

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

Diego Nascimento Arcanjo

**METODOLOGIA MULTI-ESTÁGIO PARA RESTABELECIMENTO DE SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO ALGORITMOS BIO-INSPIRADOS**

Juiz de Fora

2014

Diego Nascimento Arcanjo

**Metodologia Multi-Estágio para Restabelecimento de Sistemas Elétricos de Distribuição  
Utilizando Algoritmos Bio-Inspirados**

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

Orientador: Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.

Co-orientador: Prof. Paulo Augusto Nepomuceno Garcia, D.Sc.

Juiz de Fora

2014

Nascimento Arcanjo, Diego.

Metodologia Multi-Estágio para Restabelecimento de  
Sistemas Elétricos de Distribuição Utilizando Algoritmos Bio-  
Inspirados / Diego Nascimento Arcanjo. -- 2014.

147 p. : il.

Orientador: José Luiz Rezende Pereira

Coorientador: Paulo Augusto Nepomuceno Garcia

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica, 2014.

1. Sistemas Elétricos de Distribuição. 2. Restabelecimento.  
3. Fluxo de Potência. 4. Algoritmos Bio-Inspirados. I.  
Rezende Pereira, José Luiz , orient. II. Nepomuceno Garcia,  
Paulo Augusto , coorient. III. Título.

Diego Nascimento Arcanjo

**Metodologia Multi-Estágio para Restabelecimento de Sistemas Elétricos de Distribuição  
Utilizando Algoritmos Bio-Inspirados**

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

Aprovada em 24 de Julho de 2014.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.

---

Prof. Paulo Augusto Nepomuceno Garcia, D.Sc.

---

Professor Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc.

---

Professor Luiz Antônio da Fonseca Manso, D.Sc.

*Dedico esse trabalho aos meus familiares,  
a minha esposa Helange  
e a minha filha Iasmin.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder a benção da vida e as oportunidades de evolução nesta existência.

Aos meus pais pela educação e apoio incondicional aos meus projetos de vida.

A minha irmã Lívia pelo amor, carinho e amizade e ajuda constante.

A todos meus familiares pelo suporte durante os momentos de ausência devido a escala profissional de trabalho.

Aos professores José Luiz Rezende Pereira e Paulo Augusto Nepomuceno Garcia pela iniciação na pesquisa em engenharia elétrica, responsáveis por todo meu desenvolvimento científico desde os primeiros tempos de graduação.

Aos doutorandos e amigos do LABSPOT: Wesley Peres, Paula La Gatta, Jorge Gimenez e Wander Gaspar pelos conselhos, conversas e boas sugestões que muito contribuíram para a finalização desse trabalho.

Ao professor e engenheiro Thiago Trezza Borges pelos esclarecimentos e sugestões.

Ao amigo e professor Leandro Rodrigues Manso Silva pelo auxílio com a impressão e entrega da versão final dessa dissertação.

Ao *VP Operations, Americas* da Welltec<sup>®</sup> Inc. Mark Finsterwad por ser flexível e justo em minha escala de serviço o que possibilitou o término deste trabalho.

Agradeço, especialmente, a minha esposa Helange pelo incentivo, compreensão e paciência durante todo o mestrado. Apoio sem o qual não seria possível terminar essa dissertação.

A minha filha Iasmin por alegrar cada vez mais a minha vida como pai, fazendo com que busque meu aperfeiçoamento integral para ser um bom exemplo no futuro.

Finalmente, agradeço a CAPES, ao CNPQ e ao INERGE pelo apoio financeiro para este trabalho.

## RESUMO

Neste trabalho é proposto uma metodologia multi-estágio utilizando algoritmos bio-inspirados para a resolução do processo de Restabelecimento de Sistemas Elétricos de Distribuição.

O primeiro estágio consiste na solução de uma função multi-objetivo visando a determinação da configuração final das chaves do sistema após isolados os ramos defeituosos (configuração de pós-contingência). Neste estágio, a modelagem da função multi-objetivo busca uma configuração adequada de chaves para minimizar a carga não suprida, as perdas do sistema, o número de chaveamentos, penalizando as violações aos limites operativos do sistema e considerando a presença de consumidores prioritários. Adicionalmente, a restrição de radialidade é assegurada em cada configuração utilizando, caso necessário, uma técnica de abertura de laço.

A partir da configuração final obtida no primeiro estágio, são identificadas as chaves que foram manobradas.

O segundo estágio da metodologia busca a determinação da sequência de chaveamento levando em conta a minimização da energia não suprida. Essa formulação permite que o tempo de manobra das chaves possa ser considerado. Sendo necessário, é realizado, ainda neste estágio, cortes mínimos discretos de carga para cada manobra executada.

Em ambos os estágios foram utilizadas algoritmos bio-inspirados como métodos de solução dos respectivos problemas de otimização não-lineares inteiros mistos. As técnicas utilizadas são: Algoritmos Genéticos, Método da Eco Localização de Morcegos (*Bat Algorithm*) e Método da Reprodução dos Pássaros Cuco (*Cuckoo Search*).

Os desenvolvimentos do algoritmo proposto foi implementado no ambiente MatLab®. Os resultados obtidos foram comparados com outras metodologias conhecidas da literatura comprovando a eficiência e robustez da técnica proposta.

**Palavras-chave:** Sistemas Elétricos de Distribuição, Restabelecimento, Fluxo de Potência, Algoritmos Bio-Inspirados.

## ABSTRACT

This dissertation proposes a methodology for solving multi-stage process of Restoration on Power Distribution Systems using Nature-Inspired Algorithms.

The first stage consists in solving a fitness multi-objective function in order to determine the final configuration of the switches after the faulted branches were isolated (post-contingency configuration). In this stage the multi-objective function seeks through the suitable configuration to minimize the undelivered power, the power losses, the number of switching, penalizing for violation in the system operational limits and taking in consideration the presence of priority load in the system. Additionally the radiality constraint is improved using an open loop technique.

After the final configuration is obtained, for the first stage, the switches which were maneuvered are identified.

The second stage of the methodology is to determine the sequence of switching taking into account the minimization of energy not supplied. This formulation allows to consider the switching operation time. If necessary, the minimum discrete load shedding procedure is made for each maneuvered switch.

In both stages Nature-Inspired Algorithms to solve mixed integer nonlinear programming problems were used. The techniques used are: Genetic Algorithms, Bat Algorithm and Cuckoo Search.

The developments of the proposed algorithm were implemented in MatLab ® environment. The results obtained were compared with other well-known methodologies showing the efficiency and robustness of the proposed technique.

**Keywords:** Distribution Power System, Restoration, Power Flow, Nature-Inspired Algorithms.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XVI</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>XIX</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>XXIV</b>
<b>CAPÍTULO 1. - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Revisão Bibliográfica.....	6
1.2.1 Métodos de Busca Exaustiva.....	7
1.2.2 Métodos Heurísticos.....	7
1.2.2.1 Sistemas Especialistas .....	7
1.2.2.2 Busca Heurística.....	8
1.2.3 Métodos Matemáticos .....	11
1.2.4 Métodos Baseados em Inteligência Artificial .....	13
1.2.4.1 Lógica <i>Fuzzy</i> .....	13
1.2.4.2 Algoritmos Bio-Inspirados .....	15
1.3 Motivação da Dissertação .....	17
1.4 Objetivos da Dissertação .....	18
1.5 Publicações Decorrentes.....	19
1.6 Estrutura da Dissertação .....	19
<b>CAPÍTULO 2. - ALGORITMOS BIO-INSPIRADOS .....</b>	<b>20</b>
2.1 Considerações Iniciais.....	20

2.2	Algoritmo Genético .....	21
2.2.1	Introdução.....	21
2.2.2	Pseudocódigo Genérico .....	21
2.2.3	Métodos de Seleção.....	22
2.2.4	Reprodução.....	24
2.2.4.1	Elitismo .....	24
2.2.4.2	Recombinação ( <i>crossover</i> ) .....	24
2.2.4.3	Mutação .....	24
2.2.5	Avaliação.....	25
2.2.6	Critério de Parada.....	25
2.3	Método Baseado na Eco Localização de Morcegos ( <i>Bat Algorithm</i> ) .....	25
2.3.1	Introdução.....	25
2.3.2	Pseudocódigo genérico .....	26
2.3.3	Atualização da posição dos morcegos.....	27
2.3.4	Avaliação.....	29
2.3.5	Critério de parada .....	29
2.4	Método baseado na reprodução dos pássaros Cuco ( <i>Cuckoo Search</i> ) .....	29
2.4.1	Introdução.....	29
2.4.2	Pseudocódigo.....	30
2.4.3	Busca por Novos Ninhos .....	31
2.4.3.1	Intensificação da Busca .....	31
2.4.3.2	Diversificação da Busca .....	33
2.4.4	Avaliação.....	33
2.4.5	Critério de Parada.....	34
2.5	Sumário do Capítulo.....	34
<b>CAPÍTULO 3. - METODOLOGIA PROPOSTA .....</b>		<b>35</b>

3.1	Considerações Iniciais .....	35
3.2	Teoria de grafo aplicada ao problema de restabelecimento .....	36
3.2.1	Identificação de Barras Ilhadas no Sistema.....	36
3.2.2	Verificação da Formação de Laços no Sistema.....	38
3.2.2.1	Árvore Geradora Mínima .....	38
3.2.2.2	Determinação do Peso dos Ramos .....	40
3.3	Formulação do Problema de Otimização .....	45
3.4	Resolução do Problema de Otimização.....	46
3.4.1	Resolução do Primeiro Estágio .....	46
3.4.1.1	Etapa 1 .....	54
3.4.1.2	Etapa 2.....	54
3.4.1.3	Etapa 3.....	54
3.4.1.4	Etapa 4.....	54
3.4.1.5	Etapa 5.....	55
3.4.2	Resolução do Segundo Estágio .....	55
3.4.2.1	Etapa 6.....	60
3.4.2.2	Etapa 7.....	60
3.4.2.3	Etapa 8.....	60
3.4.2.4	Etapa 9.....	60
3.4.2.5	Etapa 10.....	61
3.4.2.6	Fim.....	61
3.5	Sumário do Capítulo.....	61
<b>CAPÍTULO 4. - ESTUDO DE CASOS .....</b>		<b>63</b>
4.1	Considerações Iniciais .....	63
4.2	Sistema Teste 1: IEEE 16 Barras .....	63
4.2.1	Tutorial do Modelo Proposto .....	66

4.2.2	Avaliação Comparativa de Resultados.....	79
4.2.3	Avaliação de Desempenho dos Métodos Bio-Inspirados.....	80
4.2.4	Avaliação da Influência do Tempo de Manobra .....	85
4.3	Sistema Teste 2: IEEE 33 Barras .....	86
4.3.1	Avaliação Comparativa de Resultados.....	90
4.3.2	Avaliação de Desempenho dos Métodos Bio-Inspirados.....	92
4.3.3	Avaliação da Influência do Tempo de Manobra .....	96
4.3.4	Influência de Consumidores Prioritários.....	98
4.3.5	Avaliação da Influência de Limites de Tensão nas Barras.....	99
4.3.5.1	Limite Inferior de Tensão em 0,85 p.u.....	99
4.3.5.2	Limite Inferior de Tensão em 0,90 p.u.....	100
4.3.5.3	Limite Inferior de Tensão em 0,95 p.u.....	102
4.3.6	Avaliação da Influência de Limites de Fluxo de Potência Aparente nos Circuitos .	105
4.4	Sistema Teste 4: Sistema de 476 Barras.....	107
4.4.1	Avaliação Comparativa de Resultados.....	108
4.4.2	Avaliação do Desempenho dos Algoritmos Bio-Inspirados .....	109
4.5	Desempenho Computacional.....	114
4.6	Sumário do Capítulo.....	115
<b>CAPÍTULO 5. - CONCLUSÕES.....</b>		<b>116</b>
5.1	Considerações Gerais .....	116
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	117
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>119</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Estados de Operação de um Sistema de Distribuição. Fonte: (Morelato e Monticelli, 1989).....	3
Figura 1.2: Evolução da Compensação por Transgressão dos Indicadores DIC, FIC e DMIC e de Multa por Violação dos Limites de DEC e FEC para o Período de 2007 a 2010. Fonte: (ANEEL, 2011) .....	5
Figura 1.3: Curva de Aversão aos Blecautes (Gomes, 2008).....	5
Figura 2.1- Pseudocódigo Genérico do Algoritmo Genético (Goldberg, 1989) .....	22
Figura 2.2- Exemplo de Roleta para o Algoritmo Genético.....	23
Figura 2.3- Pseudocódigo Genérico do Algoritmo Baseado na Eco Localização de Morcego (Yang, 2011).....	27
Figura 2.4- Pseudocódigo Genérico do Algoritmo Baseado na Reprodução dos Pássaros Cuco (Yang, 2011).....	31
Figura 3.1- Sistema Exemplo com Defeito entre as Barras 1 e 5.....	37
<i>Figura 3.2- Árvore do Sistema Exemplo Contendo Defeito entre as Barras 1 e 5 .....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.3: Grafo Exemplo .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.4: Árvore Mínima Gerada a partir do Grafo Exemplo da Figura 3.3 .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.5: Função Sigmóide Utilizada.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 3.6: Fluxograma do 1º Estágio do Algoritmo de Restabelecimento .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.7: Fluxograma do 2º Estágio do Algoritmo de Restabelecimento. ....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4.1: Sistema 16 Barras (Civanlar et al., 1988) - Topologia Inicial.....</i>	<i>64</i>

<i>Figura 4.2: Sistema 16 Barras (Lin e Chin, 1998) - Reconfigurado</i> .....	64
<i>Figura 4.3: Sistema Defeituoso de 16 Barras- Reconfigurado</i> .....	65
<i>Figura 4.4: Sistema IEEE 16 Barras com Pesos nos Ramo para Primeiro Indivíduo da População</i> .....	68
<i>Figura 4.5: Sistema IEEE 16 Barras com Laço Formado no Primeiro Indivíduo da População</i> .....	69
<i>Figura 4.6: Sistema defeituoso de 16 Barras- Restabelecido</i> .....	70
<i>Figura 4.7: Evolução do Algoritmo Genético para a Obtenção da Configuração Final do Sistema IEEE 16 Barras</i> .....	71
<i>Figura 4.8: Perfil de Tensão Pós Fechamento Simples de <math>S_7</math> e <math>S_8</math></i> .....	73
<i>Figura 4.9: Evolução do Algoritmo Genético para o Corte de Carga</i> .....	75
<i>Figura 4.10: Sistema IEEE 16 Barras com Loop Formado após Fechamentos Sucessivos de <math>S_8</math> e <math>S_7</math></i> .....	78
<i>Figura 4.11: Gráfico de Desempenho dos Métodos Bio-Inspirados em relação ao Número Médio de Fluxos de Potência do Primeiro Estágio para Sistema IEEE 16 Barras</i> .....	82
<i>Figura 4.12: Gráfico de Desempenho dos Métodos Bio-Inspirados em relação ao Número Médio de Fluxos de Potência do Segundo Estágio para Sistema IEEE 16 Barras</i> .....	84
<i>Figura 4.13: Sistema 33 Barras (BARAN; WU, 1989) - Topologia inicial</i> .....	87
<i>Figura 4.14: Sistema 33 Barras (LIN; CHIN, 1998) - Reconfigurado</i> .....	88
<i>Figura 4.15: Sistema Defeituoso de 33 Barras-Reconfigurado</i> .....	89
<i>Figura 4.16: Gráfico de desempenho dos Métodos Bio-Inspirados em relação ao número médio de fluxos de potência do primeiro estágio para Sistema IEEE 33 BUS</i> .....	94

<i>Figura 4.17: Gráfico de Desempenho dos Métodos Bio-Inspirados em relação ao número Médio de Fluxos de Potência do Segundo Estágio para Sistema IEEE 33 Barras .....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 4.18: Sistema de 476 Barras (BORGES, 2012). .....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 4.19: Gráfico de Desempenho dos Métodos Bio-Inspirados em relação ao Número Médio de Fluxos de Potência do Primeiro Estágio para Sistema de 476 Barras.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 4.20: Gráfico de Desempenho dos Métodos Bio-Inspirados em relação ao Número Médio de Fluxos de Potência do Segundo Estágio para Sistema de 476 Barras .....</i>	<i>113</i>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Ordenação Crescente das Arestas do Grafo .....	39
<i>Tabela 3.2: Exemplo de População Inicial com Codificação Binária para o Sistema da Figura 3.1 .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 3.3: Exemplo de população inicial com codificação Real para o sistema da Figura 3.1 .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 4.1: População Inicial com Codificação Binária para o Sistema IEEE 16 Barras.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 4.2: Primeiro Indivíduo da População Inicial para o Sistema IEEE 16 Barras .....</i>	<i>68</i>
Tabela 4.3: Ordenação Crescente das Arestas do Grafo para o Sistema IEEE 16 BUS .....	69
<i>Tabela 4.4: Primeiro Indivíduo da População Inicial para o Sistema IEEE 16 Barras após Verificada sua Radialidade .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 4.5: Configuração Final do Primeiro Estágio para o Sistema de 16 Barras .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 4.6: Resultado de Chaves Manobradas no Primeiro Estágio .....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 4.7: Configuração Pós Falta para o Sistema de 16 Barras .....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 4.8: Parâmetro para Obtenção do Custo Energia Não Suprida.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 4.9: Resultados do Custo da Energia Não Suprida.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 4.10: Chaves Manobradas .....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 4.11: População Inicial com Codificação Binária para o Sistema IEEE 16 Barras... </i>	<i>74</i>
<i>Tabela 4.12: Resultados da Avaliação de Corte de Carga – Fechamento <math>S_8</math>.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 4.13: Resultado do Custo da Energia Não Suprida .....</i>	<i>76</i>

<i>Tabela 4.14: Chaves Manobradas .....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 4.15: Resultados da Avaliação de Corte de Carga – Fechamento S<sub>7</sub>.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 4.16: Resultados da Avaliação de Corte de Carga – Abertura S<sub>6</sub>.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 4.17: Chaves Manobradas .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 4.18: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 16 Barras .....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 4.19: Comparação entre Tempos de Simulação dos Métodos Bio-Inspirados para o Sistema IEEE 16 Barras Primeiro Estágio .....</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 4.20: Comparação entre Tempos de Simulação dos Métodos Bio-Inspirados para o Sistema IEEE 16 Barras- Segundo Estágio.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 4.21: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 16 Barras com Influência do Tempo de Manobra.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 4.22: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 33 Barras .....</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 4.23: Comparação entre Tempos de Simulação dos Métodos Bio-Inspirados para o Sistema IEEE 33 Barras – Primeiro Estágio .....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 4.24: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 33 Barras com Influência do Tempo de Manobra.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 4.25: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 33 Barras com Influência da Presença de Consumidores Prioritários .....</i>	<i>98</i>
<i>Tabela 4.26: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 33 Barras –Limite Inferior de Tensão de 0,85p.u. ....</i>	<i>100</i>
<i>Tabela 4.27: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 33 Barras –Limite Inferior de Tensão de 0,90p.u. ....</i>	<i>101</i>

<i>Tabela 4.28: População Inicial com Codificação Binária para o Sistema IEEE 33 Barras – Limite inferior de tensão de 0,95 p.u. ....</i>	103
<i>Tabela 4.29: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 33 Barras –Limite Inferior de Tensão de 0,95p.u. ....</i>	104
<i>Tabela 4.30:Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 33 Barras com Influência do Limite de fluxo de Potência Aparente nos Circuitos. ....</i>	106
<i>Tabela 4.31:Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema de 476 Barras .....</i>	109
<i>Tabela 4.32:Comparação entre Tempos de Simulação Métodos Bio-Inspirados para o Sistema de 476 Barras – Primeiro Estágio .....</i>	111
<i>Tabela 4.33:Desempenho Computacional Geral da Metodologia Proposta .....</i>	114

## LISTA DE SÍMBOLOS

$i$ :	Índice de interrupções da unidade consumidora no período de apuração, variando de 1 a $n$
$n$ :	Número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período de apuração
$t(i)$ :	Representa o tempo de duração da interrupção ( $i$ ) da unidade consumidora considerada ou ponto de conexão, no período de apuração
$Cc$ :	Representa o número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração, atendidas em baixa ou média tensão
$k$ :	Contador de iterações
$\mu$ :	Valor randômico entre $[0, 1]$ designado por uma distribuição uniforme
$f_i$ :	Frequência de emissão de pulsos do $i$ -ésimo morcego
$f_{\min}$ :	Frequência mínima determinada para o som emitido
$f_{\max}$ :	Frequência máxima determinada para o som emitido
$p_i^k$ :	Posição do $i$ -ésimo morcego na iteração $k$
$p_*$ :	Melhor posição (solução) para problema
$v_i^k$ :	Velocidade do $i$ -ésimo morcego na iteração $k$ ;
$\alpha$ :	Constante similar ao esfriamento do Método de Recozimento Simulado
$A_i^k$ :	Volume do som emitido pelo $i$ -ésimo morcego na iteração $k$
$r_i^k$ :	Taxa de emissão de pulsos do $i$ -ésimo morcego na iteração $k$
$r_0$ :	Taxa inicial de emissão de pulsos
$\gamma$ :	Constante cujo valor típico é: $\gamma = 0,9$
$s$ :	Comprimento do passo
$\beta$ :	Número real no intervalo $[1,2]$
$u$ :	Direção aleatória no plano
$z$ :	Direção aleatória no plano ortogonal a $u$
$\sigma_u$ :	Desvio padrão na direção $u$
$\sigma_z$ :	Desvio padrão na direção $z$
$N(0, \sigma_u^2)$ :	Distribuição normal com média zero e variância $\sigma_u^2$ na direção $u$
$N(0, \sigma_z^2)$ :	Distribuição normal com média zero e variância $\sigma_z^2$ na direção $z$

$\Gamma$ :	Função de Distribuição de Probabilidade Gamma
$h$ :	Número real
$y$ :	Conjunto domínio real do passeio
$N(0,1)$ :	Distribuição normal de probabilidade com média zero e desvio padrão unitário;
$p_a$ :	Número real no intervalo $[0,1]$
$vet$ :	Número de vértices do grafo
$P_L$ :	Perdas no sistema
$ Z_{li} $ :	Módulo da impedância do ramo $i$
$\Delta P$ :	Vetor de variação da potência ativa líquida nas barras do sistema
$\Delta Q$ :	Vetor de variação da potência reativa líquida nas barras do sistema
$J$ :	Matriz Jacobiana do sistema
$\Delta\theta$ :	Vetor de variação do ângulo das tensões complexas das barras do sistema
$\Delta V$ :	Vetor de variação do módulo das tensões complexas das barras do sistema
$\Delta Y_{PQ}$ :	Vetor de resíduos
$\Delta X = [\Delta\theta \quad \Delta V]^T$ :	Vetor atualização das variáveis de estado
$Z_l$ :	Vetor de módulos das impedâncias dos ramos
$M$ :	Matriz de derivadas parciais das potências líquidas injetadas (ativa/reactiva) com relação à variável de controle ( $ Z_l $ )
$x_l^{km}$ :	Reatância do ramo $km$ do sistema
$r_l^{km}$ :	Resistência do ramo $km$ do sistema
$g_l^{km}$ :	Condutância do ramo $km$ do sistema
$b_l^{km}$ :	Susceptância do ramo $km$ do sistema
$\varphi_l^{km}$ :	Ângulo da impedância complexa do ramo $km$ do sistema
$M_{km}^{Pk}$ :	Elemento $km$ da matriz $M$ em relação à potência ativa
$M_{mk}^{Pm}$ :	Elemento $mk$ da matriz $M$ em relação à potência ativa

$M_{km}^{Qk}$ :	Elemento $km$ da matriz M em relação à potência reativa
$M_{mk}^{Qm}$ :	Elemento $mk$ da matriz M em relação à potência reativa;
$M_{kk}^{Pk}$ :	Elemento $kk$ da matriz M em relação à potência ativa
$M_{kk}^{Qk}$ :	Elemento $kk$ da matriz M em relação à potência reativa
$P_{km}$ :	Fluxo de potência ativa no ramo $km$ do sistema
$Q_{km}$ :	Fluxo de potência reativa no ramo $km$ do sistema
$ Z_l^{km} $ :	Módulo da impedância complexa entre no ramo $km$ do sistema
$V_k$ :	Módulo da tensão complexa na barra $k$ do sistema
$\theta_{km}$ :	Diferença angular entre as barras $k$ e $m$ do sistema.
$\Delta X$ :	Vetor de variáveis de estado do sistema $[\Delta\theta \quad \Delta V]^T$
$\Delta Z_l$ :	Vetor de variação do módulo das impedâncias dos ramos do sistema
$J_{hx}$ :	Submatriz de derivadas parciais da variável controlada em relação às variáveis de estado
$J_{hu}$ :	Submatriz de derivadas parciais da variável controlada em relação às variáveis de controle
$\Delta SP_L$ :	Vetor linha com os índices de sensibilidades dos ramos do sistema em relação à variação das perdas
$\rho_i$ :	Valor do peso do ramo $i$ no grafo do sistema
$ \Delta SP_{L_i} $ :	Módulo do índice de sensibilidade do ramo $i$
$\Omega_r$ :	Conjunto de barras na área(s) desenergizada(s)
$Pl_k$ :	Módulo da potência ativa demandada na barra $k$ do sistema
$Pg_k$ :	Módulo o módulo da potência ativa gerada na barra $k$ do sistema
$Ql_k$ :	Módulo o módulo da potência reativa demandada na barra $k$ do sistema
$Qg_k$ :	Módulo o módulo da potência reativa gerada na barra $k$ do sistema
$\gamma_k$ :	Variável de decisão de corte de carga da barra $k$ do sistema
$CH_{km}$ :	Variável de decisão da posição da chave no ramo $km$ do sistema
$V_k$ :	Módulo da tensão complexa na barra $k$ do sistema

$V_k^{min}$ :	Limites inferior de tensão na barra $k$ do sistema
$V_k^{max}$ :	Limites superior de tensão na barra $k$ do sistema
$Pg_k^{min}$ :	Potência ativa mínima gerada na barra $k$ do sistema
$Pg_k^{max}$ :	Potência ativa máxima gerada na barra $k$ do sistema
$Qg_k^{min}$ :	Potência reativa mínima gerada na barra $k$ do sistema
$Qg_k^{max}$ :	Potência reativa máxima gerada na barra $k$ do sistema
$S_{km}$ :	Fluxo de potência aparente no ramo $km$ do sistema
$S_{km}^{max}$ :	Limite máximo para o fluxo de potência aparente no ramo $km$ do sistema
$n_{individuos}$ :	Número total de indivíduos
$Chaves_{NA}$ :	Número de chaves normalmente abertas do sistema
$int$ :	Número inteiro entre [5,10] a depender da complexidade do sistema
$CH(x)$ :	Estado da chave na forma binária
$x$ :	Valor agregado a chave de forma contínua para o intervalo considerado
$\alpha$ :	Coefficiente da Função Sigmóide
$Perdas$ :	Potência de perdas do sistema para a configuração corrente
$P_{TOTAL}$ :	Potência ativa total do sistema
$\alpha_k$ :	Fator de prioridade da carga $Pl_k$ a ser cortada
$Pl_k^{isolada}$ :	Potência ativa da barra $k$ do sistema que não foi atendida;
$\lambda_V$	Fator de inclusão da violação do limite de tensão nas barras
$V_k^{lim}$ :	Limite (inferior/superior) de tensão na barra $k$ do sistema
$\lambda_S$ :	Fator de inclusão da violação do limite de fluxo de potência nos ramos
$\lambda_{CH}$ :	Fator de inclusão do número de chaveamentos
$n_{CH}$ :	Número de chaveamentos para se obter a configuração corrente
$C_k$ :	Custo da energia não suprida para a barra $k$ do sistema a ser cortada

$t'$ :	Tempo necessário para o restabelecimento da energia (manobra + mobilização de equipe)
$\beta_{vio}$ :	Fator de penalização do desvio de tensão
$Pl_{total}$ :	Potência ativa demandada total do sistema

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP:	Sistemas Elétricos de Potência
SED:	Sistemas Elétricos de Distribuição
ANEEL:	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST:	Procedimentos de Distribuição
DIC:	Duração de Interrupção por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão
FIC:	Frequência de Interrupção individual por unidade consumidora
DMIC:	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão
DEC:	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FEC:	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
IEEE:	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
AG:	Algoritmo Genético
BAT:	<i>Bat Algorithm</i>
CS:	<i>Cuckoo Search Algorithm</i>
NA:	Normalmente Aberta
NF:	Normalmente Fechada
N/A:	Não-aplicável

---

# Capítulo 1. -

## Introdução

### 1.1 Considerações Iniciais

Os sistemas elétricos de potência (SEP) têm como função essencial o fornecimento de energia elétrica aos usuários com a qualidade adequada e no instante em que for solicitada (Kagan, Oliveira, de e Robba, 2005).

