

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

Dissertação de Mestrado

Reconfiguração de Redes de Distribuição de
Energia Elétrica usando Otimização por
Enxame de Partículas Aprimorado



Raoni de Araújo Pegado

João Pessoa
Fevereiro - 2019

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

RAONI DE ARAÚJO PEGADO

Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica usando Otimização por Enxame de Partículas Aprimorado

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

Orientador: Prof. Dr. Yuri Percy Molina Rodriguez

João Pessoa - PB

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P376r Pegado, Raoni de Araujo.

Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica usando Otimização por Enxame de Partículas Aprimorado / Raoni de Araujo Pegado. - João Pessoa, 2019.

78 f. : il.

Orientação: Yuri Percy Molina Rodriguez.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Controle da taxa de mudança. 2. função sigmoide. 3. linguagem de programação C#. 4. OpenDSS. 5. otimização por enxame de partículas. 6. reconfiguração. 7. redes de distribuição. I. Rodriguez, Yuri Percy Molina. II. Título.

UFPB/BC

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

RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
USANDO OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS APRIMORADO

Elaborada por

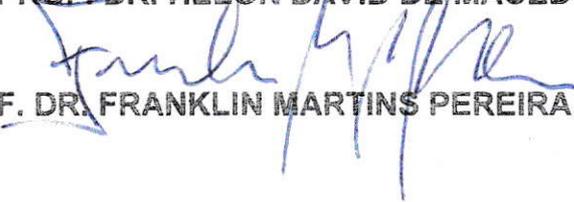
RAONI DE ARAÚJO PEGADO

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

COMISSÃO EXAMINADORA


PROF. DR. YURI PERCY MOLINA RODRIGUEZ (Presidente)


PROF. DR. HELON DAVID DE MACEDO BRAZ


PROF. DR. FRANKLIN MARTINS PEREIRA PAMPLONA

João Pessoa, 26 de fevereiro de 2019

Dedicatória

Este trabalho é dedicado a todas as crianças adultas, que quando pequenas sonharam em se tornar cientistas.

(Lauro César)

Agradecimentos

Venho com estas singelas palavras registrar meu eterno agradecimento às pessoas que fizeram parte, de uma forma ou de outra, de minha caminhada.

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por estar comigo em todos os momentos desta minha longa jornada, sempre me dando forças nas horas em que pensei em desistir. Pelo dom da vida e por todas as oportunidades que Ele me deu.

Aos meus pais, Marculina e José Hiresdelmar, pelo apoio permanente e pelo grande exemplo de força, de luta, de fé, de esperança... De vida! Sem eles eu não teria alcançado mais esta vitória. Se cheguei tão alto foi porque subi nos ombros de gigantes.

Agradeço ao meu orientador, professor Yuri Molina pelos ensinamentos, tempo, compreensão, amizade, entre muitas outras coisas que me ajudaram a realizar este trabalho.

Agradeço a toda a equipe do Grupo de Pesquisa em Inteligência Computacional Aplicada (GICA-UFPB) pela transmissão do conhecimento e experiência que me foram passados. Sobretudo a Diego, Ricardo, Joel, Jonantan, Rafael e Kaique pela amizade e apoio, por partilhar dos conhecimentos e por tornar o ambiente do GICA mais gratificante.

Aos meus amigos, os de longa data e os que encontrei ao longo dessa estada aqui em João Pessoa, em especial, Cristiano, Bruno e Maxsuel. Agradeço-lhes pela paciência, pelo incentivo constante, pelo apoio e, acima de tudo, pelo carinho que me ofereceram, provando o real valor de uma verdadeira amizade.

A toda turma do "Terrão". Pelas noites de alegrias, gargalhadas e pelos bons momentos compartilhados.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio para realização desta pesquisa.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

E aí ele falou:

- Não te entendo, meu Senhor!

E olhou pro chão

- Nos caminhos mais difíceis, eu não vejo as tuas marcas

Por que me deixaste só?

Jesus respondeu:

- Os passos são só meus, jamais te abandonei

É que nos momentos mais difíceis de viver

Nos meus braços te levei.

(Padre Antônio Maria)

Resumo

No presente trabalho é apresentado um método para a resolução do problema de reconfiguração de redes primárias de distribuição, fazendo uso dos recursos do *software Open Distribution System Simulator* (OpenDSS) e de uma nova técnica de otimização por enxame de partículas binárias (BPSO), nomeada de BPSO seletivo aprimorado. Além de utilizar do conceito de busca por malha ou espaço seletivo, o que reduz consideravelmente o espaço de busca das soluções, o método proposto possui uma nova função sigmoide capaz de promover um controle na taxa de mudança das partículas e uma melhor exploração do espaço de busca, resultando em uma melhoria na convergência dos resultados do algoritmo. O algoritmo de solução foi desenvolvido para minimizar as perdas de potência do sistema, levando em consideração seus limites operacionais. Para isso, foi elaborado um programa na linguagem de programação C# permitindo a integração entre o OpenDSS e o método de reconfiguração proposto. Seu funcionamento foi demonstrado em um sistema simples de 5 barras. Finalmente, o algoritmo proposto foi aplicado nos sistemas de distribuição de cinco (33-Barras e 69-Barras) e treze dimensões (94-Nós) disponíveis literatura técnica, realizando testes de validação e efetividade das rotinas desenvolvidas. Os resultados dos testes foram comparados com resultados de outras técnicas modernas reportadas na literatura.

Palavras-chave: Controle da taxa de mudança, função sigmoide, linguagem de programação C#, OpenDSS, otimização por enxame de partículas, reconfiguração, redes de distribuição.

Abstract

The present work presents a method to solve the reconfiguration problem of primary distribution networks, making use of the features of the Open Distribution System Simulator software and a new binary particle swarm (BPSO) optimization technique, named for improved selective BPSO. In addition to using the search concept for mesh or selective space, which considerably reduces the solutions search space, the proposed method presents a new sigmoid function capable of control in the rate of change of the particles and of promoting a better exploration of the space of result in an improvement in the convergence of results. The solution algorithm was developed to minimize system power losses, taking into account its operational limits. For this, a program was written in the programming language C# allowing the integration between OpenDSS and the proposed reconfiguration method. Its operation has been demonstrated in a simple 5-bar system. Finally, the proposed algorithm was applied in the distribution systems of five (33-Bus and 69-Bus) and thirteen dimensions (94 nodes) available technical literature, performing validation tests and effectiveness of the developed routines. The results of the tests were compared with results of other modern techniques reported in the literature.

Keywords: rate of change control, sigmoid function, C# programming language, OpenDSS, particle swarm optimization, reconfiguration, distribution networks..

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estrutura do <i>software</i> OpenDSS.	28
Figura 2 – Movimento de uma partícula.	40
Figura 3 – Comparativo entre as funções ativação.	47
Figura 4 – Influência do valor de β na função sigmoide.	47
Figura 5 – Fluxograma do algoritmo IS-BPSO proposto.	50
Figura 6 – Sistema didático de 5 barras.	51
Figura 7 – Diagrama unifilar do sistema de distribuição 33-Barras.	56
Figura 8 – Diagrama unifilar do sistema de distribuição 69-Barras.	56
Figura 9 – Diagrama unifilar do sistema de distribuição 94-nós.	57
Figura 10 – Efeito da reconfiguração nos níveis de tensão do sistema 33-barras. . .	59
Figura 11 – Características de convergência dos métodos para o sistema 33-barras. .	60
Figura 12 – Efeito da reconfiguração nos níveis de tensão do sistema 69-barras. . .	62
Figura 13 – Características de convergência dos métodos para o sistema 69-barras. .	62
Figura 14 – Características de convergência dos métodos para o sistema 94-nós. . .	63

Lista de tabelas

Tabela 1 – Principais verbos do OpenDSS.	29
Tabela 2 – Parâmetros básicos do elemento <i>Circuit</i>	30
Tabela 3 – Parâmetros básicos do elemento <i>Line</i>	31
Tabela 4 – Parâmetros básicos do elemento <i>Transformer</i>	31
Tabela 5 – Parâmetros básicos do elemento <i>Load</i>	33
Tabela 6 – Parâmetros básicos do elemento <i>Generator</i>	34
Tabela 7 – Parâmetros básicos do elemento <i>SwtControl</i>	35
Tabela 8 – Resultados para os valores de β em 100 ensaios.	58
Tabela 9 – Comparação entre os resultados do sistema 33-barras para diferentes métodos.	59
Tabela 10 – Comparação entre as simulações das funções de transferência para o sistema 33-barras.	60
Tabela 11 – Resultados para os valores de β em 100 ensaios para o sistema 69-barras.	61
Tabela 12 – Comparação entre os resultados do sistema 69-barras para diferentes métodos.	61
Tabela 13 – Resultados para os valores de β em 100 ensaios para o sistema 94-nós.	64
Tabela 14 – Comparação entre os resultados do sistema 94-nós para diferentes métodos em 100 testes.	64
Tabela A.1 – Dados de barra do sistema 5-Barras.	73
Tabela A.2 – Dados de linha do sistema 5-Barras.	73
Tabela A.3 – Dados do Sistema 33-barras.	74
Tabela A.4 – Dados do Sistema 69-barras.	75
Tabela A.5 – Dados do Sistema 94-nós.	77

Lista de abreviaturas e siglas

AG	Algoritmo Genético
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BPSO	<i>Binary Particle Swarm Optimization</i>
COM	<i>Component Object Model</i>
DSS	<i>Distribution System Simulator</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
FBS	<i>Forward-backward sweep</i>
GD	Geração Distribuída
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MIC	Método de Injeção de Correntes
MS	<i>Microsoft</i>
MSC	Método de Soma das Correntes
MSP	Método de Soma das Potências
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SPSO	<i>Selective Particle Swarm Optimization</i>
VBA	<i>Visual Basic Applications</i>

Lista de símbolos

OpenDSS

Ω	Ohm
nF	Nanofarad
P	Potência ativa
Q	Potência Reativa
kW	Quilowatt
$kvar$	Quilovolt ampère reativo
kVA	Quilovolt ampère
S	Potência Aparente
I_{inj}	Corrente injetada
Y_{prim}	Matriz admitância primitiva
s,t	Fases do sistema
$\alpha_p = \{a, b, c\}$	Conjunto de fases do sistema
$(P_k^{sp})^s$	Potência ativa especificada para a fase s da barra k
$(Q_k^{sp})^s$	Potência reativa especificada para a fase s da barra k
P_{gk}^s	Potência ativa gerada na fase s da barra k
Q_{gk}^s	Potência reativa gerada na fase s da barra k
P_{lk}^s	Potência ativa da carga conectada na fase s da barra k
Q_{lk}^s	Potência reativa da carga conectada na fase s da barra k
Ω_k	Conjunto de barras conectadas diretamente à barra k
Y_{ki}^{st}	Elemento da matriz admitância nodal
G_{ki}^{st}	Elemento condutância da matriz admitância nodal
B_{ki}^{st}	Elemento Susceptância da matriz admitância nodal

E_k^s	Tensão na barra k para a fase s
$a_k^s, b_k^s, c_k^s, d_k^s$	Parâmetros dependentes do modelo da carga adotado para cada fase da barra k

Otimização por Enxame de Partículas

i	Número da partícula
d	Número da dimensão
X_i	Vetor de posições no espaço da partícula i
V_i	Vetor de velocidades no espaço da partícula i
$Pbest_i$	Vetor das melhores posições no espaço da partícula i
$Gbest$	Vetor da melhor posições da população
w	Peso de inércia
w_{min}	Peso de inércia mínimo
w_{max}	Peso de inércia máximo
c_1	Fator de aprendizagem cognitivo
c_2	Fator de aprendizagem social
r_1, r_2	Números aleatórios entre 0 e 1
$iter$	Iteração atual
$iter_{max}$	Total de iterações
V_{max}	Limite máximo de velocidade
V_{min}	Limite mínimo de velocidade
S_d	Espaço de busca da dimensão d
dn	Número de posições do espaço de busca S_d
β	Letra grega beta
$Fbest$	Melhor valor assumido pela função objetivo
sig	Função sigmoide

Reconfiguração de Redes de Distribuição

N_l	Número total de linhas
r_l	Resistência da linha l
i_l	Corrente que passa pela linha l
E_k	Tensão da barra k
E_{min}	Límite mínimo de tensão permitidos na barra k
E_{max}	Límite máximo de tensão permitido na barra k
i_l^{max}	Máxima corrente permitida na linha l
N_{ramos}	Quantidade de ramos presente na Rede de Distribuição
N_{barras}	Quantidade de barras presente na Rede de Distribuição
N_f	Total de alimentadores presentes na Rede de Distribuição
N_{malhas}	Número de malhas geradas a partir do fechamento das chaves de interligação

Sumário

1	Introdução	17
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos específicos	19
1.2	Contribuições do Trabalho	19
1.3	Organização do Trabalho	20
2	Estado da Arte	22
2.1	Revisão Bibliográfica	22
3	O Software OpenDSS	27
3.1	Breve Histórico	27
3.2	Estrutura do <i>Software</i>	27
3.2.1	Interface COM	28
3.3	Sintaxe da Linguagem de Programação do OpenDSS	29
3.4	Elementos Básicos	29
3.4.1	Elemento Circuito	30
3.4.2	Elemento Linha de Transmissão	30
3.4.3	Elemento Transformador	31
3.4.4	Elemento Carga	32
3.4.5	Elemento Gerador	33
3.4.6	Elemento Chave	34
3.5	Fluxo de Potência	35
4	Otimização por Enxame de Partículas	39
4.1	PSO Clássico	39
4.2	PSO Binário (BPSO)	42
4.3	PSO Seletivo (SPSO)	43
5	Método Proposto para Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia	44
5.1	Formulação do Problema	44
5.1.1	Restrições	45
5.2	Método proposto	46
5.3	Aplicação do Método Proposto no Problema de Reconfiguração	48
6	Resultados	55
6.1	Descrição dos sistemas teste	55
6.2	Testes com o IS-BPSO	57
6.2.1	Sistema 33-barras	58
6.2.2	Sistema 69-barras	60
6.2.3	Sistema 94-nós	63

7 Conclusão	66
Referências	67
Anexos	72
ANEXO A Dados dos sistemas teste	73
A.1 Sistema 5-barras	73
A.2 Sistema 33-barras	73
A.3 Sistema 69-barras	74
A.4 Sistema 94-nós	76

1 Introdução

O crescimento populacional aliado ao desenvolvimento técnico-científico tem tornado a sociedade moderna cada vez mais dependente da energia elétrica, exigindo das empresas eficiência e qualidade nos serviços prestados. Nesse contexto, é necessário definir estratégias que visem à melhoria desses serviços, principalmente no que concerne a confiabilidade e a redução das perdas de energia.

O sistema elétrico de potência (SEP) é composto por quatro grandes áreas: geração, transmissão, distribuição e utilização de energia elétrica (SOUZA, 1997). O sistema de distribuição é a parte do SEP responsável pelo fornecimento de energia aos consumidores finais. É nessa etapa que ocorrem a maior quantidade de perdas de potência. Essas perdas acabam resultando em custos adicionais para as empresas, custos estes que não podem ser eliminados, mas sim minimizados.

Segundo os Procedimentos de Distribuição (PRODIST), elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as perdas no sistema de distribuição podem ser classificadas em perdas técnicas e perdas não técnicas. As perdas técnicas são inerentes ao transporte de energia elétrica na rede correspondentes ao aquecimento dos condutores por efeito Joule, as perdas no núcleo dos transformadores e perdas dielétricas. As perdas não técnicas são definidas pela diferença entre as perdas totais e as perdas técnicas, considerando, portanto, todas as demais perdas associadas à distribuição de energia elétrica, tais como: furtos de energia, erros de medição, etc. (ANEEL, 2016). No escopo desse trabalho, serão consideradas apenas as perdas técnicas como objeto de estudo.

Para a minimização das perdas técnicas são utilizadas diversas estratégias como: recondutoramento, instalação de banco de capacitores, elevação da tensão da rede e reconfiguração da rede de distribuição. Dentre estas estratégias, a opção pela reconfiguração é a que exige menor investimento para a empresa distribuidora de energia elétrica, pois permite a utilização de recursos já existentes no sistema (OLIVEIRA, 2012).

Os estudos de reconfiguração consistem em obter a topologia da rede com perdas ativas mínimas, a partir da comutação de chaves de seccionamento e interligação instaladas no sistema de distribuição. Esse procedimento além de ser utilizado para a redução de perdas, é empregado também para melhoria do perfil de tensão a partir do balanceamento de cargas entre alimentadores; aprimorar os indicadores de qualidade de serviço e promover o isolamento de faltas a fim do restabelecimento do fornecimento de energia em áreas prejudicadas.

As soluções candidatas devem atender os limites operacionais da rede, tais como: a capacidade das subestações, limites de tensão nas barras e suportabilidade dos ramos,

como também as restrições de radialidade e conexão. Radialidade significa que existe um único caminho energizado desde qualquer barra até sua subestação supridora. Conexão requer que todas as barras estejam energizadas. A configuração radial é preferível por ter como vantagem uma operação simples e uma proteção efetiva no momento de expansão de novos clientes (BRAZ, 2010).

O problema de reconfiguração é caracterizado como de natureza combinatória, sendo dependente do número de chaves existentes no sistema. Considerando que uma chave possa assumir dois estados, aberta ou fechada, em um sistema que possua n chaves, existirá 2^n soluções candidatas a alteração da topologia da rede. Portanto, em sistemas de grande porte, com um grande número de chaves, é basicamente impossível encontrar uma solução fazendo uso de técnicas tradicionais. Diante desse panorama, surge a necessidade de utilizar ferramentas computacionais capazes de solucionar o problema de reconfiguração, fazendo uso de métodos de otimização que aumentam a eficiência das soluções.

Os métodos de otimização geralmente empregados nos problemas de reconfiguração são agrupados de acordo com Mello (2014) em métodos baseados em conhecimento e métodos baseados em modelos físicos ou biológicos. Os métodos baseados em conhecimento subdividem em métodos heurísticos, sistemas especialistas e programação matemática. Já nos métodos baseados em modelos físicos ou biológicos destacam-se os algoritmos genéticos, busca tabu e outras meta-heurísticas como otimização por enxame de partículas e colônia de formigas.

Dentre esses métodos, as meta-heurísticas estão ganhando espaço na literatura por apresentarem algoritmos simples que geram resultados e eficiência computacional satisfatórios. Nesse contexto, o método utilizado nesse trabalho baseia-se na técnica de Otimização por Enxame de Partículas, do inglês *Particle Swarm Optimization* (PSO), para solucionar o problema de reconfiguração de redes de distribuição, visando a redução de perdas de potência e conseqüentemente a melhoria do perfil de tensão da rede.

O método proposto apresenta uma modificação na função de transferência sigmoide do PSO binário (BPSO), com o objetivo de controlar a taxa de mudança do vetor de partículas, tornando o processo de busca mais eficiente e melhorando a convergência do enxame. Outra característica que pode ser destacada foi a utilização da técnica de busca por malha ou espaço seletivo, diminuindo consideravelmente o espaço de busca, resultando em um aumento na rapidez da resolução do problema. Esse método foi chamado de BPSO seletivo aprimorado, do inglês *Improved Selective BPSO* (IS-BPSO).

O método de reconfiguração IS-BPSO foi implementado na linguagem de programação C# fazendo uso do *Microsoft Visual Studio*[®]. O programa desenvolvido realizou uma integração entre o método de otimização proposto e os recursos de fluxo de carga e cálculo de perdas do *software* OpenDSS (*Distribution System Simulator*) via interface *Component Object Model* (COM).

Além de contar com um método de cálculo de fluxo de potência dedicado para sistemas de distribuição, a escolha do uso do OpenDSS é justificada pela nota técnica N^o 0104/2014-SRD da ANEEL (2014) que estabeleceu o uso do *software* como ferramenta padrão para realização de estudos de fluxo de potência e de cálculo da perda regulatória das distribuidoras de energia, em sistemas de distribuição de energia elétrica de baixa e média tensão.

