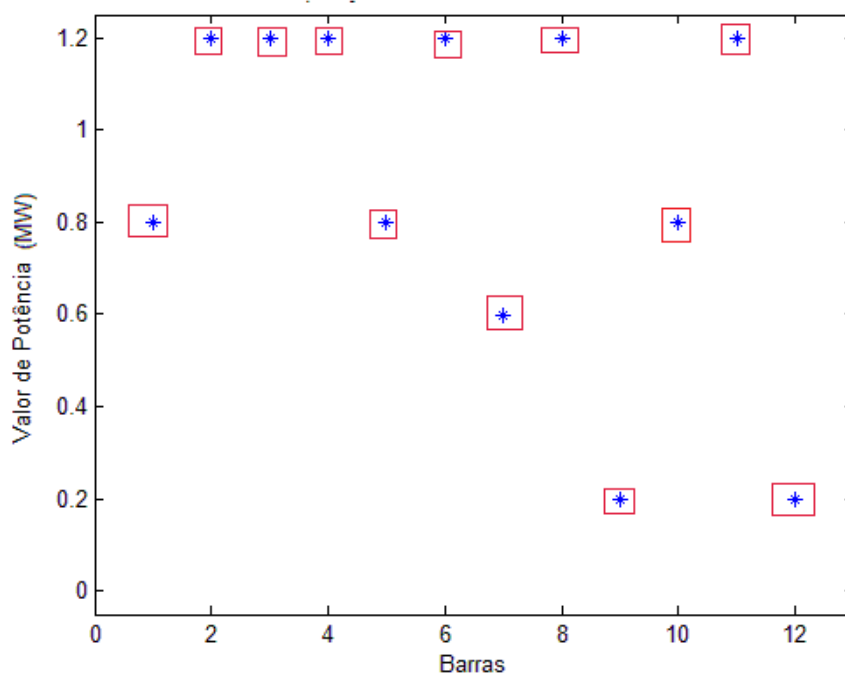


²⁹ Fonte: Autoria Própria

³⁰ Fonte: Autoria Própria

Na FIGURA 6.6 o sistema convergiu e todas as partículas estão concentradas, ou seja, encontraram o seu dimensionamento ótimo. O algoritmo conseguiu convergir bem antes que cem iterações, mas a fim de ilustrar o desempenho do PSO, decidimos executar com duzentas iterações. Vale salientar que o *DigSILENT PowerFactory*® ordena as barras por ordem alfabética. Considerando esse ponto, a nomenclatura utilizada para especificar cada geração influência na ordenação: (PF1= barra 13, PF2= barra 9, PF3= barra 10, PF4 = barra 11, PF5= barra 12, PF6= barra 7, PF7= barra 6, PF8= barra 8, PF9= barra 3, PF10= barra 4, PF11= barra 5, PF12= barra 6, PF13= barra 2).

FIGURA 6.6: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA POPULAÇÃO DUZENTOS³¹.



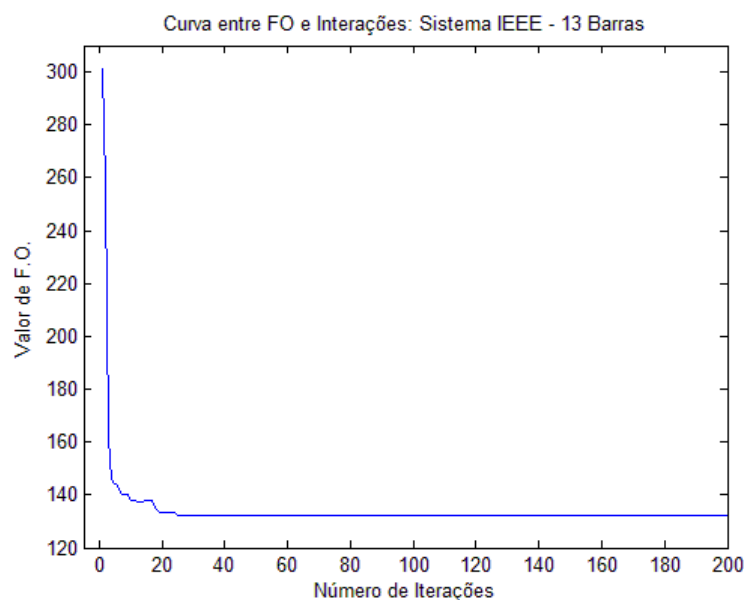
Na Tabela 6.1 mostram-se os resultados encontrados pelo algoritmo MPSO para o dimensionamento ótimo dos 12 painéis fotovoltaicos do sistema IEEE 13 Barras.

³¹ Fonte: Autoria Própria

TABELA 6.1: VALORES DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA IEEE13-BARRAS³².

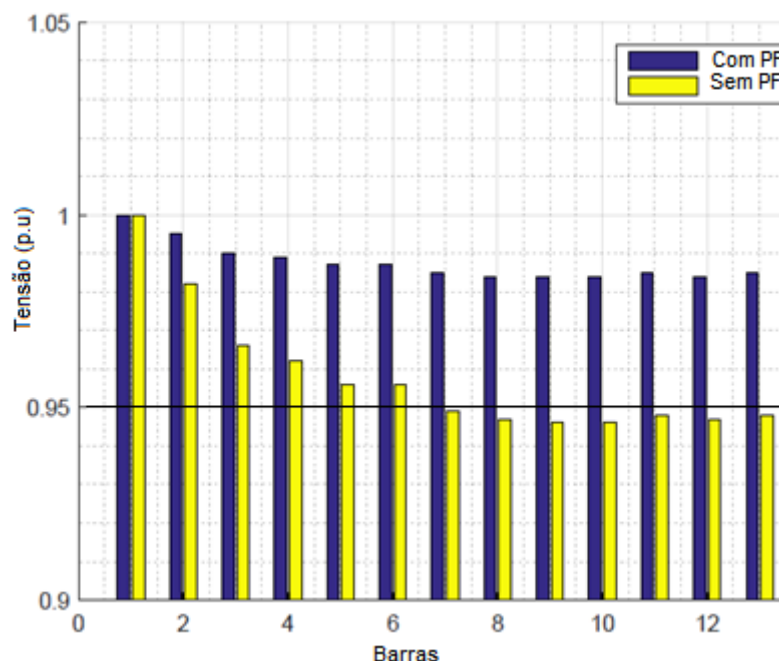
Números das Barras	Dimensionamento (MW)
Barra 2	0,2
Barra 3	0,2
Barra 4	0,8
Barra 5	1,2
Barra 6	0,6
Barra 7	1,2
Barra 8	1,2
Barra 9	1,2
Barra 10	1,2
Barra 11	1,2
Barra 12	0,8
Barra 13	0,8

Na FIGURA 6.7 é ilustrado o comportamento da função objetivo em cada iteração que irá originar uma nova população. É possível observar que o algoritmo atingiu a melhor solução possível, minimizando as perdas e melhorando o perfil de tensão no sistema proposto.

FIGURA 6.7: FUNÇÃO OBJETIVO³³.³² Fonte: Autoria Própria³³ Fonte: Autoria Própria

Na FIGURA 6.8 é ilustrado o gráfico das tensões em cada barra, sem painéis fotovoltaicos e com painéis fotovoltaicos, em amarelo e azul respectivamente. As barras mais próximas da barra de geração infinita estão com melhores níveis de tensão entre 1.0 p.u. e 0.95 p.u. (barras de 1 a 6), já as mais distantes da barra de geração (barras de 7 a 13) estão com perfil de tensão abaixo de 0.95 p.u. Na cor azul os resultados usando o algoritmo MPSO com painéis fotovoltaicos, os níveis de tensão foram melhorados em todas as barras. No programa MPSO foram estabelecidos limites operacionais da rede entre 1.05 p.u.e 0.95 p.u. As barras do sistema com painéis fotovoltaicos ficaram com os níveis de tensão entre 0,98 p.u e 1.0 p.u, considerados satisfatórios.

FIGURA 6.8: SISTEMA COM PF E SEM PF³⁴.



A Tabela 6.2 é mostrada as perdas em cada linha do sistema sem painéis fotovoltaicos com perdas totais de 465,87 kW. A partir do dimensionamento do tamanho dos painéis fotovoltaicos, usando o algoritmo MPSO, as perdas totais do sistema foram reduzidas para 104,72 kW, com seus respectivos valores de painéis fotovoltaicos para cada barra.

³⁴ Fonte: Autoria Própria

TABELA 6.2: PERDAS NAS LINHAS COM PAINEL FOTOVOLTAICO E SEM PAINEL FOTOVOLTAICO³⁵.

Linhas		Perdas Sem PF (kW)	Perdas Com PF (kW)
De	Para		
1	2	0,43	40,51
2	3	0,43	34,48
3	4	0,64	7,44
4	5	0,93	10,53
5	6	1,96	0,55
5	7	3,62	9,53
7	8	33,21	0,76
7	11	47,50	0,29
7	13	49,92	0,09
8	9	177,26	0,27
8	10	149,87	0,14
11	12	0,10	0,13
Perdas Totais (kW)		465,87	104,72

Com base nos resultados observamos que o algoritmo proposto tem a capacidade de fornecer os melhores dimensionamentos para as unidades de geração distribuída. Além disso, os resultados ilustram a eficácia desta abordagem para melhoria do perfil de tensão e redução de perdas de energia.