Essa necessidade de fornecer energia elétrica de forma cada vez mais eficiente vem transformando o modo com que os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica são planejados e operados.

As mudanças ocorridas, em particular, nos Sistemas Elétricos de Distribuição (SED) tem levado sua transformação de uma operação “cega” e manual para a realidade das redes inteligentes “*smart grid*” (Ipakchi e Albuyeh, 2009).

Essa tendência global pela busca da melhoria da eficiência no fornecimento e consumo de energia elétrica no SED mostra-se uma realidade também no âmbito nacional quando a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou, em agosto de 2012, uma resolução normativa que regulamenta o uso de medição eletrônica de energia elétrica de unidades consumidoras (ANEEL, 2012).

Os consumidores alimentados pelo sistema de distribuição são bastante diversos entre si e podem ser identificados, segundo seu nível de tensão, em: primários (consumidores industriais e comerciais de médio porte alimentados pela rede de distribuição de média tensão) e secundários (pequenos comércios alimentados pelas redes de distribuição baixa tensão) (Costa, 2008).

Essas redes, no caso de serem aéreas, são operadas, em sua maioria, de forma radial o que possibilita a transferência de blocos de carga entre circuitos para o atendimento da operação em situações de contingências ou para manutenção preventivo-corretiva. (Kagan,

---

Oliveira, de e Robba, 2005).

A Figura 1.1 ilustra alguns estados de transição inerentes à operação dos sistemas elétricos de distribuição do ponto de vista dos centros de controle. Podem-se destacar as seguintes transições:

- a) **Normal-Normal:** Quando o sistema está no estado normal, ou seja os limites emergenciais estão satisfeitos, no entanto algum limite operativo é violado ou simplesmente pretende-se melhorar o estado operativo da rede minimizando, por exemplo, as perdas do sistema. Neste caso, um processo de reconfiguração pode ser adotado ou alocação de banco de capacitores.
- b) **Normal-Emergencial:** Um estado emergencial pode ocorrer na presença de uma falta ou um curto-circuito. Nestes casos para eliminar a presença de correntes de falta de alta magnitude, a contingência deve ser rapidamente eliminada.
- c) **Emergencial-Normal:** Quando a condição de falta é temporária. Para tanto, muitos sistemas de distribuição atuais possuem religadores automático que restauram o sistema para sua condição normal.
- d) **Emergencial-Restabelecido-Normal:** Quando ocorre uma contingência permanente em um sistema de distribuição as operações a serem executadas de forma resumida são (SARMA *et al.*, 1994):
  1. Isolamento dos circuitos atingidos pela falta, através da abertura de disjuntores ou religadores.
  2. Restabelecimento do maior montante de consumidores isolados pelo procedimento “1”, através de operações de fechamento de chaves de socorro (normalmente abertas “NA”) e abertura de chaves seccionadoras (normalmente fechadas “NF”).
  3. Reparo da contingência cujo tempo para tal procedimento irá depender de diversos fatores como: tipo da contingência, local de ocorrência, disponibilidade de equipe para o reparo.
  4. Normalização do atendimento após a contingência ter sido reparada.

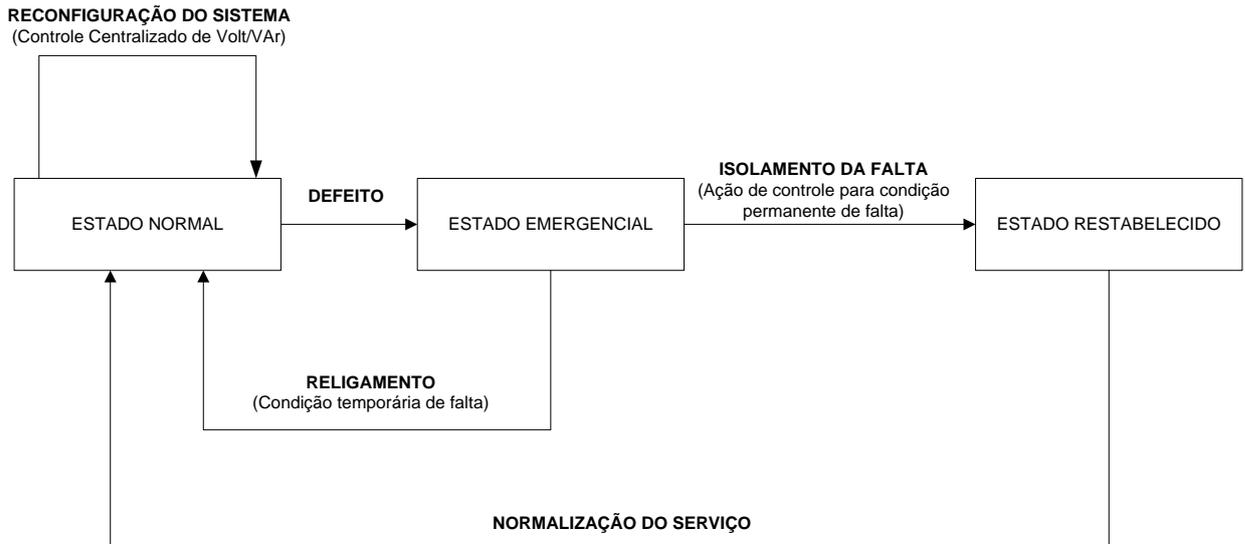


Figura 1.1: Estados de Operação de um Sistema de Distribuição. Fonte: (Morelato e Monticelli, 1989)

No Brasil, a ANEEL, com o objetivo de mensurar a qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias de energia elétrica, estabelece procedimentos para o cálculo de indicadores de continuidade e tempo de atendimento em condições emergenciais. Esses indicadores são calculados para períodos de apuração mensal, trimestral e anual (ANEEL, 2007).

As equações (1.1), (1.2) e (1.3) apresentam o cálculo de indicadores para o acompanhamento individual das interrupções ocorridas em cada unidade consumidora atendida pela concessionária de energia elétrica:

- a) Duração de Interrupção por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (DIC): intervalo de tempo que, no período de observação, cada unidade consumidora sofreu descontinuidade no atendimento de energia. Formalmente:

$$DIC = \sum_{i=1}^N t(i) \quad (1.1)$$

- b) Frequência de Interrupção individual por unidade consumidora (FIC): número de interrupções ocorridas, no período de observação em cada unidade consumidora, Matematicamente:

$$FIC = n \quad (1.2)$$

- c) Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão (DMIC): tempo máximo de interrupção contínua, do fornecimento de energia elétrica, para uma unidade consumidora qualquer. Formalmente:

$$DMIC = \max_{i=1, \dots, N} t(i) \quad (1.3)$$

Onde:

- $i$ : Representa o índice de interrupções da unidade consumidora no período de apuração, variando de 1 a  $n$ ;
- $n$ : Representa o número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período de apuração;
- $t(i)$  Representa o tempo de duração da interrupção ( $i$ ) da unidade consumidora considerada ou ponto de conexão, no período de apuração.

As equações (1.4) e (1.5) apresentam o cálculo dos indicadores para o conjunto de unidades consumidoras de determinada área de avaliação:

- d) Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC): o intervalo de tempo que, em média, cada consumidor na área de avaliação considerada ficou privado do fornecimento de energia elétrica, matematicamente:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} DIC}{Cc} \quad (1.4)$$

- e) Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC): parâmetro adimensional que representa o número de interrupções que, em média, cada consumidor sofreu, matematicamente:

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} FIC}{Cc} \quad (1.5)$$

Onde:

- $Cc$ : Representa o número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração, atendidas em baixa ou média tensão.

Visando à melhoria contínua dos serviços prestados pelas concessionárias distribuidoras de energia elétrica, a ANEEL impõe limites para os indicadores individuais e coletivos. Dessa forma, a violação desses índices de continuidades individuais no fornecimento de energia acarreta a distribuidora um montante de compensação financeira ao consumidor (Borges, 2012).

A Figura 1.2 ilustra, em azul, o montante compensado por transgressão aos indicadores individuais e, em verde, as multas por violação dos limites dos índices coletivos no período de 2007-2010. A análise da figura indica que, de forma global, o valor das compensações e multas tem aumentado.

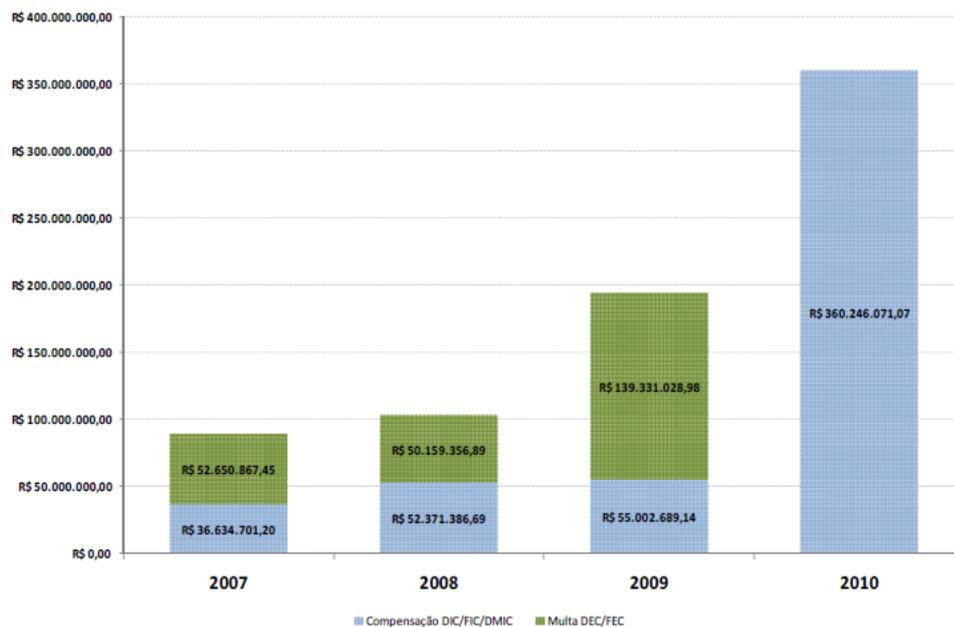


Figura 1.2: Evolução da Compensação por Transgressão dos Indicadores DIC, FIC e DMIC e de Multa por Violação dos Limites de DEC e FEC para o Período de 2007 a 2010. Fonte: (ANEEL, 2011)

Do ponto de vista dos consumidores de energia a Figura 1.3 mostra o grau de irritação dos consumidores e relação à duração de um blecaute. Deve-se destacar também que com o aumento do número de equipamentos elétricos utilizados pela sociedade moderna, a sensibilidade do sistema em relação a falhas será cada vez maior.



Figura 1.3: Curva de Aversão aos Blecautes (Gomes, 2008)

---

Desse modo, tanto do ponto de vista das concessionárias de energia quanto dos consumidores, torna-se cada vez mais importante o investimento em novos equipamentos e metodologias adequados à nova realidade de planejamento e operação dos sistemas elétricos de distribuição cuja finalidade seja a melhoria dos indicadores de qualidade do fornecimento de energia elétrica.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

O restabelecimento de energia elétrica em sistemas de potência é quase tão antigo quanto à própria indústria da eletricidade (Adibi *et al.*, 1987). Dessa forma, muitas concessionárias de energia veem adotando procedimentos cada vez mais eficazes e robustos para restabelecer a demanda não suprida após a ocorrência de uma contingência.

O restabelecimento de SED pode ser definido como um processo de reconfiguração da rede de distribuição para transferir as cargas da aérea isolada após alguma contingência de maneira mais adequadas possível usando critérios operacionais através de uma série de operações de comutação de chaves/religadores (CHEN, W. H., 2010).

A complexidade do problema de restabelecimento em SED está ligada com a grande dimensão das redes de distribuição e a natureza combinatorial da solução do problema. Dessa forma, ao longo do tempo, diversos trabalhos foram publicados na busca de soluções cada vez mais eficientes e robustas para esse problema que, matematicamente é em essência de natureza não-linear inteira mista. Tais trabalhos podem ser subdivididos pelas categorias de suas metodologias, a saber:

- Métodos de Busca Exaustiva;
- Métodos Heurísticos:
  - Sistemas Especialistas;
  - Busca Heurística;
- Métodos Matemáticos;
- Métodos baseados em Inteligência Artificial (IA):
  - Lógica *Fuzzy*;
  - Algoritmos Bio-inspirados:
    - Algoritmo Genético
    - Colônia de Formigas;
    - Enxame de Partículas;

---

A seguir serão revistos, de maneira separada, alguns trabalhos relevantes de cada uma das categorias previamente citadas.

### **1.2.1 Métodos de Busca Exaustiva**

Os Métodos de Busca Exaustiva consistem na enumeração de todas as possibilidades de configuração da rede, isto é, todas as topologias factíveis dentro do espaço de busca. Também são conhecidos como Métodos de força Bruta e permitem a obtenção da solução ótima do problema (OLIVEIRA, 2009).

O trabalho proposto por (Sarma *et al.*, 1994), após uma redução da rede original, faz uma busca exaustiva por todas as árvores chamadas de “Árvores de Interesse” a qual é um grafo com todos os pontos de alimentação e de carga da rede reduzida, com as soluções do problema que atendam às restrições de tensão, corrente e radialidade. O método, determina a configuração do sistema restabelecido, porém não define a sequência ótima de manobra. Além disso, por se tratar de um método de busca exaustiva, ainda que com a rede reduzida, essa metodologia pode ser computacionalmente inviável para sistemas de distribuição de grande porte.

### **1.2.2 Métodos Heurísticos**

Os Métodos Heurísticos são baseados em tentativa e erro através da exploração incremental do espaço de busca, empregando um conjunto de critérios (heurísticas) que são formulados baseados no conhecimento do problema. Tais métodos, são em geral, utilizados na resolução de problemas de otimização de difícil solução onde o espaço de busca é muito grande a fim de que boas soluções sejam encontradas de maneira eficiente. Essas metodologias, no entanto, não podem garantir a solução ótima global do problema.

#### **1.2.2.1 Sistemas Especialistas**

Os Métodos Heurísticos que se baseiam em critérios desenvolvidos pelo conhecimento prático de especialistas também são conhecidos como Sistemas Especialistas.

---

A metodologia proposta em (Liu, Lee e Venkata, 1988) utiliza um Sistema Especialista baseado em 180 regras obtidas através da experiência prática dos operadores com o problema de restabelecimento. O trabalho também propõe regras que podem ser utilizadas na operação normal do sistema para a minimização das perdas. Entretanto, a metodologia não calcula a violação de tensões nas barras do sistema, considerando apenas a capacidade e a disponibilidade de transferência de potência dos alimentadores e as cargas do sistema.

Em (Tsai e Wu, 2002) é proposto um sistema especialista utilizando técnicas de orientação a objeto. A metodologia considera uma discretização de 24 pontos da curva de carga para refletir sua variação horária. Apesar de durante o processo de busca ser verificada a capacidade de cada alimentador e as violações de correntes nos ramos do circuito, não são consideradas as violações de tensões nos barramentos, nem a presença de cargas prioritárias.

O trabalho de (Tsai, 2008) propõe um procedimento, valendo-se também da técnica de orientação a objeto, que permite realizar vários planos de restabelecimento com a intervenção do operador do sistema, levando em conta a variação horária da carga, bem como sua diversidade (residencial/comercial/industrial). A metodologia leva em conta os limites operativos de tensão nos barramentos e correntes nos ramos, porém não aborda a questão dos consumidores prioritários.

Um sistema especialista baseado na associação da experiência dos “despachantes” com a interface da linguagem gráfica Orientada a Objetos: Coloured Petri Nets (CPN) é formulado em (Chen, Lin e Tsai, 2002). A melhor possibilidade de reconfiguração das chaves é obtida considerando a inserção de cargas prioritárias e os limites operativos dos circuitos.

A metodologia presente em (Khalid *et al.*, 2008) apresenta um algoritmo especialista que recomenda ao operador do sistema a melhor estratégia de restabelecimento dentre as múltiplas soluções possíveis. Nessa abordagem são considerados os limites operativos das redes para a definição de cada solução recomendada, porém as cargas prioritárias não são consideradas.

### **1.2.2.2 Busca Heurística**

A Busca Heurística é uma estratégia utilizando técnicas de busca em grafo (e.x: busca

---

em profundidade, busca em largura) guiada por regras baseadas conhecimento do problema a fim de diminuir o número de possibilidades geradas.

(Morelato e Monticelli, 1989) propõe uma busca em profundidade baseada em procedimentos usualmente seguidos pelos operadores para o restabelecimento de sistemas de distribuição. A metodologia permite que sejam investigadas outras alternativas que não são comumente consideradas pelos operadores o que para determinadas situações críticas de operação podem ser úteis.

Uma busca heurística baseada em nove regras práticas adquiridas através da experiência dos operadores da Taiwan Power Company é proposta em (Hsu *et al.*, 1991). A rotina de restabelecimento final leva em conta a sobrecarga nos circuitos, no entanto não avalia as restrições de tensões nas barras e a possibilidade de existência de cargas prioritárias.

Em (Shirmohammadi, 1991) é descrita uma técnica baseada em busca heurística que engloba um procedimento de identificação e isolamento dos ramos afetados pela falta aliado com uma metodologia para o restabelecimento de carga. Nesse trabalho, no entanto a sequência de manobra das chaves a serem fechadas não é determinada e não são considerados os consumidores prioritários assim como o perfil de tensão nas barras.

Um procedimento para a resolução do problema de restabelecimento em sistemas de distribuição de grande porte é proposto em (Susheela Devi e Anandalingam, 1995). Os autores utilizam técnicas heurísticas associadas com uma metodologia de busca em grafo conhecida como “*Best-First Search*”. É utilizado também um mecanismo de poda para diminuir o número de árvore de possibilidades, fazendo com que o processo de busca fique mais eficiente. No entanto, para a avaliação da factibilidade das configurações encontradas é executado um fluxo de carga CC o qual não leva em consideração à queda de tensão nas barras tão pouco a influência da carga reativa do sistema.

(Miu *et al.*, 1998) formula o problema de restabelecimento considerando consumidores prioritários como uma função multi-objetivo cujo propósito é maximizar tanto a carga total restabelecida, quanto o número de consumidores prioritários, minimizando o número de chaveamentos. São considerados nessa abordagem os limites operativos da rede; tensão nas barras e correntes nos circuitos. Tais limites são verificados a partir da execução de fluxos de potência trifásicos que também são utilizados para calcular os índices de

---

classificação das chaves.

A metodologia encontrada em (Lin e Chin, 1998) busca, em condições normais, a melhor opção de reconfiguração da rede para a minimização das perdas do sistema de distribuição. Para condições de contingência é proposto outra abordagem heurística que consiste no fechamento das chaves que apresentam os menores índices de sensibilidades. O trabalho testa a metodologia em dois sistemas bem conhecidos da literatura: (Civanlar *et al.*, 1988) e (Baran e Wu, 1989). O trabalho não apresenta a possibilidade de existência de consumidores prioritários, não fornece a sequência de chaveamento e não propõe uma técnica efetiva para corte de carga caso seja violada a restrição de tensão em alguma barra do sistema na configuração final.

No trabalho de (Mathias-Neto, Leão e Mantovani, 2010) o restabelecimento é formulado como um problema de programação não-linear inteiro misto cujo modelo matemático é uma função multi-objetivo que minimiza o número de consumidores não atendidos assim como o número de chaveamentos, obedecendo às restrições de tensão nas barras e correntes nos circuitos. Os autores consideram um cenário com inserção de geração distribuída (GD) e a implementação computacional é realizada utilizando a linguagem C++ As principais contribuições dessa metodologia são: o problema de otimização é resolvido considerando níveis de carga diferentes e a geração distribuída do sistema é modelada utilizando dados em tempo real para cada tipo de fonte de energia. Não é considerada, porém a inclusão de cargas prioritárias.

Uma busca heurística para o restabelecimento de sistemas de distribuição balanceados e desbalanceados é proposta em (Zidan e El-Saadany, 2011). O trabalho inicialmente propõe dividir o sistema pós-falta em grupos de consumidores conectados entre si. Sequencialmente, é calculado um índice de sensibilidade que determina a chave de socorro a ser fechada baseado no valor da corrente em cada ramo para o sistema malhado. São considerados os limites de tensão nas barras e correntes nos ramos, assim como os consumidores prioritários caso o corte de carga seja necessário. No entanto, esse corte de carga não é ótimo.

(Silva Jr, da, Medeiros Jr e Filho, 2012) propõe um processo construtivo, partindo de um sistema todo radial em que as chaves são fechadas mediante um índice de sensibilidade baseado nas perdas de cada ramo até que o sistema se torne malhado. A abertura dos laços formados é realizada através da chave que possui a menor corrente no laço. A metodologia

---

necessita, como ressaltado pelos autores, de um pequeno número de fluxos de potência. No entanto, não leva em consideração a inclusão de cargas prioritárias, tão pouco um corte de carga ótimo. O corte de carga é realizado mediante um critério heurístico baseado na menor queda de tensão estimada para as barras terminais pertencente à parte que foi isolada.

### 1.2.3 Métodos Matemáticos

Os métodos de programação matemática são ferramentas de otimização as quais formulam problemas de restauração como um problema de otimização que podem ser solucionados com programação linear ou não linear (Borges, 2012).

Um dos primeiros trabalhos que abordam programação matemática em sistemas de distribuição é o encontrado em (Aoki *et al.*, 1989). A metodologia propõe um novo método gradiente dual efetivo que pode ser usado em sistemas de grande porte, evitando o chaveamento excessivo e obtendo a resposta de reconfiguração da rede para a situação emergencial em um tempo viável para a operação em tempo real.

Em (Ucak e Pahwa, 1994) é utilizado um procedimento analítico passo a passo para o restabelecimento de sistemas de distribuição levando em conta um modelo exponencial para a representação do decaimento do agregado de carga durante o chamado “*Cold Load Pick up*” (CLPU). Esse fenômeno pode ser definido como a perda da diversidade das cargas após um defeito na rede, o que pode ocasionar, durante um certo tempo, um aumento de 2 a 5 vezes na demanda total do sistema. Os autores observaram que a redução no tempo total de interrupção bem como sua frequência dependem fortemente de fatores como: parâmetros do CLPU, características térmicas e capacidade dos transformadores, número de chaves do sistema e a presença de consumidores prioritários.

(Momoh e Caven, 2003) abordam o problema multi-objetivo de restabelecimento utilizando método de programação inteira a qual incorpora a metodologia de Pontos Interiores na solução de um problema relaxado em que a posição da chave que, originalmente é uma variável inteira, é considerada fracionária. A partir da resposta obtida no problema relaxado são criados diversos subproblemas utilizando a técnica “*branch and bound*”. O estudo foi comparado outras metodologias da literatura e apresentou resultados significativos, especialmente, por ser capaz de abranger situações de múltiplas contingências.

---

Uma metodologia baseada em programação dinâmica é realizada em (Carvalho, Carvalho e Ferreira, 2007), nela é incluída uma avaliação do despacho no intuito de minimizar a energia não suprida após a ocorrência de uma falta. Os resultados obtidos foram comparados com outras metodologias e foi verificado uma aderência melhor da formulação em questão quando as áreas desenergizadas são bem dispersas geograficamente umas das outras e o número de equipes disponíveis para as manobras manuais é relativamente pequeno.

O trabalho de (Pham, Bésanger e Hadjsaid, 2009) estabelece um procedimento global de restabelecimento em sistemas de grande porte com inserção de geração distribuída. O problema é resolvido em dois estágios. No primeiro estágio é obtida uma sequência operacional de manobras com o intuito de restabelecer a maior quantidade de cargas possíveis, levando em conta consumidores prioritários de energia. No segundo estágio a sequência de chaveamento obtida é validada, em relação às restrições do problema, mediante cálculo de fluxo de carga e simulações dinâmicas.

Um dos trabalhos mais recentes que considera uma abordagem de programação matemática no problema de restabelecimento em sistemas elétricos de distribuição é o de (Borges, 2012). Nessa metodologia as variáveis discretas do problema (posição das chaves) são modeladas como uma função contínua, permitindo que o problema possa ser resolvido utilizando-se Método Primal-Dual de Pontos Interiores. Utiliza-se também teoria de grafos para a determinação das barras isoladas do sistema e na identificação de possíveis laços formados no processo de restabelecimento. Na solução do problema, o sistema parte de uma configuração malhada em que é calculado um índice de sensibilidade determinando a sequência de chaves a serem fechadas. Ao se formar um laço no sistema, é proposto um algoritmo Dijkstra para determinar qual chave deverá ser aberta. Os resultados obtidos foram comparados com outras metodologias da literatura e mostraram-se superiores tanto no estágio de reconfiguração da rede, quanto no estágio de corte de carga caso este seja necessário. A metodologia ainda considera a existência de cargas prioritárias, mas não leva em conta o tempo de manobra no processo de restauração. Adicionalmente, o corte de carga executado é feito de forma contínua o que, na prática, não é ainda realizável.