Para os estudos de caso, o algoritmo proposto foi testado em três sistemas de distribuição comumente utilizados nos problemas de reconfiguração, onde foram realizados testes de validação e efetividade. Os resultados obtidos foram comparados com outras técnicas baseadas na modificação do BPSO, reportadas na literatura técnica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional capaz de fornecer uma solução factível para o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia, considerado como função objetivo a redução de perdas técnicas. Além de fazer uso dos recursos do OpenDSS, essa ferramenta utiliza uma nova técnica baseada em otimização por enxame de partículas para a solução do problema.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos podem ser citados:

- Modelar as redes de distribuição utilizando a linguagem do OpenDSS;
- Propor e testar uma modificação na técnica de otimização por enxame de partículas com o objetivo de melhorar a performance do algoritmo;
- Desenvolver uma plataforma na linguagem de programação C# para usar os recursos de fluxo de potência do OpenDSS no método de reconfiguração proposto;
- Determinar a topologia de operação de redes de distribuição com perdas mínimas sem violar os limites operacionais.

1.2 Contribuições do Trabalho

As principais contribuições desse trabalho são:

- Utilização do fluxo de carga dedicado a sistemas de distribuição do OpenDSS conjuntamente com a otimização por enxame de partículas, através da linguagem de programação C#, aumentando a eficiência na obtenção dos resultados;
- Melhor exploração do espaço de busca fazendo com que as melhores soluções sejam encontradas mais rapidamente. Esta melhora ocorre devido a modificação da função sigmoide apresentada no método proposto;
- Controle da taxa de mudança das partículas para descobrir as melhores soluções, a partir da introdução do parâmetro de controle de declividade da função sigmoide;
- O método proposto apresentou uma melhoria na convergência da população e na redução de número de iterações na obtenção da solução ótima.

No que diz respeito à divulgação dos resultados obtidos nesse trabalho, lista-se as seguintes publicações:

1. Revistas

- Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO, publicado no Electric Power Systems Research em Janeiro de 2019. (Qualis A1). DOI: 10.1016/j.epsr.2018.12.030.
- Distribution network reconfiguration with the OpenDSS using Improved Binary Particle Swarm Optimization, publicado no IEEE Latin America Transactions em julho de 2018. (Qualis B2). DOI: 10.1109/TLA.2018.8444386.

2. Congressos

- Reconfiguração de redes de distribuição visando redução de perdas utilizando Enxame de Partículas Seletivo Modificado, apresentado no XXII Congresso Brasileiro de Automática (CBA), João Pessoa-PB em setembro de 2018. DOI: 10.20906/CPS/CBA2018-0318.

1.3 Organização do Trabalho

Além deste capítulo introdutório, no Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura técnica e o estado da arte sobre a reconfiguração de redes de distribuição;

O capítulo 3 é dedicado a apresentação das principais características do *software* OpenDSS, dando ênfase na sua estrutura computacional, na representação dos principais elementos que compõem a rede elétrica e no método de fluxo de carga utilizado pelo *software*;

No capítulo 4 é dada uma visão geral da abordagem do PSO e suas variações que serão tomadas como base para a formulação do método proposto nesse trabalho;

No capítulo 5 é abordada a formulação do problema de reconfiguração de redes de distribuição e o método IS-BPSO proposto para a sua solução, caracterizando como a principal contribuição do presente trabalho;

Os resultados obtidos nos testes executados com o IS-BPSO em três sistemas disponíveis na literatura são apresentados no Capítulo 6;

E por fim, o Capítulo 7 expõe algumas conclusões obtidas com a aplicação do método, terminando com a indicação de desdobramentos possíveis desse trabalho.

2 Estado da Arte

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma revisão bibliográfica dos trabalhos relacionados à reconfiguração de redes primárias de distribuição. Serão apresentadas as principais técnicas que integram o estado da arte, dando enfoque à técnica meta-heurística utilizada nesse trabalho.

2.1 Revisão Bibliográfica

A reconfiguração de redes de distribuição é considerada um problema clássico da área de otimização de sistemas de distribuição que ressurgiu em meio aos novos desenvolvimentos na área de supervisão e automação de sistemas de potência inteligentes. Contudo, as técnicas do estado da arte de reconfiguração continuam válidas, sendo apenas adaptadas para considerar a possibilidade de atuação em tempo real ou quase-real.

Os primeiros trabalhos na área de reconfiguração foram embasados em técnicas heurísticas cujo objetivo era fazer sempre a melhor escolha possível a partir de algoritmos do tipo passo-a-passo. Merlin e Back (1975) foram os pioneiros no estudo de reconfiguração de redes de distribuição, propondo uma técnica heurística onde a partir de uma rede malhada obtida pelo fechamento de todas as suas chaves, iniciava-se uma abertura sequencial guiada pelo critério de minimização de perdas ativas. Todavia, o alto tempo computacional e a consideração apenas da componente real da corrente para o cálculo do fluxo de potência foram algumas das limitações do método proposto por Merlin and Back.

No trabalho de Civanlar *et al.* (1988) foi proposto um novo método para avaliar a mudança nas perdas ativas de energia devido à troca de carga de um alimentador para outro no sistema de distribuição. A técnica ficou conhecida como "troca de ramos". Nesse método, a configuração inicial era radial em vez de malhada. A configuração de comutação de perda mínima pode ser determinada rapidamente, mas a reconfiguração da rede dependia do status inicial dos comutadores e apenas uma fração das configurações de rede possíveis se encontra no espaço de busca. Esse trabalho é considerado de grande importância na área, servindo como base para diversos trabalhos posteriores, que propuseram variações que resultaram na melhoria da precisão e eficiência do método.

O método apresentado por Shirmohammadi e Hong (1989) propôs um algoritmo heurístico baseado no método de fluxo de potência para determinar a configuração do sistema de distribuição radial de perda mínima. A limitação do método proposto era que a estratégia de busca é ineficiente e a solução otimizada global não era garantida. O problema é abordado por vários pesquisadores através de algoritmos heurísticos.

Baran e Wu (1989) aprimoraram a troca de ramos desenvolvendo uma formulação geral do problema de reconfiguração para redução de perdas e balanceamento de cargas, fazendo uso de dois algoritmos de fluxo de carga desenvolvidos especialmente para sistemas radiais. A partir desse trabalho, o problema de reconfiguração passou a ser reconhecido como sendo de natureza combinatória.

Em Goswami e Basu (1992) foi proposto um algoritmo heurístico de fluxo de potência-mínimo, em que o sistema é mantido radial complementando o fechamento de qualquer interruptor com a abertura de outro durante a reconfiguração da rede, o método é adequado para sistemas pequenos e resulta em um esforço computacional enorme para sistemas grandes.

Em 1995, Peponis, Papadopoulos e Hatziargyriou (1995) propuseram um método para reconfiguração de redes e realocação de cargas. O método de reconfiguração foi baseado na troca de ramos e na abertura sequencial sugerindo melhorias para ambos. O método foi aplicado em um sistema real e de grande porte.

Em 1997, Borozan, Rajcic e Ackovski (1997) apresentaram uma variação do método da abertura sequencial para sistemas trifásicos desequilibrados visando a aplicação em tempo real, a partir da utilização de um algoritmo de inspeção de elementos.

Em geral, os métodos heurísticos tem como principal vantagem a simplicidade. Entretanto, são classificados por Braz (2010) como algoritmos gulosos ou gananciosos, isto é, algoritmos que fazem a melhor escolha possível na iteração corrente sem considerar a solução como um todo. Essa característica faz com que nem todas as configurações possíveis sejam testadas, podendo resultar em soluções indesejadas.

A partir dos anos 2000, observa-se uma predominância no uso de métodos baseados em modelos físicos ou biológicos para a solução do problema de reconfiguração, destacando-se a utilização das técnicas meta-heurísticas, a exemplo os algoritmos genéticos (AG) e o PSO.

O uso dos algoritmos genéticos concentra a maior parcela de trabalhos referentes a reconfiguração para a minimização de perdas de energia. Sua primeira aplicação foi em Nara *et al.* (1992). Em 2002, destaca-se o trabalho de Huang (2002) que representou a rede por um vetor binário com comprimento igual ao número de chaves, ficando conhecida como representação por *vetor característico*.

Braz e Souza (2011) apresentaram um estudo de reconfiguração para redução de perdas com algoritmo genético utilizando duas codificações de rede capazes de reduzir o espaço de busca, além de diminuir o número de operações de comutação. A codificação subtrativa inicia com a rede malhada obtida fechando todas as chaves e prossegue abrindo uma por uma, até que a configuração radial seja obtida. Já na codificação aditiva ocorre o processo inverso.

Dentre as meta-heurísticas, o PSO também tem apresentado bons resultados em diferentes áreas de engenharia elétrica, sendo aplicado consideravelmente no problema de reconfiguração.

Em 2005, Batrinu, Carpaneto e Chicco (2005) utilizaram uma abordagem baseada na versão clássica do PSO para a solução do problema de reconfiguração visando redução de perdas. Os autores propuseram uma modificação na equação da velocidade do PSO de forma a incluir as restrições de radialidade e outras restrições operacionais de sistemas reais de distribuição. A função objetivo do problema era composta pelas perdas em conjunto com as penalidades referentes as restrições operacionais do sistema.

Wu, Tsai e Hsu (2007) propuseram uma versão binária do PSO para o problema de reconfiguração definindo a equação da velocidade como um operador de deslocamento de bits, cuja função era realizar permuta entre a solução binária atual e a próxima solução avaliada. O operador de deslocamento possuía três informações: o bit do vetor posição que será deslocado, o sentido do deslocamento e quantos passos serão deslocados. Os autores aplicaram o método em um sistema de pequeno porte.

Em 2009, Abdelaziz *et al.* (2009) propuseram uma modificação na formulação do PSO incluindo um parâmetro dependente do passo de tempo nas equações de velocidade e posição das partículas. Propuseram também um algoritmo de correção da posição das partículas caso violassem o espaço de busca e, um algoritmo de checagem da condição de radialidade do sistema. Os testes com o método foram realizados nos sistemas 33-barras e 69-barras.

Niknam e Farsani (2010) propuseram uma estrutura adaptativa para ajuste dos fatores de aprendizagem e peso de inércia do algoritmo PSO visando aumentar o desempenho e a eficiência do método por si só. O método proposto foi dividido em duas partes: A primeira, chamada de otimização de enxame de partículas discretas auto-adaptativa (SADPSO), determinava o status do número das chaves seccionadoras. Já a segunda, otimização auto-adaptativa de enxame de partículas binárias (SABPSO), era usada para determinar o status (abrir ou fechar) das chaves de interligação.

Em 2012, Niknam, Azadfarsani e Jabbari (2012) aprimoram o método autoadaptativo usando lógica Fuzzy para a escolha dos parâmetros de aprendizagem e peso de inércia e combinaram o PSO com o método *Nelder–Mead simplex* para aumentar a capacidade do PSO na pesquisa local e sua taxa de convergência. Os testes foram realizados nos sistemas 33-barras e no sistema real de 94-nós de Su e Lee (2003).

No mesmo ano, Khalil e Gorpnich (2012a) propuseram uma modificação na função sigmoide do PSO binário capaz de limitar o espaço de busca para um espaço discreto selecionado, correspondente apenas aos números das chaves presentes no sistema de distribuição. A nova versão do BPSO, chamada de PSO seletivo (SPSO), além de reduzir

consideravelmente o espaço de busca das partículas, garante a condição de radialidade em todas as soluções. Os testes foram realizados nos sistemas 33-barras e 69-barras e os resultados validados com os resultados encontrados na literatura para esses sistemas.

Em 2014, Tandon e Saxena (2014) realizaram uma análise comparativa entre o PSO binário e o PSO seletivo para a solução do problema de reconfiguração, considerando diferentes patamares de carga nos sistemas 33-barras e 69-barras. A análise comparativa foi estabelecida com base nas perdas de distribuição, características de convergência, perfil de tensão da rede, mudança de posição de chaves de ligação (do caso base) e o tempo decorrido para executar o processo de otimização. De acordo com os resultados obtidos, o SPSO apresentou uma melhor performance em relação ao BPSO.

Em 2016, Sayadi, Esmaeili e Keynia (2016) aplicaram uma abordagem do PSO no problema de reconfiguração de alimentadores e na alocação de capacitores na presença de cargas não lineares. O algoritmo proposto apresentava uma nova função peso de inércia com o objetivo de melhorar a taxa de exploração das partículas. A equação da velocidade era dependente da aptidão das partículas e do tempo. O método foi aplicado nos sistemas 33-barras e 77-barras, apresentado melhores resultados quando comparado a outras técnicas.

Em 2017, Flaih *et al.* (2017) utilizaram o PSO para a solução problema de reconfiguração fazendo o uso de fatores de aprendizagem randômicos durante o processo iterativo. O algoritmo proposto também era dependente do status das chaves. Os testes foram realizados no sistema 33-barras em três casos de variação de curva de carga, apresentando melhores resultados de convergência em comparação ao PSO clássico.

No mesmo ano, Atteya *et al.* (2017) também propuseram uma modificação do PSO para a reconfiguração de redes de distribuição radiais. O método proposto apresentava como contribuições a utilização de um espaço de busca randômico e seletivo e um algoritmo de controle das posições das partículas. Os autores validaram resultados obtidos comparando-os com os resultados encontrados na literatura para os sistemas teste 33-barras e 69-barras.

De acordo com revisão bibliográfica apresentada, nota-se um crescente avanço dos trabalhos de reconfiguração de redes utilizando a otimização por enxame de partículas. Nesse contexto, foi proposta desse trabalho uma nova abordagem baseada no PSO para a solução do problema de reconfiguração visando a redução de perdas ativas. O método proposto foi embasado nas características particulares do BPSO e no conceito de espaço seletivo do SPSO.

Foi desenvolvida uma ferramenta computacional que integra os recursos do *software* OpenDSS com o algoritmo proposto a fim de fornecer uma solução factível para o problema de reconfiguração de sistemas elétricos de distribuição. Tal ferramenta foi implementada fazendo uso do *Microsoft Visual Studio C#*[®].

No próximo capítulo são apresentadas as principais características do *software* OpenDSS utilizado na modelagem das redes de distribuição estudadas nesse trabalho, assim como o método utilizado para o cálculo de fluxo de potência nesses sistemas.

3 O *Software* OpenDSS

Nesse capítulo é dada ênfase na apresentação do OpenDSS utilizado para a modelagem das redes de distribuição estudadas nesse trabalho. Em primeiro momento, é apresentado um breve histórico do desenvolvimento do *software*, sua estrutura computacional e sua linguagem de programação. As duas últimas seções são dedicadas a modelagem dos principais elementos básicos que compõem uma rede de distribuição e o método de cálculo de fluxo de potência utilizado pelo programa.

3.1 Breve Histórico

O *software* OpenDSS (*Distribution System Simulator*) é uma abrangente ferramenta de simulação de sistemas de energia elétrica voltada para sistemas de distribuição de energia. Seu desenvolvimento iniciou em 1997 na *Electrotek Concepts, Inc.* por Roger Dugan e Thomas McDemontt com o objetivo principal de dar apoio às análises de redes com a presença de geração distribuída (GD), utilizando uma linguagem de programação orientada a objetos, dispensando o uso dos métodos convencionais de modelagem do sistema de potência, baseados em complexas linguagens e sistemas de conversão existentes na época.

Em 2004, o DSS foi adquirido pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI) e em 2008, o EPRI apresentou sob licença de código aberto (*open source*) o chamado *software* OpenDSS a fim de contribuir para o desenvolvimento da área de GD.

Por ser um *software* de licença livre, o OpenDSS pode ser indefinidamente expansível de tal modo que possa ser facilmente modificado para atender as necessidades futuras ou para atender as necessidades específicas dos usuários.

3.2 Estrutura do *Software*

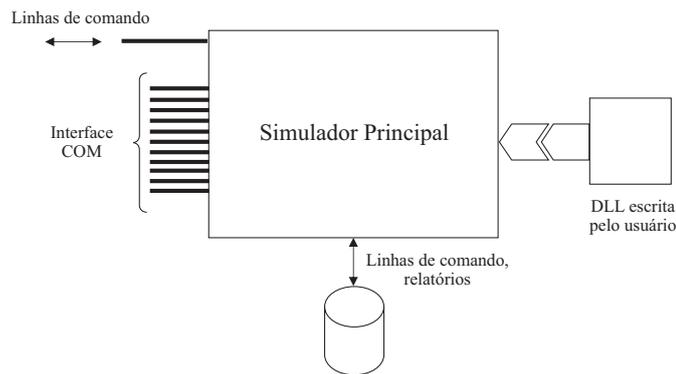
A estrutura do *software* OpenDSS que define os dados, a interface e os elementos de circuito foram desenvolvidos na linguagem orientada a objetos *Object Pascal*, originalmente através do ambiente de desenvolvimento *Delphi*. As funções para soluções e cálculos, principalmente a solução de matrizes esparsas foram escritas nas linguagens *C* e *C++* (CARVALHO, 2014).

No *software*, os elementos de circuito são definidos em linhas de comandos, que podem ser oriundas do usuário, de um arquivo de texto fixo ou de programas externos

(FREITAS, 2015).

O programa também disponibiliza uma interface *Component Object Model* (COM) permitindo ser controlado por uma variedade de plataformas de softwares existentes, a exemplo Python, C#, MATLAB, ferramentas do MS *Office*, *MS Visual Studio*, dentre outros. A estrutura do OpenDSS é ilustrada na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura do *software* OpenDSS.



Fonte: (DUGAN, 2016) Adaptado.

Uma característica importante que o *software* apresenta é a possibilidade de realizar simulações sequenciais no tempo. Desse modo, é possível analisar como os sistemas se comportam durante um intervalo de tempo definido. Os principais modos de solução presentes no OpenDSS são (SEXAUER, 2012):

- Fluxo de potência no qual subdivide em modo instantâneo, diário, anual, Monte Carlo e *Duty-cycle*;
- Análise harmônica;
- Análise dinâmica;
- Estudos de curto-circuito;
- Análise de corrente induzida geomagneticamente.

3.2.1 Interface COM

O uso da interface COM permite que o OpenDSS seja executado de forma totalmente independente de qualquer banco de dados ou arquivo de texto fixo que defina um circuito.

Graças a essa interface é possível desenvolver algoritmos em ambientes externos (MATLAB, *Visual Studio*, *VBA Excel*, etc) utilizando os recursos do OpenDSS para implementar funções que não estejam em seu código fonte. Por exemplo, um algoritmo de otimização específico. Esses algoritmos utilizam então o OpenDSS para representar o comportamento do sistema de distribuição, enquanto ajustam quaisquer que sejam as variáveis que se deseja otimizar (SEXAUER, 2012).

3.3 Sintaxe da Linguagem de Programação do OpenDSS

No OpenDSS os comandos são definidos por linhas de texto e geralmente cada comando é composto por um **verbo** e por alguns **parâmetros**, conforme apresentado a seguir (DUGAN, 2016):

verbo TipoElemento.Nome Param1=Valor1 Param2=Valor2
new line.Linha1 bus1=barra1 bus2=barra2

Os pares parâmetro/valor podem ser separados através de vírgula ou de espaço em branco. A Tabela 1 apresenta os verbos mais comuns.

Tabela 1 – Principais verbos do OpenDSS.

Verbo	Descrição
<i>New</i>	Cria um novo elemento de circuito
<i>Edit</i>	Edita um elemento de circuito escolhido.
<i>Set</i>	Define as opções de solução como, por exemplo, <i>Mode</i> .
<i>Solve</i>	Realiza a solução do circuito definido.
<i>Show</i>	Apresenta relatórios de resultados em arquivos <i>*.txt</i>
<i>Export</i>	Salva relatórios de resultados em arquivo <i>*.csv</i>
<i>Plot</i>	Plota os resultados do fluxo de potência no circuito.