6.3 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA UFPB (65 BARRAS)

O sistema de distribuição da Universidade Federal da Paraíba é alimentado na tensão nominal de 13,8 kV, composto de 65 transformadores rebaixadores 13,8kV/380V/220V que alimentam diversas instalações prediais conforme pesquisa de campo realizada em maio de 2015 com GPS Garmin 10. Com carga total de 4,95 MW, a universidade é alimentada por uma rede externa, *External Grid* (barra infinita), ligada na barra 50^a (Reitoria), correspondente a subestação principal (Barra de referência).

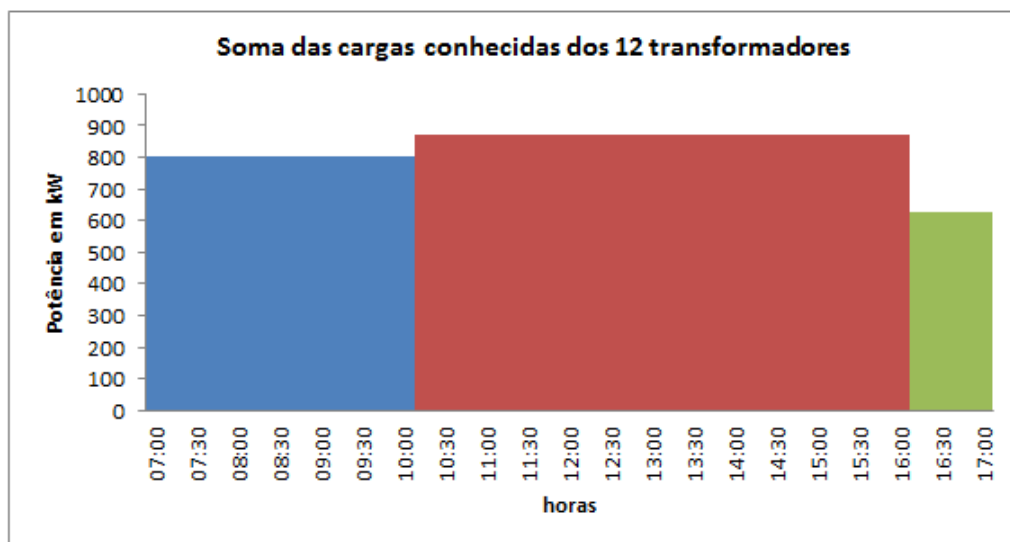
Existem 65 cargas no sistema e em apenas 12 delas havia dados de potências junto a Prefeitura Universitária, referente ao dia 14 de Abril de 2015, e a medição da carga total feita na subestação principal da UFPB. Isto devido à quantidade de

³⁵ Fonte: Autoria Própria

dispositivos de medição instalados junto aos transformadores adquiridos pela Prefeitura. Dessa maneira, elaborou-se uma estratégia para obtenção das cargas desconhecidas composta de três etapas:

a) Gerar a curva de carga com os 12 dados de cargas conhecidos, no período de 7:00 hs às 10:00 hs (valor médio), 10:15 hs às 16:00 hs (valor máximo) e 16:15 hs às 17:00 hs (valor médio). Na FIGURA 6.9 é ilustrada a soma da carga conhecidas dos 12 Transformadores disponibilizados pela Prefeitura Universitaria.

FIGURA 6.9: SOMA DAS POTÊNCIAS DOS 12 TRANSFORMADORES CONHECIDOS³⁶.



b) Determinar a soma das cargas desconhecidos de acordo com (6.1).

$$Curva_{desconhecidos} = Curva_{Total} - Curva_{conhecidos} \quad (6.1)$$

Em que:

$Curva_{desconhecidos}$ = soma das 53 cargas não conhecidas da UFPB;

$Curva_{Total}$ = são os dados medidos na subestação principal da UFPB;

$Curva_{conhecidos}$ = soma das 12 cargas cedidas pela prefeitura.

³⁶ Fonte: Autoria Própria

Na FIGURA 6.10 é ilustrada a soma da curva de carga da subestação principal e na FIGURA 6.11 a soma da curva de carga de todos os transformadores desconhecidos, devido a falta de dados.

FIGURA 6.10: SOMA DA CURVA DE CARGA DA SUBESTAÇÃO PRINCIPAL³⁷.

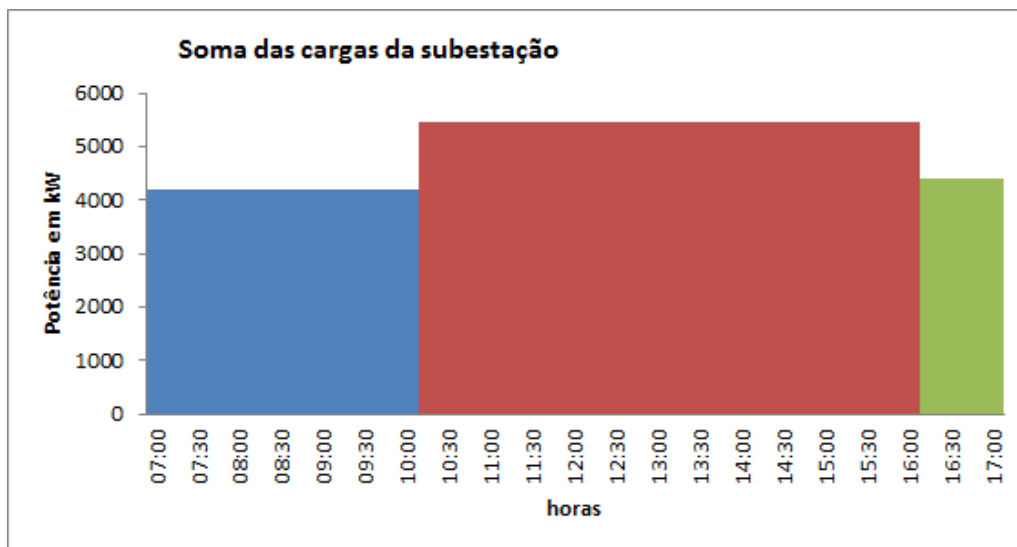
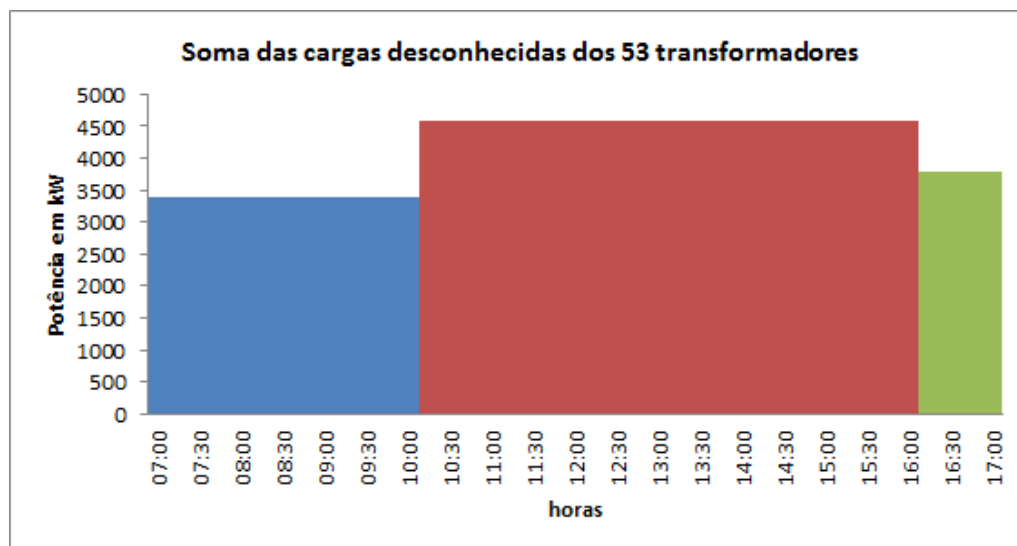


FIGURA 6.11: SOMA DAS CURVA DE CARGA DOS TRANSFORMADORES DESCONHECIDOS³⁸.



³⁷ Fonte: Autoria Própria

³⁸ Fonte: Autoria Própria

c) Alocação das cargas desconhecidas proporcionalmente a potência dos transformadores kVA_k usando a seguinte expressão:

$$Curva_k = \frac{kVA_k}{SOMA} (Curva_{desconhecidos}) \quad (6.2)$$

Em que:

$Curva_k$ = demanda correspondente a carga desconhecida k ;

$SOMA$ = soma de todos os kVA dos transformadores que faltavam.