---

## 1.2.4 Métodos Baseados em Inteligência Artificial

Os Métodos baseados em Inteligência Artificial são, por definição, algoritmos computacionais que emulam o processo de pensamento e/ou experiência humana para o domínio específico do problema que se pretende resolver (Taylor e Lubkeman, 1989).

Muitos trabalhos tem buscado resolver o complexo problema de restabelecimento de sistemas elétricos de distribuição através de tais métodos devido a flexibilidade que possibilitam em incorporar o conhecimento humano e as restrições inerentes a esse processo.

### 1.2.4.1 Lógica *Fuzzy*

A Lógica *Fuzzy* (Nebulosa) é uma lógica que se baseia em modelos que são aproximados e não exatos. Modelos *Fuzzy* são implementados em sistemas que utilizam informações qualitativas de forma rigorosa (Gomide, Gudwin e Tanscheit, 1995). A razão primordial de adotar a Lógica *Fuzzy* no problema de restabelecimento é sua capacidade de encapsular o conhecimento de especialistas humanos em variáveis linguísticas, tal como: “manter a corrente do alimentador dentro do limite” (Borges, 2012).

(Kuo e Hsu, 1993) utiliza a Lógica *Fuzzy* para prever a carga do sistema de distribuição através de regras de inferência baseadas em funções de pertinência senoidais. A partir dessa previsão de carga um procedimento heurístico de restabelecimento é executado. O trabalho leva em consideração à restrição de sobrecarga nos circuitos, no entanto não considera à restrição de violação de tensão nas barras.

(Hsu e Kuo, 1994) apresentaram uma continuação do trabalho (Kuo e Hsu, 1993). No entanto, a principal diferença entre as metodologias é que em (Hsu e Kuo, 1994) as restrições operativas tais como sobrecarga nos alimentadores é modelada por variáveis linguísticas mais flexíveis, ou seja, a restrição imposta é que as violações sejam as menores possíveis ao invés de valores previamente definidos. Dessa forma os planos de restabelecimentos definidos permitem obter soluções viáveis com pequenas sobrecargas, as quais em (Kuo e Hsu, 1993) seriam consideradas infactíveis. Da modo análogo ao trabalho anterior, os níveis de tensão nas barras foram negligenciados.

---

Em (Delbem, Bretas e Carvalho, 2000) é apresentada uma heurística baseada em Lógica *Fuzzy* em que as regras linguísticas são fuzzificadas através de uma função de pertinência trapezoidal que associa as regras à estados de temperatura: alto/baixo. Os autores testaram a metodologia em um sistema relativamente complexo da cidade de São Carlos – SP. Entretanto, a abordagem não leva em conta a possibilidade de existência de consumidores prioritários e vale-se de um fluxo de carga CC para a verificação da violação de sobrecarga nos circuitos e perdas no sistema. Como é sabido o fluxo de CC não leva em conta a queda de tensão nas barras do sistema o que pode ser entendido como uma desvantagem do método, pois não é capaz de avaliar as violações de tensões nas barras caso essas existam.

O trabalho de (Popovic e Popovic, 2004) propõe uma metodologia para o restabelecimento através de uma abordagem de gerenciamento de risco utilizando a Lógica *Fuzzy*. As cargas dos consumidores e os fluxos de potência nos circuitos são fuzzificadas mediante uma função de pertinência triangular. O objetivo da metodologia é a determinação do cenário ótimo de restabelecimento da rede que forneça o custo mínimo total da energia não suprida. Uma particularidade do método proposto é que somente as cargas e fluxos nas linhas são modelados utilizando conjuntos fuzzy, as incertezas relativas às tensões complexas nas barras não são consideradas.

(Lim *et al.*, 2006) formulam um novo algoritmo capaz de gerar um plano de restabelecimento considerando múltiplas contingências. A metodologia adota dois estágios: sequencial e simultâneo. No estágio sequencial, é determinado a ordem das zonas a serem restabelecidas de maneira independente. Para tanto, um Índice de Possibilidade de Restabelecimento (*Restoration Possibility Index - RPI*) é introduzido. Tal índice é calculado mediante Lógica *Fuzzy* baseando-se na seguinte regra linguística: “*Se a carga da zona a ser restabelecida é pequena e a margem de carregamento do alimentador é grande, a possibilidade de restabelecimento é grande.*” A fuzzificação dessa regra é realizada por uma função de pertinência triangular. Caso o algoritmo não seja capaz de encontrar uma configuração factível que restabeleça todo o montante de carga na etapa sequencial, é executado o estágio simultâneo que utiliza um algoritmo para determinar a melhor posição de uma chave de socorro (normalmente aberta) levando em conta um índice de balanço de carga de carga para cada par de alimentador. Como desvantagens, não são considerados pelo método os níveis de tensão do sistema e nem a presença de consumidores prioritários

---

Recentemente, (Kaewmanee e Sirisumrannukul, 2011) desenvolveram um algoritmo de decisão Fuzzy de forma que o operador do sistema possa usar expressões linguísticas para resolver o problema de restabelecimento. A metodologia visa através de uma função multiobjetivo: minimizar o número de operações de chaveamento, corrente nos alimentadores dentro dos limites, tensões nas barras dentro dos limites, maximização da carga na área de blecaute e balanceamento da carga entre os alimentadores. Os autores representaram a rede através de uma estrutura de árvore conhecida como “*Node Depth Encoding*” (NDE) com o intuito de tornar a modelagem, computacionalmente, mais eficiente do ponto de vista da reconfiguração do sistema. Um característica dessa estrutura é que não gera configurações malhadas ou desconexas. O método, no entanto, não apresenta a possibilidade de inclusão de consumidores prioritários.

#### **1.2.4.2 Algoritmos Bio-Inspirados**

Os algoritmos bio-inspirados, que fazem parte do conjunto de algoritmos metaheurísticos, são algoritmos estocásticos de otimização que utilizam-se da inteligência evolucionária de processos biológicos traduzidos através de relações matemáticas a fim de resolverem problemas, em geral, de difícil solução cujo o espaço de busca tem grande dimensão. Os algoritmos metaheurísticos assim como os heurísticos não garantem a localização da solução ótima global dos problemas de otimização, no entanto os primeiros permitem uma avaliação mais eficiente do espaço de busca, obtendo, muitas vezes, ótimos locais de melhor qualidade (Yang, 2011).

O problema do restabelecimento é de natureza não-linear inteira mista com explosão combinatorial de soluções viáveis. Dessa forma, sua abordagem utilizando tais algoritmos tem sido cada vez mais frequentes na literatura.

##### **1.2.4.2.1 Algoritmos Genéticos**

O conceito dos Algoritmos Genético foi introduzido no início dos anos 70 por John Holland. A metodologia se baseia em uma técnica de busca e otimização inspirada no princípio da seleção natural e reprodução genética de Charles Darwin (Goldberg, 1989).

Esses princípios são traduzidos em algoritmos computacionais que buscam uma

---

melhor solução para um determinado problema de otimização, a partir da evolução das populações de soluções codificadas através de cromossomos artificiais (Pacheco, 1999).

Existem vários trabalhos que utilizam essa técnica bio-inspirada na solução do problema de restabelecimento em sistemas de distribuição de energia.

(Fukuyama e Chiang, 1995) desenvolve um Algoritmo Genético Paralelo para resolver o problema de restabelecimento. Na abordagem são consideradas as restrições de tensão nas barras e correntes no circuito, bem como a radialidade da configuração. Porém, a metodologia não considera a inserção de consumidores prioritários na função aptidão, tão pouco determina a sequência de chaveamento para se obter a configuração final.

Em (Mun *et al.*, 2001) foi apresentada uma metodologia baseada em algoritmos de genético (AG) cuja função aptidão é função de cinco parâmetros: custo de operação das chaves, reserva de potência nos transformadores, reserva de corrente nos alimentadores, queda de tensão e balanço de cargas nos alimentadores.

#### **1.2.4.2.2 Enxame de partículas**

A otimização baseada em enxames de partículas foi desenvolvida por (Kennedy e Eberhart, 1995) baseado no comportamento de peixes e pássaros na natureza.

O algoritmo visa ajustar a melhor trajetória dos indivíduos agentes, chamados “partículas” através de um processo quase-estático de composição vetorial (Yang, 2011). O movimento das partículas é dado pela soma vetorial da posição em relação ao ótimo global  $g^*$  corrente (componente coletivo) e do ótimo local  $x_i^*$  de cada agente em separado (componente individual).

Os autores em (Yi-xiong, Yan e Yong-sheng, 2011) utilizam otimização por enxame de partículas (OEP) considerando a penetração de geração distribuída.

#### **1.2.4.2.3 Colônia de formigas**

O método conhecido como Colônia de formigas foi introduzido por (Dorigo,

---

Maniezzo e Colomi, 1996) cujo objetivo era mimetizar o comportamento real das formigas que utilizam um mecanismo chamado estigmergia a fim de trocarem informações na busca do melhor caminho para encontrarem alimentos e retornarem ao formigueiro. Os autores utilizaram o problema do caixeiro viajante para demonstrar a robustez e eficácia do método, comparando seu desempenho com o de outros métodos de busca já consagrados àquele tempo:

Esse algoritmo têm sido amplamente utilizado, desde então, em diversos problemas de otimização combinatorial do mundo real.

Em (Lu *et al.*, 2010) o problema de restabelecimento é resolvido através do método de colônia de formigas (ACO) considerando a possibilidade de determinação de consumidores prioritários.

### **1.3 Motivação da Dissertação**

O trabalho de restabelecimento em sistemas de distribuição de energia elétrica, por ser um problema de otimização em tempo real, não-linear inteiro misto, cujo espaço de busca cresce exponencialmente com o número de chaves manobráveis do sistema ( $2^n$ ) é muito complexo. A única forma de se obter seguramente o ótimo global é através de métodos de busca exaustiva (força bruta) o que computacionalmente, para sistemas reais é inviável.

Por serem formulados para explorarem de forma eficiente o espaço de busca de um problema que possui uma explosão combinatorial de soluções factíveis, técnicas bio-inspiradas (metaheurísticas), tem sido exploradas na resolução de tais problemas.

No entanto, como revisado na seção anterior, em sua grande maioria, as metodologias baseadas em metaheurísticas não definem a sequência de chaveamento para a obtenção da configuração pós-restabelecimento, não consideram a influência do tempo de chaveamento e não incorporam de maneira conjunta: a existência de consumidores prioritários e a penalização para os limites operativos do sistema. Por fim essas metodologias também não formulam um corte discreto mínimo de carga caso seja necessário.

Portanto, o estudo de outras metodologias de busca inteligente, que viabilizem a sequência de manobra, agregando o máximo de informação do problema de restabelecimento

---

à função multi-objetivo do problema e mantendo um compromisso com a eficiência computacional do problema é uma contribuição promissora na resolução do problema de restabelecimento dos sistemas elétricos de distribuição.

#### 1.4 Objetivos da Dissertação

Esta dissertação tem como objetivo a elaboração de uma nova metodologia multi-estágio utilizando algoritmos bio-inspirados para resolver o problema de restabelecimento em redes de distribuição de energia elétrica.

No primeiro estágio é proposta uma função multi-objetivo em que a configuração final do sistema restabelecido é determinada. Esta função leva em consideração a minimização simultânea: da carga não suprida (considerando a existência de consumidores prioritários), das perdas do sistema, do número de chaveamentos executados. Além disso, são incluídas penalizações por violação nos limites operativos do sistema (violação de tensão nas barras e fluxo de potência nos circuitos).

No segundo estágio do algoritmo é resolvido um novo problema de otimização levando em conta o custo da energia não suprida durante o processo de manobra para determinar a melhor sequência de chaveamento a partir da solução do primeiro estágio. Adicionalmente, são realizados, em cada manobra, os cortes mínimos discretos de carga caso as restrições operativas da rede sejam violadas.

Tanto a obtenção da configuração final do sistema restabelecido no primeiro estágio, quanto o corte mínimo discreto de carga no segundo estágio são resolvidos utilizando algoritmos bio-inspirados por se tratarem de problemas de otimização não lineares de natureza inteira-mista. No intuito de analisar o comportamento de diferentes metodologias bio-inspiradas três delas são investigadas: Algoritmos Genético, Método Baseado na Eco Localização de Morcegos (*Bat Algorithm*) e Método Baseado na Reprodução dos Pássaros Cuco (*Cuckoo Search*).

Os resultados obtidos pela metodologia proposta nessa dissertação são comparados com outros trabalhos conhecidos da literatura comprovando sua eficiência e robustez.

---

## 1.5 Publicações Decorrentes

1. ARCANJO D. N., PEREIRA J. L. R., OLIVEIRA E. J., PERES W., OLIVEIRA L. W., SILVA JUNIOR I. C., **Cuckoo Search Optimization Technique Applied to Capacitor Placement on Distribution System Problem**. 10<sup>th</sup> IEEE/IAS International Conference on Industrial Applications – INDUSCON. Fortaleza – CE 2012.

## 1.6 Estrutura da Dissertação

Além desse capítulo que apresentou uma introdução sobre restabelecimento em sistemas de distribuição, analisando seus principais aspectos e trazendo uma revisão bibliográfica de trabalhos relevantes encontrados na literatura, a dissertação conta com mais três capítulos.

O Capítulo 2 apresenta uma visão global das técnicas bio-inspiradas utilizadas enfatizando os principais conceitos para a implementação desses algoritmos.

O Capítulo 3 descreve a metodologia multi-estágio proposta bem como a descrição das técnicas matemáticas adotadas para resolver ambos os estágios.

O Capítulo 4, inicialmente possui um tutorial no qual é mostrada, de maneira didática, a implementação da metodologia proposta no sistema IEEE 16 Barras. Adicionalmente, reúne outros estudos de casos contendo resultados e discussões, para a aplicação da metodologia em alguns sistemas de distribuição encontrados na literatura: IEEE 33 Barras e 476 Barras. Os resultados finais são comparados com outros métodos de restabelecimento consagrados para analisar a qualidade das soluções obtidas pela metodologia proposta.

Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as principais conclusões do trabalho desenvolvido, bem como a sugestão de desenvolvimentos futuros, no intuito de aprimorar os resultados obtidos.

---

## Capítulo 2. -

# Algoritmos Bio-inspirados

### 2.1 Considerações Iniciais

Grande parte dos algoritmos de otimização utilizados atualmente são determinísticos, como por exemplo, os métodos utilizados para programação linear e método de Newton que é baseado na orientação do vetor gradiente.

Os métodos matemáticos baseados na orientação do vetor gradiente possuem um caráter de altíssima repetibilidade<sup>1</sup> e eficiência computacional. No entanto, quando existe uma descontinuidade na função objetivo, ou o ponto inicial de busca não é bem escolhido tais métodos tendem a não se comportarem muito bem e divergirem.

Contrastando com os métodos determinísticos de otimização existem os métodos estocásticos: heurísticos e metaheurísticos.

Etimologicamente heurístico vem da palavra grega *Heuriskein*, que significa descobrir dando origem também ao termo: “Eureca”. Os métodos heurísticos baseiam-se em técnicas específicas descobertas pelo homem que através de tentativa e erro na resolução de um determinado problema desenvolveu uma metodologia para resolvê-lo.

Os métodos metaheurísticos por sua vez, como o próprio nome indica: *meta* (além) – *heurístico* (busca), são aqueles cujas técnicas de resolução do problema incorporam processos inteligentes que tendem a melhor otimizar a solução obtida em comparação com os métodos heurísticos convencionais.

---

<sup>1</sup> O conceito de repetibilidade está associado ao comportamento dos algoritmos determinísticos em convergir para a mesma solução partindo das mesmas condições iniciais.

---

Os algoritmos bio-inspirados são métodos metaheurísticos formulados a partir do estudo de sistemas naturais. Desde os anos 1960s os algoritmos evolutivos baseados no comportamento da natureza (Algoritmos Genéticos, Algoritmo baseado em Colônia de Formigas, Otimização por Enxame de Partículas) têm sido desenvolvidos no intuito de melhor resolver problemas complexos de espaço com busca extenso e por vezes descontínuos.

Neste capítulo serão abordados de maneira breve as metaheurísticas, ou algoritmos bio-inspirados, utilizados no desenvolvimento do presente trabalho com o objetivo de destacar os conceitos mais importantes para o entendimento e implementação dos mesmos.

## **2.2 Algoritmo Genético**

### **2.2.1 Introdução**

O Algoritmo Genéticos (AG), foi desenvolvido por John Holland e seus colaboradores na Universidade de Michigan entre os anos de 1960 e 1970. É um modelo ou abstração da “Teoria da evolução das espécies” de Charles Darwin baseando-se no conceito de seleção natural. Holland foi o primeiro a usar os conceitos de: recombinação (*crossover*), mutação e seleção no estudo de sistemas artificiais adaptativos (Goldberg, 1989).

Atualmente, um grande número de problemas do cotidiano é resolvido utilizando a metodologia idealizada por Holland.

Em Sistemas Elétricos de Potência sua aplicação tem sido extensiva especialmente quando se trata de problemas de otimização de natureza inteira. O próprio problema de Restabelecimento em SED, como mostrado na seção 1.2.4.2 dessa dissertação, já foi abordado utilizando os algoritmos genéticos como ferramenta matemática de solução.

### **2.2.2 Pseudocódigo Genérico**

De modo geral, um código genérico dos Algoritmos Genéticos é mostrado na Figura 2.1.

---

### **Algoritmo Genético**

*Inicializar a população de indivíduos (solução) com sua informação genética (codificação)*

*Avaliar os indivíduos da população inicial*

#### ***Repita***

*Selecionar indivíduos para reprodução*

*Aplicar os operadores de elitismo, recombinação e mutação*

*Avaliar os indivíduos da população corrente*

*Selecionar indivíduos para sobreviver*

***Até critério de parada atingido***

***Fim***

*Figura 2.1- Pseudocódigo Genérico do Algoritmo Genético (Goldberg, 1989)*

A seguir serão mostrados separadamente os conceitos e operadores, dos Algoritmos Genéticos, envolvidos na reprodução dos indivíduos, avaliação e critério de parada.

### **2.2.3 Métodos de Seleção**

Inspirado no processo de seleção natural os indivíduos de cada da população, inclusive da inicial, são selecionados de modo que os melhores “pais” transmitem suas características (informação) para as próximas gerações (futuros “filhos”).

Na implementação do algoritmo genético é necessário fazer a escolha adequada do processo de seleção. Essa escolha, em geral, é realizada através de sucessivas simulações do problema a ser otimizado variando-se os processo de seleção e mantendo-se fixos os demais parâmetros pertinentes ao método.

Existem vários processos de seleção propostos para os algoritmos genéticos. Dentre eles, destacam-se:

#### **a) Roleta:**

O critério de seleção por Roleta faz com que o indivíduo tenha probabilidade de ser selecionado proporcionalmente ao valor de sua função aptidão.

Graficamente, pode-se construir uma roleta onde cada individuo está localizado de acordo com o valor percentual de sua aptidão em relação ao valor da aptidão média da população. Dessa forma, indivíduos mais aptos possuem maior probabilidade de serem selecionados.

---

A Figura 2.2 ilustra um exemplo de roleta onde o indivíduo que se encontra na área em vermelho correspondente a 10% do gráfico de pizza e possui uma probabilidade igual a 0,10 de ser selecionado.

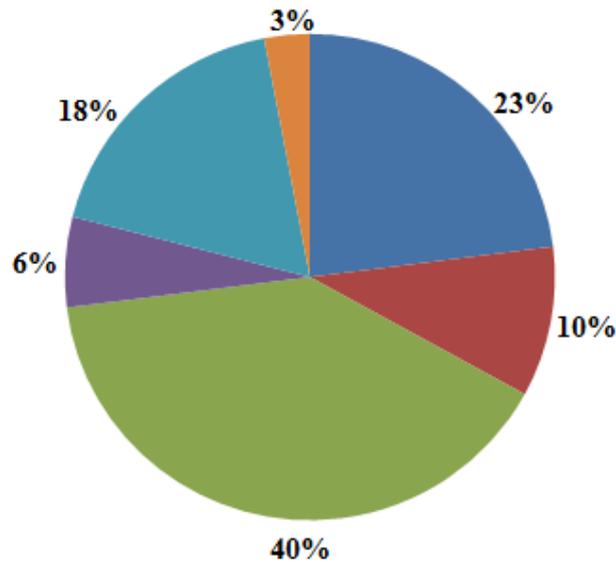


Figura 2.2- Exemplo de Roleta para o Algoritmo Genético

**b) Ranqueamento:**

O ranqueamento consiste na ordenação dos indivíduos da população de forma crescente em relação ao seus valores de aptidão. Posteriormente, especifica-se um número de indivíduos que transmitiram suas características para a geração futura.

**c) Torneio:**

O critério de torneio consiste na aplicação do critério de roleta em um subgrupo de indivíduos da população de modo a escolher o mais apto entre eles. O processo de seleção por torneio é repetido até que os subgrupos da população gerem uma nova população de mesmo tamanho da anterior.

**d) Uniforme:**

A seleção uniforme é aquela em que todos os indivíduos tem a mesma probabilidade de serem selecionados. Portanto, trata-se de um critério totalmente aleatório que, obviamente, possui probabilidade muito remota de consistentemente produzir melhora na população.

---

## 2.2.4 Reprodução

A reprodução dos indivíduos no Algoritmo Genético para a geração de uma nova população, como citado no pseudocódigo da Figura 2.1, é composta, basicamente, por três operações: elitismo, recombinação e mutação.

### 2.2.4.1 Elitismo

O elitismo corresponde a perpetuação de um número definido dos melhores indivíduos para a geração futura. Ele garante que no mínimo o número pré-definido de melhores soluções sempre farão parte do processo evolutivo de busca pela solução do problema de otimização.

### 2.2.4.2 Recombinação (*crossover*)

O operador de recombinação garante que as novas gerações de indivíduos serão produzidas a partir da troca de informações entre os “pais” selecionados previamente.

Existem diversas funções e metodologias distintas para a recombinação (Goldberg, 1989) e a escolha da melhor técnica de recombinação, em geral, também é realizada através de sucessivas simulações do problema a ser otimizado variando-se as técnicas de recombinação e mantendo-se fixos os demais parâmetros.

Além da escolha da técnica de recombinação é essencial a definição da taxa de recombinação para o Algoritmo Genético.

### 2.2.4.3 Mutação

A mutação é o operador de reprodução que garante a diversidade da busca do Algoritmo Genético. Para tanto é necessário também escolher o tipo de mutação a ser realizada e sua respectiva taxa (Goldberg, 1989).

---

### 2.2.5 Avaliação

A avaliação consiste no cálculo do valor da função objetivo do problema de otimização considerado. Essa função representa a aptidão de cada indivíduo.

### 2.2.6 Critério de Parada

O critério de parada para o Algoritmos Genéticos, define de que maneira o processo de busca será terminado. Destacam-se alguns critérios de parada, comumente, utilizados em soluções de problemas de otimização:

- Tolerância atingida para a função objetivo;
- Número máximo de gerações (iterações) atingido;
- Tempo máximo atingido.

Concluindo, destaca-se que o Algoritmo Genético é um método eficiente para a solução de diversos problemas em engenharia elétrica, conforme consta na literatura técnica especializada. Por outro lado, verifica-se a grande quantidade de parâmetros a ser ajustada. Esse processo de ajuste é função do problema sob análise e pode demandar grande quantidade de tempo para ser realizado.

## 2.3 Método Baseado na Eco Localização de Morcegos (*Bat Algorithm*)

### 2.3.1 Introdução

O Método Baseado na Eco Localização dos Morcegos (*Bat Algorithm*) foi proposto em 2010 por Xin-She Yang, professor da Universidade de Cambridge. Ele se baseia na capacidade dos morcegos de localizarem suas presas utilizando a emissão de pulsos sonoros e a recepção dos ecos. Assim os morcegos em sua locomoção, para a captura de suas presas, podem vencer obstáculos mesmo estando na escuridão (Yang, 2011).

---

No início do processo de busca, os morcegos enviam sinais sonoros com volume elevado à uma baixa taxa de emissão. Conforme se aproximam de suas presas (objetivo), o volume do som é reduzido e a taxa de emissão é aumentada.

Dessa forma, o Método Baseado na de Eco Localização de Morcegos consistem em um poderoso método de otimização, onde se utiliza morcegos virtuais com as seguintes características (Yang, 2011).

- Todos os morcegos usam a capacidade de eco localização para enxergar a distância;
- Morcegos voam randomicamente com velocidade  $v_i$  e posição  $x_i$  com frequência variando no intervalo  $[f_{min}, f_{max}]$ , conseqüentemente o comprimento de onda do som emitido varia em um intervalo  $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ .
- O volume do som, por suposição, varia de um valor alto  $A_0$  para um valor baixo  $A_{min}$  durante o processo de busca (solução do problema de otimização).
- Os morcegos podem, automaticamente, ajustar o comprimento de onda, ou a frequência dos pulsos emitidos, e ajustar a taxa de emissão de pulsos  $r \in [0,1]$ , dependendo da proximidade da presa;

O Método Baseado na Eco Localização de Morcegos foi comparado com outras metodologias bio-inspiradas na resolução de problemas matemáticos de otimização de difícil solução, mostrando-se mais acurado e eficiente que os demais algoritmos (Yang, 2010).

Um dos primeiros e mais recentes trabalhos aplicando essa nova metaheurística em sistema elétricos de potência é apresentado em (Coelho, 2013). Nesse trabalho é proposta uma modificação no algoritmo original, mostrado na Figura 2.3, e a metaheurística é utilizada para a otimização da alocação e dimensionamento de geração distribuída em sistemas de distribuição.

### 2.3.2 Pseudocódigo genérico

De modo geral, um código genérico do Método Baseado na Eco Localização dos Morcegos é mostrado na Figura 2.3 .

---

### **Algoritmo baseado na eco localização dos morcegos**

*Definir a Função Objetivo  $f(p)$ ,  $p = (p_1, \dots, p_d)^T$*

*Definir o número de indivíduos e o número máximo de gerações*

*Inicializar a população de morcegos com sua posição inicial  $p_i$  e velocidade inicial  $v_i$*

*Definir a taxa inicial de emissão de pulsos  $r_0$  e a frequência inicial  $f_0$*

#### **Repita**

*Gerar novas soluções ajustando-se a frequência e atualizando a velocidade e a posição dos morcegos (solução do problema)*

**Para  $i = 1$  até número de indivíduos**

**Se (número randômico  $> r_i$ )**

*Selecionar uma solução entre as melhores soluções*

*Gerar uma solução local ao redor da melhor solução*

**Fim Se**

*Gerar nova solução através de um voo randômico*

**Se (número randômico  $< A_i$  e  $f(p_i) < f(x_{melhor})$ )**

*Aceitar a nova solução*

*Aumentar  $r_i$  e reduzir  $A_i$*

**Fim Se**

*Avaliar as posições dos morcegos*

*Ranquear as posições dos morcegos*

*Encontrar a melhor posição atual para os morcegos  $p_{melhor}$*

**Fim Para**

**Até critério de parada atingido**

**Fim**

Figura 2.3- Pseudocódigo Genérico do Algoritmo Baseado na Eco Localização de Morcego (Yang, 2011)

A seguir serão mostrados separadamente os conceitos envolvidos na atualização da posição dos morcegos, avaliação da aptidão e critério de parada.