Fonte: (SEXAUER, 2012).

Caso nenhum verbo seja especificado, o verbo *Edit* é utilizado.

3.4 Elementos Básicos

Nesta seção são apresentados os principais elementos básicos de circuitos utilizados para a construção de um sistema de distribuição, modelados na linguagem de comandos utilizada pelo OpenDSS.

3.4.1 Elemento Circuito

O elemento circuito (no OpenDSS *Circuit*) representado por um equivalente Thévenin, define a barra de balanço (*swing*) do sistema. Este pode representar, por exemplo, o equivalente da transmissão vista pela subestação ou o equivalente da subestação vista por um alimentador. Dessa forma, todo circuito definido no OpenDSS deve inicializar com o este elemento.

O elemento *Circuit* possui apenas um terminal e é composto pelos parâmetros apresentados no Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros básicos do elemento *Circuit*.

Parâmetro	Descrição
<i>basekv</i>	Tensão base nominal de linha em kV.
<i>bus1</i>	Nome do terminal no qual o barramento principal se encontra conectado.
<i>pu</i>	Tensão em pu que o barramento está operando.
<i>phases</i>	Número de fases.
<i>Mvasc3</i>	Potência de curto-circuito trifásico.
<i>Mvasc1</i>	Potência de curto-circuito monofásico.
<i>R1</i>	Resistência de sequência positiva da fonte em Ω por unidade de distância.
<i>X1</i>	Reatância de sequência positiva da fonte em Ω por unidade de distância..

De modo que a definição de *R1* e *X1* suprime a definição de *Mvasc1* e *Mvasc3* e vice-versa.

A seguir é apresentado um exemplo da definição do elemento circuito, na sintaxe de comando do OpenDSS:

```
New Circuit.Subestação bus1=Barra1 basekv=69 pu=1.02
~ mvasc3=2000 mvasc1=2000
```

3.4.2 Elemento Linha de Transmissão

As linhas de transmissão são modeladas no OpenDSS a partir de seu modelo π com capacitores *shunt* utilizando o elemento *Line*. Uma linha de transmissão é definida no OpenDSS a partir de informações de suas impedâncias sequenciais, matrizes de resistências e de reatâncias ou através do elemento geral do OpenDSS, *Linecode*.

O elemento *Linecode* define todas as características de um arranjo de linha. Este elemento é útil em circuitos de grande porte que apresentam centenas de linhas com as mesmas características.

Na Tabela 3 são apresentados os principais parâmetros que compõem o elemento *Line*.

Tabela 3 – Parâmetros básicos do elemento *Line*.

Parâmetro	Descrição
<i>Bus1</i>	Nome da barra a qual o terminal 1 é conectado
<i>Bus2</i>	Nome da barra a qual o terminal 2 é conectado
<i>phases</i>	Número de fases
<i>baseFreq</i>	Frequência base das reatâncias
<i>R1</i>	Resistência de sequência positiva em Ω por unidade de distância
<i>R0</i>	Resistência de sequência zero em Ω por unidade de distância
<i>X1</i>	Reatância de sequência positiva em Ω por unidade de distância
<i>X0</i>	Reatância de sequência zero por em Ω unidade de distância
<i>C1</i>	Capacitância total de sequência positiva em nF por unidade de distância
<i>C0</i>	Capacitância total de sequência zero em nF por unidade de distância
<i>Rmatrix</i>	Matriz de resistências da linha por unidade de distância
<i>Xmatrix</i>	Matriz de reatâncias da linha por unidade de distância
<i>units</i>	Unidade de distância utilizada
<i>Normamps</i>	Corrente nominal da linha
<i>length</i>	Comprimento da linha

A seguir é apresentado um exemplo de código em OpenDSS para definição das características de uma linha trifásica equilibrada.

```
New Line.Linha phases=3 bus1=BarraA.1.2.3 bus2=BarraB.1.2.3
~basefreq=60 units=km length=1.0 normamps=419.0
~R1=3.34 X1=10.01 R0=10.03 X0=30.05 C1=803.8 C0=267.9
```

3.4.3 Elemento Transformador

Os transformadores são definidos no OpenDSS utilizando o comando *Transformer*. Para a definição desse elemento é necessário conhecer a quantidade de enrolamentos, o tipo de conexão de cada enrolamento, os parâmetros elétricos que caracterizam o circuito equivalente e as barras nas quais os terminais do transformador estão conectados. Os principais parâmetros desse elemento são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros básicos do elemento *Transformer*.

Parâmetro	Descrição
<i>phases</i>	Número de fases (o default é 3)
<i>Windings</i>	Número de enrolamentos (o default é 2)
<i>XLH</i>	Reatância percentual entre o primário e o secundário
<i>%loadloss</i>	Porcentagem da perda total com base na carga nominal
<i>%noloadloss</i>	Porcentagem da perda em vazio com base na carga nominal
<i>Wdg</i>	número inteiro que representa o enrolamento.
<i>bus</i>	barra de conexão do enrolamento
<i>conn</i>	Ligação do enrolamento (estrela ou triângulo)
<i>kv</i>	tensão nominal do enrolamento em kV
<i>Kva</i>	potência nominal do enrolamento em kVA
<i>tap</i>	Tensão em pu do tap utilizado

Como exemplo, é modelado um transformador trifásico de 10 MVA ligado em delta-estrela aterrada. Onde o primário é conectado na Barra A de tensão 13,8 kV e o

secundário conectado a Barra B de tensão nominal de 380 V. O tap foi ajustado em 1,05 pu. Sendo a perda em carga nominal de 0,5%, perda em vazio de 0,2% e valor de reatância de curto-circuito de 6%.

```
New transformer.trafo xhl=6 % loadloss=0.5 % noloadloss=0.2
~wdg=1 bus=BarraA conn=delta kV=13.8 kVA=10000 tap=1
~wdg=2 bus=BarraB conn=wye kV=0.38 kVA=10000 tap=1.05
```

3.4.4 Elemento Carga

O elemento carga pode ser definido basicamente pelo valor de sua potência ativa (P) nominal em kW, sua potência reativa (Q) em kvar e seu fator de potência (fp), podendo ainda ter seu comportamento descrito por uma curva de carga. No OpenDSS, esse elemento pode ser definido de três formas:

- Potência ativa em kW e fator de potência;
- Potência ativa em kW e potência reativa em kvar;
- Potência aparente (S) em kVA e fator de potência;

Além dessas especificações, deve-se informar o comportamento da carga devido a variação de tensão. O OpenDSS dispõe de oito tipos de modelo de carga descritos a seguir:

1. P e Q constantes;
2. Impedância constante;
3. P constante e Q variando de forma quadrática, conforme um motor;
4. P varia linearmente e Q varia de forma quadrática (resistência e motor);
5. P e corrente constantes (Carga tipo retificador);
6. P constante, podendo ser modificada pelo formato da curva de carga, mas com a potência reativa (Q) fixa em seu valor nominal;
7. Similar ao modelo anterior, mas com a potência reativa variando com o quadrado da tensão;
8. Modelo ZIP.

Caso a tensão fique fora dos limites predefinidos, todos os modelos acima comportam-se como o modelo de impedância constante, garantindo a convergência do cálculo do fluxo de potência.

No OpenDSS a carga é caracterizada pelo elemento *Load* contendo os parâmetros descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros básicos do elemento *Load*.

Parâmetro	Descrição
<i>Bus1</i>	Nome da barra a qual a carga está conectada
<i>phases</i>	Número de fases
<i>Conn</i>	Tipo de conexão: estrela (<i>wye</i>) ou triângulo (<i>delta</i>)
<i>Model</i>	define como a carga varia com a tensão
<i>kV</i>	Tensão nominal
<i>KVA</i>	Potência aparente nominal
<i>kW</i>	potência ativa nominal
<i>kvar</i>	potência reativa nominal
<i>Pf</i>	fator de potência
<i>Daily</i>	nome da curva de carga associada

A seguir é apresentado um exemplo de uma carga trifásica equilibrada conectada em triângulo na linguagem de comandos do OpenDSS.

```
New load.carga2 phases=3 model=5 bus=Barra2
~ kV=0.2 kW=20 kvar=16 conn=delta
```

3.4.5 Elemento Gerador

Assim como o elemento carga (*Load*), o elemento gerador (*Generator*) pode ser caracterizado no OpenDSS pelo seu valor de potência nominal, seu fator de potência, a tensão de operação e o modelo utilizado, podendo também ser controlado por uma curva de despacho. Os principais modelos utilizados são:

1. Potência constante;
2. Impedância constante;
3. Modelo do gerador como uma barra PV.
4. Potência ativa (P) constante, podendo seguir um valor de uma curva de despacho, e potência reativa Q fixada;
5. P constante e a reatância com valor fixo. P segue a curva de despacho e Q será calculada para o valor da reatância fixada;
6. Modelo definido pelo usuário;
7. P constante limitado pela corrente.

Tabela 6 – Parâmetros básicos do elemento *Generator*.

Parâmetro	Descrição
<i>Bus1</i>	Nome da barra a qual o gerador está conectado
<i>phases</i>	Número de fases
<i>Conn</i>	Tipo de conexão: estrela (<i>wye</i>) ou triângulo (<i>delta</i>)
<i>Model</i>	modelo do gerador
<i>kV</i>	Tensão nominal
<i>kW</i>	potência ativa nominal
<i>kvar</i>	potência reativa nominal
<i>Pf</i>	fator de potência
<i>maxkvar</i>	Valor máximo de potência reativa em kvar. Para o modelo 3
<i>minkvar</i>	Valor mínimo de potência reativa em kvar. Para o modelo 3

Os principais parâmetros que definem o elemento gerador são apresentados na Tabela 6.

A seguir é apresentado um exemplo de código em OpenDSS para se definir um gerador com tensão 13,8 kV conectado na barra Barra A, potência de 100 MW, modelo 3 e com potência reativa entre 1 e 50 Mvar.

```
New Generator.Gerador bus=BarraA kV=13.2 kW=100000 model=3
~ maxkvar=50000 minkvar=1000
```

3.4.6 Elemento Chave

O elemento chave apresenta basicamente dois estados de operação, o estado normalmente fechado e o estado normalmente aberto. No OpenDSS uma chave pode ser representada das seguintes maneiras:

- Como uma linha curta com valores impedâncias sequenciais quase desprezíveis;
- A partir do parâmetro *Switch* do elemento *line*;
- Utilizando o elemento *SwtControl*.

O primeiro modelo apresenta uma desvantagem quando se deseja controlar o estado de operação da chave. Neste modelo é necessário definir uma linha para cada estado de comutação (aberto e fechado), além do mais no modelo da chave aberta deve-se definir uma barra fictícia como terminal aberto. A representação da chave como uma linha curta é apresentado a seguir:

Chave normalmente fechada

```
New Line.Swfchada phases=3 Bus1=BarraA Bus2=BarraB
~ r1=1e-3 r0=1e-3 x1=0.000 x0=0.000 c1=0.000 c0=0.000 Length=0.001
```

Chave normalmente aberta

*New Line.Swaberta phases=3 Bus1=BarraA Bus2=**BarraB-Aberta**
 $\sim r1=1e-3$ $r0=1e-3$ $x1=0.000$ $x0=0.000$ $c1=0.000$ $c0=0.000$ $Length=0.001$*

onde **BarraB-Aberta** é uma barra fictícia que não faz parte do circuito

O modelo mais apropriado para o controle da comutação da chave é o modelo *SwtControl*. A partir dele se pode definir o tempo de operação, o estado normal de operação, o elemento de circuito onde a chave irá operar, etc. Na tabela 7 são apresentados os principais parâmetros para a definição desse elemento.

Tabela 7 – Parâmetros básicos do elemento *SwtControl*.

Parâmetro	Descrição
<i>Action</i>	Realiza a comutação da chave após o tempo de atraso especificado.
<i>Delay</i>	Tempo de atuação da chave
<i>Normal</i>	Estado normal da chave (aberto ou fechado)
<i>SwitchedObj</i>	Elemento de circuito onde a chave irá atuar
<i>SwitchedTerm</i>	Número do terminal do interruptor do elemento controlado

3.5 Fluxo de Potência

Na literatura são encontrados diversos métodos para o cálculo de fluxo de potência em redes de transmissão de energia elétrica. Dentre eles, destaca-se o método de Gauss-Seidel, o método de Newton-Raphson, desacoplado rápido, etc. (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2012; MONTICELLI, 1983). Em sua formulação, esses métodos clássicos assumem que o sistema é equilibrado e representam a rede trifásica por seu equivalente monofásico.

Segundo Garcia *et al.* (2000), os sistemas de distribuição são caracterizados por baixas relações X/R (Reatância / Resistência) e condições de desequilíbrio (redes desequilibradas, cargas desbalanceadas, etc.). Essas características impõem sérios desafios para o desenvolvimento de técnicas eficientes de fluxo de potência computacional. Dessa forma, a aplicação dos métodos tradicionais nos sistemas de distribuição resulta em um baixo desempenho.

O OpenDSS utiliza o método de injeção das correntes (MIC) para obter o fluxo de potência, podendo ser aplicado em circuitos desequilibrados. Esse método se baseia na utilização da técnica de decomposição da matriz de admitâncias nodais. Essa é a principal característica que diferencia o OpenDSS de outros simuladores de rede de distribuição, que ainda utilizam métodos como o *forward-backward sweep* (FBS) (KERSTING, 2001), métodos de soma das correntes (MSC) ou métodos de soma das potências (MSP), que são pouco funcionais para sistemas muito ramificados e em anel (DUGAN; MCDERMOTT, 2011).

Inicialmente, o método MIC monta a matriz admitância nodal de cada elemento denominada de matriz primitiva (Y_{prim}), a partir das contribuições da corrente e tensões nodais. Após a obtenção das matrizes primitivas, o programa poderá construir a matriz para todo o sistema. A formulação completa do método MIC é apresentada em Garcia, Pereira e Jr (2001) para circuitos trifásicos desequilibrados e em Penido *et al.* (2010) para circuitos a n condutores.

Para uma barra k do tipo PQ , os resíduos de corrente nas fases a , b e c são determinados por:

$$\Delta I_k^s = \Delta I_{rk}^s + j\Delta I_{mk}^s = \frac{(P_k^{sp})^s - j(Q_k^{sp})^s}{(E_k^s)^*} - \sum_{i \in \Omega_k} \sum_{t \in \alpha_p} Y_{ki}^{st} E_i^t \quad (3.1)$$

$$E_k = V_{rk} + jV_{mk} \quad (3.2)$$

$$(P_k^{sp})^s = P_{gk}^s - P_{lk}^s \quad (3.3)$$

$$(Q_k^{sp})^s = Q_{gk}^s - Q_{lk}^s \quad (3.4)$$

onde,

$(P_k^{sp})^s$, $(Q_k^{sp})^s$ são as potências ativa e reativa especificadas para a fase s da barra k ;

P_{gk}^s , Q_{gk}^s são as potências ativa e reativa geradas na fase s da barra k ;

P_{lk}^s , Q_{lk}^s são as potências ativa e reativa da carga conectada na fase s da barra k ;

s e $t \in \alpha_p = \{a, b, c\}$ e representam as fases do sistema;

$k = 1, \dots, n$, n é o número total de barras;

Ω_k : Conjunto de barras conectadas diretamente à barra k ;

$Y_{ki}^{st} = G_{ki}^{st} + jB_{ki}^{st}$: Elemento ki da matriz admitância nodal entre as fases s e t ;

E_k^s é a tensão na barra k para a fase s .

Dividindo a Equação (3.1) em partes real e imaginária, obtêm-se:

$$\Delta I_{rk}^s = \frac{(P_k^{sp})^s V_{rk}^s + (Q_k^{sp})^s V_{mk}^s}{(V_{rk}^s)^2 + (V_{mk}^s)^2} - \sum_{i=1}^n \sum_{t \in \alpha_p} (G_{ki}^{st} V_{ri}^t - B_{ki}^{st} V_{mi}^t) \quad (3.5)$$

$$\Delta I_{mk}^s = \frac{(P_k^{sp})^s V_{mk}^s - (Q_k^{sp})^s V_{rk}^s}{(V_{rk}^s)^2 + (V_{mk}^s)^2} - \sum_{i=1}^n \sum_{t \in \alpha_p} (G_{ki}^{st} V_{mi}^t - B_{ki}^{st} V_{ki}^t) \quad (3.6)$$

Aplicando-se o método de Newton-Raphson as equações (3.5) e (3.6), obtém-se a seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{m1}^{abc} \\ \Delta I_{r1}^{abc} \\ \Delta I_{m2}^{abc} \\ \Delta I_{r2}^{abc} \\ \vdots \\ \Delta I_{mn}^{abc} \\ \Delta I_{rn}^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y'_{11}{}^{abc} & Y_{12}^{abc} & \dots & Y_{1n}^{abc} \\ Y_{21}^{abc} & Y'_{22}{}^{abc} & \dots & Y_{2n}^{abc} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1}^{abc} & Y_{n2}^{abc} & \dots & Y'_{nn}{}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{r1}^{abc} \\ \Delta V_{m1}^{abc} \\ \Delta V_{r2}^{abc} \\ \Delta V_{m2}^{abc} \\ \vdots \\ \Delta V_{rn}^{abc} \\ \Delta V_{mn}^{abc} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Reescrevendo (3.7) de forma simplificada:

$$[\Delta I_{mr}^{abc}] = [Y^{abc}] [\Delta V_{rm}^{abc}] \quad (3.8)$$

Os elementos fora da diagonal principal da matriz jacobiana são idênticos aos correspondentes elementos da matriz admitância de barras. Na modelagem trifásica os elementos da matriz jacobiana têm dimensão 6x6 e são obtidos a partir das equações (3.9) e (3.10).

$$[Y_{km}^{abc}] = \begin{bmatrix} B_{km}^{abc} & G_{km}^{abc} \\ G_{km}^{abc} & -B_{km}^{abc} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$[Y_{kk}^{abc}] = \begin{bmatrix} B'_{kk}{}^{abc} & G'_{kk}{}^{abc} \\ G''_{kk}{}^{abc} & B''_{kk}{}^{abc} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

onde

$$B'_{kk}{}^{abc} = B_{kk}^{abc} - \begin{bmatrix} a_k^a & & \\ & a_k^b & \\ & & a_k^c \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$G'_{kk}{}^{abc} = G_{kk}^{abc} - \begin{bmatrix} b_k^a & & \\ & b_k^b & \\ & & b_k^c \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$G''_{kk}{}^{abc} = G_{kk}^{abc} - \begin{bmatrix} c_k^a & & \\ & c_k^b & \\ & & c_k^c \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$B''_{kk}{}^{abc} = B_{kk}{}^{abc} - \begin{bmatrix} d_k^a & & \\ & d_k^b & \\ & & d_k^c \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Os elementos a_k^s , b_k^s , c_k^s e d_k^s são dependentes do modelo da carga adotado para cada fase da barra k (GARCIA *et al.*, 2000),(GARCIA; PEREIRA; JR, 2001).

A seguir são apresentados os passos do algoritmo de fluxo de carga (CARVALHO, 2014; DUGAN, 2016).

1. Remove-se de todos os elementos de conversão de energia da rede, como geradores e cargas e calcula o valor inicial de tensão do barramento para a iteração com a matriz admitância da rede desta forma.
2. Conecta-se todos os elementos na rede e calcula a injeção de corrente (I_{inj}) de cada elemento de conversão com a sua matriz admitância, tensão de nó e potência.
3. Utiliza-se as correntes de injeção de cada elemento para formar uma matriz de injeção de corrente. As tensões dos nós podem ser calculadas com a matriz corrente de injeção e a matriz admitância do sistema através da operação matricial. Repetir as iterações até que o erro de tensões nodais seja inferior a tolerância.