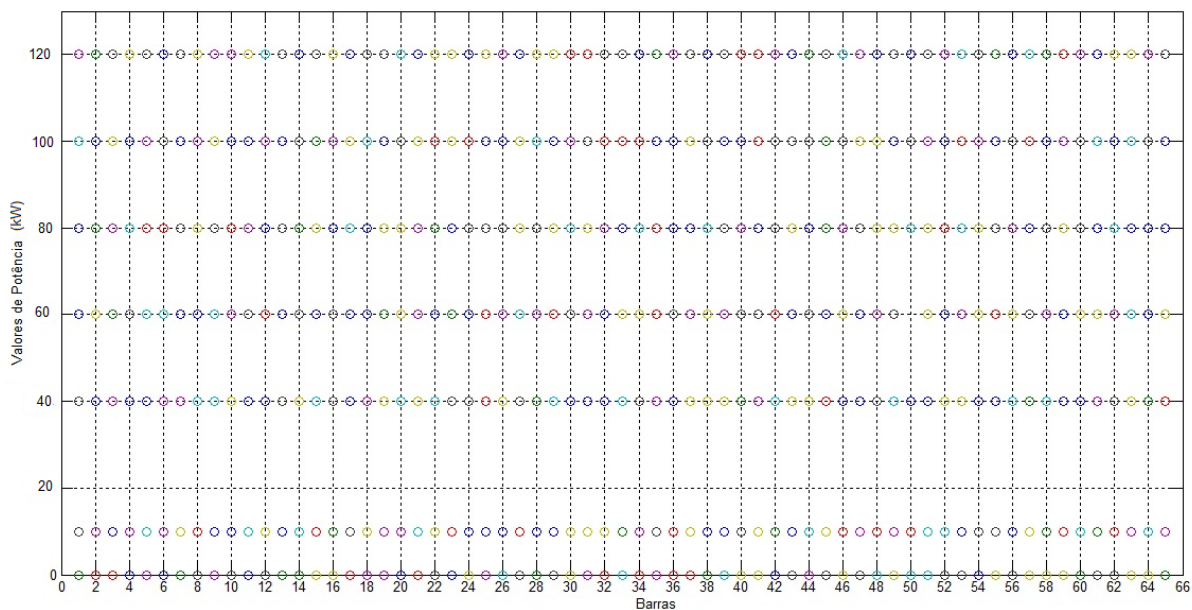
Seguidas as etapas acima, obtiveram-se os valores aproximados das 53 cargas desconhecidas do sistema de distribuição da UFPB que somadas com as cargas conhecidas, foi comparada com a curva de carga total da Universidade.

6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA UFPB

Os resultados obtidos via simulação são calculados para 200 populações, cada população com 50 partículas e cada partícula com 65 painéis fotovoltaicos (módulos de painéis fotovoltaicos), que representam as potências injetadas em cada uma das 65 cargas. No Anexo 2, Figura 7.1 é mostrado o sistema de distribuição da Universidade no *software DlgSILENT PowerFactory®*. Vale salientar que para cada 100 m² de área se obtém 10 kW de potência. O algoritmo desenvolvido irá selecionar a melhor função objetivo que é responsável por avaliar se a partícula melhorou ou não de posição a cada iteração.

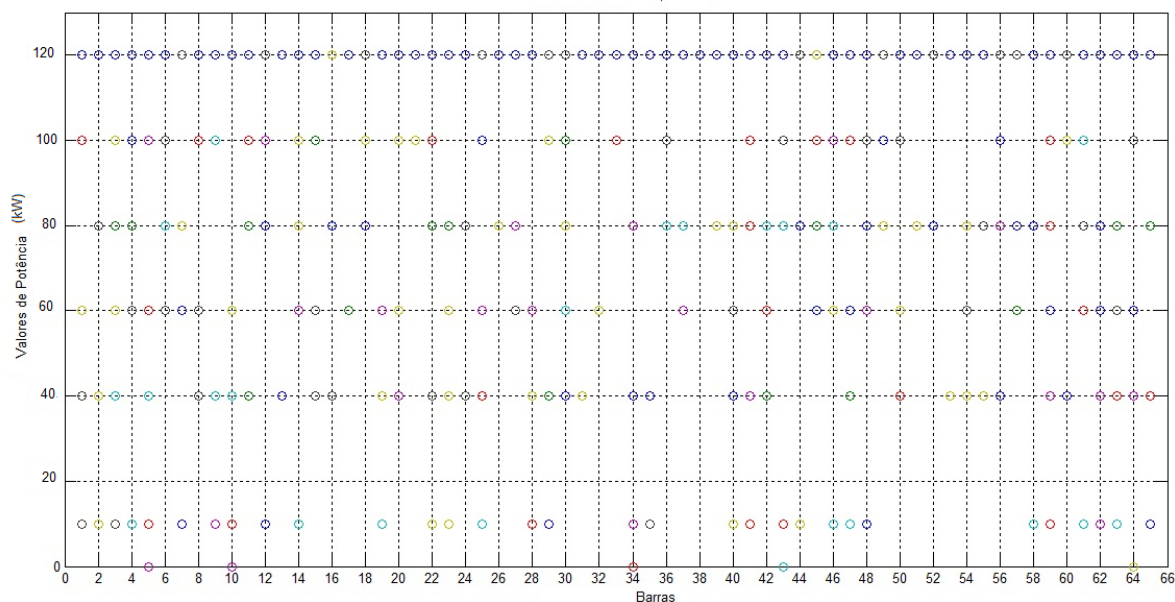
Na Figura 6.12 é possível observar que na primeira população as partículas estão se locomovendo no espaço de busca (entre 0 e 120 kW), de forma aleatória, com funções objetivo diferentes. As partículas representadas por bolinhas coloridas são aquelas com melhor dimensionamento conhecido pela partícula (painéis fotovoltaicos) até o momento (P_{best}) e os asteriscos azuis são as que possuem melhor dimensionamento conhecida pelo conjunto de partículas (painéis fotovoltaicos), experiência coletiva (G_{best}).

FIGURA 6.12: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA PRIMEIRA POPULAÇÃO³⁹.



Na Figura 6.13 é ilustrada a população 30, onde a microgeração das barras não encontraram ainda seu ponto ótimo de dimensionamento de painéis fotovoltaicos, todas as partículas continuam diferentes.

FIGURA 6.13: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA POPULAÇÃO 30⁴⁰.

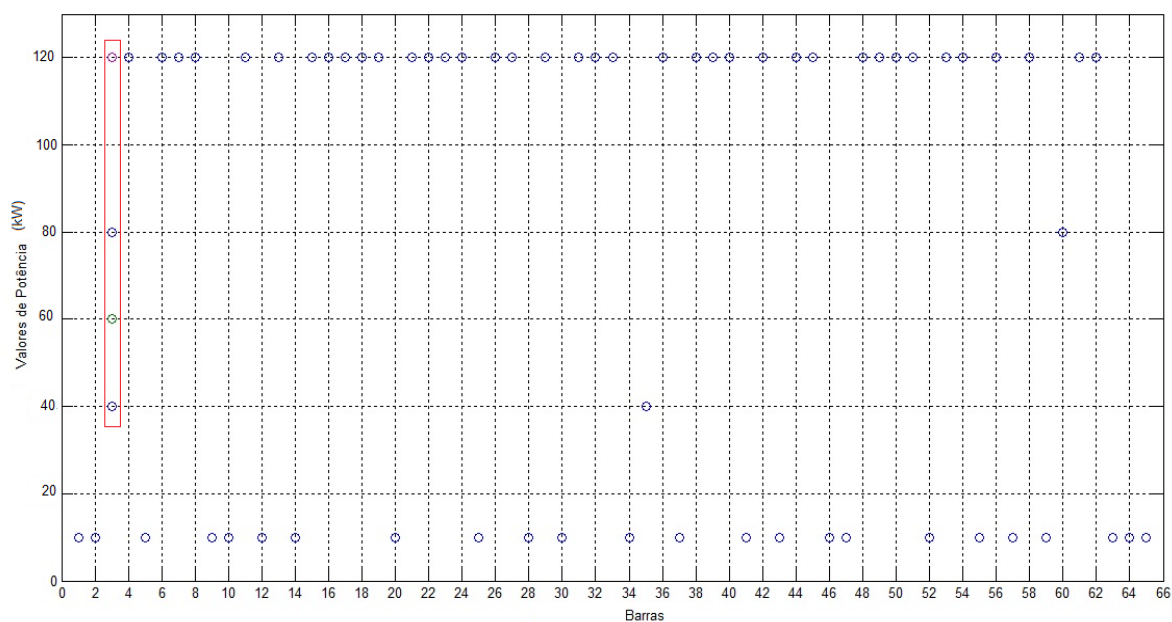


³⁹ Fonte: Autoria Própria

⁴⁰ Fonte: Autoria Própria

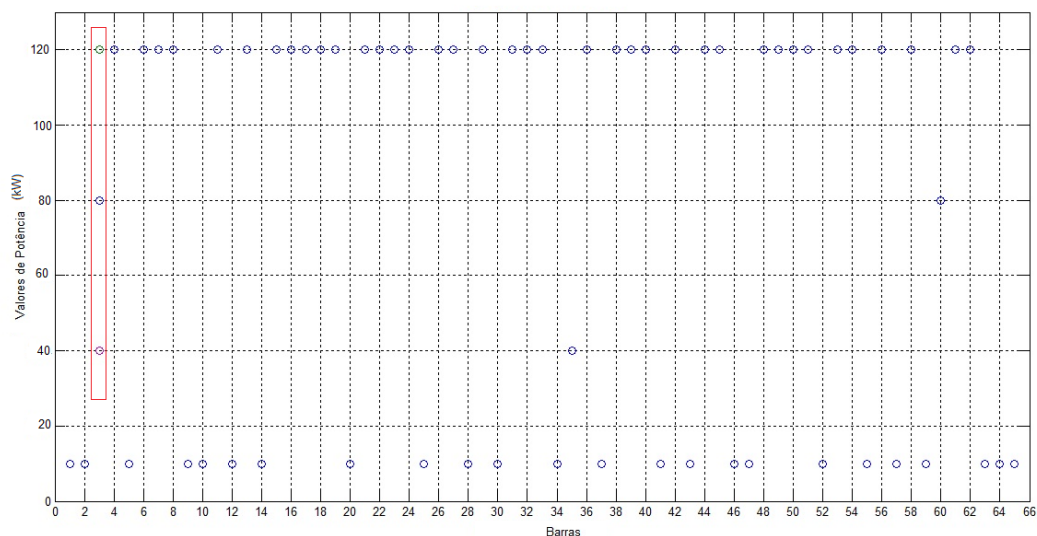
Na FIGURA 6.14 é ilustrada a população cinquenta onde a microgeração da barra (3) ainda não convergiu, pois existem algumas partículas diferentes, ou seja, não conseguiu alcançar a solução ótima do problema de minimização.