### **2.3.3 Atualização da posição dos morcegos**

O movimento dos morcegos é dado pelas equações (2.1), (2.2) e (2.3) :

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\mu \quad (2.1)$$

$$v_i^k = v_i^{k-1} + (p_i^k - p_*)f_i \quad (2.2)$$

$$p_i^k = p_i^{k-1} + v_i^k \quad (2.3)$$

---

Onde:

- $k$ : Representa o contador de iterações;
- $\mu$ : Representa o valor randômico entre  $[0, 1]$  designado por uma distribuição uniforme;
- $f_i$ : Representa a frequência de emissão de pulsos do  $i$ -ésimo morcego;
- $f_{min}$ : Representa a frequência mínima determinada para o som emitido;
- $f_{max}$ : Representa a frequência máxima determinada para o som emitido;
- $p_i^k$ : Representa a posição do  $i$ -ésimo morcego na iteração  $k$ ;
- $p_*$ : Representa a melhor posição (solução) para problema;
- $v_i^k$ : Representa a velocidade do  $i$ -ésimo morcego na iteração  $k$ .

A faixa de ajuste da frequência vai depender do domínio de busca de soluções.

O *Bat Algorithm* é muito parecido com o algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (OEP), na atualização da posição e da velocidade, podendo ser considerado como um balanceamento entre OEP e busca intensiva controlada pelo volume do som emitido ( $A$ ) e taxa de emissão de pulso ( $r$ ).

O volume da emissão do som emitido e a taxa de emissão de pulsos pode ser considerado constante, ou de forma mais complexa, como mostra o pseudocódigo da Figura 2.3. Nesse caso, esses parâmetros podem ser atualizados a cada iteração (Yang, 2011) conforme as equações (2.4) e (2.5):

$$A_i^{k+1} = \alpha A_i^k \quad (2.4)$$

$$r_i^{k+1} = r_0 [1 - e^{-\gamma k}] \quad (2.5)$$

Onde:

- $k$ : Representa o contador de iterações;
- $\alpha$ : Representa uma constante similar ao esfriamento do Método de Recozimento Simulado. Tipicamente  $\alpha = 0,9$ ;
- $A_i^k$ : Representa o volume do som emitido pelo  $i$ -ésimo morcego na iteração  $k$ ;
- $r_i^k$ : Representa a taxa de emissão de pulsos do  $i$ -ésimo morcego na iteração  $k$ ;
- $r_0$ : Representa a taxa inicial de emissão de pulsos;
- $\gamma$ : Representa uma constante cujo valor típico é:  $\gamma = 0,9$ .

O presente trabalho considera a formulação básica do Método Baseado na Eco Localização de Morcegos (Yang, 2011) em que o volume do som emitido e a taxa de emissão de pulsos são variáveis, atualizados segundo equações (2.4) e (2.5).

---

### **2.3.4 Avaliação**

A avaliação consiste no cálculo do valor da função objetivo formulada para o problema de otimização que define quão boa é a posição (solução) do morcego.

### **2.3.5 Critério de parada**

O critério de parada para o Método Baseado na Eco Localização de Morcegos também é definido previamente, levando em consideração a melhor forma de buscar a convergência do método para o problema de otimização a ser resolvido. Destacam-se alguns critérios de paradas comumente utilizados em soluções de problemas de otimização:

- Tolerância atingida para a função objetivo;
- Número máximo de gerações (iterações) atingido;
- Tempo máximo atingido.

## **2.4 Método baseado na reprodução dos pássaros Cuco (*Cuckoo Search*)**

### **2.4.1 Introdução**

O Método Baseado na Reprodução dos Pássaros Cuco (*Cuckoo Search*) é uma dos mais recentes algoritmos bio-inspirados, ele foi proposto por Xin-Shen Yang da Universidade de Cambridge e Suash Deb da Universidade de Engenharia C.V. Raman de Bhubaneswar – Índia (Yang, 2011).

Os Cucos são aves que possuem uma interessante e agressiva estratégia de reprodução. Algumas espécies de Cuco colocam seus ovos em ninhos de outras aves para serem chocados. Adicionalmente, para aumentar a probabilidade de ter seus ovos chocados, os pássaros Cucos têm de remover ovos das aves hospedeiras e substituí-los por seus próprios ovos. Caso o ovo dos Cucos sejam descobertos pela ave hospedeira eles serão destruídos ou o ninho será abandonado (Payne, 2005).

---

Inspirado na estratégia parasita de reprodução dos pássaros Cuco foi proposta a metaheurística *Cuckoo Search*. Este método possui três regras básicas:

1. Cada ave Cuco coloca um ovo (solução) por vez em um ninho escolhido aleatoriamente;
2. O melhor ninho (conjunto de soluções) é aquele que possui a melhor aptidão e será mantido para as próximas gerações. (Parte de intensificação do método);
3. Um número  $n$  de ninhos possuem probabilidade  $p_a = [0,1]$  de serem descobertos pela ave hospedeira. Portanto esses ninhos serão abandonados ou os seus ovos serão destruídos (Parte de diversificação do método);.

Esta metaheurística foi utilizado na resolução de diversos problemas de otimização com funções objetivos de difícil solução, tendo seu desempenho comparado com outros métodos tais como: Otimização por Enxame de Partículas e Algoritmos Genéticos. Conforme constado em (Yang e Deb, 2010) os resultados da nova metaheurística mostraram-se bem superiores.

Em sistema elétricos de potência a primeira abordagem foi uma análise no desempenho do algoritmo bio-inspirado na resolução de alocação de capacitores em sistemas de distribuição (Arcanjo *et al.*, 2012). Outros trabalhos, posteriormente foram publicados utilizando esse método bio-inspirado na resolução de problemas de otimização na área de transmissão (Peres *et al.*, 2013) e distribuição (El-Fergany e Abdelaziz, 2014).

#### **2.4.2 Pseudocódigo**

De modo geral, um código genérico do Método baseado na reprodução dos pássaros Cuco é mostrado na Figura 2.4.

---

### **Algoritmo baseado na reprodução dos pássaros Cuco**

*Definir a Função Objetivo  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$*

*Definir do número de indivíduos, do número de gerações e da probabilidade  $p_a$*

*Inicializar a população de  $n$  ninhos hospedeiros com ovos  $x_i$*

#### **Repita**

*Obter um cuco, aleatoriamente, que colocará um ovo em um ninho (conjunto solução) escolhido por Voo de Lévy.*

*Avaliar a qualidade do ninho através de  $f_i$*

*Escolher aleatoriamente um novo ninho  $j$*

**Se ( $F_i > F_j$ )**

*Substitua o ninho  $i$  pelo novo ninho  $j$*

#### **Fim Se**

*Abandonar uma fração  $p_a$  dos piores ninhos (soluções) e buscar novos ninhos*

*Avaliar a qualidade do ninho através de  $f(x)$*

*Manter os melhores ninhos (solução)*

*Ranquear os melhores ninhos (soluções) e encontre o melhor ninho atual.*

**Até critério de parada atingido**

**Fim**

Figura 2.4- Pseudocódigo Genérico do Algoritmo Baseado na Reprodução dos Pássaros Cuco (Yang, 2011)

A seguir serão mostrados separadamente os conceitos envolvidos na busca por novos ninhos, avaliação e critério de parada.

### **2.4.3 Busca por Novos Ninhos**

#### **2.4.3.1 Intensificação da Busca**

Alguns estudos indicam que muitos animais procuram alimento através de passeios aleatórios, tipicamente, executados por Voos de Lévy (Brown, Liebovitch e Glendon, 2007) e (Reynolds e Frye, 2007).

Os Voos de Lévy resumidamente são passeios aleatórios cujos passos são calculados baseados na Distribuição de Lévy que é uma distribuição de probabilidade com variância infinita. Do ponto de vista da exploração do espaço de busca, os Voos de Lévy permitem que essa busca seja mais diversificada. Assim, a probabilidade de se retornar a um ponto do espaço de busca já visitado é baixa.

A formulação original do *Cuckoo Search* (Yang e Deb, 2010) propõe como intensificação do processo solução a busca entre as regiões vizinhas à melhor solução corrente

através de Voos de Lévy com um comprimento de passeio segundo as expressões (2.6) à (2.11).

$$s = 0,01 \frac{u}{|z|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (2.6)$$

$$u \sim N(0, \sigma_u^2) \quad (2.7)$$

$$z \sim N(0, \sigma_z^2) \quad (2.8)$$

$$\sigma_u = \left( \frac{\Gamma(1 + \beta) \operatorname{sen} \left( \frac{\pi\beta}{2} \right)}{\Gamma \left( \frac{1 + \beta}{\alpha} \right) \beta 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.9)$$

$$\sigma_z = 1 \quad (2.10)$$

$$\Gamma(h) = \int_0^{\infty} (y^{h-1} e^{-y}) dy \quad (2.11)$$

Onde:

- $s$ : Representa o comprimento do passo;
- $\beta$ : Representa um número real no intervalo [1,2]
- $u$ : Representa uma direção aleatória no plano;
- $z$ : Representa uma direção aleatória no plano ortogonal a  $u$ ;
- $\sigma_u$ : Representa a o desvio padrão na direção  $u$ ;
- $\sigma_z$ : Representa a desvio padrão na direção  $z$ ;
- $N(0, \sigma_u^2)$ : Representa uma distribuição normal com média zero e variância  $\sigma_u^2$  na direção  $u$
- $N(0, \sigma_z^2)$ : Representa uma distribuição normal com média zero e variância  $\sigma_z^2$  na direção  $z$
- $\Gamma$ : Representa a função de Distribuição de Probabilidade Gamma
- $h$ : Representa um número real
- $y$ : Representa o conjunto domínio real do passeio;

Na formulação original, é considerada uma constante multiplicativa (0,01) no comprimento dos passos dos Voo de Lévy como mostrado na equação (2.6). No entanto, estudos como os de (Walton *et al.*, 2011) foram realizados no sentido de tornar essa constante multiplicativa variável de acordo com o processo de convergência da solução.

---

Em (Walton *et al.*, 2011), o valor dessa constante é reduzido de acordo com o aumento do número de iterações executadas. Assim, tem-se uma intensificação da busca ao redor das soluções obtidas. Com essa estratégia foi verificado um aumento da eficiência da metaheurística.

O presente trabalho, todavia, para uma análise comparativa no desempenho das metodologias bio-inspiradas em uma formulação básica, considerou o comprimento dos passos de acordo com a equação (2.6).

#### **2.4.3.2 Diversificação da Busca**

A maioria das metaheurísticas tem um processo de diversificação da busca pela solução do problema de otimização a fim de evitar convergência prematura para um ótimo local.

O processo de diversificação original do Método de Reprodução dos Pássaros Cuco proposto por (Yang e Deb, 2010) é baseado no abandono de ninhos (soluções) descobertos pela ave hospedeira segundo uma probabilidade  $p_a$ , como descrito no pseudocódigo da Figura 2.4. Assim novas soluções aleatórias podem ser geradas. A expressão (2.12) determina o critério probabilístico de abandono das soluções:

$$N(0,1) > p_a \tag{2.12}$$

Onde:

$N(0,1)$ : Representa uma distribuição normal de probabilidade com média zero e desvio padrão unitário;  
 $p_a$ : Representa um número real no intervalo  $[0,1]$ ;

#### **2.4.4 Avaliação**

A avaliação da qualidade dos ninhos é realizada através do cálculo do valor da função objetivo formulada para o problema de otimização.

---

### **2.4.5 Critério de Parada**

O critério de parada para o Método Baseado na Reprodução dos Pássaros Cuco, assim como nas demais metaheurísticas, é definido previamente. Os critérios de paradas comumente utilizados em soluções de problemas de otimização:

- Tolerância atingida para a função objetivo;
- Número máximo de gerações (iterações) atingido;
- Tempo máximo atingido.

## **2.5 Sumário do Capítulo**

O Capítulo 2 apresentou os principais conceitos envolvidos na modelagem matemática dos Algoritmos Bio-inspirados que serão utilizados na solução do problema de otimização formulado nesta dissertação para a resolução do restabelecimento de Sistemas Elétricos de Distribuição. Os métodos bio-inspirados considerados foram o Algoritmo Genético, o Método Baseado na Eco Localização de Morcegos e o Método Baseado na Reprodução dos Cucos..

Neste capítulo, foram evidenciadas algumas considerações adotadas para implementação das metodologias bio-inspiradas utilizadas. Uma análise comparativa do desempenho de cada um desses métodos aplicados à solução do problema de Restabelecimento será apresentada no Capítulo 4.

---

## Capítulo 3. -

# Metodologia Proposta

### 3.1 Considerações Iniciais

O objetivo principal de um procedimento de restabelecimento de energia em um SED é garantir a restauração da maior quantidade de carga possível levando em conta as restrições operativas da rede bem como a existência de cargas prioritárias como: hospitais, delegacias, etc.

É importante ressaltar que o tempo necessário para a re-energização da área isolada após uma contingência também deve ser minimizado. Isso implica dizer que as concessionárias de energia devem buscar as adequações de suas metodologias de restabelecimento para a melhoria dos indicadores de continuidade.

Nesse trabalho é proposto um algoritmo multi-estágio de restabelecimento do sistema de distribuição de energia elétrica que têm como objetivo recompor o sistema, após a ocorrência de um defeito, restaurando a maior quantidade de carga possível. Dessa forma, o algoritmo considera, inicialmente, a ocorrência de um defeito em um ou mais ramos do sistema e quando isso ocorre o sistema de proteção desliga automaticamente toda região a jusante do dispositivo de proteção. Posteriormente, o ramo defeituoso é localizado e retirado do sistema.

O algoritmo é baseado, no primeiro estágio, em uma modelagem multi-objetiva utilizando técnicas bio-inspiradas para a determinação da configuração final do sistema a fim de maximizar o fornecimento de energia atendendo às restrições operativas, mantendo a radialidade e considerando a possível existência de consumidores prioritários.

No segundo estágio, é determinada a sequência de chaveamento ótima que leve o sistema de um estado sob contingência para um estado restabelecido. Nesse estágio são considerados a presença de consumidores prioritários e os tempos de chaveamento (muito

---

importantes quando existem chaves operadas manualmente no SED). Caso sejam necessários são realizados cortes de carga discretos para cada manobra determinada no estágio anterior.

### **3.2 Teoria de grafo aplicada ao problema de restabelecimento**

Desde de 1960, anualmente, vários trabalhos são publicados na área de teoria de grafos (Gross e Yellen, 2003).

Grafo pode ser definido como qualquer objeto matemático envolvendo pontos e suas conexões (Gross e Yellen, 2003).

Em Sistema Elétricos de Energia as conexões de rede podem ser, representadas do ponto de vista matemático, utilizando teoria de grafos.

No processo de restabelecimento de sistemas de distribuição é necessário identificar as barras isoladas após a ocorrência de um defeito. Durante a solução do problema é necessário também verificar a formação de laços no sistema, pois a radialidade é uma restrição. Dessa forma, todas essas questões podem ser resolvidas utilizando técnicas apropriadas de teoria de grafos.

Por ser de grande conhecimento acadêmico as aplicações e técnicas de teoria de grafos em sistemas de potência, iremos abordar apenas alguns algoritmos e formulações que foram utilizadas nessa dissertação.

#### **3.2.1 Identificação de Barras Ilhadas no Sistema**

É muito importante, no problema de restabelecimento de SED saber quais são as barras que estão isoladas, ou seja, sem alimentação, e os circuitos atingidos após a ocorrência e um defeito. Para tanto, deve-se montar a árvore do sistema, tendo como nó raiz a subestação e as barras que não pertencem a essa árvore são as barras ilhadas do sistema (Borges, 2012).

Esta rotina, também pode ser entendida como um algoritmo que determina a conectividade do sistema uma vez que se existir alguma barra que não é conectada à nenhuma outra, diz-se de que o sistema é não conexo e a barra está isolada ou ilhada.

A Figura 3.1 ilustra um sistema elétrico de distribuição em que a barra 1 é a subestação e existe um defeito entre as barras 1 e 5. Dessa forma, após a atuação da proteção do sistema as barras 5, 6 e 7 ficam desenergizadas.

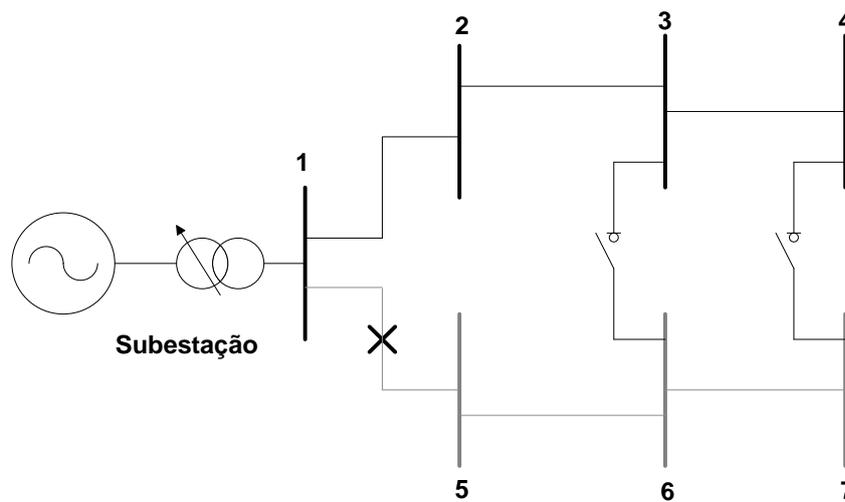


Figura 3.1- Sistema Exemplo com Defeito entre as Barras 1 e 5

Na Figura 3.2 encontra-se a árvore da rede ilustrada na Figura 3.1. Nela é possível perceber que as barras 5, 6 e 7 que foram desenergizadas, correspondem aos nós ilhados do grafo.

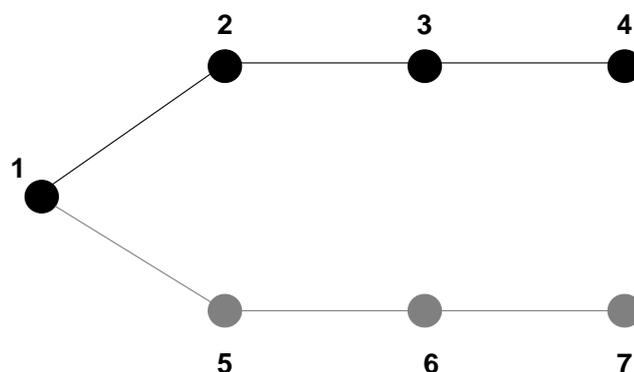


Figura 3.2- Árvore do Sistema Exemplo Contendo Defeito entre as Barras 1 e 5

Dessa forma, para a determinação automática das barras isoladas em um sistema de distribuição, basta a implementação de um algoritmo de busca em árvore que verifique a conectividade de cada barra em relação à subestação.

---

### 3.2.2 Verificação da Formação de Laços no Sistema

Em um SED a restrição de radialidade é imperativa, dessa forma, em um problema de restabelecimento, para cada chave que for fechada é necessário verificar se existe a formação de algum laço e posteriormente desfazê-lo com a abertura de outra chave.

Muitos métodos da literatura utilizam uma análise sobre a matriz incidência do sistema para a determinação dos laços (Balabanian e Bickart, 1981) e, posteriormente, o algoritmo *Dijkstra* para a determinação do ramo a ser aberto (Borges, 2012).

Nesse trabalho é utilizado o algoritmo Árvore Geradora Mínima (Graham e Hell, 1985) em combinação com o índice de sensibilidade baseado em (Raju e Bijwe, 2008) para a determinação da chave a ser aberta, caso algum laço no sistema seja formado. A explicação da técnica utilizada será detalhada à seguir.

#### 3.2.2.1 Árvore Geradora Mínima

O algoritmo solução para a determinação da Árvore geradora mínima (do inglês: *Minimum Spanning Tree*) de um grafo, aparentemente, foi proposto por diferentes autores (Graham e Hell, 1985). No entanto, é prática padrão referir-se aos trabalhos de (Kruskal, 1956) e (Prim, 1957) como as fontes principais que originaram o algoritmo.

O Algoritmo de determinação da Árvore Geradora Mínima pode ser descrito da seguinte forma: *Dado um grafo cujos pesos das arestas/ramos são não negativos ordene as arestas do grafo em ordem crescente segundo seus respectivos pesos; examine cada aresta do conjunto ordenado, caso ela não gere um ciclo adicione-a à árvore, caso contrário descarte-a. Continue o processo até o número de arestas adicionadas seja igual ao número de vértices menos 1.*

O entendimento do algoritmo pode ser facilitado visualizando um caso genérico proposto no grafo da Figura 3.3.

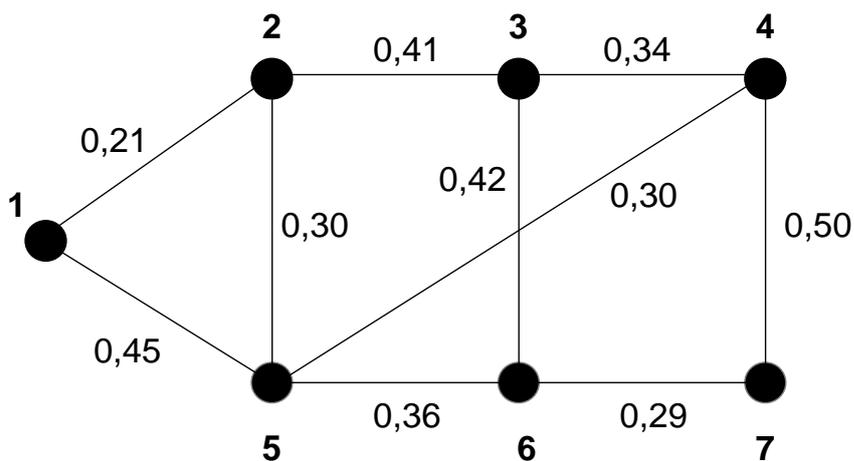


Figura 3.3: Grafo Exemplo

As aresta do grafo da Figura 3.3. ordenadas de maneira crescente é mostrada na Tabela 3.1

Tabela 3.1: Ordenação Crescente das Arestas do Grafo

Aresta	Peso	Gera Ciclo?
(1,2)	0,21	Não
(6,7)	0,29	Não
(2,5)	0,30	Não
(4,5)	0,30	Não
(3,4)	0,34	Não
(5,6)	0,36	Não
(2,3)	0,41	<b>Sim</b>
(3,6)	0,42	<b>Sim</b>
(4,7)	0,50	<b>Sim</b>

Seguindo o algoritmo explicitado anteriormente a Árvore Geradora Mínima é mostrada na Figura 3.4.

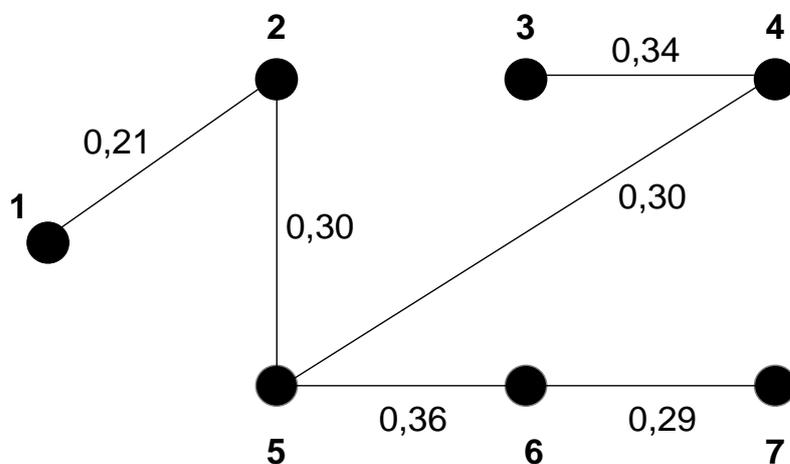


Figura 3.4: Árvore Mínima Gerada a partir do Grafo Exemplo da Figura 3.3

---

É sabido pelo trabalho (Graham e Hell, 1985) que a melhor implementação do algoritmo que determina a Árvore Geradora Mínima tem seu tempo computacional calculado através da expressão (3.1).

$$t = a \log(vet) \quad (3.1)$$

Onde:

- t*: Representa o tempo computacional em segundos;  
*a*: Representa o número de arestas do grafo;  
*vet*: Representa o número de vértices do grafo.

### 3.2.2.2 Determinação do Peso dos Ramos

O algoritmo de determinação da Árvores Geradora Mínima descrito na seção anterior, necessita, como foi visto, de que cada ramo/aresta do grafo tenha um peso não negativo associado.

A vasta aplicação do algoritmo descrito está justamente na variedade de interpretações a que se pode atribuir aos pesos das arestas. Por exemplo, pode ser: a distância física entre duas cidades distintas, a impedância elétrica entre barramentos de uma rede. Todas essas atribuições estão associadas com a modelagem matemática do problema a ser resolvido.

No presente trabalho, foi utilizado o Índice de Sensibilidade baseado no trabalho de (Raju e Bijwe, 2008) com o valor do peso para cada ramo do grafo que representa a rede de distribuição.

(Raju e Bijwe, 2008) propõem um método de reconfiguração em redes de distribuição de energia elétrica partindo de um sistema completamente radial no qual as chaves candidatas a serem abertas são ranqueadas conforme um índice de sensibilidade. Basicamente, o índice significa a taxa de variação das perdas do sistema em relação à variação da impedância do ramo ao qual a chave está conectado. A equação (3.2) resume, em termos matemáticos, o objetivo do método anteriormente citado:

$$\min \Delta P_L = \frac{\delta P_L}{\delta |Z_{ii}|} \Delta Z_{ii}, i \in \text{ao conjunto de linhas candidatas do sistema} \quad (3.2)$$

Onde:

- 
- $P_L$ : Representa as perdas no sistema;  
 $|Z_{ii}|$ : Representa o módulo da impedância do ramo  $i$ .

O algoritmo é composto de dois estágios, porém o índice é calculado apenas no primeiro estágio de cada iteração e é obtido pela seguinte expressão linearizada do problema básico de fluxo de potência (MONTICELLI, 1983):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Onde:

- $\Delta P$ : Representa o vetor de variação da potência ativa líquida nas barras do sistema;  
 $\Delta Q$ : Representa o vetor de variação da potência reativa líquida nas barras do sistema;  
 $J$ : Representa a matriz Jacobiana do sistema;  
 $\Delta \theta$ : Representa o vetor de variação do ângulo das tensões complexas das barras do sistema;  
 $\Delta V$ : Representa o vetor de variação do módulo das tensões complexas das barras do sistema.

A equação (3.3) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta Y_{PQ} = J \Delta X \quad (3.4)$$

Onde:

- $\Delta Y_{PQ}$ : Representa o vetor de resíduos;  
 $\Delta X = [\Delta \theta \quad \Delta V]^T$ : Representa o vetor atualização das variáveis de estado.