Além do método de injeção de correntes, o OpenDSS possibilita a utilização do método de Newton que é uma variação do MIC onde as matrizes são atualizadas a cada iteração (GARCIA *et al.*, 2000), não sendo correspondente ao método Newton-Raphson de fluxo de potência (DUGAN, 2016).

O fluxo de carga no OpenDSS pode ser executado de vários modos que dependem ou não do comportamento das cargas. Os principais modos de simulação são: instantâneo; diário; anual; *dutycycle*; Monte Carlo.

4 Otimização por Enxame de Partículas

Nesse capítulo é apresentada a formulação clássica do método de otimização por enxame de partículas, do inglês Particle Swarm Optimization (PSO), como também suas principais modificações para otimização de problemas cujo modelo exigem variáveis binárias e soluções combinatórias, em domínio discreto.

4.1 PSO Clássico

O método de otimização por enxame de partículas é um método meta-heurístico de programação evolutiva baseado no conceito de inteligência coletiva. O método foi desenvolvido originalmente pelo sociólogo James Kennedy em conjunto com o engenheiro eletricitista Russell Eberhat em 1995, baseando-se no comportamento social de grupos de pássaros e peixes. O algoritmo utiliza o conceito de iteração social para a resolução de problemas fazendo uso de parâmetros sociais e cognitivos para a tomada de decisão.

No PSO, cada indivíduo é modelado como uma partícula, e cada partícula representa uma possível solução do problema de otimização no espaço de busca d -dimensional. O conjunto de partículas é denominado enxame. Essas partículas se movem através do espaço e, eventualmente, se comunicam entre si mantendo a melhor solução (PRIETO, 2015).

Os vetores posição e velocidade correspondentes a i -ésima partícula no espaço de busca d -dimensional podem ser representados por $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}]$ e $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}]$ respectivamente. A melhor posição encontrada pela i -ésima partícula até o momento é gravada e representada por $Pbest_i = [Pb_{i1}, Pb_{i2}, \dots, Pb_{id}]$. A melhor posição de todas as partículas do grupo é representada por $Gbest = [Gb_1, Gb_2, \dots, Gb_d]$. A função da velocidade da partícula v_{id}^{k+1} , expressa pela Equação (4.1), é indicar a direção a ser seguida a fim de se aproximar do ponto ótimo global ($Gbest$). Dessa forma, em cada iteração a posição da partícula x_{id}^{k+1} é definida pela soma de sua posição atual e sua velocidade atualizada, conforme a Equação (4.2).

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(Pb_{id}^k - x_{id}^k) + c_2r_2(Gb_d^k - x_{id}^k) \quad (4.1)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (4.2)$$

onde

i representa o número da partícula;

d representa o número da dimensão;

k é a iteração atual;

w é o peso de inércia;

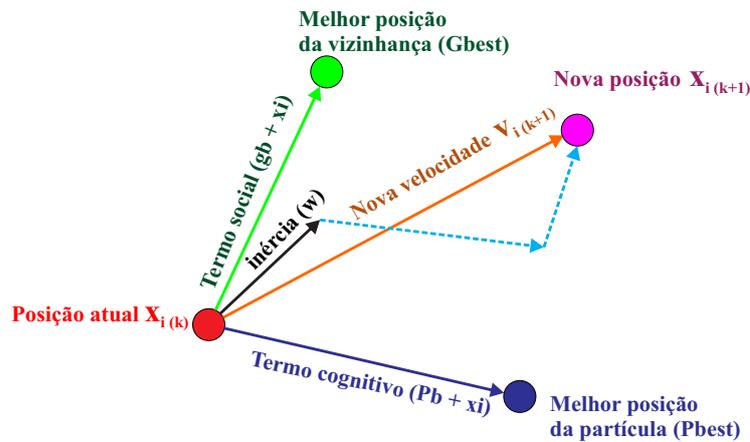
c_1 e c_2 são fatores de aprendizagem cognitivo e social, respectivamente;

r_1 e r_2 são números aleatórios entre 0 e 1.

Observando a Equação (4.1) é possível fazer uma analogia das características sociais apresentadas no algoritmo. O termo v_{id}^k indica que o algoritmo possui memória, pois a velocidade futura é dependente do seu valor atual. Além disso, a tomada de decisão da partícula é influenciada pelo peso de inércia w , a componente cognitiva ($c_1 r_1 (Pb_{id}^k - x_{id}^k)$) e social ($c_2 r_2 (Gb_d^k - x_{id}^k)$).

As componentes cognitivas e sociais indicam que a tomada de decisão é influenciada pela sua própria experiência e pela experiência do enxame, respectivamente. Os parâmetros c_1 e c_2 são números inteiros positivos que determinam a influência do melhor individual Pb_{id} e melhor global Gb_d na tomada de decisão da partícula. Na Figura 2 é ilustrado um movimento de uma partícula de acordo com a influência de suas componentes.

Figura 2 – Movimento de uma partícula.



Fonte: Autoria própria (2018).

O parâmetro peso de inércia w determina a preferência da partícula em seguir a mesma direção da iteração anterior (OLIVEIRA, 2012). Desde sua introdução, diversos autores propõem diferentes métodos para determinação desse parâmetro. Dependendo do tipo da função que se deseja otimizar, esse parâmetro pode ser constante ou variável.

Na literatura técnica, alguns autores definem a função peso de inércia w conforme a Equação (4.3), onde seu valor é diminuído ao longo do processo iterativo (KHALIL; GORPINICH, 2012b; FLAIH *et al.*, 2017):

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} x \text{ iter} \quad (4.3)$$

sendo w_{max} é o valor do peso inicial; w_{min} é o valor do peso final; $iter_{max}$ é o número máximo de iterações e $iter$ é a iteração atual.

O algoritmo clássico do PSO é definido como:

1. Início.
2. Nesse passo são definidos os vetores do enxame inicial, velocidades iniciais, $Pbest$ e $Gbest$ de forma aleatória. Define-se também os valores dos parâmetros de aprendizagem (c_1 e c_2) e o número máximo de iterações ($iter_{max}$).
3. $iter = iter + 1$.
4. Atualiza o coeficiente de peso w usando (4.3), a velocidade usando (4.1) e a posição usando (4.2).
5. Calcula a função *fitness* para cada partícula.
6. Se as restrições do problema não forem satisfeitas, volte para o passo 3; caso contrário vá para o passo 7.
7. Defina o novo $Pbest_{iter}$ e sua função *fitness* correspondente.
8. Se a função *fitness* de $Pbest_{iter} < Fbest$
 $Gbest_{iter} = Pbest_{iter}$ e $Fbest =$ função *fitness* de $Pbest_{iter}$.
9. Verifique os critérios de parada (no algoritmo proposto, o critério de parada se dá quando todas as partículas convergem para o mesmo ponto ou quando o número de iterações chega ao valor máximo). Caso sejam satisfeitos, vá para o passo 10. Se não, volte o passo 3.
10. Fim.

O método PSO clássico atua em um espaço de busca contínuo durante o processo de otimização, onde as variáveis assumem valores reais. Todavia, existem problemas no domínio da engenharia cujo modelo envolve variáveis binárias ou discretas e soluções combinatórias, como é o caso do problema de reconfiguração de redes de distribuição apresentado nesse trabalho.

Nesse contexto, surgiram modificações na formulação do PSO capazes de fazer com que o algoritmo operasse no domínio discreto a partir de variáveis binárias. Nas próximas seções são apresentadas as duas principais modificações que serviram como base para a formulação do algoritmo proposto desse trabalho.

4.2 PSO Binário (BPSO)

O Algoritmo *Binary* PSO foi introduzido por Kennedy e Eberhart (1997) possibilitando operar no domínio discreto fazendo uso de variáveis binárias.

No BPSO uma transformação é aplicada para limitar o movimento das partículas em um espaço de estado restrito a 0 (zero) e 1 (um) em cada dimensão, onde a velocidade v_{id} representa a probabilidade de o bit x_{id} assumir valor 1. Em outras palavras, se $v_{id} = 0,20$, então existe uma chance de vinte por cento de x_{id} ser 1, e uma chance de oitenta por cento de x_{id} ser 0 (KENNEDY; EBERHART, 1997).

Em suma, a fórmula da velocidade descrita em (4.1) permanecerá igual, exceto que agora Pb_{id} e x_{id} são binários em [0-1] e v_{id} , uma vez que representa uma probabilidade, deve ser limitado no intervalo [0,0-1,0]. Para satisfazer essas modificações, utilizou-se uma função sigmoide descrita em (4.4).

$$\text{sig}(v_{id}^{k+1}) = \frac{1}{1 + e^{-v_{id}^{k+1}}} \quad (4.4)$$

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} 1, & \text{se } \text{rand} \leq \text{sig}(v_{id}^{k+1}) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.5)$$

sendo *rand* um número quase aleatório selecionado de uma distribuição uniforme em [0-1,0].

No algoritmo do PSO contínuo v_{id} é limitado em um valor V_{max} , que era um parâmetro do sistema. Na versão discreta do PSO o valor de V_{max} é retido, isto é, $|v_{id}| \leq V_{max}$, limitando a probabilidade máxima do bit x_{id} assumir valor 0 ou 1 (KENNEDY; EBERHART, 1997). Por exemplo, se $V_{max} = 4$, as probabilidades de $\text{sig}(v_{id})$ serão limitadas entre de 0,017 e 0,981. O resultado disso é que os novos vetores ainda serão testados, mesmo após cada bit ter alcançado sua melhor posição. Especificar um V_{max} maior, por exemplo, 8, torna novos vetores menos prováveis. Assim, parte da função da V_{max} , no enxame de partículas discretas é estabelecer um limite para uma maior exploração após a convergência do enxame; em certo sentido, pode-se dizer que controla a taxa de mutação do vetor de bits. O valor de v_{id} é limitado pelos valores V_{max} e V_{min} usando :

$$v_{id}^{k+1} = \begin{cases} V_{max}, & v_{id}^{k+1} > V_{max} \\ v_{id}^{k+1}, & |v_{id}^{k+1}| \leq V_{max} \\ V_{min}, & v_{id}^{k+1} < V_{min} \end{cases} \quad (4.6)$$

onde $V_{min} = -V_{max}$

Pode-se notar também que, o BPSO é suscetível à saturação da função sigmoide, que ocorre quando os valores limites de velocidade são muito grandes ou muito pequenos.

Nesses casos, a probabilidade de uma mudança no valor do bit se aproxima de zero, limitando a exploração de novos vetores. Essa característica é levada em consideração na elaboração do método proposto nesse trabalho.

4.3 PSO Seletivo (SPSO)

Uma simples modificação no PSO binário foi proposta por Khalil e Gorpnich (2012b) limitando a busca no espaço de pesquisa selecionado. O espaço de busca no SPSO, em cada dimensão d é definido por $S_d = [s_{d1}, s_{d2}, \dots, s_{dn}]$, que corresponde a um conjunto de dn posições onde, dn é o número total de posições existentes em cada dimensão. Em outras palavras, será mapeado o espaço de busca S_d de dn posições de cada dimensão d , onde a posição de cada partícula deixa de ser um ponto em um espaço de valor real e passa a ser um ponto no espaço discreto selecionado, alterando assim a transformação sigmoide de acordo com (4.7) e (4.8).

$$\text{sig}(v_{id}^{k+1}) = \frac{dn}{1 + e^{-v_{id}^{k+1}}} \quad (4.7)$$

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} s_{d1}, & \text{se } \text{sig}(v_{id}^{k+1}) < 1 \\ s_{d2}, & \text{se } 1 < \text{sig}(v_{id}^{k+1}) < 2 \\ \vdots & \\ s_{dn}, & \text{se } (dn - 1) < \text{sig}(v_{id}^{k+1}) < dn \end{cases} \quad (4.8)$$

onde $s_{d1}, s_{d2} \dots s_{dn}$ são os valores selecionados no espaço S_d .

A utilização do espaço de busca seletivo destaca-se como a principal vantagem do método na solução de problemas cujo modelo envolve variáveis discretas, uma vez que não há a necessidade de codificação binária das soluções candidatas, como ocorre no BPSO. O conceito de espaço seletivo é utilizado no método proposto desse trabalho.

5 Método Proposto para Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia

Nesse capítulo é discutido o problema de reconfiguração de redes de distribuição em estado normal de operação, apresentando em primeiro momento, a formulação do problema, juntamente com sua função objetivo e restrições. Para a solução do problema, é proposto um método fundamentado nas características probabilísticas do BPSO e no conceito de espaço seletivo do SPSO.

5.1 Formulação do Problema

A reconfiguração de redes de distribuição pode ocorrer em três situações: em caso de contingências visando o reestabelecimento do fornecimento de energia em áreas prejudicadas, em casos de manutenções programadas para isolar os trechos que precisam ser desligados e em condições normais de operação, quando a topologia muda para melhorar os parâmetros de desempenho da rede (PFITSCHER, 2013).

Em todos os casos, estudos de reconfiguração de redes de distribuição primárias consistem em determinar o estado das chaves (fechada/aberta) de seccionamento e interligação, visando obter uma configuração topológica que melhor atenda a função objetivo definida, sem violar as restrições operacionais do sistema. Trata-se de um problema de otimização não linear mono ou multi-objetivo (BRAZ, 2010).

A função objetivo tradicional utilizada nos trabalhos de reconfiguração é a minimização das perdas ativas do sistema. Outros objetivos podem ser considerados, como melhoria do perfil de tensão, redução da sobrecarga nos equipamentos e balanceamento entre alimentadores; todavia, por não serem objetivos conflitantes, minimizar perdas tende a melhorar também os demais objetivos listados.

Nesse contexto, o objetivo principal desse trabalho é obter uma configuração ótima visando a redução de perdas ativas do sistema, levando em consideração algumas restrições operacionais, como limite de tensão, limite de corrente suportado pelos ramos, ilhamento de carga e radialidade do sistema. A função objetivo referente a minimização das perdas do sistema é descrita como:

$$f(x) = \min \left(\sum_{l=1}^{N_l} r_l i_l^2 \right) \quad (5.1)$$

onde

N_l é o número total de linhas;
 r_l é a resistência da linha l ;
 i_l é a corrente que passa pela linha l .

O cálculo de fluxo de potência para as redes de distribuição é obtido a partir do OpenDSS, fazendo uso do método de injeção de correntes (GARCIA *et al.*, 2000).

5.1.1 Restrições

Considerada como restrição do problema, o valor da tensão nos barramentos deve situar dentro dos limites operacionais para garantir a estabilidade do sistema, conforme a Equação (5.2).

$$E_{min} \leq |E_k| \leq E_{max} \quad (5.2)$$

onde

E_k é a tensão na barra k ;

E_{min} e E_{max} são os limites mínimo e máximo de tensão permitidos.

Os valores dos limites operacionais garantem a qualidade do fornecimento de energia aos consumidores e são definidos como $E_{min} = 0,93$ pu e $E_{max} = 1,05$ pu da tensão nominal de operação do sistema, segundo o módulo 8 da ANEEL (2018).

Outro ponto a ser considerado é que a corrente que circula em um determinado condutor não ultrapasse o valor máximo de corrente admissível, conforme a Equação (5.3). Um valor de corrente acima do limite suportado implicará no aquecimento do condutor, aumentando as perdas na rede por efeito Joule e diminuindo sua vida útil.

$$i_l \leq i_l^{max} \quad (5.3)$$

Em que:

i_l é a corrente da linha l ;

i_l^{max} é a máxima corrente permitida na linha l .

Para uma operação simples e barata da proteção da rede elétrica de distribuição, a configuração radial é preferida, isto é, deve existir um único caminho energizado desde qualquer barra até sua subestação supridora. Para manter essa topologia, os seguintes critérios devem ser considerados (NIKNAM; AZADFARSANI; JABBARI, 2012):

O número total de ramos deve ser:

$$N_{ramos} = N_{barras} - N_f \quad (5.4)$$

onde N_{ramos} representa a quantidade de ramos, N_{barras} é o número de barras e N_f é o número total de alimentadores.

O número total de malhas obtidas fechando todas as chaves de interligação deve ser (PRIETO, 2015):

$$N_{malhas} = N_{chaves} - N_{ramos} \quad (5.5)$$

onde N_{malhas} é o total de malhas geradas a partir do fechamento das chaves de interligação; N_{chaves} é a quantidade de chaves presentes na rede.

Assim, para garantir que a estrutura da rede seja radial, apenas uma chave deve estar aberta em cada malha.

5.2 Método proposto

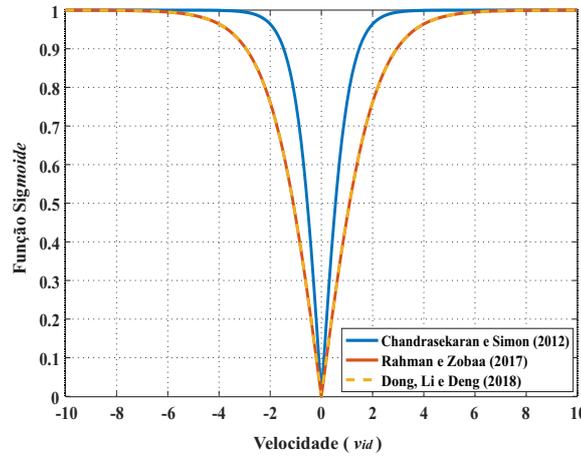
Na literatura técnica são encontrados vários trabalhos em diversas áreas da engenharia que propõem a alteração da função sigmoide do BPSO com o objetivo de melhorar a performance do algoritmo. Em Dong, Li e Deng (2018) é proposta uma modificação na função sigmoide para a aplicação do BPSO no projeto de estrutura de uma antena tipo-fragmento. A nova função é adaptada para receber apenas os valores absolutos de velocidade v_{id} das partículas, apresentando um comportamento semelhante a letra "V", conforme apresentado na Figura 3.

Funções de comportamento semelhante são aplicadas em Rahman e Zobaa (2017) no problema de posicionamento ótimo de unidades de medição fasorial (*phasor measurement units*) e em Chandrasekaran e Simon (2012) para resolver o problema de comprometimento de unidades geradoras térmicas. Entretanto, na tentativa de aplicação dessa função para o problema de reconfiguração não se obteve efetividade nos resultados.

Nesse contexto, foi proposta uma modificação na função sigmoide preservando seu comportamento em "S" e modificando apenas a declividade da curva a partir da inserção de um parâmetro β . A modificação proposta faz com que seja possível controlar a taxa de mudança do vetor de partículas, tornando o processo de busca mais eficiente e melhorando a convergência da população. A nova função é apresentada na Equação (5.6). Este novo método é chamado de BPSO Seletivo Aprimorado (IS-BPSO) (PEGADO *et al.*, 2019).

$$f(v_{id}^{k+1}) = \frac{dn}{1 + e^{-\beta(v_{id}^{k+1})}} \quad (5.6)$$

Figura 3 – Comparativo entre as funções ativação.



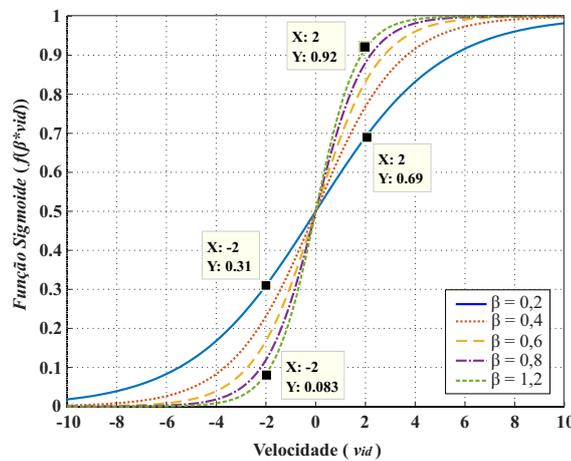
Fonte: Autoria própria (2018).