FIGURA 6.14: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA POPULAÇÃO 50⁴¹.

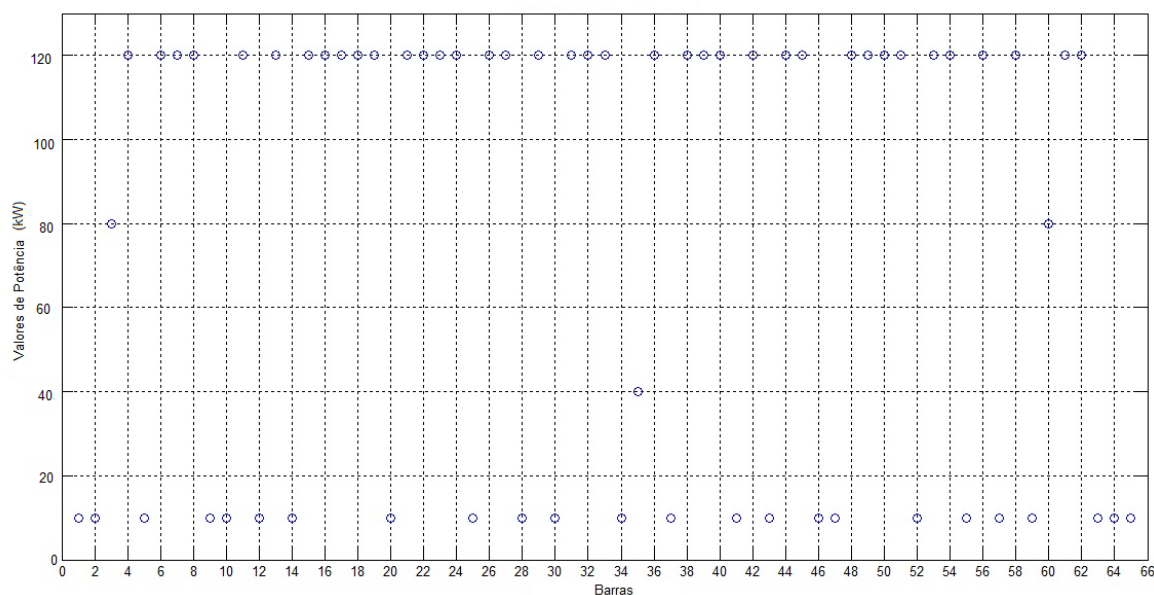


Na FIGURA 6.15 é ilustrada a população 70, onde é possível observar que o sistema está convergindo, porém, a barra 3 possui ainda partículas diferentes, porém o sistema está muito próximo da solução ótima.

⁴¹ Fonte: Autoria Própria

FIGURA 6.15: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA POPULAÇÃO 70⁴².

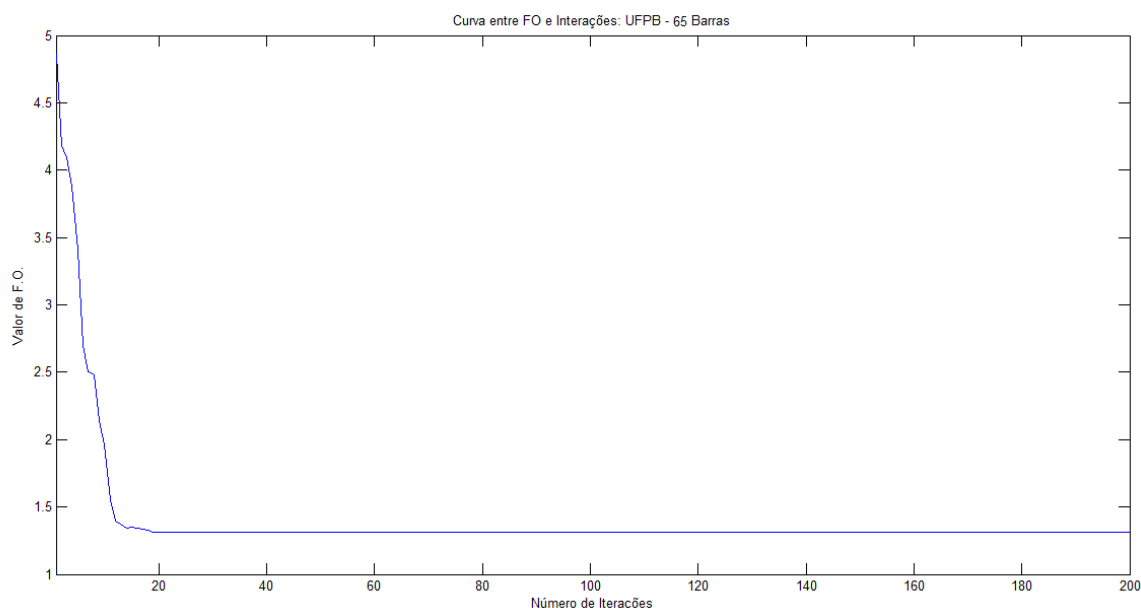
Na FIGURA 6.16 o sistema convergiu e todas as partículas estão concentradas, ou seja, encontraram o seu dimensionamento ótimo, ou seja, os mesmos valores. Vale salientar que o algoritmo conseguiu convergir bem antes de duzentas iterações, mas a fim de ilustrar o desempenho do MPSO, decidiu-se executar com duzentas iterações.

FIGURA 6.16: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA POPULAÇÃO 200⁴³.⁴² Fonte: Autoria Própria⁴³ Fonte: Autoria Própria

No anexo 2 é ilustrada a Tabela 7.4 com os valores de dimensionamento dos painéis fotovoltaicos no sistema da Universidade, com seus respectivos valores de potência.

Para avaliar o desempenho das partículas é ilustrada na FIGURA 6.17 a função objetivo em cada iteração que irá originar uma nova população. É possível observar que o algoritmo atingiu a melhor solução possível.

FIGURA 6.17:FUNÇÃO OBJETIVO⁴⁴.



As perdas foram calculadas para cada linha de transmissão referente ao sistema da Universidade e apresentadas no Anexo 2, Tabela 7.5, porém, foram obtidas de acordo com a modelagem ilustrada no *software*. A Tabela 6.3 apresenta as perdas totais do sistema de distribuição da UFPB com e sem painéis fotovoltaicos. Baseado nos dados da Tabela 6.3 a redução de perdas de potência foi de 89 %.

TABELA 6.3: PERDAS GERAIS COM E SEM PAINÉIS FOTOLVOLTAICOS⁴⁵.

Perdas Totais (kW)	Sem Painéis Fotovoltaicos	Com Painéis Fotovoltaicos
	194,4098	22,8901

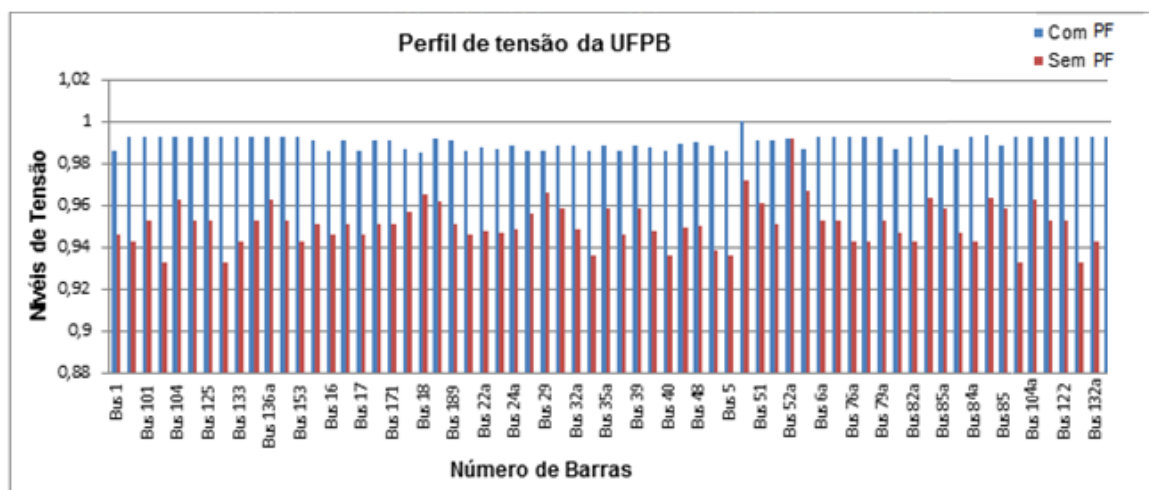
Na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** é ilustrado o gráfico das tensões em cada barra, sem painéis fotovoltaicos e com painéis fotovoltaicos em azul e vermelho respectivamente. Algumas barras aparecem com notação, por exemplo,

⁴⁴ Fonte: Autoria Própria

⁴⁵ Fonte: Autoria Própria.