A equação para a avaliação do índice de sensibilidade é obtida pela extensão da expressão (3.4) adicionando a variação do módulo da impedância para cada ramo do sistema como uma variável de controle. Portanto, a equação resultante pode ser escrita:

$$\Delta Y_{PQ} = J \Delta X + M \Delta Z_l \quad (3.5)$$

Onde:

- $Z_l$ : Representa o vetor de módulos das impedâncias dos ramos;  
 $M$ : Representa a matriz de derivadas parciais das potências líquidas injetadas (ativa/reactiva) com relação à variável de controle ( $|Z_l|$ ).

A matriz  $M$  é retangular de ordem  $2n_{barras} \times n_{linhas}$  sua montagem é realizada partindo da consideração imposta pela expressão (3.5).

$$\frac{x_l^{km}}{r_l^{km}} = constante \quad (3.6)$$

Dessa forma, para ramo dos sistema pode-se escrever às relações:

$$g_l^{km} = \frac{\cos \varphi_l^{km}}{|Z_l^{km}|} \quad (3.7)$$

$$b_l^{km} = -\frac{\text{sen } \varphi_l^{km}}{|Z_l^{km}|} \quad (3.8)$$

$$\varphi_l^{km} = \tan^{-1} \frac{x_l^{km}}{r_l^{km}} \quad (3.9)$$

Onde:

- $x_l^{km}$ : Representa a reatância do ramo  $km$  do sistema;
- $r_l^{km}$ : Representa a resistência do ramo  $km$  do sistema;
- $g_l^{km}$ : Representa a condutância do ramo  $km$  do sistema;
- $b_l^{km}$ : Representa a susceptância do ramo  $km$  do sistema;
- $\varphi_l^{km}$ : Representa o ângulo da impedância complexa do ramo  $km$  do sistema.

As relações (3.7)-(3.9) podem ser substituídas nas expressões das derivadas parciais das potências líquidas injetadas (ativa/reactiva) com relação à variável de controle ( $|Z_l|$ ). Tais derivadas na realidade, resumem-se, tão somente, às taxas de variação dos fluxos nas linhas do sistema em relação ao módulo da impedância complexa da respectiva linha. Portanto, só existirá o elemento  $km$  na matriz (M) caso exista fisicamente a ligação entre as barras  $k$  e  $m$ .

Dessa forma, tem-se:

$$M_{km}^{Pk} = \frac{\partial P_{km}}{\partial |Z_l^{km}|} = V_k^2 \frac{\cos \varphi_l^{km}}{|Z_l^{km}|} - V_k V_m \frac{\cos \varphi_l^{km}}{|Z_l^{km}|} \cos \theta_{km} + V_k V_m \frac{\text{sen } \varphi_l^{km}}{|Z_l^{km}|} \text{sen } \theta_{km} \quad (3.10)$$

$$M_{mk}^{Pm} = \frac{\partial P_{mk}}{\partial |Z_l^{km}|} = V_m^2 \frac{\cos \varphi_l^{km}}{|Z_l^{km}|} - V_k V_m \frac{\cos \varphi_l^{km}}{|Z_l^{km}|} \cos \theta_{km} - V_k V_m \frac{\text{sen } \varphi_l^{km}}{|Z_l^{km}|} \text{sen } \theta_{km} \quad (3.11)$$

$$M_{km}^{Qk} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial |Z_l^{km}|} = -V_k^2 \left( -\frac{\text{sen } \varphi_l^{km}}{|Z_l^{km}|} + b_{km}^{sh} \right) - V_k V_m \frac{\text{sen } \varphi_l^{km}}{|Z_l^{km}|} \cos \theta_{km} - V_k V_m \frac{\cos \varphi_l^{km}}{|Z_l^{km}|} \text{sen } \theta_{km} \quad (3.12)$$

$$M_{mk}^{Qm} = \frac{\partial Q_{mk}}{\partial |Z_l^{km}|} = -V_m^2 \left( -\frac{\text{sen } \varphi_l^{km}}{|Z_l^{km}|} + b_{km}^{sh} \right) - V_k V_m \frac{\text{sen } \varphi_l^{km}}{|Z_l^{km}|} \cos \theta_{km} + V_k V_m \frac{\cos \varphi_l^{km}}{|Z_l^{km}|} \text{sen } \theta_{km} \quad (3.13)$$

$$M_{kk}^{Pk} = 0 \quad (3.14)$$

$$M_{kk}^{Qk} = 0 \quad (3.15)$$

Onde:

- $M_{km}^{Pk}$ : Representa o elemento  $km$  da matriz M em relação à potência ativa;
- $M_{mk}^{Pm}$ : Representa o elemento  $mk$  da matriz M em relação à potência ativa;
- $M_{km}^{Qk}$ : Representa o elemento  $km$  da matriz M em relação à potência reativa;
- $M_{mk}^{Qm}$ : Representa o elemento  $mk$  da matriz M em relação à potência reativa;
- $M_{kk}^{Pk}$ : Representa o elemento  $kk$  da matriz M em relação à potência ativa;
- $M_{kk}^{Qk}$ : Representa o elemento  $kk$  da matriz M em relação à potência reativa;

---

$P_{km}$ :	Representa o fluxo de potência ativa no ramo $km$ do sistema;
$Q_{km}$ :	Representa o fluxo de potência reativa no ramo $km$ do sistema;
$ Z_l^{km} $ :	Representa o módulo da impedância complexa entre no ramo $km$ do sistema;
$V_k$	Representa o módulo da tensão complexa na barra $k$ do sistema;
$\theta_{km}$	Representa a diferença angular entre as barras $k$ e $m$ do sistema.

Na convergência do fluxo de potência, dado que a tolerância é pequena, geralmente da ordem de  $10^{-4}$ , pode-se fazer a consideração para a equação (3.5):

$$\Delta Y_{PQ} = 0 \quad (3.16)$$

A consideração (3.16) possibilita a que a equação (3.5) seja reescrita da seguinte forma:

$$\Delta X = J^{-1}[-M\Delta Z_l] \quad (3.17)$$

É possível determinar uma expressão linear que relaciona as variáveis de estados, variáveis de controle, com a variável que se deseja controlar no sistema da seguinte maneira:

$$\Delta h = J_{hx}\Delta X + J_{hu}\Delta Z_l \quad (3.18)$$

Onde:

$\Delta X$ :	Representa o vetor de variáveis de estado do sistema $[\Delta\theta \quad \Delta V]^T$ ;
$\Delta Z_l$ :	Representa o vetor de variação do módulo das impedâncias dos ramos do sistema;
$J_{hx}$ :	Representam a submatriz de derivadas parciais da variável controlada em relação às variáveis de estado;
$J_{hu}$ :	Representam a submatriz de derivadas parciais da variável controlada em relação às variáveis de controle.

Substituindo a equação (3.17) na equação (3.18), tem-se:

$$\Delta h = J_{hx}(J^{-1}[-M\Delta Z_l]) + J_{hu}\Delta Z_l \quad (3.19)$$

No método propostos originalmente por (Raju e Bijwe, 2008) o objetivo é a minimização dos perdas do sistema de distribuição. Dessa forma, a variável de controle resume-se nas perdas do sistema. Essa consideração determina a reescrita da equação (3.19) através da equação (3.20):

$$\Delta P_L = \left[ \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \quad \frac{\partial P_L}{\partial V} \right] (J^{-1}[-M\Delta Z_l]) + \left[ \frac{\partial P_L}{\partial Z_l} \quad \frac{\partial P_L}{\partial Z_l} \right] \Delta Z_l \quad (3.20)$$

Reorganizando os termos da equação (3.20):

$$\Delta P_L = \left( \left[ \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \quad \frac{\partial P_L}{\partial V} \right] [J^{-1}(-M)] + \left[ \frac{\partial P_L}{\partial Z_i} \quad \frac{\partial P_L}{\partial Z_l} \right] \right) \Delta Z_i \quad (3.21)$$

Através da equação (3.21) é possível definir o seguinte índice de sensibilidade para o sistema:

$$\Delta SP_L = \left( \left[ \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \quad \frac{\partial P_L}{\partial V} \right] [J^{-1}(-M)] + \left[ \frac{\partial P_L}{\partial Z_i} \quad \frac{\partial P_L}{\partial Z_l} \right] \right) \quad (3.22)$$

Onde:

$\Delta SP_L$ : Representa o vetor linha com os índices de sensibilidades dos ramos do sistema em relação à variação das perdas;

No presente trabalho foi utilizado como pesos para o grafo que representa o sistema o seguinte índice mostrado na expressão (3.23) :

$$\rho_i = \frac{1}{|\Delta SP_{L_i}|} \quad (3.23)$$

Onde:

$\rho_i$ : Representa o valor do peso do ramo  $i$  no grafo do sistema;  
 $|\Delta SP_{L_i}|$ : Representa o módulo do índice de sensibilidade do ramo  $i$  calculado pela expressão (3.22).

O valor do peso do ramo é inversamente proporcional à sensibilidade de (Raju e Bijwe, 2008), pois aquele ramo a ser aberto, indicado por um menor índice de sensibilidade, deve ter o maior valor para o algoritmo de Geração da Árvore Mínima como mostrado na seção anterior 3.2.2.1.

Importante salientar que o cálculo do índice de sensibilidade para a determinação dos pesos das arestas do grafo irá ocorrer se para uma determinada manobra de fechamento de uma chave NA do sistema houver formação de um laço. Como essa técnica tende a manter a radialidade do sistema baseando-se em uma sensibilidade para a minimização de perdas é possível afirmar que essa metodologia também irá contribuir para uma melhora no perfil de tensão da rede de distribuição em questão.

### 3.3 Formulação do Problema de Otimização

Matematicamente, o problema de otimização que descreve a proposta do restabelecimento do SED foi formulado por (Borges, 2012) a partir das equações (3.24)-(3.33):

$$Max\ FOB = \sum_{k \in \Omega_r} (\gamma_k Pl_k) \quad (3.24)$$

$$s. a \quad (3.25)$$

$$Pg_k - Pl_k + \sum_{m \in \Omega_k} CH_{km} P_{km} = 0 \quad (3.26)$$

$$Qg_k - Ql_k + \sum_{m \in \Omega_k} CH_{km} Q_{km} = 0 \quad (3.27)$$

$$CH_{km} \in \mathbb{Z} \setminus CH_{km} = 0 \text{ ou } CH_{km} = 1 \quad (3.28)$$

$$\gamma_k \in \mathbb{Z} \setminus \gamma_k = 0 \text{ ou } \gamma_k = 1 \quad (3.29)$$

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (3.30)$$

$$Pg_k^{min} \leq Pg_k \leq Pg_k^{max} \quad (3.31)$$

$$Qg_k^{min} \leq Qg_k \leq Qg_k^{max} \quad (3.32)$$

$$0 \leq S_{km} \leq S_{km}^{max} \quad (3.33)$$

Onde:

$\Omega_r$ :	Representa o conjunto de barras na área(s) desenergizada(s);
$Pl_k$ :	Representa o módulo da potência ativa demandada na barra $k$ do sistema;
$Pg_k$ :	Representa o módulo da potência ativa gerada na barra $k$ do sistema;
$Ql_k$ :	Representa o módulo da potência reativa demandada na barra $k$ do sistema;
$Qg_k$ :	Representa o módulo da potência reativa gerada na barra $k$ do sistema;
$\gamma_k$ :	Representa a variável de decisão de corte de carga da barra $k$ do sistema;
$CH_{km}$ :	Representa a variável de decisão da posição da chave no ramo $km$ do sistema;
$V_k$ :	Representa o módulo da tensão complexa na barra $k$ do sistema;
$V_k^{min}, V_k^{max}$ :	Representam os limites de tensão na barra $k$ do sistema;
$Pg_k^{min}, Pg_k^{max}$ :	Representam os limites de potência ativa gerada na barra $k$ do sistema;
$Qg_k^{min}, Qg_k^{max}$ :	Representam os limites de potência reativa gerada na barra $k$ do sistema;
$P_{km}$ :	Representa o fluxo de potência ativa no ramo $km$ do sistema;
$Q_{km}$ :	Representa o fluxo de potência reativa no ramo $km$ do sistema;
$S_{km}$ :	Representa o fluxo de potência aparente no ramo $km$ do sistema;
$S_{km}^{max}$ :	Representa o limite máximo para o fluxo de potência aparente no ramo $km$ do sistema.

Subsequentemente, será descrita a técnica utilizada para a resolução do problema. Por se tratar de uma problema de programação não-linear inteiro misto onde as variáveis inteiras são definidas nas expressões (3.28) e (3.29), optou-se, nessa dissertação, por uma resolução

---

em dois estágios utilizando algoritmos bio-inspirados.

### 3.4 Resolução do Problema de Otimização

A complexidade do problema de otimização (3.24) fez com que uma abordagem em dois estágios fosse escolhida para sua resolução.

A seguir serão detalhadas as abordagens de ambos os estágios.

#### 3.4.1 Resolução do Primeiro Estágio

O primeiro estágio, consiste na resolução de um problema de otimização visando definir a configuração final do sistema, considerando as restrições: perdas do sistema; radialidade; limites operativos da rede (tensão nas barras / corrente nos ramos) e número de chaveamentos.

A presente dissertação, utiliza-se de três algoritmos bio-inspirados (Algoritmos Genéticos, Método Baseado na Eco Localização de Morcegos e Método Baseado na Reprodução dos Pássaros Cuco) para análise de suas respectivas eficiências computacionais na resolução do problema de otimização não-linear inteiro misto.

Inicialmente, é determinada a população inicial para o algoritmo bio-inspirado. Essa população consiste de uma matriz de ordem  $n_{indivíduos} \times n_{Chaves\ Monobráveis}$  cujos elementos (indivíduos) são números binários em que “1” representa que a chave manobrável está fechada e “0” está aberta.

Através de experimentação prática adotou-se a equação (3.34) para o número de indivíduos da população inicial:

$$n_{indivíduos} = int \times Chaves_{NA} \quad (3.34)$$

Onde:

$n_{indivíduos}$ : Representa o número total de indivíduos;  
 $Chaves_{NA}$ : Representa o número de chaves normalmente abertas do sistema;

---

*int* Representa um número inteiro entre [5,10] a depender da complexidade do sistema.

A matriz da população inicial inicializada para todos os sistemas utilizados na validação da metodologia proposta é composta por: configuração com todas as chaves fechadas, exceto aquelas manobradas para isolar a falta; configuração pós-falta (imediatamente após a falta ter sido isolada); combinação simples com o fechamento de uma chave normalmente aberta por vez; combinação simples com o fechamento de duas chaves normalmente abertas por vez e configurações randômicas para os indivíduos iniciais restantes.

É importante ressaltar que para sistemas de distribuição que possuam um grande número de chaves normalmente abertas ou cuja complexidade da rede é elevada, torna-se necessário inserir mais combinações de fechamento simultâneo de suas chaves de laço. Isso é relevante, porque, inicialmente, já garante mais caminhos alternativos para o método bio-inspirado, o que em casos de ocorrência de faltas onde um número grande de manobras de chaves de laço é necessário, os métodos de busca já possuem um ponto de partida mais favorável.

A Tabela 3.2 exemplifica uma população inicial gerada para o sistema exemplo da Figura 3.1 onde a falta se encontra no circuito 1-5.

Tabela 3.2: Exemplo de População Inicial com Codificação Binária para o Sistema da Figura 3.1  
(Matriz de Configuração dos Circuitos)

	Chaves Manobráveis							
	1-2	2-3	3-4	1-5	5-6	6-7	3-6	4-7
	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NA	NA
Indivíduos	1	1	1	0	1	1	1	1
	1	1	1	0	1	1	0	0
	1	1	1	0	1	1	1	0
	1	1	1	0	1	1	0	1
	1	1	1	0	1	1	1	1
	1	0	0	0	1	1	1	1
	0	1	1	0	1	1	1	1
	0	1	1	0	0	1	1	1
	1	0	1	0	0	1	1	1
	1	1	0	0	1	0	1	1
	1	1	1	0	1	1	1	1
	1	1	1	0	1	1	1	1
	1	0	1	0	1	1	1	0
	1	1	1	0	1	1	1	1
	0	1	1	0	1	1	1	0
	0	0	1	0	1	1	1	0
	1	1	1	0	1	0	1	0
	1	1	1	0	1	1	1	1
	1	0	1	0	1	1	0	1
	1	1	0	0	1	1	1	1

A modelagem dos indivíduos de forma binária é utilizada na resolução da função aptidão (3.39) através do Algoritmo Genético, pois nele é possível modelar cada indivíduo como um vetor binário.

O Método Baseado na Eco Localização de Morcego (*Bat Algorithm*) e o Método Baseado na Reprodução de Pássaros Cuco (*Cuckoo Search*) são técnicas bio-inspiradas, originalmente, utilizadas para um espaço de busca contínuo. Dessa forma, foi utilizada a função sigmoide apresentada na Figura 3.5 para converter os indivíduos em vetores binários.

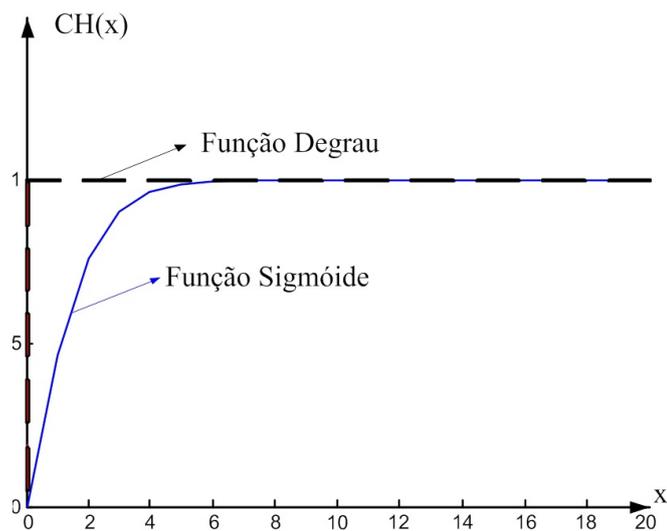


Figura 3.5: Função Sigmóide Utilizada

A equação (3.35) descreve a função sigmoide em termos matemáticos e as considerações (3.36) à (3.38) são as mesmas encontradas em: (Silva, da *et al.*, 2008), (Costa, 2008) e (Borges, 2012).

$$CH(x) = \frac{e^{\alpha x} - 1}{e^{\alpha x} + 1} \quad (3.35)$$

tal que:

$$CH(x) = 0 \text{ se } CH(x) < 0.95 \text{ e } CH(x) = 1 \text{ se } CH(x) \geq 0.95 \quad (3.36)$$

$$0 \leq x \leq 20 \quad (3.37)$$

$$\alpha = 1 \quad (3.38)$$

Onde:

- $CH(x)$ : Representa o estado da chave na forma binária;
- $x$ : Representa o valor agregado a chave de forma contínua para o intervalo considerado;
- $\alpha$ : Coeficiente da Função Sigmóide.

A matriz com a população inicial para os Métodos Baseado na Eco Localização (*Bat Algorithm*) de Morcego e na Reprodução de Pássaros Cuco (*Cuckoo Search*) é mostrada na Tabela 3.3Tabela 3.1.

Tabela 3.3: Exemplo de população inicial com codificação Real para o sistema da Figura 3.1

	Chaves Manobráveis							
	20-2	2-3	3-4	1-5	5-6	6-7	3-6	4-7
	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NA	NA
Indivíduos	20	20	20	0	20	20	20	20
	20	20	20	0	20	20	0	0
	20	20	20	0	20	20	20	0
	20	20	20	0	20	20	0	20
	20	20	20	0	20	20	20	20
	20	0	0	0	20	20	20	20
	0	20	20	0	20	20	20	20
	0	20	20	0	0	20	20	20
	20	0	20	0	0	20	20	20
	20	20	0	0	20	0	20	20
	20	20	20	0	20	20	20	20
	20	20	20	0	20	20	20	20
	20	0	20	0	20	20	20	0
	20	20	20	0	20	20	20	20
	0	20	20	0	20	20	20	0
	0	0	20	0	20	20	20	0
	20	20	20	0	20	0	20	0
	20	20	20	0	20	20	20	20
	20	0	20	0	20	20	0	20
	20	20	0	0	20	20	20	20

Dentro do processo de resolução da função aptidão, cada configuração (indivíduo) é analisada segundo uma rotina de ilhamento e é considerada apenas a parte conexa com a fonte. Isso porque, para a solução do algoritmo bio-inspirado são calculados Fluxos de Potência não linear, utilizando o método de *Newton-Raphson* em coordenadas polares (Monticelli, 1983).

Adicionalmente, para cada indivíduo que não é radial, é executada uma busca básica pela Árvore Mínima (Kruskal, 1956), utilizando como pesos dos ramos o índice mostrado na seção 3.2.2.2. Dessa forma, não é necessário, na presente metodologia, a adição de penalização para não-radialidade, o que diminui a complexidade da função multi-objetivo a ser otimizada e aumenta a busca em vizinhanças de soluções antes severamente penalizadas.

O índice da seção 3.2.2.2 foi utilizado, originalmente por (Raju e Bijwe, 2008) com a finalidade de reconfiguração do sistema de distribuição para a minimização de perdas. A intenção de usá-lo na presente metodologia é uma melhor sensibilidade na definição dos indivíduos radiais segundo o perfil de tensão, uma vez que em um sistema totalmente radial, quanto menores são suas perdas existe um tendência do melhoramento de seu perfil de tensão.

Finalmente, a avaliação de cada indivíduo é realizada segundo o cálculo da função (3.39) que representa a função multi-objetivo proposta neste trabalho.

$$Min\ FOB = 10^{-8} \cdot \left( \frac{Perdas}{P_{TOTAL}} + \sum_{k \in \Omega_r} (\alpha_k Pl_k^{isolada}) + \lambda_V \cdot |(V_k - V_k^{lim})| + \lambda_S \cdot |(S_{km} - S_{km}^{max})| + \lambda_{CH} \cdot n_{CH} \right) \quad (3.39)$$

$$Pg_k - Pl_k + \sum_{m \in \Omega_k} CH_{km} P_{km} = 0 \quad (3.40)$$

$$Qg_k - Ql_k + \sum_{m \in \Omega_k} CH_{km} Q_{km} = 0 \quad (3.41)$$

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (3.42)$$

$$Pg_k^{min} \leq Pg_k \leq Pg_k^{max} \quad (3.43)$$

$$Qg_k^{min} \leq Qg_k \leq Qg_k^{max} \quad (3.44)$$

$$0 \leq S_{km} \leq S_{km}^{max} \quad (3.45)$$

Onde:

<i>Perdas</i> :	Representa a potência de perdas do sistema para a configuração corrente;
$P_{TOTAL}$ :	Representa a potência ativa total do sistema;
$\alpha_k$ :	Representa o fator de prioridade (baixo = $10^3$ , médio = $10^5$ , alto = $10^7$ ) da carga $Pl_k$ a ser cortada;
$Pl_k^{isolada}$ :	Representa o da potência ativa da barra $k$ do sistema que não foi atendida;
$\lambda_V$ :	Representa o fator de inclusão da violação do limite de tensão nas barras ( $\lambda_V = 10^3$ );
$V_k$ :	Representa o módulo da tensão complexa na barra $k$ do sistema;
$V_k^{lim}$ :	Representa o limite (inferior/superior) de tensão na barra $k$ do sistema;
$\lambda_S$ :	Representa o fator de inclusão da violação do limite de fluxo de potência nos ramos ( $\lambda_S = 10^3$ );
$S_{km}$ :	Representa o fluxo de potência aparente no ramo $km$ do sistema;
$S_{km}^{max}$ :	Representa o limite máximo para o fluxo de potência aparente no ramo $km$ do sistema;
$\lambda_{CH}$ :	Representa o fator de inclusão do número de chaveamentos para se obter a configuração corrente ( $\lambda_{CH} = 1$ );
$n_{CH}$ :	Representa o número de chaveamentos para se obter a configuração corrente;
$\Omega_r$ :	Representa o conjunto de barras na área(s) desenergizada(s);
$Pl_k$ :	Representa o módulo da potência ativa demandada na barra $k$ do sistema;
$Pg_k$ :	Representa o módulo da potência ativa gerada na barra $k$ do sistema;
$Ql_k$ :	Representa o módulo da potência reativa demandada na barra $k$ do sistema;
$Qg_k$ :	Representa o módulo da potência reativa gerada na barra $k$ do sistema;
$V_k$ :	Representa o módulo da tensão complexa na barra $k$ do sistema;
$V_k^{min}, V_k^{max}$ :	Representam os limites de tensão na barra $k$ do sistema;
$Pg_k^{min}, Pg_k^{max}$ :	Representam os limites de potência ativa gerada na barra $k$ do sistema;
$Qg_k^{min}, Qg_k^{max}$ :	Representam os limites de potência reativa gerada na barra $k$ do sistema;
$P_{km}$ :	Representa o fluxo de potência ativa no ramo $km$ do sistema;
$Q_{km}$ :	Representa o fluxo de potência reativa no ramo $km$ do sistema;

---

$S_{km}$ : Representa o fluxo de potência aparente no ramo  $km$  do sistema;  
 $S_{km}^{max}$ : Representa o limite máximo para o fluxo de potência aparente no ramo  $km$  do sistema.

Os valores:  $\alpha_k, \lambda_V, \lambda_S, \lambda_{CH}$  foram obtidos a partir de simulação exaustiva e análise da qualidade dos resultados . A adequação de tais valores baseia-se impacto de cada parcela na função multi-objetivo é parte decisiva para uma boa convergência do estágio.

A constante  $10^{-8}$  que multiplica toda a função multi-objetivo é usada para manter o valor seu sempre no intervalo normalizado de [0,1] o que auxilia para a boa evolução das metodologias bio-inspiradas (Yang, 2011).

A Figura 3.6 mostra o fluxograma completo do primeiro estágio, anteriormente, descrito.