A equação da posição das partículas é atualizada para:

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} s_{d1}, & \text{se } f(v_{id}^{k+1}) < 1 \\ s_{d2}, & \text{se } 1 < f(v_{id}^{k+1}) < 2 \\ \vdots & \\ s_{dn}, & \text{se } (dn - 1) < f(v_{id}^{k+1}) < dn \end{cases} \quad (5.7)$$

Similarmente aos valores de V_{min} e V_{max} , o comportamento da função sigmoide influencia nos limites máximos de probabilidade do bit x_{id} para assumir o valor 0 ou 1. Observando a Figura 4, pode-se notar que na medida que o parâmetro β da função sigmoide é alterado, as probabilidades $sig(v_{id})$, relacionadas aos valores de V_{max} e V_{min} , são modificadas.

Figura 4 – Influência do valor de β na função sigmoide.



Fonte: Autoria própria (2018).

Para valores de V_{max} e V_{min} fixos, quanto mais acentuado o comportamento da sigmoide ($\beta > 1$), menor a probabilidade do bit x_{id} mudar de valor, reduzindo a taxa de mudança e tornando a exploração de novos vetores menos provável. Por outro lado, um comportamento menos acentuado de $sig(v_{id})$ ($\beta < 1$) aumenta a probabilidade x_{id} ter seu valor alterado, provocando uma maior exploração após a convergência da população.

Além do controle da taxa de mudança, o algoritmo proposto conta com o conceito de espaço seletivo do SPSO, reduzindo o espaço de busca para um espaço selecionado e trabalhando com valores discretos, dispensando a codificação binária do BPSO. Na próxima seção é apresentada a aplicação do método proposto para a resolução do problema de reconfiguração.

5.3 Aplicação do Método Proposto no Problema de Reconfiguração

A seleção da configuração ótima para o problema de reconfiguração é feita utilizando o método IS-BPSO proposto nesse trabalho. Antes da aplicação do IS-BPSO, devem ser realizados os seguintes passos:

1. Inicialmente, são definidos os dados de entrada, incluindo a configuração de rede, os dados de linha e de barra, o valor do parâmetro β , os valores básicos de peso de inércia (w_{min} e w_{max}) e fatores de aprendizado (c_1 e c_2), o número máximo de iterações ($iter_{max}$) e o número de partículas (N_{par}).
2. O próximo passo é definir o número de dimensões do problema. Isso é feito a partir do fechamento de todas as chaves de interligação presentes na rede de distribuição, criando uma rede malhada. O número de dimensões será igual ao número de malhas originadas pelo fechamento das chaves.

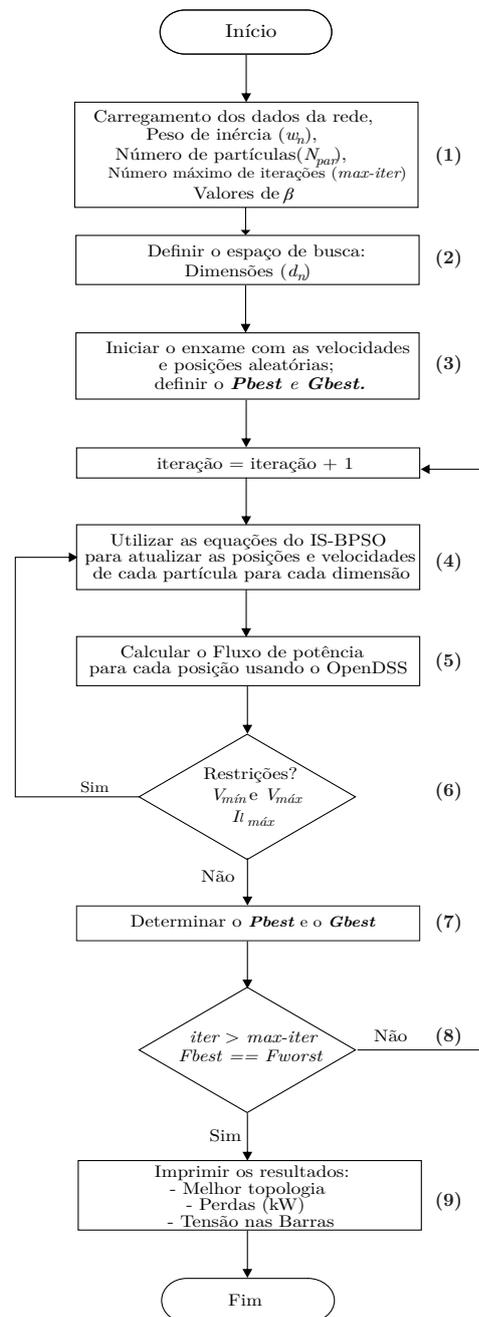
Deve-se encontrar o espaço de busca de cada dimensão. O espaço de busca de uma dimensão consistirá das chaves pertencentes a sua malha correspondente. As chaves que não fazem parte de alguma malha são desconsideradas e, as chaves que fazem parte de mais de uma malha, isto é, a mais de uma dimensão, devem fazer parte apenas de uma dimensão. Essa escolha é feita aleatoriamente em cada iteração;

3. Definido o número de dimensões e o espaço de busca para cada dimensão, aplica-se o algoritmo IS-BPSO iniciando o enxame com as velocidades e posições aleatórias e definido o $Pbest$ e $Gbest$ iniciais;
4. Utiliza-se as equações (4.1), (4.6), (5.6) e (5.7) para atualizar as velocidades e posições de cada partícula para cada dimensão d ;

5. Calcula-se o fluxo de carga para cada vetor posição X_i usando o OpenDSS;
6. Verifica se as restrições operacionais de tensão e corrente foram violadas. Em caso afirmativo volta para o passo 4;
7. Determina a melhor posição encontrada por cada partícula até o momento ($Pbest$) e a melhor posição de todas as partículas ($Gbest$);
8. Verifica os critérios de parada (número máximo de iterações e convergência das partículas). Caso sejam satisfeitos, vá para o passo 9.
9. Apresenta os resultados obtidos pelo método: melhor topologia, total de perdas e tensão nas barras.

Uma característica importante do método é que apenas uma chave é aberta em cada malha (dimensão), garantindo que todas as topologias escolhidas obedeam à restrição de radialidade do sistema. O fluxograma completo do algoritmo é apresentado na Figura 5.

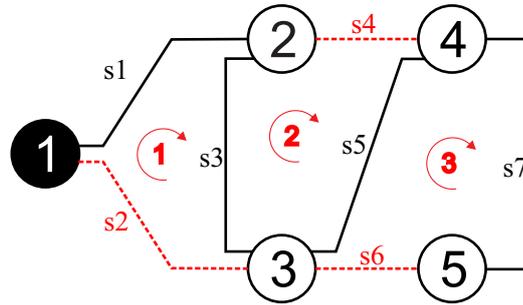
Figura 5 – Fluxograma do algoritmo IS-BPSO proposto.



Fonte: Autoria própria (2018).

Para exemplificar o funcionamento do algoritmo IS-BPSO, considere o sistema didático de 5 barras mostrado na Figura 6 (PEREIRA, 2010). Esse sistema possui uma subestação (Barra 1), 4 chaves de seccionamento (s1, s3, s5 e s7) e 3 chaves de interligação (s2, s4 e s6). Na topologia inicial, as perdas totais do sistema são de 1,4136 pu. A tensão de referência para o sistema é de 1,05 pu.

Figura 6 – Sistema didático de 5 barras.



Fonte: Autoria própria (2018).

A seguir é apresentada a inicialização dos dados e três iterações do algoritmo proposto:

1. Inicialização dos dados:

- Definição dos parâmetros $\beta = 0,5$, $N_{par} = 2$, $iter_{max} = 3$, $c_1 = c_2 = 2$;
- Valores básicos do peso de inércia: $w_{min} = 0,5$, $w_{max} = 0,9$;
- Número de dimensões definido pelo fechamento das chaves de interligação: $d = 3$;
- Espaços de busca para cada dimensão: $S_1 = [1 \ 2 \ 3]$, $S_2 = [4 \ 5]$, $S_3 = [6 \ 7]$;
- Posição inicial para cada partícula, definida aleatoriamente: $X^{(0)} = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 1 & 4 & 6 \end{bmatrix}$;
- Melhores posições das partículas até o momento (Correspondente a mesma posição inicial): $Pb^{(0)} = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 1 & 4 & 6 \end{bmatrix}$;
- Velocidades iniciais aleatórias: $V^{(0)} = \begin{bmatrix} 0,816 & 0,796 & 1,310 \\ 0,996 & 0,971 & 0,886 \end{bmatrix}$;
- Perdas correspondentes as partículas 1 e 2: $Fx^{(0)} = \begin{bmatrix} 1,5068 \\ 0,3846 \end{bmatrix}$ pu;
- Valor de $Gbest$ e o valor de perdas correspondente a essa topologia: $Gb^{(0)} = [1 \ 4 \ 6]$, $F_{best}^{(0)} = 0,3846$.

2. iteração 1:

- Calcula o valor do w usando a Equação (4.3): $w^{(1)} = 0,76$;
- Calcula a nova velocidade para cada partícula usando (4.1):

$$V^{(1)} = \begin{bmatrix} 0,242 & 0,604 & 0,995 \\ 0,756 & 0,737 & 0,658 \end{bmatrix};$$

- Cálculo da função sigmoide usando (5.6):

$$sig^{(1)} = \begin{bmatrix} 1,319 & 1,293 & 1,460 \\ 2,042 & 1,353 & 1,317 \end{bmatrix};$$

- Atualização das posições das partículas usando (5.7):

$$X^{(1)} = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 3 & 5 & 7 \end{bmatrix};$$

- Cálculo das perdas para cada posição usando o OpenDSS:

$$Fx^{(1)} = \begin{bmatrix} 1,5068 \\ 0,9412 \end{bmatrix} \text{ pu};$$

- Verifica as restrições operacionais para cada nova posição encontrada: se $X^{(1)}$ é radial, (5.2) e (5.3) são válidas.

- Compara-se as novas posições para cada partícula e as perdas correspondentes com o valor do $Pbest$ anterior:

$$Pb^{(0)} = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 1 & 4 & 6 \end{bmatrix} \quad Fx^{(0)} = \begin{bmatrix} 1,5068 \\ 0,3846 \end{bmatrix}$$

$$X^{(1)} = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 3 & 5 & 7 \end{bmatrix} \quad Fx^{(1)} = \begin{bmatrix} 1,5068 \\ 0,9412 \end{bmatrix}$$

- Guarda-se para cada partícula a melhor posição própria:

$$Pb^{(1)} = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 1 & 4 & 6 \end{bmatrix} \quad Fx_{própria}^{(1)} = \begin{bmatrix} 1,5068 \\ 0,3846 \end{bmatrix}$$

- Comparam-se as perdas obtidas para cada posição com o melhor global (F_{best}):

$$\begin{bmatrix} Fx_{própria}^{(1)} & F_{best}^{(0)} \\ 1,5068 & > 0,3846 \\ 0,3846 & = 0,3846 \end{bmatrix}$$

- É armazenado o novo global que corresponde à posição que apresente o menor valor de perdas:

$$Gb^{(1)} = [1 \ 4 \ 6]$$

$$F_{best}^{(1)} = 0,3846$$

3. iteração 2:

- Calcula o valor do w usando a Equação (4.3): $w^{(2)} = 0,63$;

- Atualiza a velocidade de cada partícula usando (4.1):

$$V^{(2)} = \begin{bmatrix} 0,144 & 0,380 & 0,626 \\ 0,829 & 0,464 & 0,414 \end{bmatrix};$$

- Cálculo da função sigmoide usando (5.6):

$$sig^{(2)} = \begin{bmatrix} 1,392 & 1,187 & 1,955 \\ 0,911 & 1,228 & 1,204 \end{bmatrix};$$

- Atualização das posições das partículas usando (5.7):

$$X^{(2)} = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 1 & 5 & 7 \end{bmatrix};$$

- Cálculo das perdas para cada posição usando o OpenDSS:

$$Fx^{(2)} = \begin{bmatrix} 1,5068 \\ 0,5234 \end{bmatrix} \text{ pu};$$

- Verifica as restrições operacionais para cada nova posição encontrada: se $X^{(2)}$ é radial, (5.2) e (5.3) são válidas.

- Compara-se as novas posições para cada partícula e as perdas correspondentes com o valor do $Pbest$ anterior:

$$Pb^{(1)} = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 1 & 4 & 6 \end{bmatrix} \quad Fx_{própria}^{(1)} = \begin{bmatrix} 1,5068 \\ 0,3846 \end{bmatrix}$$

$$X^{(2)} = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 1 & 5 & 7 \end{bmatrix}; \quad Fx^{(2)} = \begin{bmatrix} 1,5068 \\ 0,5234 \end{bmatrix}$$

- Guarda-se para cada partícula a melhor posição própria:

$$Pb^{(2)} = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 1 & 4 & 6 \end{bmatrix} \quad Fx_{própria}^{(2)} = \begin{bmatrix} 1,5068 \\ 0,3846 \end{bmatrix}$$

- Comparam-se as perdas obtidas para cada posição com o melhor global (F_{best}):

$$\begin{bmatrix} Fx_{própria}^{(2)} & F_{best}^{(1)} \\ 1,5068 > 0,3846 \\ 0,3846 = 0,3846 \end{bmatrix}$$

- A melhor posição de todas as partículas continua sendo a encontrada na iteração anterior:

$$Gb^{(2)} = [1 \ 4 \ 6]$$

$$F_{best}^{(2)} = 0,3846$$

4. iteração 3:

- Calcula o novo valor do w usando a Equação (4.3): $w^{(3)} = 0,5$;

- Atualiza a velocidade para cada partícula usando (4.1):

$$V^{(3)} = \begin{bmatrix} 2,32 & 0,0025 & 0,313 \\ 0,414 & 0,232 & 0,207 \end{bmatrix};$$

- Calcula os valores da função sigmoide usando (5.6):

$$sig^{(3)} = \begin{bmatrix} 2,731 & 0,996 & 1,732 \\ 1,8064 & 1,115 & 1,103 \end{bmatrix};$$

- Atualização das posições das partículas usando (5.7):

$$X^{(3)} = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 7 \\ 2 & 5 & 7 \end{bmatrix};$$

- Cálculo das perdas para cada posição usando o OpenDSS:

$$Fx^{(3)} = \begin{bmatrix} 0,3559 \\ 1,5068 \end{bmatrix} \text{ pu};$$

- Verifica as restrições operacionais para cada nova posição encontrada:

se $X^{(3)}$ é radial, (5.2) e (5.3) são válidas.

- Compara-se as novas posições para cada partícula e as perdas correspondentes com o valor do $Pbest$ anterior:

$$Pb^{(2)} = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 1 & 4 & 6 \end{bmatrix} \quad Fx_{própria}^{(2)} = \begin{bmatrix} 1,5068 \\ 0,3846 \end{bmatrix}$$

$$X^{(3)} = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 7 \\ 2 & 5 & 7 \end{bmatrix}; \quad Fx^{(3)} = \begin{bmatrix} 0,3559 \\ 1,5068 \end{bmatrix}$$

- Guarda-se para cada partícula sua melhor posição até o momento:

$$Pb^{(3)} = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 7 \\ 1 & 4 & 6 \end{bmatrix} \quad Fx_{própria}^{(3)} = \begin{bmatrix} 0,3559 \\ 0,3846 \end{bmatrix}$$

- Comparam-se as perdas obtidas para cada posição com o melhor global (F_{best}):

$$\begin{bmatrix} Fx_{própria}^{(3)} & F_{best}^{(2)} \\ 0,3559 < 0,3846 \\ 0,3846 = 0,3846 \end{bmatrix}$$

- É armazenado o novo global que corresponde à posição que apresente o menor valor de perdas:

$$Gb^{(3)} = [3 \ 4 \ 7]$$

$$F_{best}^{(3)} = 0,3559 \text{ pu}$$

5. Resultados:

Melhor posição encontrada $Gb^{(3)} = [3 \ 4 \ 7]$, perdas = 0,3559 pu.

A solução obtida pelo algoritmo proposto foi a mesma obtida em Pereira (2010), Prieto (2015). Sendo essa, segundo os autores, a configuração ótima para esse sistema.

No próximo capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados em sistemas de distribuição de maior porte.

6 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados com o algoritmo proposto em três sistemas de distribuição disponíveis na literatura técnica sobre reconfiguração de redes. Tais resultados foram comparados com outros trabalhos apresentados no estado da arte.

6.1 Descrição dos sistemas teste

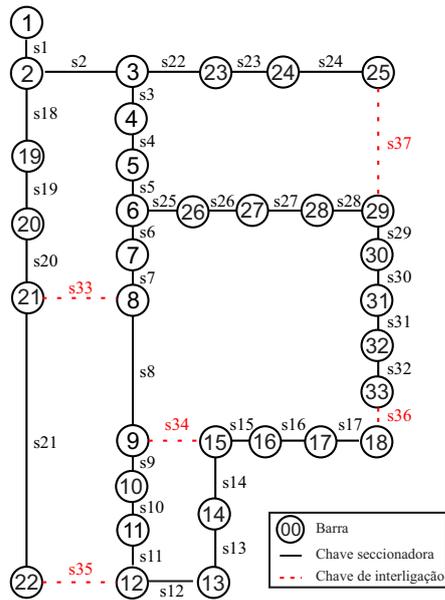
Inicialmente, o método proposto foi aplicado em dois sistemas bastante utilizados nos problemas de reconfiguração. Os sistemas teste 33-Barras (BARAN; WU, 1989) e 69-Barras (SAVIER; DAS, 2007), ambos sistemas de cinco dimensões. Esses dois primeiros sistemas foram escolhidos principalmente para validação das rotinas de código desenvolvidas. Os dados completos de todos os sistemas são encontrados no Anexo A.

O sistema 33-Barras de Baran e Wu (1989) possui 37 ramos, 32 chaves normalmente fechadas (chaves seccionadoras) e 5 chaves normalmente abertas (chaves de interligação). O diagrama unifilar desse sistema é apresentado na Figura 7. O total de cargas ativas e reativas são de 3715 kW e 2300 kvar, respectivamente. As chaves abertas, s33, s34, s35, s36 e s37, são ilustradas por linhas tracejadas. As chaves normalmente fechadas, s1 a s32, são representadas por linhas contínuas. Na condição inicial, as perdas totais do sistema são de 202,67 kW. Cinco malhas são formadas pelo fechamento de todas chaves de interligação.

O sistema de 69-Barras, 12.6 kV, 10 MVA, cujo o diagrama unifilar é mostrado na Figura 8. Esse sistema consiste de 73 ramos, 68 chaves normalmente fechadas. O total de perdas ativas calculadas antes da reconfiguração é de 224,96 kW. As chaves normalmente abertas na configuração inicial são s69 a s73. Igualmente ao sistema 33-Barras, cinco malhas são formadas pelo fechamento das cinco chaves de interligação iniciais.