82ª, pelo fato do sistema de distribuição ter sido capturado no GPS Garmin 10, em vários dias distintos, sendo acrescentada a letra (a) para facilitar o cálculo das distâncias entre as barras. As barras mais próximas da barra de geração infinita (50ª) estão com melhores níveis de tensão entre 1.0 p.u e 0.95 p.u., enquanto as mais distantes da barra de geração estão com perfil de tensão abaixo de 0.95 p.u. Na cor azul utilizando o algoritmo MPSO com geração distribuída, os níveis de tensão foram melhorados em todas as barras. No Programa MPSO foram estabelecidos limites operacionais da rede entre 1.05 p.u.e 0.95 p.u. As barras do sistema com geração distribuída ficaram com níveis de tensão entre 0,98 p.u e 1.0 p.u, considerados satisfatórios.

FIGURA 6.18: PERFIL DE TENSÃO DA UFPB⁴⁶.



⁴⁶ Fonte: Autoria Própria

7 CONCLUSÃO

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto um novo método baseado no algoritmo PSO, o método de otimização por enxame de partículas modificado (MPSO), que identifica o dimensionamento de unidades de geração distribuída (painéis fotovoltaicos) com valores inteiros, no sistema de distribuição de energia elétrica da Universidade Federal da Paraíba, tendo como finalidade a redução de perdas e a melhoria do perfil de tensão, reduzindo as perdas de potência em 89 % e mantendo o perfil de tensão na rede entre 0.98 pu e 1.0 pu.

Os resultados obtidos com o sistema teste de 13-Barras, observou-se que com a geração distribuída as perdas totais diminuíram em 77 % e os níveis de tensão ficaram entre os limites permitidos.

Os resultados relacionados à Universidade demonstraram que em muitos pontos o algoritmo optou por potências de 120 kW nas suas extremidades, diminuindo as perdas nos trechos das extremidades, enquanto no centro da universidade os resultados variaram entre 10 kW, 40 kW e 80 kW. A técnica proposta pode ser um método eficiente para auxiliar a Universidade Federal da Paraíba na escolha do dimensionamento ótimo nos pontos para conexão de painéis fotovoltaicos.

No que se refere ao comportamento da carga relacionado à Universidade, devido ser dividida em três patameres bem definidos, optou-se por dividir a carga por três períodos, considerando os períodos de 07:00 hs as 17:00 hs, período em que a incidência solar dos painéis solares são maiores.

O trabalho apresentado, com a aplicação do algoritmo MPSO, obteve resultados satisfatórios referentes ao dimensionamento, tanto no sistema IEEE 13-Barras quanto relacionado ao sistema real da Universidade. Comprova-se a eficiência do método proposto, desenvolvido como uma ferramenta de análise adequada e de alto nível, com o objetivo de otimizar o uso de painéis fotovoltaicos em micro redes contribuindo para uma maior eficiência energética dos sistemas.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Como atividades futuras, pretende-se:

Verificar um método de alocação de unidades de geração distribuída considerando perdas, desvios de tensão e aspectos econômicos;

Desenvolvimento de uma metodologia de custos de investimento em painéis fotovoltaicos, principalmente na parcela referente aos custos evitados devido à redução das perdas;

Realizar simulações que consideram a alocação de diversas unidades em ponto chave da UFPB.

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SODER, L. **Distributed Generation**. 2000.
- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SODER, L. **Distributed generation**: Electric Power Systems Research. Issue 3: v. 57, 2001. 195-204 p.
- ANEEL. Resolução normativa nº482 de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica e dá outras providências. <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>, Brasília, 08 maio 2012. Acesso em: 26 maio 2015.
- ANEEL. Energia hidráulica, 2015.
- AREF, A. et al. PSO Based Multi Objective Approach for Optimal Sizing and Placement of Distributed Generation. **Research Journal of Sciences**, Takestan, p. 4617- 4624, Novembro 2012.
- AUGUSTUS, G. **Inteligência de Enxame e o Algoritmo das Abelhas**. São Paulo: 2009.
- BANZHAF, W.; NORDIN, P.; KELLER, R. E. & F. F. D. Genetic Programming an introdução. **ISBN 155860510X**, Morgan Kaufmann, 1998.
- BARBOSA, W. P. F.; AZEVEDO, A. C. S. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: VANTAGENS E DESVANTAGENS. **II SIMPOSIO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**, AMAZONIA, 2013.
- BARIN, A. **Metodologia Para a Análise dos Efeitos da Geração Distribuída sobre as Características operacionais dos Sistemas de Distribuição Utilizando Técnicas Multicriteriais**. Santa Maria: 2007.
- BONABEAU, E.; THÉRAULAZ, G. Swarm Smarts. **Scientific American**, v. 18, Março 2000.
- BRAUN-GRABOLLE, P. A Integração de Sistemas Solares Fotovoltaicos em Larga Escala no Sistema Elétrico de Distribuição Urbana, Florianópolis, 2010.
- BRITO, S. D. S. http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial_solar.htm. **Tutorial de Energia Solar- Princípios e Aplicações. 2006 CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica**, 02 jun. 2015. Acesso em: 02 jun. 2015.
- CARACIOLO, M. P. **Multi-Ring**: Uma nova topologia para otimização por enxame de partículas (PSO). Recife: [s.n.], 2008.

- CARO, G. . D.; DORIGO, M. Ant colonies for Adaptive Routing in Packetswitched Communications Networks. **Journal of Artificial Intelligence Research** 9, Belgium, Dezembro 1998.
- CARVALHO, A. P. D. L. F. D. **Otimização por Enxame de Partículas (PSO) e Otimização por Colônias de Formigas (ASO) aplicadas ao Problema do Caixeiro Viajante (TSP)**. São Paulo: 2007.
- CIGRE. www.cigre.org, 2008. Acesso em: 23 julho 2015.
- DUARTE, G. R. **Um algoritmo inspirado em colônias de abelhas para otimização numérica**. Juiz de Fora: 2015.
- DUGAN, R. C.; MCDERMOTT, T. E.; BALL, G. J. **Distribution Planning For Distributed Generation**. USA: 2000.
- DUGAN, R. C.; PRINCE, S. K. Including Distributed Resources In Distribution Planning. **IEEE**, 2004.
- EBERHART, J. E. K. **Swarm Intelligence**. **Morgan Kaufmann Publishers**, California, USA, 2001.
- EBERHART, Y. S. E. R. C. A Modified Particle Swarm Optimizer. **IEEE International Conference of Evolutionary Computation**, Alaska, Maio 1998.
- EKEL, P.; TERRA, L. D. B.; JUNGES, M. F. D. Methods of multicriteria decision making in fuzzy environments and their applications to transmission and distribution problems. **IEEE**, Minas Gerais, 1999.
- ELETROBRAS. <http://www.eletrobras.com/>. **Como a energia elétrica é gerada no Brasil**, 20 jul. 2015. Acesso em: 20 2015 2015.
- ENGELBRECHT, P. **Fundamentals of Computational Swarm Intelligence**. **Jonh Wiley & Sons**, 2005.
- FALCÃO, D. M. Impactos da mini e microgeração distribuída nas redes de distribuição de energia elétrica. **IEEE**, Setembro 2013.
- FARRET, A. F. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica**. Santa Maria: UFSM, v. 2, 2010.
- FRIGO, M. M. **IMPACTO DA MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO**. CAMPO BRANDE-MS: 2013. Acesso em: 02 jun. 2015.

- GAMBARDELLA, L.M.; MONTEMANNI, R.; WEYLAND, D. **An Enhanced Ant Colony System for the Sequential Ordering Problem**. Selected papers of the International Conference on Operations Research. 2012. p. 355-360.
- GATHERCOLE, C. & R. P. An investigation of supervised learning in genetic programming, 1998.
- GIANNI DI CARO, MARCO DORIGO. **Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks**.
- GMBH A, D. **DlgSILENT Programming Language DlgSILEN**. Alemanha: v. 15.0, 2011.
- GMBH D, D. **DlgSILENT Programming Language DlgSILEN**. Alemanha: v. 15.0, 2011.
- GMBH, D. **User's Manual, DlgSILENT GmbH**. Alemanha: v. 15.0, 2011b.
- GMBH, D. **DlgSILENT PowerFactory V-Getting Started**. Alemanha: 2011c.
- GOLDBERG. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. **Reading: Addison-Wesley Longman**, 1989.
- GOLDEMBERG, J. The Brazilian Energy Initiative; **Word Summit on Sustainable Development**, Johannesburg, agosto 2002.
- GÓMEZ-EXPÓSITO, A. C. A. J. **Sistemas de Energia Elétrica: Análise e Operação**. Rio de Janeiro: LTC Cañizares, 2011.
- GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Powersystem analysis**. Estados Unidos da América: McGraw-Hill, 1994.
- GUEDES, L. D. M. **Alocação de Unidades de Geração Distribuída Considerando Perdas e Aspectos Econômicos**. Brasília: 2013.
- GUERRICHE, BOUKTIR, T. Optimal Allocation and Sizing of Distributed Generation with Particle Swarm Optimization Algorithm for Loss Reduction. **Revue des Sciences et de la Technologie - RST**-, v. 6, n. 1, p. 59-69, janvier 2015.
- IEA. **Enhancing the Market Deployment of Energy Technology**. Paris: 2009.
- IEEE. **Institut of Electrical and Electronics Engineers, Inc.**, Maio 2008.
- INEE. INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **http://www.inee.org.br/downloads/forum/Notas%20GD.pdf.**, 2015. Acesso em: 24 Maio 2015.
- KAGAN, N. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. São Paulo: Blucher, 2010.