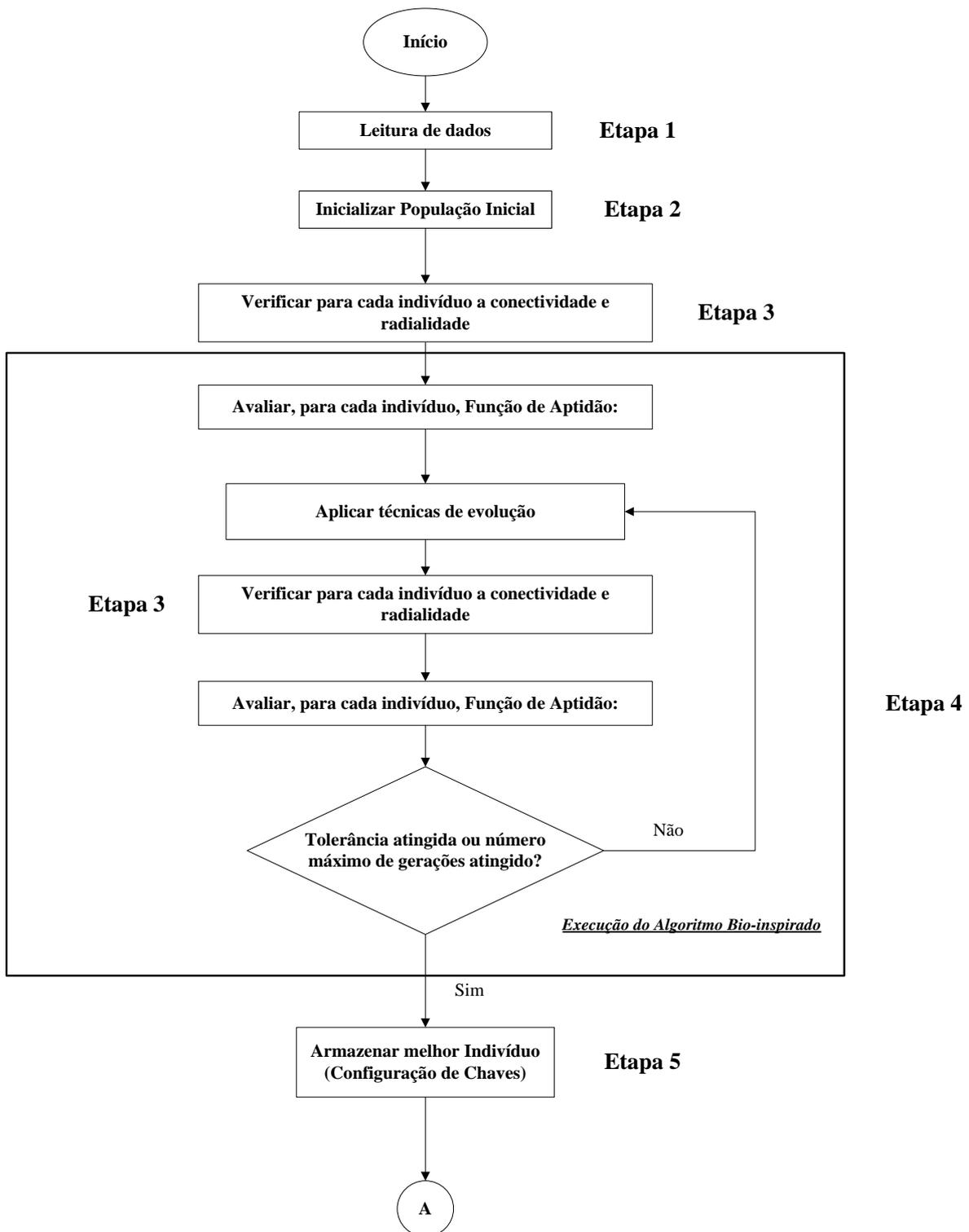


Figura 3.6: Fluxograma do 1º Estágio do Algoritmo de Restabelecimento

A seguir são detalhadas as etapas de 1 a 5 que constituem o primeiro estágio da metodologia proposta as quais já foram, de maneira geral, descritas anteriormente.

---

#### **3.4.1.1 Etapa 1**

A primeira etapa do primeiro estágio constitui a leitura dos dados do sistema pós isolamento da falta. Nela são indicados todos os dados globais das barras, circuitos e chaves, bem como os dados sobre a falta: linha(s) da falta, número de falta(s), barras atingidas pela falta.

#### **3.4.1.2 Etapa 2**

Esta etapa consiste na elaboração conveniente, como mostrado nas Tabela 3.2 e Tabela 3.3, da população inicial para inicialização do processo de busca da configuração restabelecida do sistema utilizando os algoritmos bio-inspirados.

#### **3.4.1.3 Etapa 3**

A Etapa 3 é a verificação da conectividade e radialidade para cada configuração gerada na população inicial. A partir da avaliação de conectividade são encontradas e separadas as barras que são conexas com a subestação e a avaliação da radialidade garante que todas as configurações a serem avaliadas serão radiais utilizando o algoritmo de Busca da Árvore Geradora Mínima.

Esta etapa é repetida dentro da Etapa 4 no processo de evolução dos indivíduos gerados pelos métodos bio-inspirados.

#### **3.4.1.4 Etapa 4**

O objetivo da quarta etapa é executar o algoritmo bio-inspirado utilizando a população inicial da Etapa 2, cujos indivíduos foram devidamente avaliados na Etapa 3.

Cada indivíduo é avaliado segundo a função aptidão (3.39) e novos indivíduos são criados de acordo com os critérios evolutivos de cada método bio-inspirado.

Os novos indivíduos, são avaliados por critérios de conectividade e radialidade (Etapa 3) a fim de que a função aptidão possa ser calculada *a posteriori*.

Esta etapa termina quando os critérios de convergência para o método bio-inspirado forem atingidos. Neste momento, a configuração final para o sistema restabelecido é obtida.

### 3.4.1.5 Etapa 5

Finalmente a Etapa 5 armazena a lista de chaves que foram manobradas para se chegar na configuração final da Etapa 4.

## 3.4.2 Resolução do Segundo Estágio

Esse estágio é iniciado com a configuração final determinada no primeiro estágio. A partir desse resultado são identificadas quais são as chaves NA que foram fechadas e as chaves NF que foram abertas em relação à configuração pós-falta.

Então, a sequência de chaveamento é determinada avaliando-se a função objetivo (3.46) a partir do fechamento simples de cada uma dessas chaves. Essa função objetivo visa a minimização do custo da energia não suprida a partir do fechamento da chave avaliada.

$$Min\ FOB = \left( \sum_{k \in \Omega_r} C_k \cdot t' \cdot \alpha_k \cdot Pl_k^{isolada} \right) + (V_{max} - V_{min}) \times \beta_{vio} \quad (3.46)$$

$$Pg_k - Pl_k + \sum_{m \in \Omega_k} CH_{km} P_{km} = 0 \quad (3.47)$$

$$Qg_k - Ql_k + \sum_{m \in \Omega_k} CH_{km} Q_{km} = 0 \quad (3.48)$$

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (3.49)$$

$$Pg_k^{min} \leq Pg_k \leq Pg_k^{max} \quad (3.50)$$

$$Qg_k^{min} \leq Qg_k \leq Qg_k^{max} \quad (3.51)$$

---

Onde:

$C_k$	Representa o custo da energia não suprida para a barra $k$ do sistema a ser cortada;
$t'$	Representa o tempo necessário para o restabelecimento da energia (manobra + mobilização de equipe);
$\alpha_k$ :	Representa o fator de prioridade (baixo = 0.5, médio = 1, alto = 100) da carga $Pl_k$ a ser cortada;
$Pl_k^{isolada}$	Representa o da potência ativa da barra $k$ do sistema que não foi atendida;
$V_{max}$	Representa a tensão máxima do sistema para a configuração com a chave
$V_{min}$	Representa a tensão mínima do sistema para a configuração com a chave
$\beta_{vio}$	Representa o fator de penalização do desvio de tensão ( $\beta_{vio} = 10^{-4}$ );
$\Omega_r$	Representa o conjunto de barras na área(s) desenergizada(s);
$Pl_k$ :	Representa o módulo da potência ativa demandada na barra $k$ do sistema;
$Pg_k$ :	Representa o módulo da potência ativa gerada na barra $k$ do sistema;
$Ql_k$ :	Representa o módulo da potência reativa demandada na barra $k$ do sistema;
$Qg_k$ :	Representa o módulo da potência reativa gerada na barra $k$ do sistema;
$V_k$ :	Representa o módulo da tensão complexa na barra $k$ do sistema;
$V_k^{min}, V_k^{max}$ :	Representam os limites de tensão na barra $k$ do sistema;
$Pg_k^{min}, Pg_k^{max}$ :	Representam os limites de potência ativa gerada na barra $k$ do sistema;
$Qg_k^{min}, Qg_k^{max}$ :	Representam os limites de potência reativa gerada na barra $k$ do sistema;
$P_{km}$ :	Representa o fluxo de potência ativa no ramo $km$ do sistema;
$Q_{km}$ :	Representa o fluxo de potência reativa no ramo $km$ do sistema;

Na função (3.52) a parcela  $(V_{max} - V_{min}) \times \beta_{vio}$  somente é calculada caso o limites de tensão seja violado no fechamento de uma chave. Isso é realizado, pois se o fechamento de duas chaves restabelecerem a mesma quantidade de carga em um mesmo intervalo de tempo o perfil de tensão pode ser usado no critério de escolha da chave mais adequada caso a manobra de ambas viole o limite de tensão da rede. Essa heurística é adotada no intuito de direcionar a escolha do circuito a ser fechado minimizando o corte de carga e, indiretamente, diminuir o fluxo máximo de potência no sistema.

O valor de  $\beta_{vio}$  foi obtido a partir de simulação exaustiva e análise da qualidade dos resultados de modo a adequar a inclusão do custo para perfil de tensão na função objetivo do segundo estágio. Um fluxo de potência é executado para avaliar o estado da rede e verificar se existe alguma violação de limites operativos.

O valor  $C_k$ , representado o custo da energia em cada barra no sistema, é um dado prévio do problema.

Um fluxo de potência é executado e caso haja violação dos limites operativos do sistema, o corte mínimo discreto de carga é determinado utilizando métodos bio-inspirados para resolver a função multi-objetivo (3.52).

$$\text{Min } FOB = 10^{-8} \left( \frac{Pl_{total}}{\sum_{k \in \Omega_r} (\gamma_k Pl_k)} + \lambda_V \cdot |V_k - V_k^{lim}| + \lambda_S \cdot |S_{km} - S_{km}^{max}| \right) \quad (3.52)$$

$$Pg_k - Pl_k + \sum_{m \in \Omega_k} CH_{km} P_{km} = 0 \quad (3.53)$$

$$Qg_k - Ql_k + \sum_{m \in \Omega_k} CH_{km} Q_{km} = 0 \quad (3.54)$$

$$\gamma_k \in \mathbb{Z} \setminus \gamma_k = 0 \text{ ou } \gamma_k = 1 \quad (3.55)$$

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (3.56)$$

$$Pg_k^{min} \leq Pg_k \leq Pg_k^{max} \quad (3.57)$$

$$Qg_k^{min} \leq Qg_k \leq Qg_k^{max} \quad (3.58)$$

$$0 \leq S_{km} \leq S_{km}^{max} \quad (3.59)$$

Onde:

- $\gamma_k$ : Representa a variável de decisão de corte de carga da barra  $k$  do sistema;
- $Pl_k$ : Representa o módulo da potência ativa demandada na barra  $k$  do sistema;
- $Pl_{total}$ : Representa o da potência ativa demandada total do sistema;
- $\lambda_V$ : Representa o fator de inclusão da violação do limite de tensão nas barras ( $\lambda_S = 10^3$ );
- $V_k$ : Representa o módulo da tensão complexa na barra  $k$  do sistema;
- $V_k^{lim}$ : Representa o limite (inferior/superior) de tensão na barra  $k$  do sistema;
- $\lambda_S$ : Representa o fator de inclusão da violação do limite de fluxo de potência nos ramos ( $\lambda_S = 10^3$ );
- $S_{km}$ : Representa o fluxo de potência aparente no ramo  $km$  do sistema;
- $S_{km}^{max}$ : Representa o limite máximo para o fluxo de potência aparente no ramo  $km$  do sistema;

A variável de decisão de corte  $\gamma_k$  será sempre unitária para cargas de alta prioridade. Essa medida garante que na etapa de corte de carga, um consumidor prioritário nunca terá seu fornecimento de energia cortado.

A determinação conveniente da população inicial para a resolução da função (3.52) será exemplificada no tutorial da seção 4.2.1. A codificação dos indivíduos: binária/contínua irá depender da forma em que é modelado o espaço de busca do algoritmo bio-inspirado. No presente trabalho, como já foi explicitado na seção 3.4.1, o Algoritmo Genético foi implementado com codificação binária, já o *Bat Algorithm* e *Cuckoo Search* foram codificados de maneira contínua [0,20] e sua discretização foi realizada a partir do resultado da função sigmoide mostrada na Figura 3.5.

---

Após a verificação de violação dos limites operativos da rede e corte discreto de carga, quando necessário, é verificado se o fechamento da chave NA formou um laço no sistema. Caso esse fechamento forme um laço, a chave NF determinada no primeiro estágio cuja abertura desfaz o laço é, então, manobrada.

Um novo fluxo de potência é executado para avaliar o estado da rede e verificar se existe alguma violação de limites operativos. Caso haja violação dos limites operativos, o corte discreto de carga é novamente determinado.

O segundo estágio é finalizado após todas as chaves armazenadas da configuração final do primeiro estágio serem manobradas.

Esse estágio é executado para determinar a sequência de chaveamento, levando em consideração o custo da energia não suprida do sistema. Tal consideração é necessária, pois possibilita inserir o tempo de manobra para chaves manuais remotas.

A Figura 3.7 ilustra o fluxograma completo do segundo estágio, anteriormente, descrito.

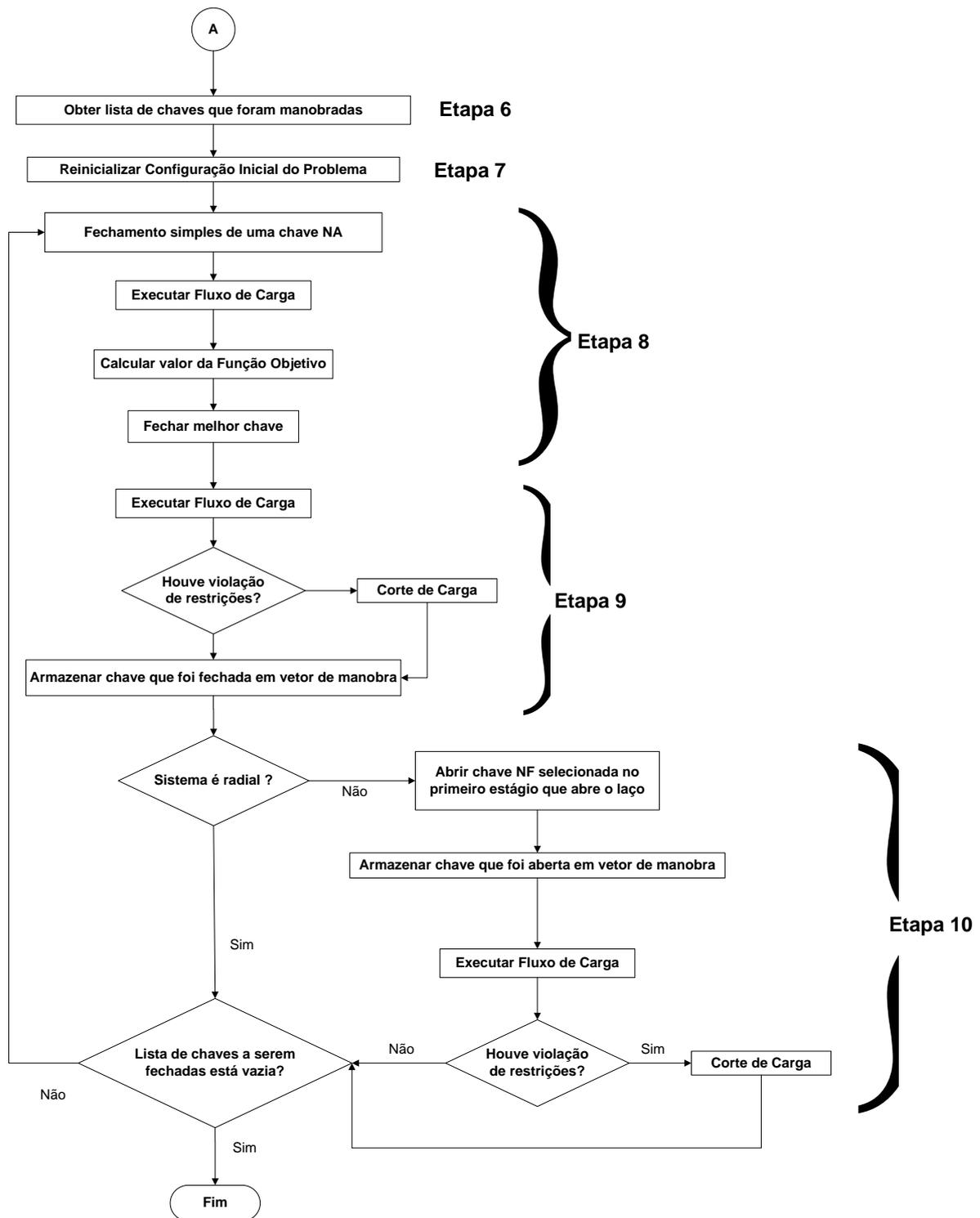


Figura 3.7: Fluxograma do 2º Estágio do Algoritmo de Restabelecimento.

A seguir são detalhadas as etapas de 6 a 10 que constituem o segundo estágio da metodologia proposta as quais já foram, de maneira geral, descritas anteriormente.

---

#### **3.4.2.1 Etapa 6**

Esta etapa executa o carregamento das chaves manobradas no primeiro estágio.

#### **3.4.2.2 Etapa 7**

Na Etapa 7 a configuração do sistema é mudada para o estado pós isolamento da falta para que a sequência de chaveamento possa ser implementada.

#### **3.4.2.3 Etapa 8**

Esta etapa realiza o chaveamento simples das chaves que foram selecionadas no primeiro estágio para serem fechadas.

Um fluxo de potência é calculado para possibilitar a avaliação de cada chave mediante a função (3.46). A chave a testada que determina o menor valor do custo da energia não suprida será fechada nesta etapa.

Como mostrado na Figura 3.7 essa etapa é executada de forma recursiva até que todas as chaves a serem fechadas tenham sido manobradas

#### **3.4.2.4 Etapa 9**

A Etapa 9 é realizada após o fechamento ou abertura de qualquer chave para verificar se há violação nas restrições operativas do sistema. Essa verificação é realizada através do cálculo de um fluxo de potência com a configuração atual da rede onde as tensões nas barras e os fluxos nas linhas são avaliados segundo seus limites.

Caso algum limite seja violado são utilizadas técnicas bio-inspiradas para a resolução da função multi-objetivo (3.52) para a minimização do corte discreto de carga.

---

### 3.4.2.5 Etapa 10

Na Etapa 10 é verificado se o fechamento da Etapa 8 gerou um laço no sistema. Caso haja formação de laço, será aberta a chave NF selecionada no primeiro estágio e armazenada na lista da Etapa 5 que desfaz o laço formado.

### 3.4.2.6 Fim

O segundo estágio da metodologia proposta termina quando a lista de chaves a serem manobradas, selecionadas no primeiro estágio, está vazia. Isto é, quando todas as chaves já foram manobradas pelos critérios do segundo estágio.

## 3.5 Sumário do Capítulo

O Capítulo 3 mostrou a metodologia multi-estágio proposta para o restabelecimento de sistemas de distribuição com o objetivo de minimizar e energia não suprida do sistema, atendo as restrições operativas e levando em conta a prioridade dos consumidores.

O primeiro estágio visa a obtenção das chaves de laço a serem fechadas no sistema a partir da configuração final contida na solução da função multi-objetivo de minimização da energia não suprida.

O segundo estágio determina a sequencia de chaveamento necessária utilizando Teoria de Grafos para identificar as barras ilhadas do sistema e para indicar quais chaves devem ser abertas caso haja formação de laços no processo de manobra.

O algoritmo proposto utiliza técnicas bio-inspiradas para a solução de funções multi-objetivas:

- Primeiro estágio: minimização da energia não suprida, considerando a existência de cargas prioritárias, as perdas do sistema, o número de chaveamentos e os limites operativos do sistema;

- 
- Segundo estágio: corte discreto de carga quando necessário após cada chaveamento do sistema, caso haja violação de limites operativos.

Matematicamente, são utilizados Fluxo de Potência não linear baseado no Método de *Newton Raphson* em coordenadas polares no processo de cálculo das funções multi-objetivos.

Por fim, cita-se como contribuições não encontradas na literatura as seguintes características da metodologia proposta apresentadas neste capítulo:

- Utilização da técnica: Árvore Geradora Mínima juntamente com cálculo apropriado de índice de sensibilidade, para garantir que todas as configurações avaliadas durante o processo solução do primeiro estágio sejam radiais. Esta consideração, não só diminui a complexidade da função multi-objetivo, pela retirada da penalização por não radialidade, como também auxilia na convergência da solução final;
- Modelagem simultânea de: consumidores prioritários, limites operativos da rede (corrente nos circuitos e tensão nas barras) e número mínimo de chaveamentos;
- Consideração do cálculo do custo da energia não suprida para a determinação da sequência de chaveamento no segundo estágio. Isso torna a metodologia proposta adequada tanto para sistemas de distribuição que possuem chaves/religadores operadas remotamente (tempo de manobra desprezado), quanto para sistema que possuem chaves/religadores operados manualmente (tempo de manobra tem de ser considerado).
- Modelagem do corte mínimo discreto de carga por chaveamento.

---

# Capítulo 4. -

## Estudo de Casos

### 4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentados os resultados da aplicação do algoritmo na seguinte ordem: primeiramente será realizado um passo a passo com o sistema IEEE 16 Barras (Civanlar *et al.*, 1988) para uma melhor explicação a respeito da metodologia em questão; posteriormente serão mostrados os resultados para os seguintes sistemas: IEEE 33 Barras de (Baran e Wu, 1989) e o sistema de distribuição real de 476 barras mostrado pela primeira vez em (Gomes *et al.*, 2006).

As simulações foram conduzidas utilizando a plataforma MatLab® em um computador Intel Core i7 2.93 GHz com 8GB de RAM e um sistema operacional Windows 7 64-bit.

### 4.2 Sistema Teste 1: IEEE 16 Barras

O sistema de IEEE 16 Barras proposto por (Civanlar *et al.*, 1988) é composto por 14 barras de carga e 3 alimentadores de 23 kV carga total de 28,7 MW e 17,3 MVar e possui um total de 13 chaves normalmente fechadas e 3 chaves de interconexão.

A Figura 4.1 ilustra a configuração inicial proposta por (Civanlar *et al.*, 1988) em que os circuitos representados por linhas contínuas são as chaves normalmente fechadas (NF) e os circuitos tracejados são as chaves normalmente abertas (NA).

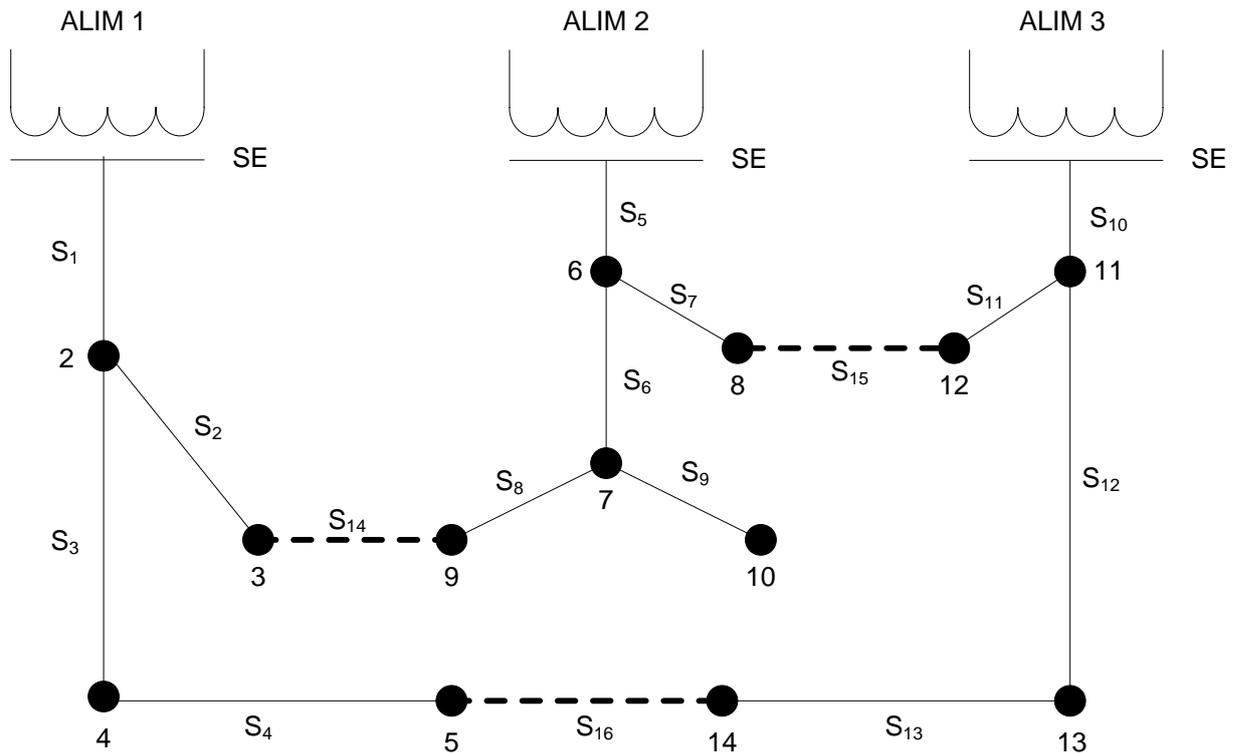


Figura 4.1: Sistema 16 Barras (Civanlar et al., 1988) - Topologia Inicial

O problema de restabelecimento, no entanto, será abordado no sistema reconfigurado da Figura 4.2. Este sistema constitui a reconfiguração ótima do sistema da Figura 4.1 como apontado em (GOMES, F. V. et al., 2006) e já foi utilizado por (LIN; CHIN, 1998) e (BORGES, 2012) no problema de restabelecimento.