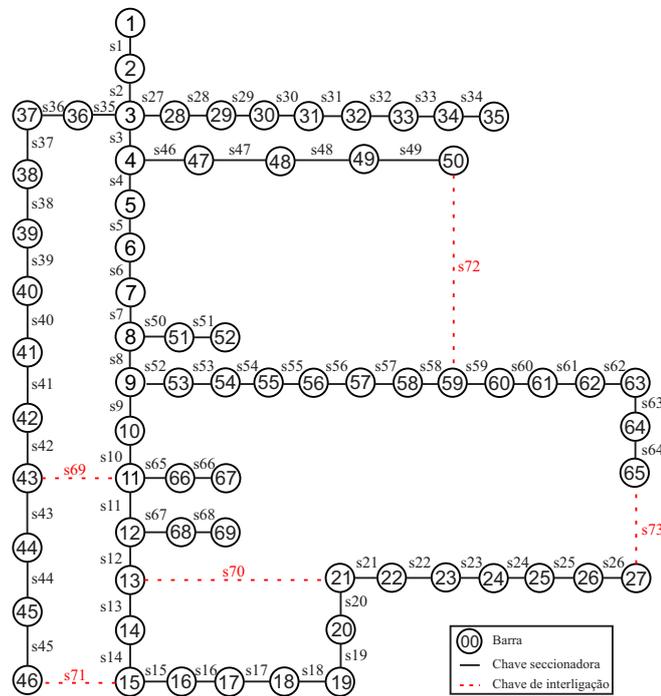
Finalmente, foi utilizado um sistema de maior porte com o objetivo de realizar testes de efetividade dos códigos, uma vez que sua dimensão permite uma análise mais realista do problema. Este sistema, denominado nessa seção de sistema de 94-nós, foi apresentado por Su e Lee (2003). Sua topologia possui 11 alimentadores de 11,4 kV, 83 chaves normalmente fechadas e 13 chaves normalmente abertas (s84 à s96). O total de perdas ativas calculadas antes da reconfiguração são de 532 kW. Treze malhas são formadas com o fechamento das trezes chaves de interligação. Sua configuração inicial é apresentada na Figura 9.

Figura 7 – Diagrama unifilar do sistema de distribuição 33-Barras.



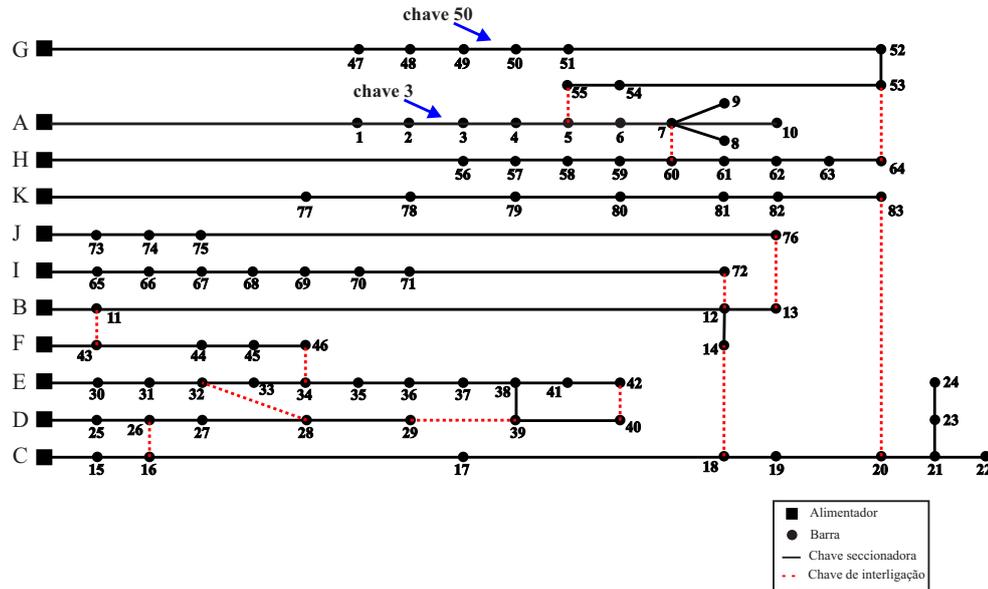
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 8 – Diagrama unifilar do sistema de distribuição 69-Barras.



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 9 – Diagrama unifilar do sistema de distribuição 94-nós.



Fonte: Autoria própria (2018).

6.2 Testes com o IS-BPSO

Nessa seção são discutidos os resultados dos testes realizados nos três sistemas de distribuição apresentados anteriormente. Nos dois casos, utiliza-se fator de demanda unitário e a carga é modelada como de potência constante. O algoritmo foi implementado na linguagem C# utilizando o *Microsoft Visual Studio* e as simulações foram feitas em uma máquina com processador *Intel Core i5- 7200U CPU @ 2,50 GHz*, 4 GB de memória RAM.

Os parâmetros necessários para a implementação do algoritmo IS-BPSO são $iter_{max}$, N_{par} , c_1 , c_2 , w_{min} , w_{max} e β . Os valores atribuídos para esses parâmetros foram os mesmos usados em Tandon e Saxena (2014) e Prieto (2015): $c_1 = c_2 = 2$, $w_{min} = 0,5$, $w_{max} = 0,9$. Já os parâmetros $iter_{max}$, N_{par} dependem do sistema simulado. Os testes foram realizados para valores de β variando de 0,1 a 2,0.

O cálculo do fluxo de potência é obtido a partir do método de injeção de correntes (MIC) (GARCIA *et al.*, 2000), implementado no OpenDSS. Portanto, existem pequenas discrepâncias entre os resultados relatados por diversos autores em relação ao total de perdas de potência para um mesmo chaveamento que são justificadas devido a diferença de precisão dos métodos de fluxo de carga utilizados.

6.2.1 Sistema 33-barras

Para os testes nesse sistema, foi utilizado um número de partículas $N_{par} = 30$, conforme apresentado em Sayadi, Esmaeili e Keynia (2016). O autor também sugere a utilização do número máximo de iterações igual a $iter_{max} = 120$, porém foi notado durante os testes que são necessárias apenas 30 iterações para alcançar a solução ótima do sistema. Desse modo foi utilizado o valor de $iter_{max} = 30$.

A solução ótima apresentada pelo algoritmo proposto foi manter a chave s37 aberta e fechar as chaves s33, s34, s35 e s36, abrindo as chaves s07, s09, s14 e s32. Essa configuração apresentou um valor de perdas de potência ativa igual a 137,08 kW, correspondendo a uma redução de aproximadamente 32,4%. O tempo para a realização de um ensaio foi de 1,8 segundos.

Na Tabela 8 são apresentados os resultados dos testes para diferentes valores de β em cem ensaios aleatórios. Pode-se notar que, para os valores de β entre 0,1 e 0,4 o algoritmo não apresenta a solução ótima, o mesmo acontece quando $\beta = 2,0$. Os valores de β iguais a 0,5, 0,6 e 0,7 apresentam os melhores resultados dos ensaios, sendo que em $\beta = 0,5$ a melhor solução é obtida em todos os ensaios (desvio padrão igual a zero).

Tabela 8 – Resultados para os valores de β em 100 ensaios.

β	Valor médio da função objetivo	Desvio Padrão	Pior Solução		Melhor Solução		No. de soluções globais
			Perdas (kW)	Chaves abertas	Perdas (kW)	Chaves abertas	
0,1	153,67	0	153,67	07-10-14-30-26	153,67	07-10-14-30-26	0
0,2	143,49	0,7345	149,54	07-10-13-31-27	143,26	07-09-14-31-27	0
0,3	138,68	0,8855	144,38	07-10-14-31-27	138,42	07-09-14-32-28	0
0,4	138,43	0,0653	139,07	07-10-14-32-28	138,42	07-09-14-32-28	0
0,5	137,08	0	137,08	07-09-14-32-37	137,08	07-09-14-32-37	100
0,6	137,10	0,1491	138,42	07-09-14-32-28	137,08	07-09-14-32-37	97
0,7	137,09	0,1120	138,42	07-09-14-32-28	137,08	07-09-14-32-37	95
0,8	137,77	1,7208	142,48	33-09-14-32-28	137,08	07-09-14-32-37	78
0,9	137,79	1,6294	141,78	33-11-34-32-28	137,08	07-09-14-32-37	80
1,0	137,84	1,6836	142,65	33-09-34-32-28	137,08	07-09-14-32-37	78
1,1	138,69	2,2586	142,48	33-09-14-32-28	137,08	07-09-14-32-37	66
1,2	137,83	1,5679	141,78	33-11-34-32-28	137,08	07-09-14-32-37	70
1,3	138,66	2,2405	143,65	33-08-14-32-28	137,08	07-09-14-32-37	66
1,4	138,31	2,0339	143,72	33-09-34-36-28	137,08	07-09-14-32-37	67
1,5	137,80	1,6275	143,27	33-11-34-36-28	137,08	07-09-14-32-37	72
1,6	138,63	2,4529	144,48	06-09-14-16-37	137,08	07-09-14-32-37	68
1,7	138,63	2,4529	144,48	06-09-14-16-37	137,08	07-09-14-32-37	68
1,8	138,63	2,2130	142,48	33-09-14-32-28	137,08	07-09-14-32-37	42
1,9	140,38	2,2187	143,27	33-11-34-36-28	137,08	07-09-14-32-37	28
2,0	141,78	0	141,78	33-11-34-32-28	141,78	33-11-34-32-28	0

Outro ponto a ser observado é que para valores de $\beta > 0,5$, o número de soluções globais começa a decrescer, comprovando que o comportamento mais acentuado da função sigmoide diminui a probabilidade de exploração de novos vetores, resultando em uma redução da taxa de mudança.

Comparando com o estado da arte, a solução encontrada pelo método proposto

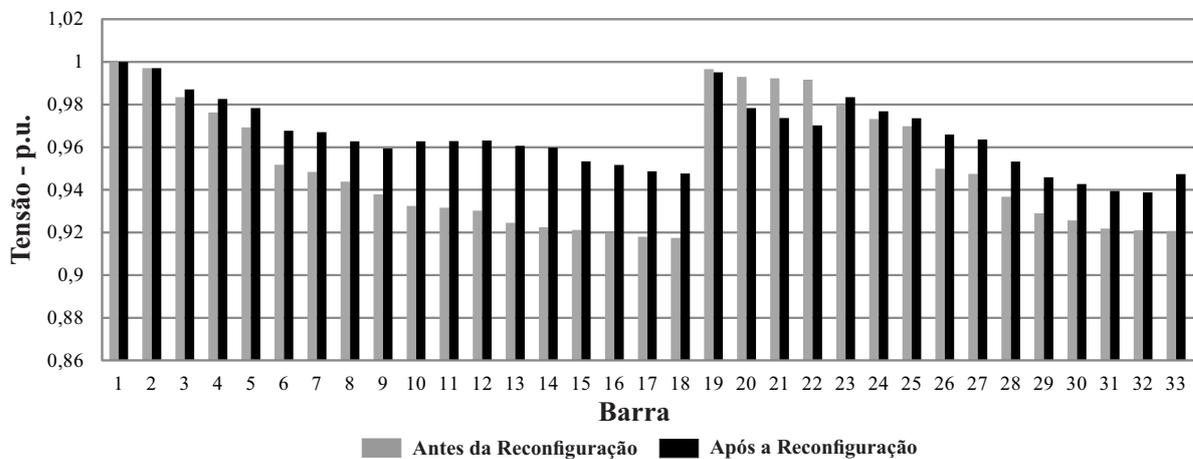
reproduz os resultados de diferentes métodos encontrados na literatura para este sistema teste, conforme apresentado na Tabela 9. Nesta tabela também é apresentada a porcentagem de erro referente as discrepâncias existentes entre os valores de perdas de potência relatados pelos autores.

Tabela 9 – Comparação entre os resultados do sistema 33-barras para diferentes métodos.

Método	Perdas (kW)	Redução (%)	Chaves abertas	Erro (%)
Método proposto	137,08	32,40	07-09-14-32-37	
(SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989)	140,26	30,78	07-10-14-32-37	2,32%
(GOSWAMI; BASU, 1992)	139,53	31,14	07-09-14-32-37	1,79%
SPSO (TANDON; SAXENA, 2014)	138,92	31,43	07-09-14-32-37	1,34%
MA-PSO (SHU <i>et al.</i> , 2016)	141,60	30,12	07-09-14-32-37	3,30%
new PSO (FLAIH <i>et al.</i> , 2017)	139,55	31,14	07-09-14-32-37	1,80%

A aplicação do método também resultou em uma melhoria significativa no perfil de tensão da rede. O efeito da reconfiguração dos níveis de tensão é mostrado graficamente na Figura 10. A menor tensão de barramento, que antes era de 0,9174 p.u. na barra 18, passa a ser de 0,94 p.u. na barra 32 após a reconfiguração. Ratificando a afirmação que a redução de perdas influencia diretamente na melhoria do perfil de tensão da rede.

Figura 10 – Efeito da reconfiguração nos níveis de tensão do sistema 33-barras.



Fonte: Autoria própria (2018).

Também foram realizadas simulações utilizando as funções sigmóides propostas em Dong, Li e Deng (2018), Rahman e Zobaa (2017) e Bagheri e Rasouli (2010), os resultados são apresentados na Tabela 10. A partir desses resultados, pode-se notar que os métodos não apresentam a melhor solução global para o sistema quando comparados ao IS-BPSO. Portanto, não possuem uma aplicação efetiva para o problema de reconfiguração.

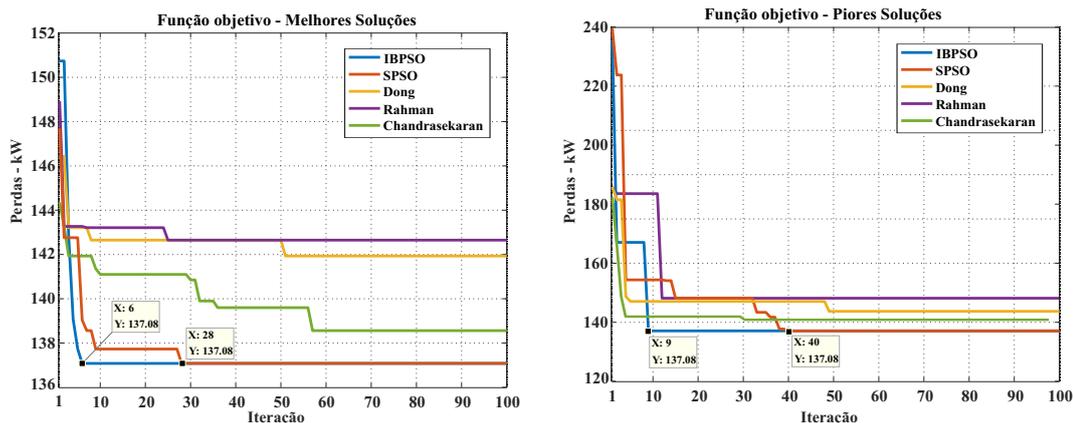
Na Figura 11 são mostradas as características de convergência do algoritmo IS-BPSO proposto em comparação aos demais para o sistema 33-barras em um ensaio,

Tabela 10 – Comparação entre as simulações das funções de transferência para o sistema 33-barras.

Método	Perdas (kW)	Redução (%)	Chaves abertas
(DONG; LI; DENG, 2018)	141,93	29,96	33-10-34-32-28
(RAHMAN; ZOBAA, 2017)	142,65	29,61	33-09-34-32-28
(CHANDRASEKARAN; SIMON, 2012)	138,56	31,63	07-09-14-36-37

utilizando agora $iter_{max} = 100$. Como a nova função ativação ajuda a explorar melhor o espaço de busca, a solução ótima é obtida na sexta iteração no IS-BPSO ($\beta = 0,5$). As demais partículas convergem na nona iteração. No algoritmo SPSO, a melhor solução é obtida na vigésima oitava iteração, enquanto que as outras partículas convergem com 40 iterações. Como pode ser observado, os demais algoritmos não convergem para a solução ótima.

Figura 11 – Características de convergência dos métodos para o sistema 33-barras.



Fonte: Autoria própria (2018).

6.2.2 Sistema 69-barras

Para a realização dos testes nesse sistema, utilizou o mesmo ajuste que Prieto (2015) para o número de partículas: $N_{par} = 60$, enquanto que o número de iterações foi modificado para $iter_{max} = 60$.

De forma análoga ao sistema 33-barras, os testes foram realizados para os valores de β entre 0,1 e 2,0 em cem ensaios cada e os resultados são apresentados na Tabela 11. Os melhores resultados são encontrados quando β assume valores de 0,7 e 0,8, sendo que em $\beta=0,7$ a solução ótima é encontrada em todos os ensaios.

A melhor solução obtida pelo algoritmo proposto foi abrir s14, s55, s61, s69 e s70, mantendo as demais fechadas. Essa configuração proporcionou uma redução de 56,31%

Tabela 11 – Resultados para os valores de β em 100 ensaios para o sistema 69-barras.

β	Valor médio da função objetivo	Desvio Padrão	Pior Solução		Melhor Solução		No. de soluções globais
			Perdas (kW)	Chaves abertas	Perdas (kW)	Chaves abertas	
0,1	105,39	0,3024	107,51	10-14-55-61-17	105,35	10-13-55-61-18	0
0,2	105,35	0	105,35	10-13-55-61-18	105,35	10-13-55-61-18	0
0,3	105,34	0,0080	105,35	10-13-55-61-18	105,33	10-13-55-61-20	0
0,4	103,97	0,0030	103,98	10-13-56-61-70	103,97	10-13-55-61-70	0
0,5	98,28	0,0242	98,36	69-13-56-61-70	98,27	69-14-55-61-70	89
0,6	98,272	0,0041	98,36	69-14-58-61-70	98,27	69-14-55-61-70	89
0,7	98,270	0	138,42	69-14-55-61-70	98,27	69-14-55-61-70	100
0,8	98,272	0,0154	98,38	69-13-58-61-70	98,27	69-14-55-61-70	98
0,9	98,28	0,0312	98,36	69-13-56-61-70	98,27	69-14-55-61-70	93
1,0	98,33	0,0821	98,46	69-12-55-61-70	98,27	69-14-55-61-70	77
1,1	98,32	0,0618	100,95	69-12-56-61-20	98,27	69-14-55-61-70	76
1,2	99,52	1,4986	104,58	69-11-55-61-70	98,27	69-14-55-61-70	75
1,3	98,33	0,2046	99,03	69-13-55-62-70	98,27	69-14-55-61-70	70
1,4	98,69	0,5818	100,94	69-12-55-61-20	98,27	69-14-55-61-70	68
1,5	98,54	0,8103	102,74	69-12-54-63-20	98,27	69-14-55-61-70	57
1,6	99,28	1,0199	102,41	69-12-54-61-20	98,28	69-14-58-61-70	0
1,7	98,51	0,7170	100,95	69-12-56-61-20	98,28	69-14-58-61-70	0
1,8	98,71	1,3816	104,88	69-11-56-63-70	98,28	69-14-58-61-70	0
1,9	98,75	2,065	113,21	69-11-54-61-20	98,46	69-12-55-61-70	0
2,0	99,76	1,644	104,89	69-11-57-62-70	99,04	69-13-56-62-70	0

nas perdas de potência, correspondendo a um valor de 98,27 kW. A menor tensão de barramento passa a ser de 0,9495 p.u.(barra 61), de acordo com a Figura 12. O tempo total para a realização de um ensaio foi de 5 segundos.