- KARABOGA, D. **An idea based on honey bee swarm for numerical optimization**. Kayseri: 2005.
- KENNEDY, R. E. E. J. Particle swarm optimization. **IEEE**, Piscataway, NJ, p. 1945-1948, 1995.
- KESSIA. Inteligencia Artificial Raciocinio baseado em casos. **http://kessia.blogs.unipar.br/**, fev. 2009. Acesso em: jun. 2015.
- KIM, K.-H. et al. Dispersed generator placement using fuzzy-GA in distribution systems. **IEEE**, 2002.
- KOTO, S. M. **FLUXO DE CARGA PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA CONSIDERANDO A PRESENÇA DE AEROGERADORES**. Santo André: 2013.
- KOZA, J. R. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. **ISBN 0262111705**, MIT Press, 1992, 1992.
- KUMAR, S. **Optimal Sizing and Placement of Generator Units in Distributed Generation System by Particle Swarm Optimization (PSO)**. Kalkata: [s.n.], 2012.
- LEVINE, R. D. D. E. E. B. Inteligência Artificial e Sistemas especialistas. **McGraw-Hill**, São Paulo, 1988.
- LI, Y. L. Y. Z. B. M. **A modified Newton-Raphson power flow method considering wind power**. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Asia-Pacific: [s.n.]. 2011. p. 1-5, 25-28.
- LIU, J; SALAMA, M. M. A.M. R. R. **An efficient power flow algorithm for distribution systems with polynomial load**. International Journal of Electrical Engineering Education, v. 39, 2002. 372-386 p.
- LUGER, G. F. Inteligência Artificial: Estruturas e Estratégias para a Solução de Problemas Complexos. **Bookman**, Porto Alegre, v. 4, 2004.
- MARCO DORIGO. **“Ant colonies for the traveling salesman problem”**. IRIDIA – Université: [s.n.].
- MÉNDEZ, V. H. E. A. A Impact of distributed generation on distribution investment deferral. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 28, p. 244-252, 2006.
- MILLONAS, M. M. S. **phase transitions, and collective intelligence**. MA: Artificial Life III, 1994.

- MIRANDA, V.; MONTEIRO, C. C. A. C. Training a FIS with EPSO under an Entropy Criterion. **9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems**, Stockholm, Sweden, June 2006.
- MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.
- MONTICELLI, A.; GARCIA, &. A. **Introdução a Sistemas de Energia Elétrica**. Campinas: Unicamp, 2003.
- NARA, K. et al. **Application of tabu search to optimal placement of distributed generators**. v. 2, 2001.
- OLADE. ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGIA. Curso de la Generación Distribuida. <http://www.olade.org/elearning/>, 15 out 2011.
- OLIVEIRA, C. B. M. **Desenvolvimento de Modelos no Programa DlgSILENT PowerFactory para estudo de estabilidade Transitória em Sistemas elétricos de Potência com Aerogerador**. Rio Grande do Norte: 2006.
- POZO, A. E. A. **Computação Evolutiva**. Paraná: 2015. Acesso em: 15 jun. 2015.
- PRESIDÊNCIA, D. R. DECRETO Nº 5.163 DE 30 DE JULHO DE 2004. <http://www.planalto.gov.br/>, 30 Julho 2004. Acesso em: 21 Agosto 2015.
- RAMIREZ-ROSADO, I. J.; DOMINGUEZ-NAVARRO, J. A. New multiobjective tabu search algorithmo for fuzzy optimal planning of power distribution systems. **IEEE Transactions**, v. 21, p. 224-223, 2006.
- RICH, E.; KNIGHT, K. **Inteligência Artificial**. McGraw-Hill, Rio de Janeiro, 1994.
- SHI, Y. Particle Swarm Optimization. **Proceedings of the IEEE Neural Network**, , p. 8-13, 2004.
- SILVA, R. A. C. **Inteligência artificial aplicada à ambientes de Engenharia de Software: Uma visão geral**. Viçosa: 2005.
- SOUZA, A. R. R. **Conexão de Geração Distribuida em Redes de Distribuição. Dissertação de Mestrado**, Curitiba, 2009.
- SUGANTHAN. P.N. Particle swarm optimizer with neighborhood operator. **IEEE**, Washington, p. 1958 -1962, Julho 1999.
- SUTTON, A. M.; D. WHITLEY, M. L. E. A. H. PSO and multifunnel landscapes: how cooperation might limit exploration. **Em GECCO 2006 -:Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation**, Washington, v. 1, p. 75-82, Julho 2006.

TREVISAN, A. S. **EFEITOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO**. CURITIBA: 2011.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: Conceito e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2013.

WHITE, T.; PAGUREK, B. Towards multi-swarm problem solving in networks. In: Proceedings of Third International Conference on Multi-Agent Systems. **IEEE Computer Society**, 1998.

XAVIER, M. V.; BOROTNI, E. D. C.; HADDAD, J. Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras. **Sociedade Brasileira de Planejamento Energético SBPE**, v. 11, 2014.

Neste anexo apresenta-se os dados de barras e os dados de linhas. A Tabela 7.1 mostra-se os dados de linhas do sistema de 13-Barras e a Tabela 7.2 é ilustrado os dados de carga do sistema de 13-Barras.

TABELA 7.1: DADOS DE LINHAS SISTEMA 13-BARRAS.

Barras		R (Ohm)	X (Ohm)
De	Para		
1	2	0,176	0,138
2	3	0,176	0,138
3	4	0,045	0,035
4	5	0,089	0,069
5	6	0,045	0,035
5	7	0,116	0,091
7	8	0,073	0,073
7	11	0,063	0,05
7	13	0,062	0,053
8	9	0,074	0,058
8	10	0,093	0,093
11	12	0,068	0,053

TABELA 7.2: DADOS DE CARGA SISTEMA 13-BARRAS.

Cargas	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MW)
2	0,89	0,468
3	0,628	0,47
4	1,112	0,764
5	0,636	0,378
6	0,474	0,344
7	1,342	1,078
8	0,92	0,292
9	0,766	0,498
10	0,662	0,48
11	0,69	0,186
12	1,292	0,554
13	1,124	0,48

ANEXO 2

Na FIGURA 7.1 é ilustrado o diagrama unifilar do sistema de distribuição da UFPB, e na FIGURA 7.2 é ilustrado o dimensionamento dos painéis fotovoltaicos.

FIGURA 7.1: SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA UFPB.