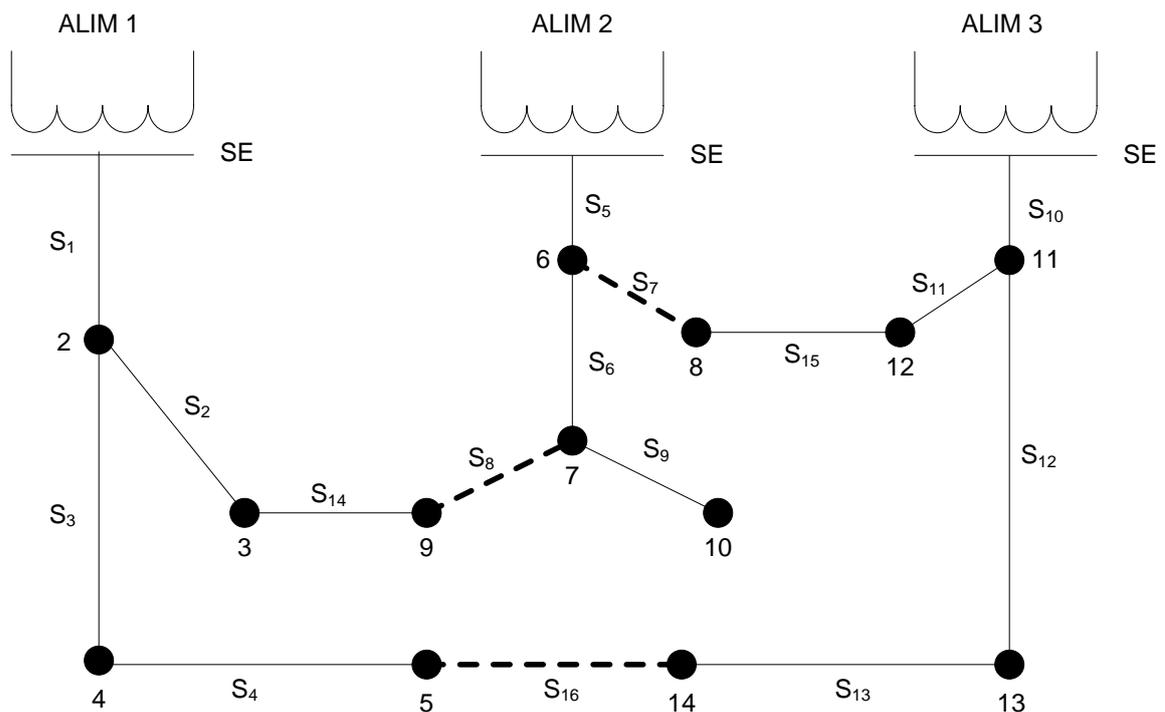


Figura 4.2: Sistema 16 Barras (Lin e Chin, 1998) - Reconfigurado

Como exemplo ilustrativo, adotou-se, da mesma forma que em (Lin e Chin, 1998) e (Borges, 2012), a ocorrência do defeito no mesmo ramo  $S_5$ . Após a atuação dos dispositivos de proteção, existe o desligamento das cargas nas barras: 6, 7 e 10 que estão a jusante da falta como mostrado, em cinza, na Figura 4.3.

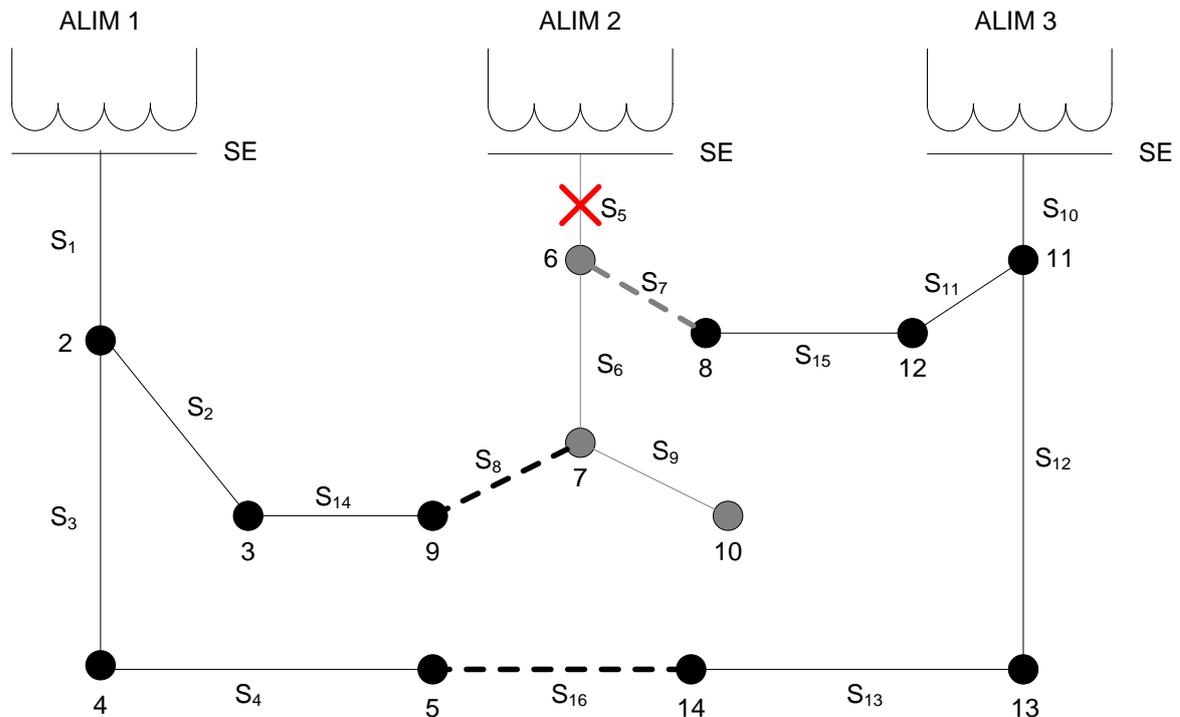


Figura 4.3: Sistema Defeituoso de 16 Barras- Reconfigurado

O sistema de 16 Barras da Figura 4.2 será utilizado para a análise dos seguinte resultados:

1. Tutorial da metodologia proposta;
2. Avaliação da qualidade dos resultados obtidos através de tabela comparativa com os resultados apresentados em comparação em: (Lin e Chin, 1998) e (Borges, 2012);
3. Avaliação de desempenho dos algoritmos bio-inspirados utilizados em ambos os estágios da metodologia proposta;
4. Avaliação da influência do tempo de manobra.

---

### 4.2.1 Tutorial do Modelo Proposto

O tutorial do modelo proposto será apresentado para o sistema IEEE 16 Barras, abordando, por motivos didáticos, os resultados do Algoritmo Genético para resolver o primeiro estágio e o corte discreto de carga do segundo estágio (caso necessário).

As seguintes premissas foram feitas para o sistema da Figura 4.3:

- ✓ Tensão na subestação (SE) foi considerada 1,0 p.u. durante todo o estudo;
- ✓ Limites de tensões nas barras foram considerados entre 0,95 p.u. e 1,05 p.u.
- ✓ Limites de fluxos nos circuitos de 1.0 p.u.;
- ✓ Chaves manobradas remotamente. Tempo de manobra desprezado.
- ✓ Todas as cargas foram consideradas com a mesma prioridade de atendimento.

Considera-se também que após a identificação do defeito, a falta é isolada através da atuação do sistema de proteção. O processo de restabelecimento é então iniciado.

#### ➤ Primeiro estágio

O primeiro estágio é resolvido com o objetivo de obter-se a configuração final mais adequada que possibilite o restabelecimento do maior número de cargas possíveis.

#### **Etapa 1:**

A primeira etapa do programa executa a leitura de dados do Sistema IEEE 16 Barras da Figura 4.3, armazenando os dados relacionados as barras, circuitos, chaves manobráveis e falta.

#### **Etapa 2:**

A partir da escolha da técnica metaheurísticas, uma população inicial é gerada baseada no critério descrito na seção 3.4.1.

A Tabela 4.1 ilustra como foi gerada a população inicial com codificação binária para uma simulação do algoritmo. O valor “1” representa uma chave manobrável fechada e o valor “0” uma chave aberta.

Tabela 4.1: População Inicial com Codificação Binária para o Sistema IEEE 16 Barras  
(Matriz de Configuração dos Circuitos)

	Chaves Manobráveis															
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	S <sub>15</sub>	S <sub>16</sub>
Indivíduos	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1
	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0
	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0
	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0
	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1
	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0
	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1
	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1
	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1
	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0
	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0

### Etapa 3 – Execução 1:

Nesta etapa, cada indivíduo (configuração do sistema) é, primeiramente, avaliado quanto à conectividade e à radialidade.

Como explicado na seção 3.4.1, a avaliação de conectividade é realizada para garantir que os fluxos de potência sejam resolvidos para configurações conexas com a(s) subestação(ões).

A avaliação de radialidade é executada a fim de assegurar que todas as configurações avaliadas no processo de solução sejam radiais.

Por exemplo, o primeiro indivíduo a ser avaliado da população é mostrado na Tabela 4.2. Avaliando-o quanto à conectividade obtêm-se que todas as barras são conexas com a subestação.

Tabela 4.2: Primeiro Indivíduo da População Inicial para o Sistema IEEE 16 Barras

Chaves Manobráveis															
S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	S <sub>15</sub>	S <sub>16</sub>
1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Porém ao ser verificada a radialidade, nota-se que a presente configuração não é radial. Assim sendo, os pesos para cada ramo são calculados de acordo com a seção 3.2.2.2. A Figura 4.4 ilustra a rede com cada peso atribuído ao correspondente ramo.

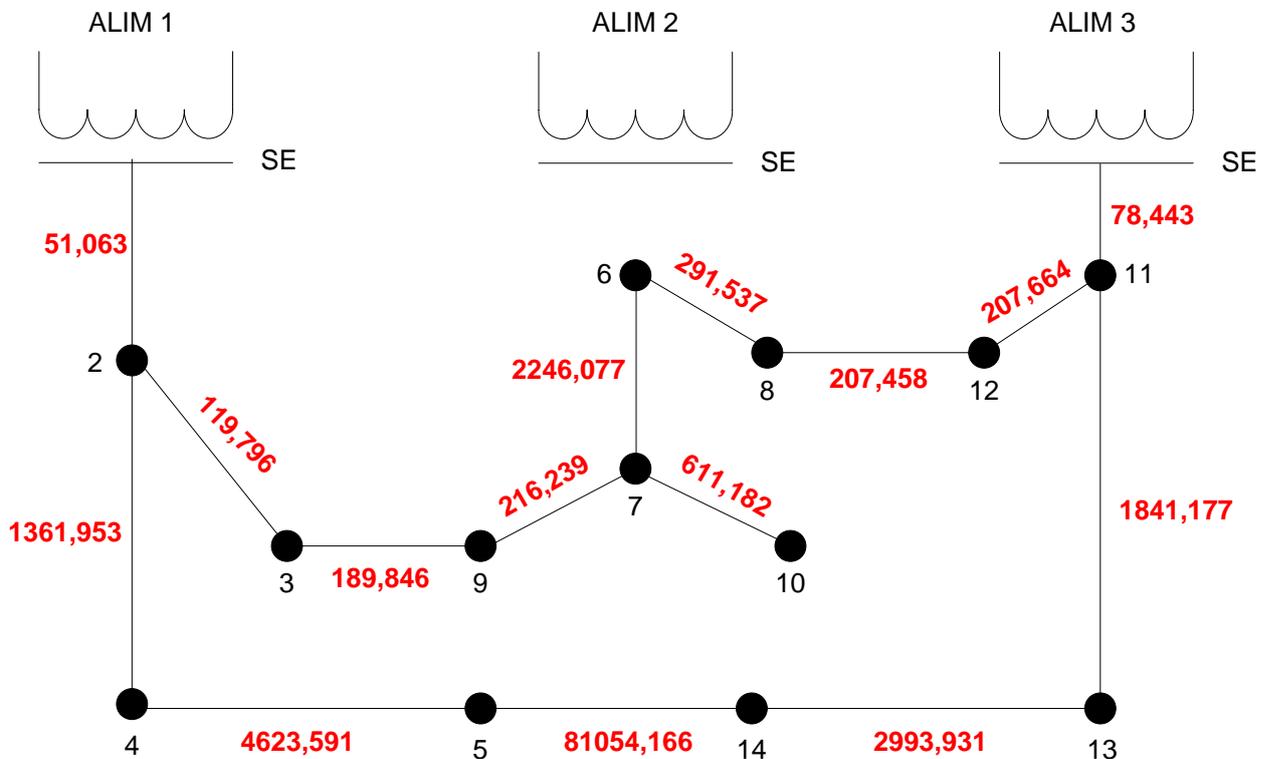


Figura 4.4: Sistema IEEE 16 Barras com Pesos nos Ramos para Primeiro Indivíduo da População.

A abertura das chaves que levaram o sistema da Figura 4.4 para a radialidade é determinada pelo algoritmo de Busca da Árvore Geradora Mínima. Dessa forma, como mostrado na seção 3.2.2.1 a Tabela 4.3 de ordenação dos ramos pode ser construída.

Tabela 4.3: Ordenação Crescente das Arestas do Grafo para o Sistema IEEE 16 BUS

Aresta	Peso	Chave	Forma de laço?
(1,2)	51,063	S <sub>1</sub>	Não
(1,11)	78,443	S <sub>10</sub>	Não
(2,3)	119,796	S <sub>2</sub>	Não
(3,9)	189,846	S <sub>14</sub>	Não
(8,12)	207,458	S <sub>15</sub>	Não
(12,11)	207,664	S <sub>11</sub>	Não
(9,7)	216,239	S <sub>8</sub>	Não
(6,8)	291,537	S <sub>7</sub>	Não
(7,10)	611,182	S <sub>9</sub>	Não
(2,4)	1361,953	S <sub>3</sub>	Não
(11,13)	1841,177	S <sub>12</sub>	Não
<b>(6,7)</b>	<b>2246,077</b>	<b>S<sub>6</sub></b>	<b>Sim</b>
<b>(5,14)</b>	<b>81054,166</b>	<b>S<sub>16</sub></b>	<b>Sim</b>

A Figura 4.5 ilustra os loops formados a partir da verificação utilizando a Tabela 4.3. Nesse caso, as chaves S<sub>6</sub> (ramo 6-7) e S<sub>16</sub> (ramo 5-14) devem ser abertas para que essa configuração torne-se radial.

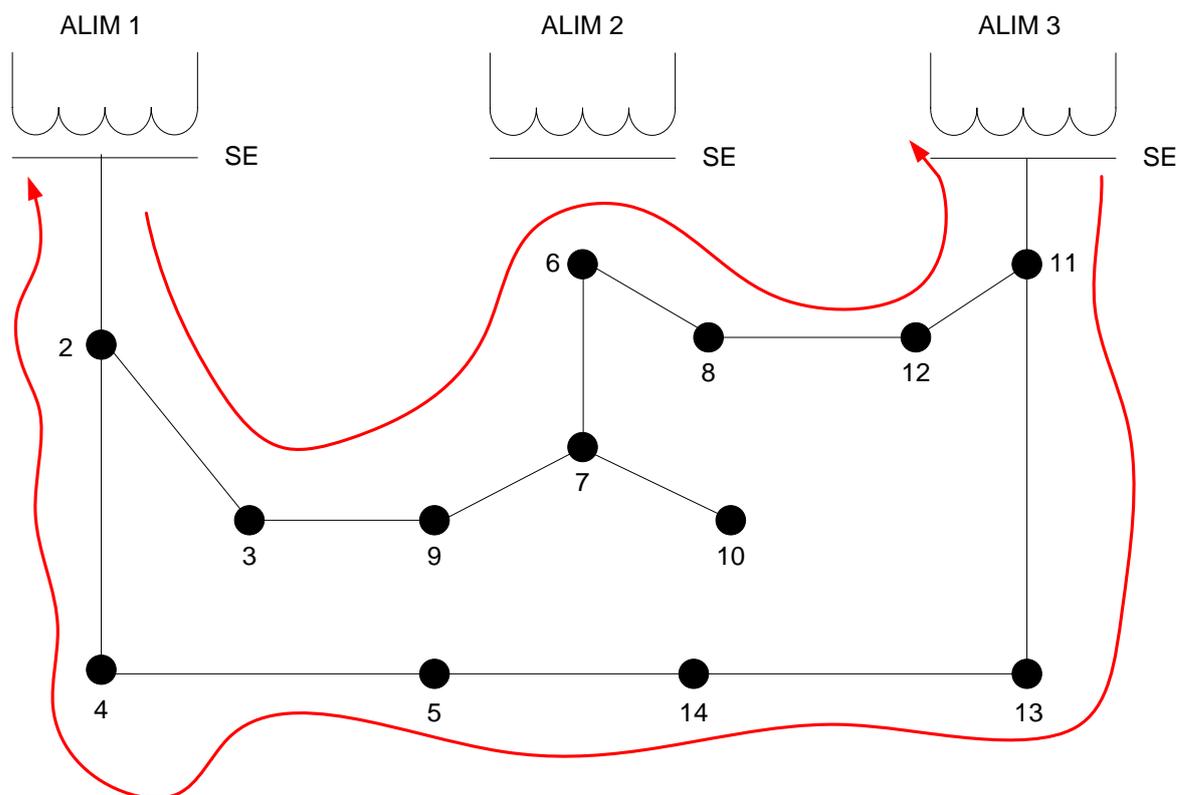


Figura 4.5: Sistema IEEE 16 Barras com Laço Formado no Primeiro Indivíduo da População.

A configuração da Tabela 4.2 é modificada como apresentado na Tabela 4.4 após a abertura dos ramos S<sub>6</sub> e S<sub>16</sub>.



## Etapa 5:

A partir da comparação entre a configuração pós isolamento da falta (Figura 4.3) e do sistema restabelecido (Figura 4.6), é possível gerar uma lista das chaves que foram manobradas para o restabelecimento do sistema. A lista para o sistema em questão é mostrada na Tabela 4.6 e será utilizada, posteriormente, no segundo estágio.

Tabela 4.6: Resultado de Chaves Manobradas no Primeiro Estágio

S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>
Aberta	Fechada	Fechada

A Figura 4.7 ilustra o gráfico do desempenho do algoritmo genético para a solução da função objetivo (3.39). Através do gráfico é possível observar que a resposta final do problema foi obtida com menos de 10 gerações.

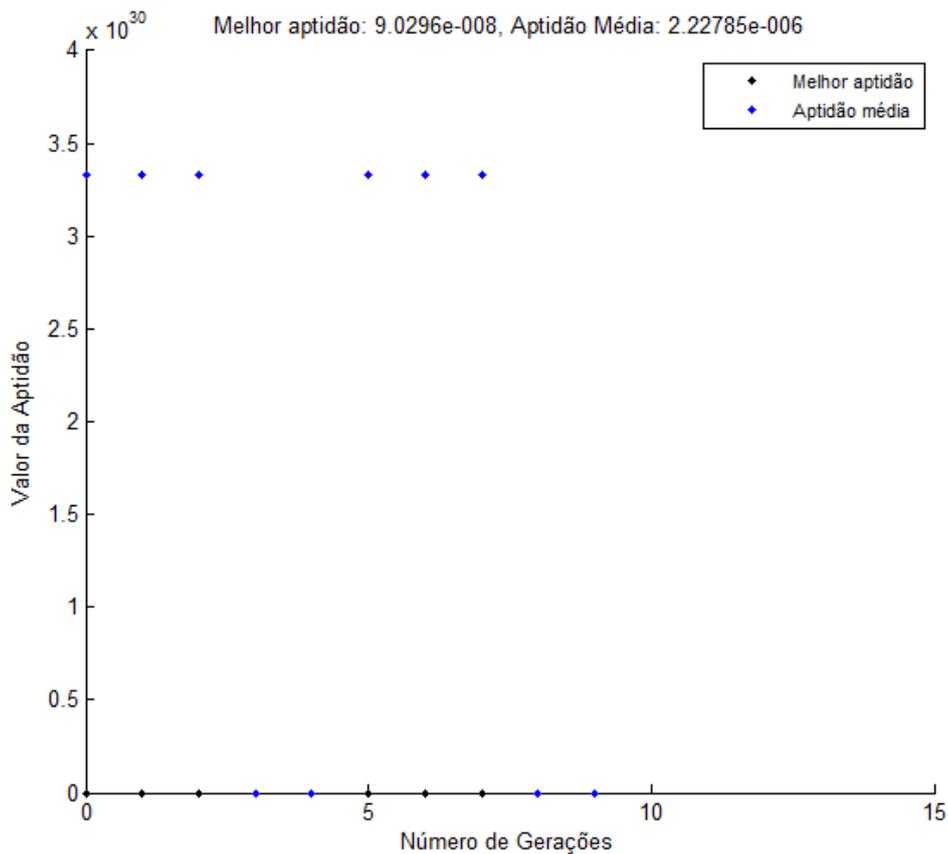


Figura 4.7: Evolução do Algoritmo Genético para a Obtenção da Configuração Final do Sistema IEEE 16 Barras

### ➤ Segundo estágio

O segundo visa indicar a sequência de chaveamento adequada a partir da lista de chaves manobradas gerada no primeiro estágio da metodologia proposta.

---

**Etapa 6:**

As chaves manobradas no primeiro estágio, descritas , da Tabela 4.6, são carregadas nessa etapa do algoritmo.

**Etapa 7:**

A configuração do sistema é retornada para o estado pós isolamento da falta.Tabela 4.7 revela a configuração reinicializada para o sistema tutorial em questão.

*Tabela 4.7: Configuração Pós Falta para o Sistema de 16 Barras*

<b>Chaves Manobráveis</b>															
<b>S<sub>1</sub></b>	<b>S<sub>2</sub></b>	<b>S<sub>3</sub></b>	<b>S<sub>4</sub></b>	<b>S<sub>5</sub></b>	<b>S<sub>6</sub></b>	<b>S<sub>7</sub></b>	<b>S<sub>8</sub></b>	<b>S<sub>9</sub></b>	<b>S<sub>10</sub></b>	<b>S<sub>11</sub></b>	<b>S<sub>12</sub></b>	<b>S<sub>13</sub></b>	<b>S<sub>14</sub></b>	<b>S<sub>15</sub></b>	<b>S<sub>16</sub></b>
1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0

**Etapa 8 – Execução 1:**

Neta etapa, cada chave a ser fechada selecionada no primeiro estágio é manobrada separadamente. Posteriormente é calculado o valor da função (3.46). A chave a ser fechada é aquela cujo fechamento simples para a configuração atual do sistema proporciona o menor valor para a função (3.46) que representa o custo da energia não suprida.

A Tabela 4.8 revela os parâmetros utilizados para obtenção do custo da energia não suprida nesta dissertação.

*Tabela 4.8:Parâmetro para Obtenção do Custo Energia Não Suprida*

<b>Chave NA</b>	<b>S<sub>7</sub></b>	<b>S<sub>8</sub></b>
<b>Tempo de manobra (h)</b>	1	1
<b>Valor energia não suprida (\$/MW)</b>	0,06	
<b>Fator de prioridade para as cargas</b>	1	
<b>Fator de penalização do desvio de tensão (\$/p.u.)</b>	10 <sup>-4</sup>	

A Tabela 4.9 mostra os resultados dos custos da energia não suprida para o fechamento simples das chaves S<sub>7</sub> e S<sub>8</sub>

Tabela 4.9: Resultados do Custo da Energia Não Suprida

Chave NA	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>
Custo da energia não suprida (\$)	8,57.10 <sup>-6</sup>	7,57.10 <sup>-6</sup>

Neste sistema tutorial é possível notar, por inspeção visual, que nenhuma carga fica sem atendimento no fechamento simples de quaisquer uma das chaves S<sub>7</sub> ou S<sub>8</sub>.

No entanto, a Figura 4.8 revela que a violação de tensão para o fechamento de S<sub>8</sub> é menor. Como o custo da violação de tensão nas barras está inserido na função (3.46), existe, neste caso, um custo de energia não suprida distinto para ambas as chaves como mostrado na Tabela 4.9.

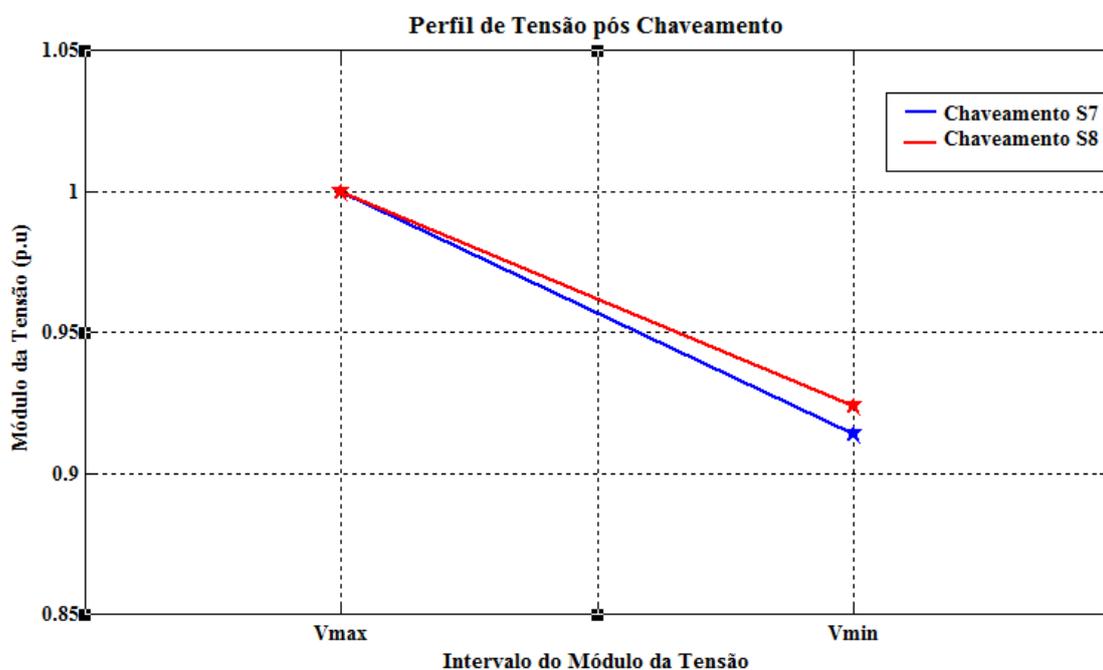


Figura 4.8: Perfil de Tensão Pós Fechamento Simples de S<sub>7</sub> e S<sub>8</sub>

A Tabela 4.10 indica a chave que será manobrada nesta execução da Etapa 8.

Tabela 4.10: Chaves Manobradas

Chave	Manobra	Etapa
S <sub>8</sub>	Fechamento	Etapa 8 – Execução 1

---

### Etapa 9 – Execução 1:

Esta etapa efetua a verificação do atendimento as restrições operativas a partir do fechamento de cada chave NA da etapa anterior mediante um cálculo de fluxo de potência para a configuração conexa em questão.

Caso alguma restrição seja violada é realizado um corte de carga discreto utilizado algoritmos bio-inspirados para resolver a função objetivo (3.52).

A Tabela 4.11 mostra a inicialização da população inicial para esta execução do corte discreto de carga.

*Tabela 4.11: População Inicial com Codificação Binária para o Sistema IEEE 16 Barras (Matriz de Corte de Carga)*

<b>Barras da área isolada</b>			
	<b>B<sub>7</sub></b>	<b>B<sub>6</sub></b>	<b>B<sub>10</sub></b>
<b>Indivíduos</b>	0	0	0
	1	1	1
	1	1	0
	0	0	1
	1	0	0
	0	1	0
	0	1	1
	1	1	0
	1	1	1

A Matriz de Corte de Carga é formada, neste, caso, por um número de indivíduos (linhas da matriz) igual ao triplo do número de barras isoladas pela falta. Cada indivíduo corresponde a uma configuração de carga e utilizando codificação binária para o algoritmo genético o valor “0” significa que a carga (ativa/reactiva) foi cortada e o valor “1” que a carga será considerada no cálculo do fluxo de potência necessário para resolver a função (3.52).