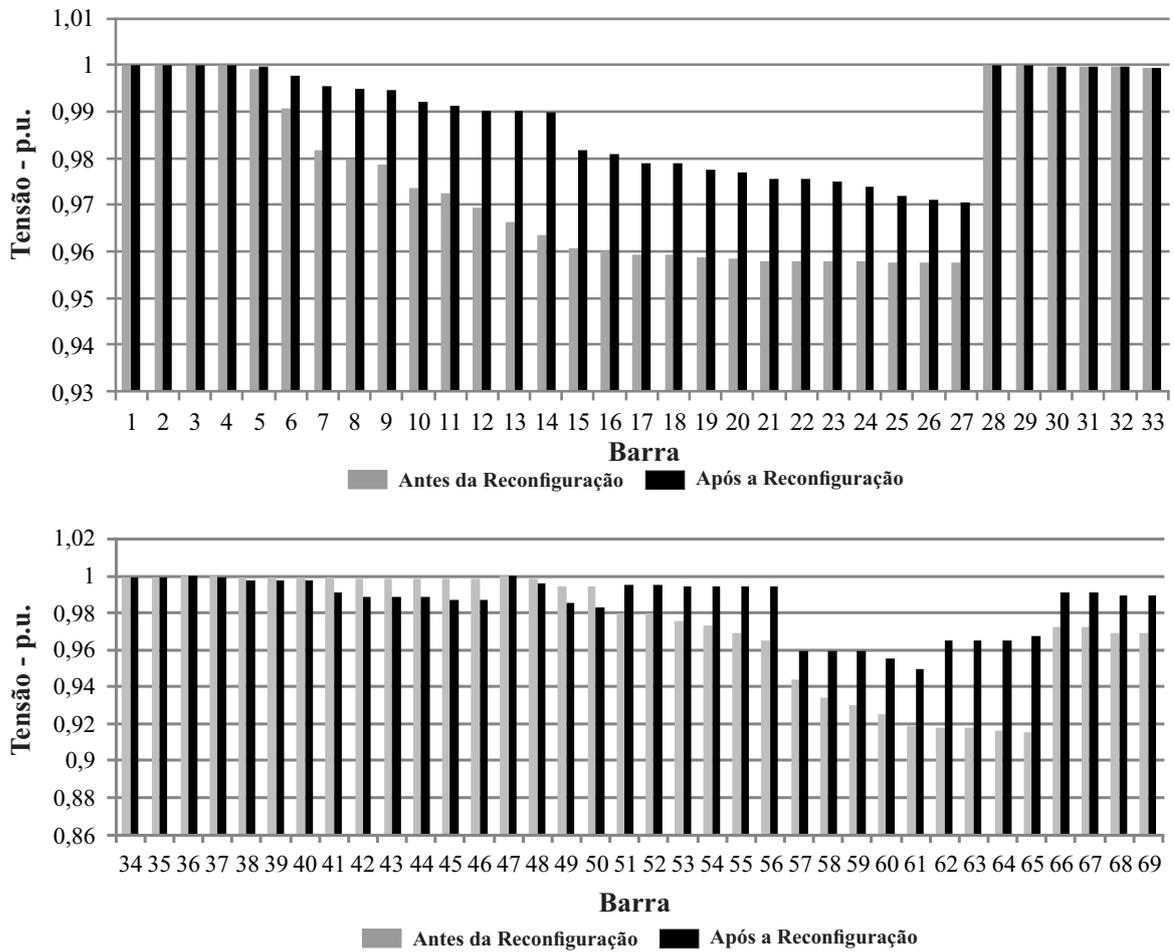
Na Tabela 12 é apresentada uma comparação da solução encontrada pelo algoritmo proposto com as soluções utilizando a função sigmoide proposta em Dong, Li e Deng (2018), Rahman e Zobaa (2017) e Chandrasekaran e Simon (2012). Esses resultados também são comparados com outros resultados encontrados na literatura técnica para esse sistema teste.

Tabela 12 – Comparação entre os resultados do sistema 69-barras para diferentes métodos.

Método	Perdas (kW)	Redução (%)	Chaves abertas
Método proposto	98,27	56,31	69-14-55-61-70
(DONG; LI; DENG, 2018)	115,24	48,77	69-71-55-62-20
(RAHMAN; ZOBAA, 2017)	104,50	53,54	69-12-53-63-20
(CHANDRASEKARAN; SIMON, 2012)	101,25	55,00	69-12-57-63-20
SPSO (KHALIL; GORPINICH, 2012b)	134,97	44,00	69-14-56-63-70
BPSO (TANDON; SAXENA, 2014)	105,14	53,25	69-13-55-61-20
MCPSO (JENA; CHAUHAN, 2016)	103,62	53,96	69-18-58-61-12
MPSO (ATTEYA <i>et al.</i> , 2017)	100,30	55,41	69-14-55-61-70

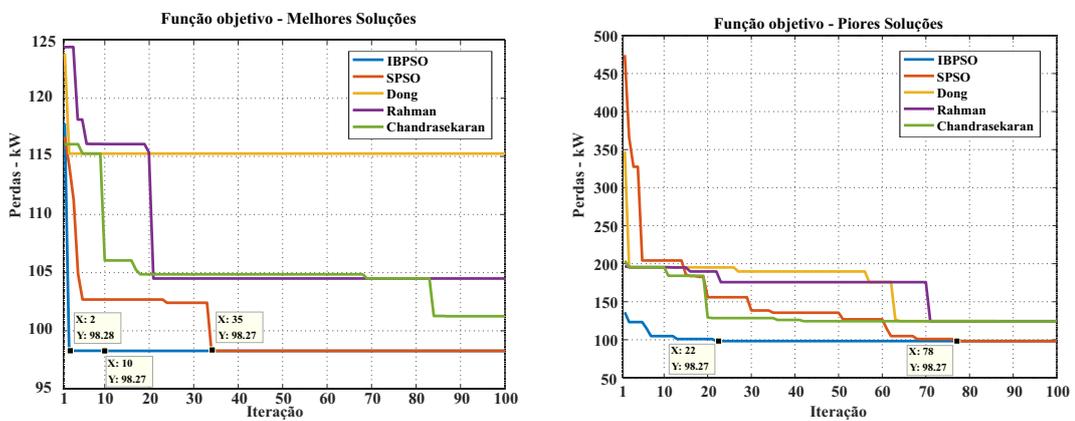
Assim como no sistema 33-barras, o algoritmo proposto apresenta um melhor resultado de convergência em relação aos demais. Como pode ser observado na Figura 13, O IS-BPSO ($\beta=0,7$) apresenta a melhor solução para o sistema na décima iteração e as demais partículas convergem na vigésima segunda iteração. Já o método SPSO só apresenta a melhor solução na trigésima quinta iteração.

Figura 12 – Efeito da reconfiguração nos níveis de tensão do sistema 69-barras.



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 13 – Características de convergência dos métodos para o sistema 69-barras.



Fonte: Autoria própria (2018).

6.2.3 Sistema 94-nós

Igualmente ao sistema 69-barras, foram utilizados um número máximo de iterações e partículas igual a 60. Também foram realizados testes variando o valor de β entre 0,1 e 2,0, a fim de encontrar seu valor ótimo.

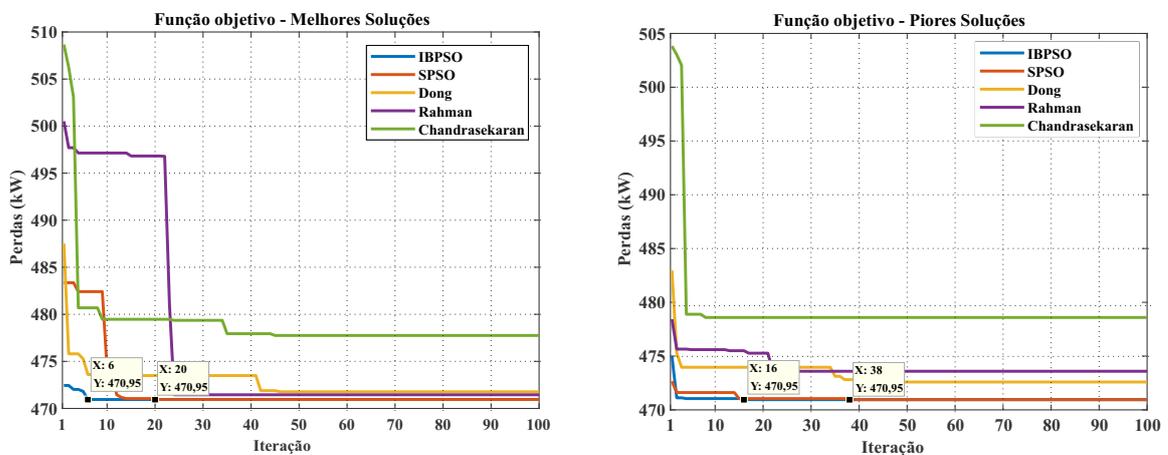
A solução ótima encontrada pelo algoritmo foi abrir as chaves 55, 7, 86, 72, 13, 89, 90, 83, 92, 39, 34, 42, e 62, mantendo as demais fechadas. As perdas mínimas obtidas com essa configuração foram de 470,95 kW. Essa mesma configuração foi obtida em Su e Lee (2003) e Braz (2010). A menor tensão de barramento é 0,9529 p.u. no barramento 71. O tempo médio para execução de um teste foi de 75 segundos.

Na Tabela 13 são apresentados os resultados do teste para os valores β entre 0,4 e 2,0. Não foram obtidos resultados com β igual a 0,1, 0,2 e 0,3 pois esses valores violaram as restrições operacionais do problema. Para cada valor de β , 100 testes foram realizados. A partir dos resultados, nota-se que o valor ideal de β para este sistema é 0,8.

De forma análoga aos sistemas anteriores, foi feita uma comparação entre simulações do método proposto e outros métodos PSO. Os resultados são mostrados na Tabela 14. Pode-se observar que o método proposto apresenta melhores resultados de convergência que os demais.

Também foi plotada as características de convergência dos métodos em um teste aleatório com 100 iterações. Os gráficos são apresentados na Figura 14. E assim como nos demais sistemas, o IS-BPSO apresenta melhores índices de convergência em relação aos outros métodos, obtendo a solução ótima na sexta iteração com as demais partículas convergindo na décima sexta iteração.

Figura 14 – Características de convergência dos métodos para o sistema 94-nós.



Fonte: Autoria própria (2018).

Tabela 13 – Resultados para os valores de β em 100 ensaios para o sistema 94-nós.

Beta	Valor médio da função objetivo	Desvio padrão	Solução	Perdas (kW)	No. de soluções globais
0,4	481,86	5,4749	Pior	54-7-86-72-13-89-90 -83-28-93-34-95-63	521,13
			Melhor	54-7-86-72-13-89-90 -83-32-93-34-42-61	481,08
0,5	471,02	0,2136	Pior	55-7-86-72-13-89-90 -82-92-37-34-42-63	472,91
			Melhor	55-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-62	470,95
0,6	472,87	4,2509	Pior	55-7-86-72-88-14-90-91-92-38-34-42-63	483,42
			Melhor	55-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-62	470,95
0,7	471,00	0,2669	Pior	55-7-86-72-88-89-90-83-92-38-34-42-61	472,44
			Melhor	55-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-62	470,95
0,8	470,96	0,0980	Pior	55-7-86 -72-13-89-90-82-92-39-34-42-63	471,65
			Melhor	55-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-62	470,95
0,9	471,00	0,4003	Pior	84-7-86-72-13-89-90-91-92-38-34-42-62	474,97
			Melhor	55-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-62	470,95
1,0	472,08	3,3784	Pior	55-7-86-72-88-14-90-91-92-38-34-40-62	483,36
			Melhor	55-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-62	470,95
1,1	471,20	0,336	Pior	84-7-86-72-13-89-90-83-92-38-34-42-62	472,66
			Melhor	55-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-62	470,95
1,2	472,55	5,2863	Pior	84-85-86-72-88-89-90-83-92-35-34-42-96	499,30
			Melhor	55-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-61	471,05
1,3	471,25	0,4812	Pior	84 -7-86-72-13-89-90-83-92-29-34-42-62	473,60
			Melhor	55-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-63	471,12
1,4	472,54	1,6606	Pior	84-7-86-72-88-89-90-83-92-35-34-95-61	476,38
			Melhor	55-7-86-72-13-89-90-82-92-93-34-42-62	471,71
1,5	472,20	0,7581	Pior	84-7-86-72-13-89-90-91-92-37-34-42-62	475,16
			Melhor	84-7-86-72-13-89-9-83-92-39-34-42-63	471,16
1,6	472,00	1,0207	Pior	84-7-86-72-13-89-90-83-92-93-34-42-62	471,82
			Melhor	55-7-86-72-13-89-90-83-92-93-34-40-62	471,25
1,7	473,07	5,7855	Pior	84-85-86-72-13-89-90-83-92-29-34-40-96	496,82
			Melhor	84-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-62	471,59
1,8	472,45	1,0950	Pior	84-7-86-72-13-89-90-91-92-36-34-42-62	476,43
			Melhor	84-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-62	471,59
1,9	471,37	0,2832	Pior	84-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-61	471,75
			Melhor	84-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-63	471,16
2,0	472,77	1,4551	Pior	84-7-86-72-13-89-90-83-32-35-34-40-62	481,96
			Melhor	84-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-62	471,59

Tabela 14 – Comparação entre os resultados do sistema 94-nós para diferentes métodos em 100 testes.

Método	Desvio padrão	Solução	Perdas (kW)	Solução global
Método proposto (Beta = 0.8)	0,098	Pior	55-7-86-72-13-89-90 -82-92-39-34-42-63	471,65
		Melhor	55-7-86-72-13-89-90 -83-92-39-34-42-62	470,95
SPSO	3,3784	Pior	55-7-86-72-88-14-90-91-92-38-34-40-62	483,36
		Melhor	55-7-86-72-13-89-90-83-92-39-34-42-62	470,95
Dong (2018)	2,1896	Pior	84-7-86-87-76-89-90-91-92-29-34-40-64	487,52
		Melhor	55-7-86-72-13-89-90-82-92-93-34-40-62	471,77
Rahman (2017)	12,7050	Pior	84-85-86-87-13-89-90-83-92-93-34-40-96	500,51
		Melhor	84-7-86-72-13-89-90-83-92-93-34-40-63	471,45
Chandrasekaran (2012)	6,4894	Pior	84-7-86-87-76-89-90-91-92-36-94-40-96	508,66
		Melhor	84-7-86-87-88-89-90-83-92-29-34-40-61	477,75

Como conclusões dos testes realizados, pode-se comprovar que o método proposto é bastante eficiente em garantir a solução global, graças a nova função sigmoide capaz de controlar a taxa de mudança do vetor de partículas, desde que usada com ajuste adequado do parâmetro β .

Observando os resultados dos três sistemas utilizados, percebe-se que as melhores soluções ocorrem quando β assume valores dentro do intervalo $[0,5-0,9]$. Porém não se pode afirmar apenas com os resultados aqui obtidos, que esses valores se aplicam a sistemas ainda maiores. Dessa forma, uma sugestão seria desenvolver uma estratégia de ajuste para este parâmetro.

7 Conclusão

Nesse trabalho foi desenvolvida uma ferramenta computacional para a reconfiguração de redes de distribuição fazendo uso dos recursos do *software* OpenDSS em conjunto com método IS-BPSO. O uso dessa ferramenta reduziu o número de iterações necessárias para a obtenção da solução global dos sistemas e aumentou a velocidade de convergência das demais partículas do enxame.

O IS-BPSO apresenta uma modificação na função sigmoide do BPSO com o objetivo de controlar a taxa de mudança do vetor de partículas, acarretando em uma melhor exploração do espaço de busca e melhor convergência do enxame. Além de apresentar um algoritmo simples, pode ser facilmente adaptado a outros tipos problema.

O uso dos recursos do OpenDSS permite que o algoritmo de reconfiguração seja aplicado em sistemas de distribuição reais e de grande porte, sem grandes esforços computacionais. Uma das vantagens é a utilização de um método de cálculo de fluxo de potência dedicado para os sistemas de distribuição.

O método foi testado em três sistemas bastante utilizados nos trabalhos de reconfiguração e a partir dos resultados dos testes, pôde-se notar a performance do algoritmo em relação as variações do PSO encontradas na literatura.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Testar o algoritmo em sistemas ainda maiores, principalmente em sistemas cujas cargas apresentam variação de comportamento;
- Considerar outras restrições para o problema de reconfiguração, por exemplo, o problema da seletividade e coordenação da proteção;
- Desenvolver técnicas de ajuste para os parâmetros do algoritmo, bem como para o parâmetro β , dispensando a necessidade de varredura em busca de um valor ótimo;
- Desenvolver uma técnica para obtenção automática dos espaços de busca dos sistemas teste;
- Otimizar o algoritmo visando passar por performances em tempo real.

Referências

- ABDELAZIZ, A. *et al.* A modified particle swarm technique for distribution systems reconfiguration. *Online Journal on Electronics and Electrical Engineering (OJEEE)* Vol.(1)–No.(2), 2009. Citado na página 24.
- ANEEL. *Nota técnica 0104/2014-SRD - Aprimoramento dos procedimentos e da metodologia de cálculo de perdas na distribuição regulamentada no Módulo 7 - Cálculo de Perdas na Distribuição do PRODIST*. 2014. Citado na página 19.
- ANEEL. Módulo 1 - procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – prodist. 2016. Citado na página 17.
- ANEEL. Módulo 8 - procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – prodist. 2018. Citado na página 45.
- ATTEYA, I. I. *et al.* Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction using a modified particle swarm optimisation. *CIREN-Open Access Proceedings Journal, IET*, v. 2017, n. 1, p. 2505–2508, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 61.
- BAGHERI, G.; RASOULI, A. Optimization of space domes using modified binary particle swarm method (modified bps). In: IEEE. *Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), 2010 International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 1–5. Citado na página 59.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 4, n. 2, p. 1401–1407, 1989. Citado 3 vezes nas páginas 23, 55 e 73.
- BATRINU, F.; CARPANETO, E.; CHICCO, G. A novel particle swarm method for distribution system optimal reconfiguration. In: IEEE. *Power Tech, 2005 IEEE Russia*. [S.l.], 2005. p. 1–6. Citado na página 24.
- BOROZAN, V.; RAJICIC, D.; ACKOVSKI, R. Minimum loss reconfiguration of unbalanced distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 12, n. 1, p. 435–442, 1997. Citado na página 23.
- BRAZ, H. D. de M. *Configuração de Sistemas de Distribuição usando um Algoritmo Genético Sequencial*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB-Brasil, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 18, 23, 44 e 63.
- BRAZ, H. D. de M.; SOUZA, B. A. de. Distribution network reconfiguration using genetic algorithms with sequential encoding: Subtractive and additive approaches. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 26, n. 2, p. 582–593, 2011. Citado na página 23.
- CARVALHO, F. F. de. *Estudo do Simulador OpenDSS*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Paraná, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 38.
- CHANDRASEKARAN, K.; SIMON, S. P. Binary/real coded particle swarm optimization for unit commitment problem. In: IEEE. *Power, Signals, Controls and Computation*

(EPSCICON), *2012 International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 46, 60 e 61.

CIVANLAR, S. *et al.* Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988. Citado na página 22.

DONG, J.; LI, Q.; DENG, L. Design of fragment-type antenna structure using an improved bpsq. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 66, n. 2, p. 564–571, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 46, 59, 60 e 61.

DUGAN, R. C. Reference guide: The open distribution system simulator (openss). *Electric Power Research Institute, Inc*, v. 7.6, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 38.

DUGAN, R. C.; MCDERMOTT, T. E. An open source platform for collaborating on smart grid research. In: IEEE. *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*. [S.l.], 2011. p. 1–7. Citado na página 35.

FLAIH, F. M. *et al.* A new method for distribution network reconfiguration analysis under different load demands. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 4, p. 455, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 25, 40 e 59.

FREITAS, P. R. R. de. *Modelos avançados de análise de redes elétricas inteligentes utilizando o software OpenDSS*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade de São Paulo USP, 2015. Citado na página 28.

GARCIA, P. A.; PEREIRA, J. L.; JR, S. C. Fluxo de potência trifásico por injeção de corrente: parte 1-formulação básica. *Revista Controle & Automação*, v. 12, n. 3, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 38.

GARCIA, P. A. *et al.* Three-phase power flow calculations using the current injection method. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 15, n. 2, p. 508–514, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 35, 38, 45 e 57.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. *Power System Analysis & Design, SI Version*. [S.l.]: Cengage Learning, 2012. Citado na página 35.

GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 7, n. 3, p. 1484–1491, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 59.

HUANG, Y.-C. Enhanced-genetic-algorithm-based fuzzy multi-objective approach to distribution network reconfiguration. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, IET, v. 149, n. 5, p. 615–620, 2002. Citado na página 23.