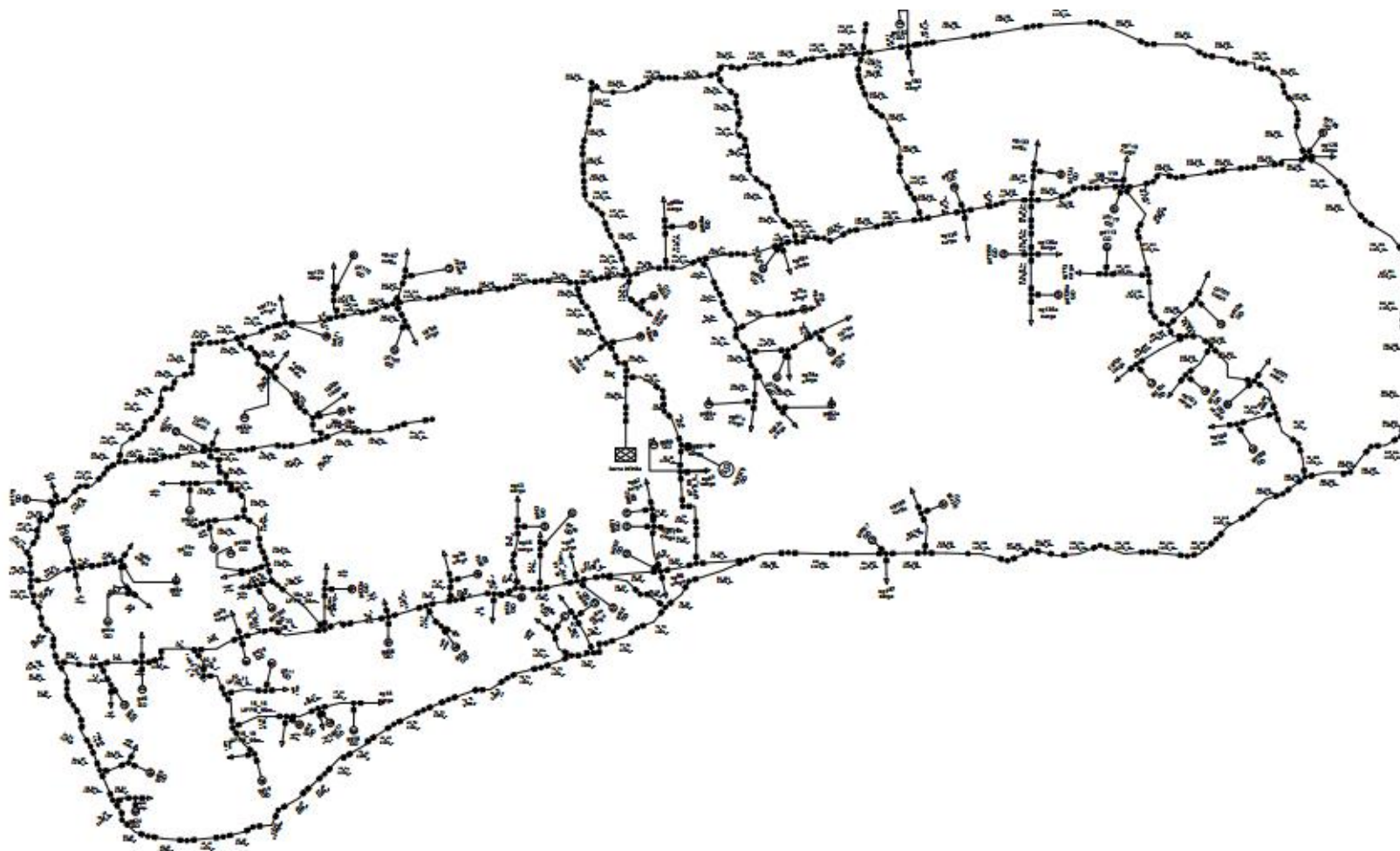
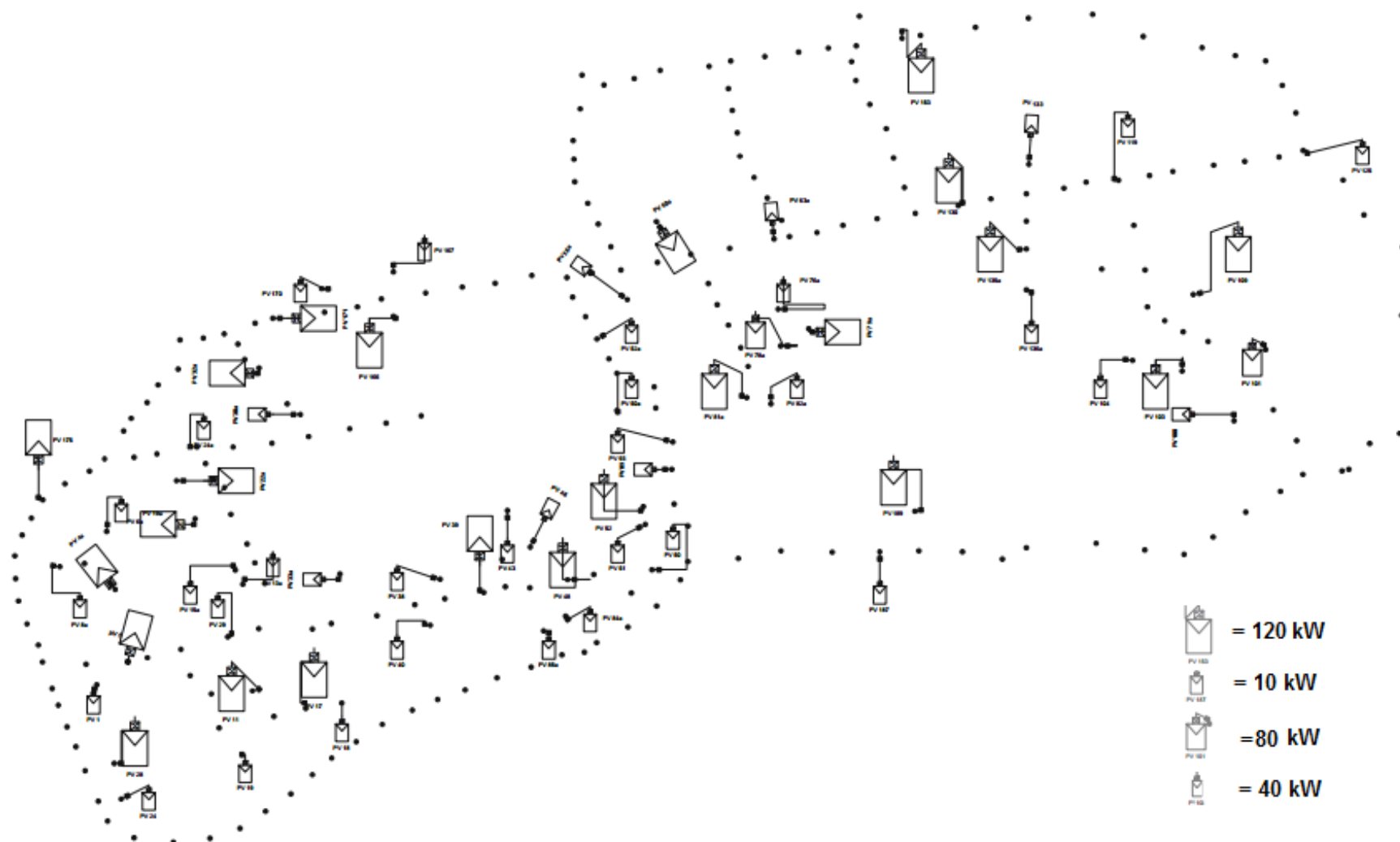


FIGURA 7.2: DIMENSIONAMENTO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.



Na Tabela 7.3 os valores de cargas para o sistema da UFPB de acordo com a estratégia para determinar os valores de cargas desconhecidos são apresentados.

TABELA 7.3: DADOS DE CARGA DO SISTEMA DA UFPB.

Número da Carga	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kW)
cg1	103,92	34,15686
cg100	52,31	17,19346
cg101	20,7	6,80376
cg103	77,1	18,88065
cg104	52,31	17,19346
cg109	155,89	20,69866
cg11	31,17	10,24509
cg113	77,9	25,6045
cg119	77,9	25,6045
cg125	52,31	17,19346
cg130	31,17	10,24509
cg133	52,31	17,19346
cg135a	77,9	25,6045
cg136a	156,4	52,50787
cg13a	86,82	13,57255
cg153	31,17	10,24509
cg15a	103,92	34,15686
cg166	52,31	17,19346
cg167	103,92	34,15686
cg16a	20,7	6,80376
cg170	103,92	34,15686
cg171a	52,31	17,19346
cg175	103,92	34,15686
cg17a	103,92	34,15686
cg18	103,92	34,15686
cg187	52,31	17,19346
cg189	155,89	20,69866
cg19	80	16,69954
cg19a	43,89	16,51987
cg22a	155,89	20,69866
cg24	52,31	17,19346
cg24a	52,31	17,19347
cg28	103,92	34,15686
cg29	52,31	17,19346

cg30a	52,31	5,50908
cg32a	72,73	23,90521
cg33a	103,92	34,15686
cg35	52,31	12,90293
cg38	62,56	20,56248
cg39	103,92	34,15686
cg40	103,92	23,23727
cg43	100,08	32,89469
cg46	77,9	25,6045
cg48	52,31	17,19347
cg5	31,17	4,13866
cg50	31,17	10,24509
cg51	155,89	21,05708
cg52	126,4	41,54569
cg52a	155,89	51,23859
cg58a	77,9	25,60452
cg5a	31,17	10,24509
cg60a	52,31	17,19346
cg63a	52,31	17,19347
cg6a	103,92	29,49615
cg76a	14,01	4,60487
cg78a	77,9	25,60452
cg79a	31,17	10,24509
cg81a	77,9	25,6045
cg82a	52,31	17,19347
cg84a	103,92	34,15686
cg85a	103,92	34,15686
cg89	103,92	34,15686
cg8a	103,92	34,15686
cg93	52,31	17,19346

Na Tabela 7.4 mostram-se os resultados encontrados pelo algoritmo MPSO para o dimensionamento ótimo dos 65 painéis fotovoltaicos do sistema real de distribuição da UFPB.

TABELA 7.4: DIMENSIONAMENTO DA UFPB.

Números das Barras	Dimensionamento (kW)
Barra 1	10
Barra 100	10
Barra 101	80
Barra 103	120
Barra 104	10
Barra 109	120
Barra 11	120
Barra 113	120
Barra 119	10
Barra 125	10
Barra 130	120
Barra 133	10
Barra 135 ^a	120
Barra 136a	10
Barra 13a	120
Barra 153	120
Barra 15a	120
Barra 166	120
Barra 167	120
Barra 16a	10
Barra 170	120
Barra 171a	120
Barra 175	120
Barra 17a	120
Barra 18	10
Barra 187	120
Barra 189	120
Barra 19	10
Barra 19a	120
Barra 22a	10
Barra 24	120
Barra 24a	120
Barra 28	120
Barra 29	10
Barra 30a	40
Barra 32a	120

Barra 33a	10
Barra 35	120
Barra 38	120
Barra 39	120
Barra 40	10
Barra 43	120
Barra 46	10
Barra 48	120
Barra 5	120
Barra 50	10
Barra 51	10
Barra 52	120
Barra 52a	120
Barra 58a	120
Barra 5 ^a	120
Barra 60 ^a	10
Barra 63 ^a	120
Barra 6 ^a	120
Barra 76 ^a	10
Barra 78 ^a	120
Barra 79 ^a	10
Barra 81 ^a	10
Barra 82 ^a	120
Barra 84 ^a	10
Barra 85 ^a	80
Barra 89	120
Barra 8 ^a	10
Barra 93	10
Barra 132 ^a	10

A Tabela 7.5 apresenta as perdas de linhas do sistema configurados no *DlgSILENT PowerFactory*®

TABELA 7.5: PERDAS POR LINHAS.

Linhas	Perdas sem PF (kW)	Perdas com PF (MW)
101_102	0,00159	0,00028
102_103	0,00107	0,0001
102_105	0,00017	0,00006
105_104	0,0003	0,00003
105_108	0,00001	0,00001
108_109	0,00249	0,00058
108_110	0,00279	0,00028
10_11	0,00014	0,00013
10_12	0,00793	0,00072
10_9	0,0087	0,00088
10a_32	0,02691	0,00344
112_110	0,00513	0,00052
112_113	0,0004	0,00006
117_112	0,02433	0,00095
119_117	0,01412	0,00055
119_120	0,00002	0,00024
120_121	0,00003	0,00048
121_122	0,00004	0,00054
122_123	0,00002	0,00023
123_124	0,00003	0,00045
124_125	0,00001	0,0002
126_127	0,01369	0,00139
127_128	0,00758	0,00077
128_129	0,01126	0,00115
129_130	0,06526	0,00466
129_160	0,02615	0,00158
12a_13a	0,00024	0,00001
12a_14a	0,01282	0,00118
130_131	0,06749	0,00366
131_132	0,05777	0,00314
132_133	0,00032	0,00048
132_134	0,01798	0,0005
132_134a	0,01074	0,00149
134_135	0,00872	0,00025
134a_135a	0,00571	0,00079
135_119	0,0259	0,00073
135a_136a	0,00727	0,00215
136_137	0,06943	0,00583
137_138	0,06293	0,00528

138_139	0,06651	0,00559
139_140	0,06554	0,00551
140_141	0,05448	0,00458
141_142	0,05334	0,00448
142_143	0,05839	0,00491
143_144	0,05416	0,00456
144_145	0,06132	0,00516
145_146	0,04945	0,00416
146_72a	0,10573	0,0089
147_148	0,02565	0,00244
148_149	0,02544	0,00242
149_150	0,02244	0,00213
14a_15a	0,00064	0,0005
14a_16a	0,02187	0,00405
150_151	0,01086	0,00103
151_153	0,00051	0,0008
154_190	0,00199	0,00002
155_151	0,01624	0,00097
156_155	0,01881	0,00113
157_156	0,02456	0,00147
158_157	0,02565	0,00154
159_158	0,02943	0,00177
15_16	0,00819	0,00075
15_19	0,00085	0,00019
160_159	0,02943	0,00177
161_55a	0,32578	0,07111
162_161	0,36178	0,07897
163_162	0,30959	0,06758
164_163	0,35189	0,07682
165_164	0,3159	0,06896
165_166	0,00007	0,00006
165_167	0,00053	0,00006
168_165	0,25517	0,05924
169_168	0,25517	0,05924
169_170	0,00078	0,00032
16_17	0,17753	0,01564
16a_18a	0,62249	0,11504
171_169	0,27833	0,06096
172_171	0,16106	0,03612
173_44a	0,02314	0,00203
174_173	0,62247	0,05496
175_174	0,62331	0,05579
176_175	0,33717	0,02175
177_176	0,33776	0,02234
178_177	0,33836	0,02293
179_178	0,33897	0,02353
179_8a	0,23121	0,01903

17_18	0,04447	0,00397
180_179	0,0105	0,00613
181_180	0,01059	0,00622
182_181	0,01068	0,00631
183_182	0,01078	0,00641
183_4	0,0334	0,00722
184_185	0,62645	0,02709
185_186	0,62712	0,02774
186_187	0,62779	0,02839
187_188	0,47503	0,02723
188_189	0,08874	0,03292
18a_19a	0,02453	0,00645
18a_20a	0,89174	0,17204
190_191	0,002	0,00002
191_192	0,00202	0,00004
192_193	0,00204	0,00006
193_194	0,00208	0,0001
194_195	0,00212	0,00014
195_196	0,00217	0,00019
196_197	0,00222	0,00024
197_198	0,00229	0,00031
198_125	0,00236	0,00038
199_125	0,00115	0,00053
1_3	0,04441	0,01061
200_199	0,00107	0,00045
201_200	0,001	0,00038
202_201	0,00094	0,00031
203_202	0,00089	0,00026
204_203	0,00084	0,00021
205_204	0,0008	0,00017
206_205	0,00077	0,00014
207_206	0,00075	0,00012
208_207	0,00073	0,00011
209_208	0,00036	0,00005
209_210	0,15927	0,02
20a_21a	0,89076	0,17107
210_211	0,15879	0,01952
211_212	0,15832	0,01905
212_188	0,15481	0,0156
212_213	0,15786	0,01859
213_214	0,1574	0,01814
214_215	0,15695	0,0177
215_216	0,1565	0,01726
216_217	0,15607	0,01683
217_218	0,15564	0,01641
218_219	0,15522	0,016
21a_22a	0,00822	0,00682

21a_23a	0,04628	0,0134
23a_24a	0,04874	0,01412
24a_27a	0,0001	0,00036
25a_24a	0,07211	0,02617
26a_25a	0,04068	0,01476
27a_28a	0,00011	0,00039
28a_29a	0,0001	0,00038
29_32	0,65123	0,05756
29a_45a	0,00002	0,00003
30a_29a	0,00007	0,00026
30a_31a	0,00015	0,00006
31a_32a	0,00198	0,00213
32_33	0,02427	0,00884
32a_33a	0,03236	0,00099
33_33A	0,00126	0,0236
33_34	0,3656	0,02345
33a_34	0,08633	0,02298
34_35	0,36497	0,02318
34a_35a	0,08605	0,03029
35_36	0,49967	1,26862
35a_172	5,65246	0,07162
36_37	0,82755	0,03238
36_40	0,0415	0,03454
36a_35a	0,15775	0,01096
37_38	0,01576	0,12868
37_39	1,06975	0,00999
37a_36a	0,04563	0,28424
39_41	1,54251	0,05367
39a_37a	0,24511	0,00001
3_5	0,00002	0,03331
40a_39a	0,15211	0,00476
41_42	0,03985	0,35504
41_45	2,07552	0,03179
41a_40a	0,14516	0,00501
42_43	0,04009	0,03112
42a_41a	0,14212	0,0495
43a_42a	0,226	0,02055
44a_26a	0,05664	0,02456
44a_43a	0,11213	0,00711
45_46	0,0241	0,4599
45_48	2,54396	0,00001
45a_46a	0,00001	0,01421
47_49	0,08714	10,28886
48a_50a	95,62352	0,08336
48a_95	0,52047	0,00746
4_3	0,03363	0,0167
4a_6a	0,00397	0,35378

50_49	2,49358	0,12684
51_50	0,29695	0,03141
51_52	0,0629	2,55533
51a_48a	31,20479	0,09542
52a_51a	1,16405	0,09274
52a_53a	1,17205	0,00098
53_183	0,00613	0,08129
53a_54a	1,02729	0,00087
54_53	0,00602	0,078
54a_55a	0,98554	0,00076
55_54	0,00592	0,51019
55a_56	5,18348	0,01554
56_57a	0,15761	0,0345
56a_28	0,04428	0,00002
56a_57	0,00016	0,00067
57_55	0,00583	0,00584
57a_136	0,06959	0,00011
57a_58a	0,00071	0,00319
57a_59a	0,02836	0,01682
58_24	0,01117	0,03292
58_56a	0,08172	0,01335
59_58	0,15264	0,01291
59_60	0,1522	0,00873
59a_60a	0,01094	0,04371
59a_61a	0,55094	0,00524
5_6	0,00773	0,01247
60_61	0,15176	0,01205
61_62	0,15133	0,00275
61a_62a	0,05663	0,02908
61a_73a	0,2553	0,01163
62_63	0,15091	0,00011
62a_63a	0,00226	0,01122
63_64	0,15049	0,00588
63a_64a	0,01795	0,00044
64_65	0,00598	0,03225
64a_126	0,31961	0,0108
65_66	0,15007	0,01323
65a_64a	0,18571	0,01041
66_67	0,14967	0,00055
66a_65a	0,00783	0,01002
67_68	0,14928	0,00051
67a_66a	0,00729	0,00965
68_69	0,1489	0,00053
68a_67a	0,00755	0,00928
69_70	0,14852	0,00052
69a_68a	0,00744	0,00521
6_7	0,00769	0,00892

70_71	0,14815	0,00052
70a_69a	0,00744	0,00857
71_72	0,14779	0,0005
71a_70a	0,00723	0,00823
72_73	0,14744	0,06746
72a_147	0,71413	0,00052
72a_71a	0,00749	0,00789
73_74	0,14709	0,02963
73a_74a	0,25586	0,00757
74_75	0,14675	0,0302
74a_75a	0,25643	0,04317
75_76	0,34747	0,01799
75_85a	0,04314	0,03845
75a_76a	0,00078	0,02634
75a_77a	0,22975	0,11399
76_77	0,63333	0,01798
76_84a	0,04303	0,11319
77_78	0,63251	0,00525
77a_78a	0,04798	0,00861
77a_80a	0,06821	0,11239
78_79	0,6317	0,00186
78a_79a	0,00391	0,18006
79_80	0,83261	0,00845
79_85	0,01411	0,0358
7_29	0,49224	0,02995
7a_6a	0,07329	0,17912
80_184	0,83166	0,00707
80a_81a	0,0246	0,00115
80a_82a	0,01107	0,30983
84_184	2,89725	0,98073
84_50	4,77186	0,00861
85_49	0,01428	0,08689
86_84	0,5542	0,09991
87_86	0,63725	0,0857
87_89	0,54664	0,00096
8a_7a	0,00236	0,25029
93_89	1,67318	0,13069
93_94	0,81589	0,10758
94_95	0,6717	0,0192
98_209	0,14008	0,00075
98_99	0,0054	0,00005
99_100	0,00038	0,00027
99_101	0,00118	0,00217
Total	194,4098	22,8901