JENA, S.; CHAUHAN, S. Solving distribution feeder reconfiguration and concurrent dg installation problems for power loss minimization by multi swarm cooperative pso algorithm. In: IEEE. *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2016 IEEE/PES*. [S.l.], 2016. p. 1–9. Citado na página 61.

- KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm. In: IEEE. *Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation., 1997 IEEE International Conference on.* [S.l.], 1997. v. 5, p. 4104–4108. Citado na página 42.
- KERSTING, W. H. *Distribution system modeling and analysis.* [S.l.]: CRC press, 2001. Citado na página 35.
- KHALIL, T. M.; GORPINICH, A. V. Reconfiguration for loss reduction of distribution systems using selective particle swarm optimization. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering (IJMSE)*, v. 3, n. 6, 2012. Citado na página 24.
- KHALIL, T. M.; GORPINICH, A. V. Selective particle swarm optimization. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering (IJMSE)*, v. 3, n. 4, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 40, 43 e 61.
- MELLO, A. P. C. de. *Reconfiguração de redes de distribuição considerando multivariáveis e geração distribuída.* Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2014. Citado na página 18.
- MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimum-loss operating spanning tree configuration for an urban power distribution system. *5th Power System Computation Conference, Cambridge, England*, v. 1, p. 1–18, 1975. Citado na página 22.
- MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica.* [S.l.]: E. Blucher, 1983. Citado na página 35.
- NARA, K. *et al.* Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration. *IEEE Transactions on Power systems*, IEEE, v. 7, n. 3, p. 1044–1051, 1992. Citado na página 23.
- NIKNAM, T.; AZADFARSANI, E.; JABBARI, M. A new hybrid evolutionary algorithm based on new fuzzy adaptive pso and nm algorithms for distribution feeder reconfiguration. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 54, n. 1, p. 7–16, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 45.
- NIKNAM, T.; FARSANI, E. A. A hybrid self-adaptive particle swarm optimization and modified shuffled frog leaping algorithm for distribution feeder reconfiguration. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, v. 23, n. 8, p. 1340–1349, 2010. Citado na página 24.
- OLIVEIRA, L. M. *Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica para minimização de perdas ativas totais via otimização por enxame de partículas (PSO).* Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 40.
- PEGADO, R. *et al.* Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective bps. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 169, p. 206–213, 2019. Citado na página 46.
- PENIDO, D. R. R. *et al.* Uma metodologia para análise de sistemas elétricos an condutores pelo método de injeção de correntes. *Revista Controle & Automação*, v. 21, n. 3, p. 308–321, 2010. Citado na página 36.

- PEPONIS, G.; PAPADOPOULOS, M.; HATZIARGYRIOU, N. Distribution network reconfiguration to minimize resistive line losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 10, n. 3, p. 1338–1342, 1995. Citado na página 23.
- PEREIRA, F. S. *Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônias de formigas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 50, 54 e 73.
- PFITSCHER, L. L. *Reconfiguração automáticas das redes de distribuição de energia elétrica com monitoramento em tempo real*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2013. Citado na página 44.
- PRIETO, L. P. V. *Uma eficiente metodologia para reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica usando otimização por enxame de partículas*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do ABC, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 39, 46, 54, 57 e 60.
- RAHMAN, N. H. A.; ZOBAA, A. F. Integrated mutation strategy with modified binary pso algorithm for optimal pmus placement. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 13, n. 6, p. 3124–3133, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 46, 59, 60 e 61.
- SAVIER, J.; DAS, D. Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 22, n. 4, p. 2473–2480, 2007. Citado na página 55.
- SAYADI, F.; ESMAEILI, S.; KEYNIA, F. Feeder reconfiguration and capacitor allocation in the presence of non-linear loads using new p-pso algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 10, n. 10, p. 2316–2326, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 58.
- SEXAUER, J. New user primer:the open distribution system simulator (openss). *Electric Power Research Institute, Inc*, v. 7.6, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 4, n. 2, p. 1492–1498, 1989. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 59.
- SHU, D. *et al.* Application of multi-agent particle swarm algorithm in distribution network reconfiguration. *Chinese Journal of Electronics*, IET, v. 25, n. 6, p. 1179–1185, 2016. Citado na página 59.
- SOUZA, B. A. Distribuição de energia elétrica. *Campina Grande: CCT/UFPBREENGE/-PAPE*, 1997. Citado na página 17.
- SU, C.-T.; LEE, C.-S. Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 1022–1027, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 24, 55, 63 e 76.
- TANDON, A.; SAXENA, D. A comparative analysis of spso and bpsso for power loss minimization in distribution system using network reconfiguration. In: IEEE. *Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH), 2014 Innovative Applications of*. [S.l.], 2014. p. 226–232. Citado 4 vezes nas páginas 25, 57, 59 e 61.

WU, W.-C.; TSAI, M.-S.; HSU, F.-Y. A new binary coding particle swarm optimization for feeder reconfiguration. In: IEEE. *Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007. ISAP 2007. International Conference on.* [S.l.], 2007. p. 1–6. Citado na página 24.

Anexos

ANEXO A – Dados dos sistemas teste

Neste anexo são apresentados os dados completos dos sistemas utilizados nos testes com o algoritmo proposto.

A.1 Sistema 5-barras

O sistema 5-barras é um sistema didático apresentado Pereira (2010). Sua função nesse trabalho foi exemplificar o funcionamento do algoritmo proposto. Os dados de barra e de linha são apresentados nas Tabelas A.1 e A.2, respectivamente.

Tabela A.1 – Dados de barra do sistema 5-Barras.

Barra	PI (p.u.)	QI (p.u.)
1	0	0
2	1,28	1,28
3	0,32	0,16
4	1,6	0,8
5	0,74	0,37

Tabela A.2 – Dados de linha do sistema 5-Barras.

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R (p.u.)	XI (p.u.)
1	1	2	0,0066	0,0033
2	1	3	0,0016	0,0006
3	2	3	0,0003	0,0002
4	2	4	0,0051	0,0005
5	3	4	0,0005	0,0005
6	3	5	0,0027	0,0012
7	4	5	0,0033	0,0015

A.2 Sistema 33-barras

O sistema 33-barras 10 MVA de Baran e Wu (1989) possui possui 37 ramos e uma subestação de 12,6 kV. Na Tabela A.3 são apresentados os dados de entrada do sistema.

Tabela A.3 – Dados do Sistema 33-barras.

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R (Ω \km)	Xl (Ω \km)	Imax (A)	Carga Barra (Para)	
						PI (kW)	QI (kvar)
1	1	2	0,0922	0,047	1000	100	60
2	2	3	0,493	0,2511	1000	90	40
3	3	4	0,3661	0,1864	1000	120	80
4	4	5	0,3811	0,1941	1000	60	30
5	5	6	0,8190	0,7070	1000	60	20
6	6	7	0,1872	0,6188	1000	200	100
7	7	8	0,7115	0,2351	1000	200	100
8	8	9	1,0299	0,7400	1000	60	20
9	9	10	1,0440	0,7400	1000	60	20
10	10	11	0,1967	0,0651	1000	45	30
11	11	12	0,3744	0,1298	1000	60	35
12	12	13	1,4680	1,1549	1000	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	1000	120	80
14	14	15	0,5909	0,5260	1000	60	10
15	15	16	0,7462	0,5449	1000	60	10
16	16	17	1,2889	1,7210	1000	60	20
17	17	18	0,7320	0,5739	1000	90	40
18	2	19	0,1640	0,1565	1000	90	40
19	19	20	1,5042	1,3555	1000	90	40
20	20	21	0,4095	0,4784	1000	90	40
21	21	22	0,7089	0,9373	1000	90	40
22	3	23	0,4512	0,3084	1000	90	50
23	23	24	0,8980	0,7091	1000	420	200
24	24	25	0,8959	0,7071	1000	420	200
25	6	26	0,2031	0,1034	1000	60	25
26	26	27	0,2842	0,1447	1000	60	25
27	27	28	1,0589	0,9338	1000	60	20
28	28	29	0,8043	0,7006	1000	120	70
29	29	30	0,5074	0,2585	1000	200	100
30	30	31	0,9745	0,9629	1000	150	70
31	31	32	0,3105	0,3619	1000	210	100
32	32	33	0,3411	0,5302	1000	60	40
33	25	29	0,5000	0,5000	1000	60	40
34	8	21	2,000	2,0000	1000		
35	12	22	2,0000	2,0000	1000		
36	9	15	2,0000	2,0000	1000		
37	18	33	0,5000	0,5000	1000		

A.3 Sistema 69-barras

O sistema 69-barras de 10 MVA é composto por 73 ramos, 68 chaves normalmente fechadas e uma subestação de 12,6 kV. Os dados desse sistema estão apresentados na Tabela A.4.

Tabela A.4 – Dados do Sistema 69-barras.

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R ($\Omega \setminus k$)	Xl ($\Omega \setminus km$)	Carga Barra (Para)	
					PI (kW)	QI (kvar)
1	1	2	0,0005	0,0012	0	0
2	2	3	0,0005	0,0012	0	0
3	3	4	0,0015	0,0036	0	0
4	4	5	0,0251	0,0294	0	0
5	5	6	0,3660	0,1864	2,6	2,2
6	6	7	0,3811	0,1941	40,4	30
7	7	8	0,0922	0,0470	75	54
8	8	9	0,0493	0,0251	30	22
9	9	10	0,8190	0,2707	28	19
10	10	11	0,1872	0,0619	145	104
11	11	12	0,7114	0,2351	145	104
12	12	13	1,03	0,34	8	5
13	13	14	1,044	0,345	8	5,5
14	14	15	1,058	0,3496	0	0
15	15	16	0,1966	0,065	45,5	30
16	16	17	0,3744	0,1238	60	35
17	17	18	0,0047	0,00116	60	35
18	18	19	0,3276	0,1083	0	0
19	19	20	0,2106	0,069	1	0,6
20	20	21	0,3416	0,1129	114	81
21	21	22	0,014	0,0046	5	3,5
22	22	23	0,1591	0,0526	0	0
23	23	24	0,3463	0,1145	28	20
24	24	25	0,7488	0,2475	0	0
25	25	26	0,3089	0,1021	14	10
26	26	27	0,1732	0,0572	14	10
27	3	28	0,0044	0,0108	26	18,6
28	28	29	0,064	0,1565	26	18,6
29	29	30	0,3978	0,1315	0	0
30	30	31	0,0702	0,0232	0	0
31	31	32	0,351	0,116	0	0
32	32	33	0,839	0,2816	14	10
33	33	34	1,708	0,5646	19,5	14
34	34	35	1,474	0,4873	6	4
35	3	36	0,0044	0,0108	26	18,55
36	36	37	0,064	0,1565	26	18,55
37	37	38	0,1053	0,123	0	0
38	38	39	0,0304	0,0355	24	17
39	39	40	0,0018	0,0021	24	17
40	40	41	0,7283	0,8509	1,2	1,0
41	41	42	0,3100	0,3623	0	0
42	42	43	0,041	0,0478	6	4,3
43	43	44	0,0092	0,0116	0	0
44	44	45	0,1089	0,1373	39,22	26,3
45	45	46	0,009	0,0012	39,22	26,3
46	4	47	0,0034	0,0084	0	0
47	47	48	0,0851	0,2083	79	56,4
48	48	49	0,2898	0,7091	384,7	274,5
49	49	50	0,0822	0,2011	384,7	274,5
50	8	51	0,0928	0,0473	40,5	28,3

Tabela A.4 (*continuação*)

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R (Ω \k)	Xl (Ω \km)	Carga Barra (Para)	
					PI (kW)	QI (kvar)
51	51	52	0,3319	0,114	3,6	2,7
52	9	53	0,174	0,0886	4,35	3,5
53	53	54	0,203	0,1034	26,4	19
54	54	55	0,2842	0,1447	24	17,2
55	55	56	0,2813	0,1433	0	0
56	56	57	1,59	0,5337	0	0
57	57	58	0,7837	0,263	0	0
58	58	59	0,3042	0,1006	100	72
59	59	60	0,3861	0,1172	0	0
60	60	61	0,5075	0,2585	1244	888
61	61	62	0,0974	0,0496	32	23
62	62	63	0,145	0,0738	0	0
63	63	64	0,7105	0,3619	227	162
64	64	65	1,041	0,5302	59	42
65	11	66	0,2012	0,0611	18	13
66	66	67	0,0047	0,0014	18	13
67	12	68	0,7394	0,2444	28	20
68	68	69	0,0047	0,0016	28	20
69	11	43	0,5	0,5		
70	13	21	0,5	0,5		
71	15	46	1	0,5		
72	50	59	2	1		
73	27	65	1	0,5		

A.4 Sistema 94-nós

O sistema de 94-nós e 100 MVA de Su e Lee (2003) é um sistema de distribuição prático da Companhia de Energia de Taiwan (TPC). Seus condutores são principalmente linhas aéreas de ACSR 477 KCM e condutores subterrâneos de cobre 500 KCM. Sua topologia possui 11 alimentadores de 11,4 kV , 83 chaves normalmente fechadas e 13 chaves normalmente abertas (s84 à s96). Os dados construtivos desse sistema são apresentados na Tabela A.5.

Tabela A.5 – Dados do Sistema 94-nós.

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R (Ω \k)	Xl (Ω \km)	Imax (A)	Carga Barra (Para)	
						PI (MW)	QI (Mvar)
1		A				0	0
2		B				0	0
3		C				0	0
4		D				0	0
5		E				0	0
6		F				0	0
7		G				0	0
8		H				0	0
9		I				0	0
10		J				0	0
11		K				0	0
12	A	1	0,032400	0,110400	10000	0,00	0,00
13	1	2	0,209600	0,430400	10000	0,10	0,05
14	2	3	0,235800	0,484200	10000	0,30	0,20
15	3	4	0,091700	0,188200	10000	0,35	0,25
16	4	5	0,209600	0,430400	10000	0,22	0,10
17	5	6	0,039300	0,080700	10000	1,10	0,80
18	6	7	0,040500	0,138000	10000	0,40	0,32
19	7	8	0,093736	0,192481	10000	0,30	0,20
20	7	9	0,210906	0,433082	10000	0,30	0,23
21	7	10	0,052400	0,107600	10000	0,30	0,26
22	B	11	0,078600	0,161400	10000	0,00	0,00
23	11	12	0,028383	0,057867	10000	1,20	0,80
24	12	13	0,026200	0,053800	10000	0,80	0,60
25	12	14	0,078600	0,161400	10000	0,70	0,50
26	C	15	0,113400	0,386400	10000	0,00	0,00
27	15	16	0,052400	0,107600	10000	0,30	0,15
28	16	17	0,008733	0,017933	10000	0,50	0,35
29	17	18	0,031440	0,064560	10000	0,70	0,40
30	18	19	0,039300	0,080700	10000	1,20	1,00
31	19	20	0,085150	0,174850	10000	0,30	0,30
32	20	21	0,235800	0,484200	10000	0,40	0,35
33	21	22	0,157200	0,322800	10000	0,05	0,02
34	21	23	0,196500	0,403500	10000	0,05	0,02
35	23	24	0,131000	0,269000	10000	0,05	0,01
36	D	25	0,056700	0,193200	10000	0,05	0,03
37	25	26	0,104800	0,215200	10000	0,10	0,06
38	26	27	0,248900	0,511100	10000	0,10	0,07
39	27	28	0,024300	0,082800	10000	1,80	1,30
40	28	29	0,065500	0,134500	10000	0,20	0,12
41	E	30	0,196500	0,396000	10000	0,00	0,00
42	30	31	0,131000	0,269000	10000	1,80	1,60
43	31	32	0,131000	0,269000	10000	0,20	0,15
44	32	33	0,026200	0,053800	10000	0,20	0,10
45	33	34	0,170300	0,349700	10000	0,80	0,60
46	34	35	0,052400	0,107600	10000	0,10	0,06
47	35	36	0,497800	1,022200	10000	0,10	0,06
48	36	37	0,039300	0,080700	10000	0,02	0,01
49	37	38	0,039300	0,080700	10000	0,02	0,01
50	38	39	0,078600	0,161400	10000	0,02	0,01

Tabela A.5 (continuação)

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R ($\Omega \setminus k$)	Xl ($\Omega \setminus km$)	Imax (A)	Carga Barra (Para)	
						PI (MW)	QI (Mvar)
51	39	40	0,104800	0,215200	10000	0,02	0,01
52	38	41	0,196500	0,403500	10000	0,20	0,16
53	41	42	0,209600	0,430400	10000	0,05	0,03
54	F	43	0,048600	0,165600	10000	0,00	0,00
55	43	44	0,019650	0,040350	10000	0,03	0,02
56	44	45	0,131000	0,269000	10000	0,80	0,70
57	45	46	0,235800	0,484200	10000	0,20	0,15
58	G	47	0,040500	0,138000	10000	0,00	0,00
59	47	48	0,065500	0,134500	10000	0,00	0,00
60	48	49	0,065500	0,134500	10000	0,00	0,00
61	49	50	0,039300	0,080700	10000	0,20	0,16
62	50	51	0,078600	0,161400	10000	0,80	0,60
63	51	52	0,006550	0,013450	10000	0,50	0,30
64	52	53	0,078600	0,161400	10000	0,50	0,35
65	53	54	0,010480	0,021520	10000	0,50	0,30
66	54	55	0,131000	0,269000	10000	0,20	0,08
67	H	56	0,028350	0,096600	10000	0,00	0,00
68	56	57	0,537100	1,102900	10000	0,03	0,02
69	57	58	0,052400	0,107600	10000	0,60	0,42
70	58	59	0,040500	0,138000	10000	0,00	0,00
71	59	60	0,039300	0,080700	10000	0,02	0,01
72	60	61	0,026200	0,053800	10000	0,02	0,01
73	61	62	0,104800	0,215200	10000	0,20	0,13
74	62	63	0,235800	0,484200	10000	0,30	0,24
75	63	64	0,024300	0,082800	10000	0,30	0,20
76	I	65	0,048600	0,165600	10000	0,00	0,00
77	65	66	0,170300	0,349700	10000	0,05	0,03
78	66	67	0,121500	0,414000	10000	0,00	0,00
79	67	68	0,218700	0,745200	10000	0,40	0,36
80	68	69	0,048600	0,165600	10000	0,00	0,00
81	69	70	0,072900	0,248400	10000	0,00	0,00
82	70	71	0,056700	0,193200	10000	2,00	1,50
83	71	72	0,004367	0,008800	10000	0,20	0,15
84	J	73	0,324000	1,102400	10000	0,00	0,00
85	73	74	0,032400	0,110400	10000	0,00	0,00
86	74	75	0,056700	0,193200	10000	1,20	0,95
87	75	76	0,004418	0,015055	10000	0,30	0,18
88	K	77	0,050220	0,171120	10000	0,00	0,00
89	77	78	0,064800	0,220800	10000	0,40	0,36
90	78	79	0,024300	0,082800	10000	2,00	1,30
91	79	80	0,065500	0,132000	10000	0,20	0,14
92	80	81	0,065500	0,132000	10000	0,50	0,36
93	81	82	0,091700	0,188300	10000	0,10	0,03
94	82	83	0,157200	0,322900	10000	0,40	0,36
95	5	55	0,131000	0,269000	10000	0	0
96	7	60	0,131000	0,269000	10000	0	0
97	11	43	0,131000	0,269000	10000	0	0
98	12	72	0,340600	0,699400	10000	0	0
99	13	76	0,229250	0,470750	10000	0	0
100	14	18	0,179033	0,360800	10000	0	0
101	16	26	0,091700	0,188300	10000	0	0
102	20	83	0,011229	0,023057	10000	0	0
103	28	32	0,023434	0,048120	10000	0	0
104	29	39	0,039300	0,080700	10000	0	0
105	34	46	0,026200	0,053800	10000	0	0
106	40	42	0,196500	0,403500	10000	0	0
107	53	64	0,019650	0,040350	10000	0	0