Os oito primeiros indivíduos dessa matriz são inicializados segundo as seguintes regras:

1. Um indivíduo com 100% de corte de carga;
2. Um indivíduo com 0% de corte de carga;
3. Um indivíduo com corte de carga para a segunda metade do conjunto de barras isoladas;

4. Um indivíduo com corte de carga para a primeira metade do conjunto de barras isoladas;
5. Um indivíduo com corte para 3/4 finais do conjunto de barras isoladas;
6. Um indivíduo com corte de carga para o primeiro e terceiro quartos do conjunto de barras isoladas;
7. Um indivíduo com corte de carga para o primeiro quarto do conjunto de barras isoladas;
8. Um indivíduo com corte de carga para o último quarto do conjunto de barras isoladas;

Os demais indivíduos da população são determinados aleatoriamente.

A Figura 4.9 apresenta o gráfico de uma simulação do algoritmo genético utilizado para a resolução da função objetivo (3.52). Nele é possível observar que o algoritmo convergiu com 4 gerações para um valor de tolerância de  $10^{-4}$ .

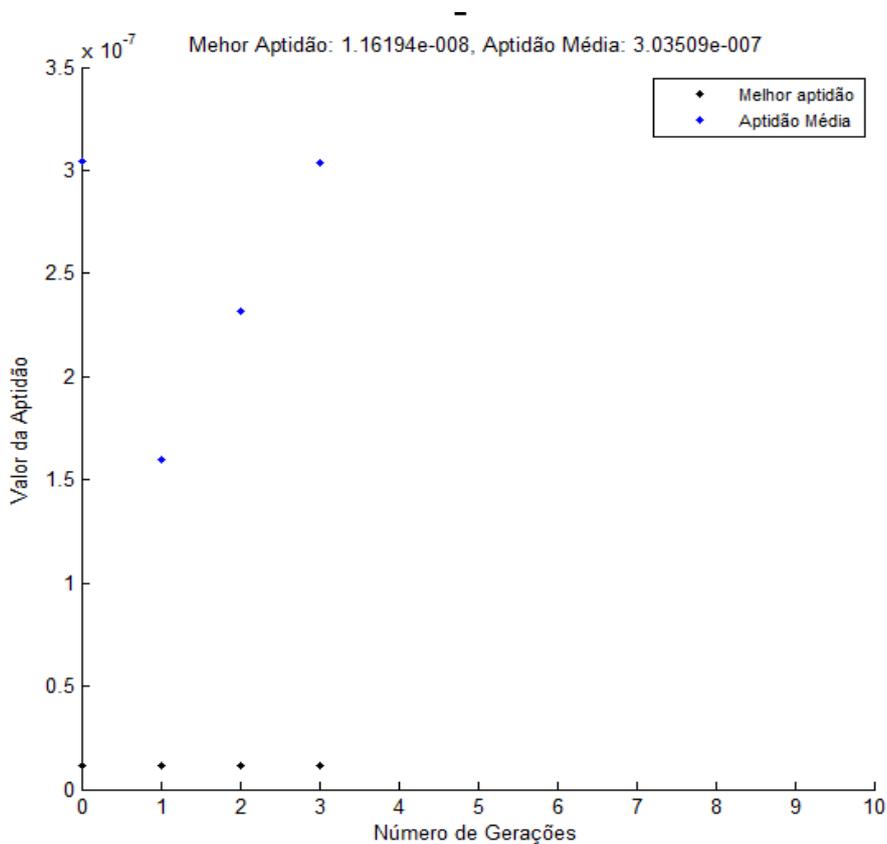


Figura 4.9: Evolução do Algoritmo Genético para o Corte de Carga

A Tabela 4.12 revela os resultados da violação de tensão e do corte discreto de carga após o fechamento da chave  $S_8$ .

Tabela 4.12: Resultados da Avaliação de Corte de Carga – Fechamento  $S_8$

Chave manobrada	$S_8$	
Limites de tensão do sistema (p.u.)	$V_{\min}$	$V_{\max}$
	0,950	1,000
Perfil de tensão pós manobra (p.u.)	$V_{\min}$	$V_{\max}$
	<b>0,924</b>	1,000
Corte de carga necessário?	Sim	
Barras com corte de carga	6	
Perfil de tensão pós corte (p.u.)	$V_{\min}$	$V_{\max}$
	0,954	1,000

Com os resultados da Tabela 4.12 é possível saber que após a manobra de fechamento da chave  $S_8$  a carga da barra 6 necessita ser cortada para que o perfil de tensão do sistema se mantenha dentro dos limites mesmo durante o processo de restabelecimento.

#### Etapa 10 – Execução 1:

A Etapa 10 executa a verificação da radialidade do sistema após o fechamento da chave de laço. Caso o sistema em questão não seja radial a chave NF selecionada no primeiro estágio que abre o laço formado é manobrada.

No fechamento da chave  $S_8$  não existe a formação de nenhum laço.

#### Etapa 8 – Execução 2:

A chave  $S_7$  é a próxima e última chave da lista de chaves a serem fechada de acordo com o primeiro estágio.

A Tabela 4.13 apresenta o resultado do cálculo da função (3.46) no fechamento de  $S_7$ .

Tabela 4.13: Resultado do Custo da Energia Não Suprida

Chave NA	$S_7$
Custo da energia não suprida (\$)	7,31

A Tabela 4.14 apresenta as chaves manobradas até esta etapa do segundo estágio.

Tabela 4.14: Chaves Manobradas

Chave	Manobra	Etapa
S <sub>8</sub>	Fechamento	Etapa 8 – Execução 1
S <sub>7</sub>	Fechamento	Etapa 8 – Execução 2

### Etapa 9 – Execução 2:

Após o fechamento da chave S<sub>7</sub> é verificado, novamente, se houve violação nos limites operativos do sistema.

A Tabela 4.15 revela os resultados para o perfil de tensão e corte discreto de carga após o fechamento da chave S<sub>7</sub>.

Tabela 4.15: Resultados da Avaliação de Corte de Carga – Fechamento S<sub>7</sub>

Chave manobra	S <sub>7</sub>	
Limites de tensão do sistema (p.u.)	V <sub>min</sub>	V <sub>max</sub>
	0,950	1,000
Perfil de tensão pós manobra (p.u.)	V <sub>min</sub>	V <sub>max</sub>
	<b>0,958</b>	1,000
Corte de carga necessário?	Não	
Barras com corte de carga	N/A	N/A
Perfil de tensão final (p.u.)	V <sub>min</sub>	V <sub>max</sub>
	<b>0,958</b>	1,000

Analisando a Tabela 4.15 é possível observar que não houve violação nos limites de tensão após o fechamento da chave S<sub>7</sub>.

### Etapa 10 – Execução 2:

O fechamento da chave S<sub>7</sub>, tendo em vista que a chave S<sub>8</sub> foi manobrada anteriormente, forma um laço no sistema como indicado na Figura 4.10.

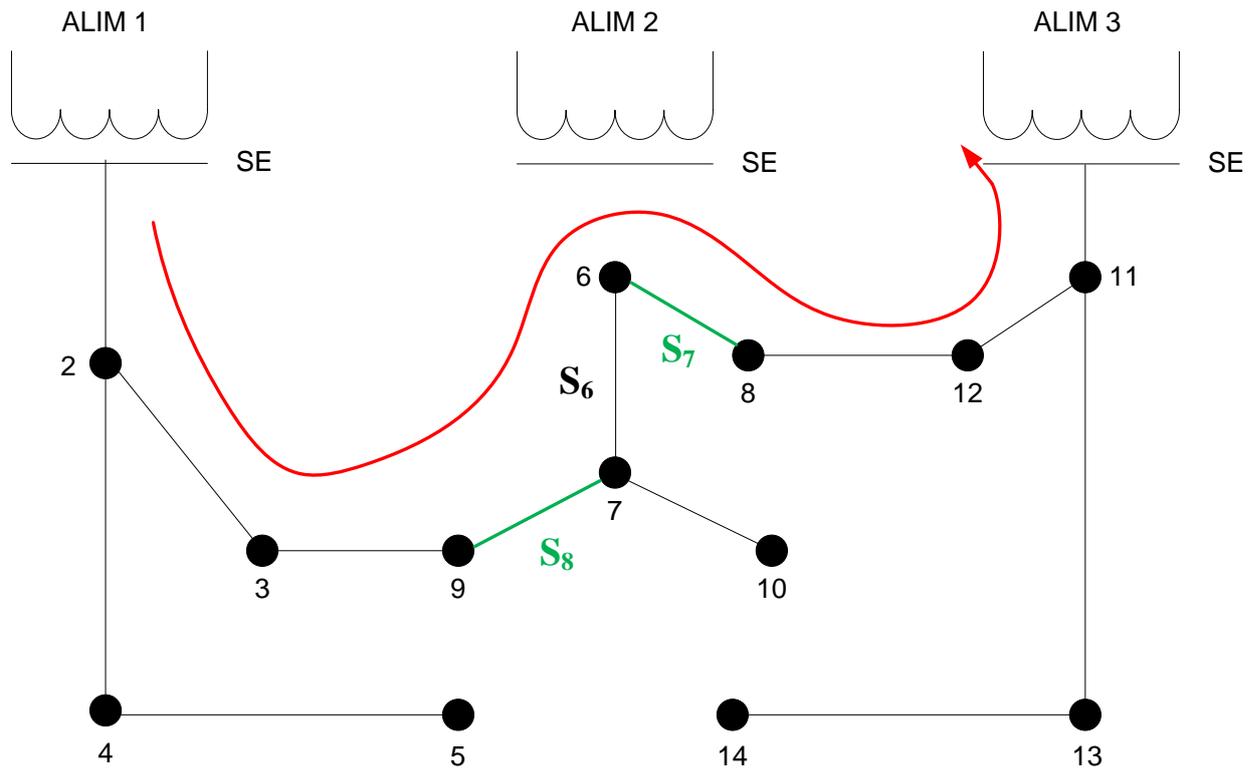


Figura 4.10: Sistema IEEE 16 Barras com Loop Formado após Fechamentos Sucessivos de  $S_8$  e  $S_7$

A chave que desfaz esse laço que foi selecionada no primeiro estágio é a  $S_6$ .

### Etapa 9 – Execução 3:

A Tabela 4.16 apresenta o perfil de tensão e a necessidade do corte de carga após o abertura da chave  $S_6$ .

Tabela 4.16: Resultados da Avaliação de Corte de Carga – Abertura  $S_6$

Chave manobra	$S_6$	
	$V_{\min}$	$V_{\max}$
Limites de tensão do sistema (p.u.)	0,950	1,000
Perfil de tensão pós manobra (p.u.)	$V_{\min}$	$V_{\max}$
	<b>0,954</b>	1,000
Corte de carga necessário?	Não	
Barras com corte de carga	N/A	N/A
Perfil de tensão final (p.u.)	$V_{\min}$	$V_{\max}$
	<b>0,954</b>	1,000

---

A análise da Tabela 4.16 indica que não é necessário corte de carga após a abertura da chave  $S_6$ .

**Fim:**

A manobra de  $S_6$  dá por encerrado o segundo estágio e conseqüentemente ao algoritmo de restabelecimento proposto para o sistema IEEE 16 Barras, pois todas as chaves selecionadas no primeiro estágio já foram manobradas.

A Tabela 4.17 indica a seqüência de chaves manobradas para o sistema tutorial em questão.

*Tabela 4.17: Chaves Manobradas*

<b>Chave</b>	<b>Manobra</b>	<b>Etapa</b>
$S_8$	Fechamento	Etapa 8 – Execução 1
$S_7$	Fechamento	Etapa 8 – Execução 2
$S_6$	Abertura	Etapa 9 – Execução 3

#### **4.2.2 Avaliação Comparativa de Resultados**

No intuito de comprovar a eficácia do método, a Tabela 4.18 mostra uma comparação do resultado obtido com o método proposto e os das metodologias encontradas em:(Lin e Chin, 1998), (Borges, 2012) e o resultado da Busca Exaustiva.

Tabela 4.18: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 16 Barras

Método	Chaveamento	Corte discreto de carga por chaveamento	Tensão mínima	Carga final restabelecida
Busca Exaustiva*	Fechar S <sub>8</sub> Fechar S <sub>7</sub> Abrir S <sub>6</sub>	0%	0,954 p.u. (Barra 10)	100%
(Lin e Chin, 1998)	Fechar S <sub>7</sub>	Barra 10 (33%)	0,950 p.u. (Barra 6)	67%
(Borges, 2012)	1° - Fechar S <sub>8</sub>	N/A	0,954 p.u. (Barra 10)	100%
	2° - Fechar S <sub>7</sub>	N/A		
	3° -Abrir S <sub>6</sub>	0%		
Método Proposto	1° - Fechar S <sub>8</sub>	Barra 6 (37%)	0,954 p.u. (Barra 6)	100%
	2° - Fechar S <sub>7</sub>	0%	0,958 p.u. (Barra 10)	
	3° -Abrir S <sub>6</sub>	0%	0,954 p.u. (Barra 10)	

\*Ótimo global conseguido por busca exaustiva em um tempo de 0,33s.

A análise da Tabela 4.18 mostra que a metodologia proposta assim como o método encontrado em (Borges, 2012) restabelecem 100% da carga do sistema chegando ao ótimo global para esse problema. Porém a metodologia proposta, possui na segunda etapa a possibilidade de executar cortes discretos de carga para cada manobra, como evidenciado na terceira coluna da Tabela 4.18, caso algum dos limites do sistema seja violado.

O método proposto em (Lin e Chin, 1998) restabelece apenas as cargas nas barras 6 e 7 do sistema após o fechamento da chave S<sub>7</sub>. Isso acontece porque, os autores consideram que a carga na barra 10 não é prioritária e decidem cortá-la uma vez que, com o fechamento da chave S<sub>7</sub>, existe uma violação de tensão no sistema que é resolvido com o corte da carga na barra 10. O perfil de tensão da solução encontrada por (Lin e Chin, 1998) é ligeiramente menor ao ótimo do problema.

### 4.2.3 Avaliação de Desempenho dos Métodos Bio-Inspirados

O primeiro estágio para o sistema da Figura 4.3 foi resolvido utilizando três métodos bio-inspirados na resolução da função objetivo (3.37).

A seguir são listados os parâmetros gerais adotados nas simulações:

- 
- Número de indivíduos:  $n_{chaves} = 16$
  - Número da população: 30
  - Número máximo de gerações: 100
  - Número máximo de repetições do mesmo valor da função aptidão como melhor solução: aproximação  $\left(\frac{(\text{Número da população})}{4}\right)$
  - Número de simulações: 10

Os parâmetros individuais ajustados através de tentativa para cada um dos métodos cada são:

1. Algoritmo Genético:

- Taxa de mutação:  $0,2 = 20\%$
- Taxa de recombinação (*crossover*):  $0,8 = 100\%$
- Elitismo: 2
- Função seleção de pais para a recombinação e mutação: Roleta
- Função de mutação: Gaussiana
- Função de recombinação: Função de dois pontos (*crossover two points*)
- Fração de migração:  $0,3 = 30\%$

2. Algoritmo de eco localização de morcegos (*Bat Algorithm*):

- Intensidade sonora inicial: 0,95
- Constante da equação da intensidade sonora:  $\alpha = 0,90$
- Taxa de emissão de pulsos inicial:  $r_0 = 0,95$
- Constante da equação da taxa de emissão de pulsos:  $\gamma = 0,90$
- Frequência mínima: 0
- Frequência máxima: 1

3. Método da reprodução dos pássaros Cuco (*Cuckoo Search*):

- Fração de ovos descobertos:  $0,2 = 20\%$

Todos as técnicas bio-inspiradas chegaram no resultado da Tabela 4.18 para todas as simulações propostas.

A Tabela 4.19 revela os tempos computacionais médios em segundos e em porcentual da metaheurística “mais lenta” que neste caso foi o Algoritmo Genético (AG) .

Tabela 4.19: Comparação entre Tempos de Simulação dos Métodos Bio-Inspirados para o Sistema IEEE 16 Barras Primeiro Estágio

Parâmetro	AG	BAT	CS
	Estagio 1	Estagio 1	Estagio 1
Tempo Médio (s)	2,232	0,358	0,383
Tempo Médio (%)	100	16	17

A observação da Tabela 4.19 evidencia que o desempenho do *Bat Algorithm* (BAT) é 84% superior ao do AG. O *Cuckoo Search* (CS) teve desempenho bem semelhante, sendo 83% superior ao AG.

A Figura 4.11 apresenta o desempenho das metaheurísticas no primeiro estágio com respeito ao número de fluxos de potência médios executados. Na figura, pode-se perceber que o AG teve o pior desempenho, executando um total de 508 fluxos de potência em média. O CS executou 75 fluxos, desempenho próximo ao do BAT com 68 fluxos.

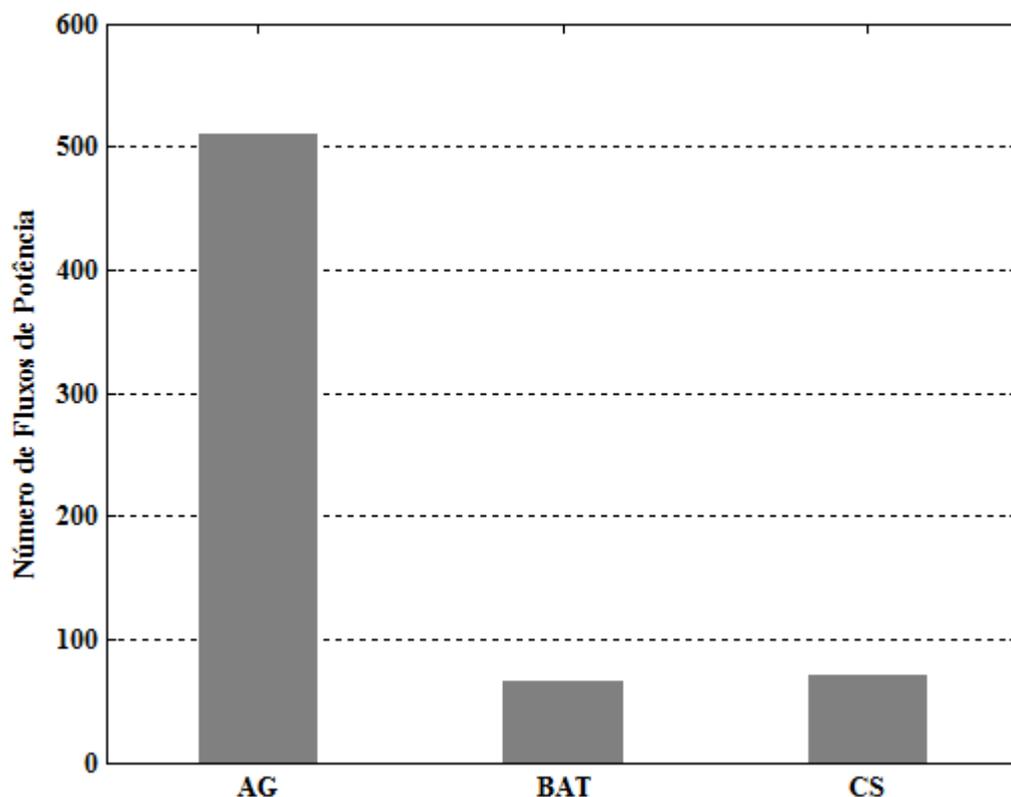


Figura 4.11: Gráfico de Desempenho dos Métodos Bio-Inspirados em relação ao Número Médio de Fluxos de Potência do Primeiro Estágio para Sistema IEEE 16 Barras

---

O segundo estágio do algoritmo proposto, utiliza métodos bio-inspirados na resolução da função multi-objetivo de corte mínimo discreto de carga.

A seguir são listados os parâmetros gerais adotados nas simulações:

- Número de indivíduos:  $n^{\circ}$  de barras a sofrerem corte
- Número da população:  $3 \times$  (Número de indivíduos)
- Número máximo de gerações: 100
- Número máximo de repetições do mesmo valor da função aptidão como melhor solução: aproximação  $\left(\frac{\text{(Número da população)}}{4}\right)$
- Número de simulações: 10

Os parâmetros individuais ajustados através de tentativa para cada um dos métodos são:

4. Algoritmo Genético:

- Taxa de mutação:  $0,2 = 20\%$
- Taxa de recombinação (*crossover*):  $0,8 = 100\%$
- Elitismo: 2
- Função seleção de pais para a recombinação e mutação: Roleta
- Função de mutação: Gaussiana
- Função de recombinação: Função de dois pontos (*crossovertwopoints*)
- Fração de migração:  $0,3 = 30\%$

5. Algoritmo de eco localização de morcegos (*Bat Algorithm*):

- Intensidade sonora inicial: 0,95
- Constante da equação da intensidade sonora:  $\alpha = 0,90$
- Taxa de emissão de pulsos inicial:  $r_0 = 0,95$
- Constante da equação da taxa de emissão de pulsos:  $\gamma = 0,90$
- Frequência mínima: 0
- Frequência máxima: 1

6. Método da reprodução dos pássaros Cuco (*Cuckoo Search*):

- Fração de ovos descobertos:  $0,2 = 20\%$

A Tabela 4.20 mostra a comparação dos tempos médios de simulação em segundo e em percentual da metaheurística “mais lenta”.

Tabela 4.20: Comparação entre Tempos de Simulação dos Métodos Bio-Inspirados para o Sistema IEEE 16 Barras- Segundo Estágio

Parâmetro	AG	BAT	CS
	Estagio 2	Estagio 2	Estagio 2
Tempo Médio (s)	0,226	0,159	0,145
Tempo Médio (%)	100	70	64

A Figura 4.12 apresenta o desempenho das methaurísticas no segundo estágio com respeito ao número de fluxos de potência médios executados. Percebe-se, novamente, que o AG executado o maior número médio de fluxos de potência, totalizando 43. O BAT executou 27 fluxos e o CS 25 fluxos.

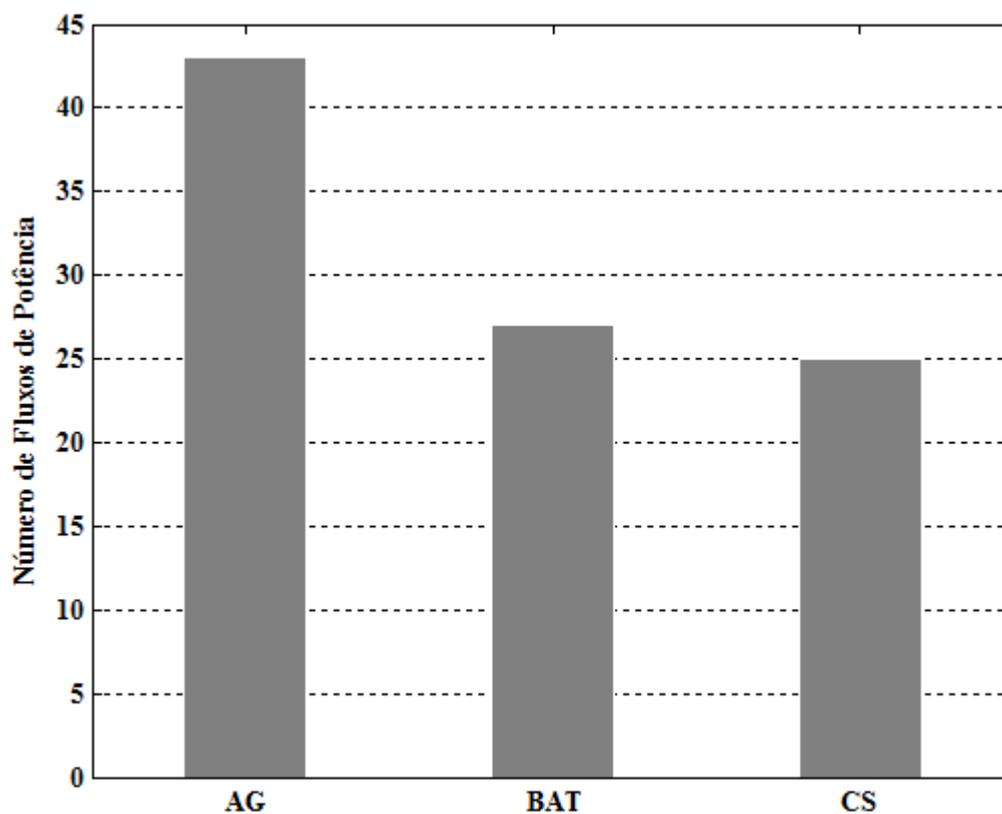


Figura 4.12: Gráfico de Desempenho dos Métodos Bio-Inspirados em relação ao Número Médio de Fluxos de Potência do Segundo Estágio para Sistema IEEE 16 Barras

#### 4.2.4 Avaliação da Influência do Tempo de Manobra

O objetivo dessa análise é demonstrar a validade do método para sistemas cujas chaves manobráveis são operadas manualmente e, portanto o tempo de manobra deve ser considerado para que a energia não suprida em razão da falta seja minimizada.

O defeito e a configuração do sistema considerado são os mesmos apresentados na Figura 4.3. As seguintes premissas do sistema foram:

- ✓ Tensão na subestação (SE) foi considerada 1,0 p.u. durante todo o estudo;
- ✓ Limites de tensões nas barras foram considerados entre 0,95 p.u. e 1,05 p.u.;
- ✓ Limites de fluxos nos circuitos não foram considerados;
- ✓ Chaves de laço ( $S_7, S_8, S_{16}$ ) operadas manualmente: tempo de manobra para as chave  $S_7 = 0.5h$ ; tempo de manobra para a chave  $S_8$  e  $S_{16} = 1h$ ;
- ✓ Todas as cargas foram consideradas com a mesma prioridade de atendimento.

A Tabela 4.21 apresenta uma comparação entre a solução encontrada pelo método proposto e os resultados das metodologias encontradas em: (Lin e Chin, 1998) e (Borges, 2012).

Tabela 4.21: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 16 Barras com Influência do Tempo de Manobra

Método	Chaveamento	Corte discreto de carga por chaveamento	Tensão mínima	Carga final restabelecida
(Lin e Chin, 1998)	Fechar $S_7$	Barra 10 (33%)	0,950 p.u. (Barra 6)	67%
(Borges, 2012)	1° -Fechar $S_8$	N/A	0,954 p.u. (Barra 10)	100%
	2° -Fechar $S_7$	N/A		
	3° -Abrir $S_6$	0%		
Método Proposto	1° -Fechar $S_7$	Barra 10 (33%)	0,950 p.u. Barra(7)	100%
	2° -Fechar $S_8$	0%	0,958 p.u. (Barra 10)	
	3° -Abrir $S_6$	0%	0,954 p.u. (Barra 10)	

A análise da Tabela 4.21 revela que para a metodologia proposta encontra a mesma solução final do problema que o método de (Borges, 2012), porém a sequência de fechamento as chaves  $S_8$  e  $S_7$  está invertida. Essa inversão é ocasionada porque o método proposto leva

---

em conta, no segundo estágio, o tempo de chaveamento para o cálculo da energia não suprida como mostrado na função objetivo (3.46).

Uma observação adicional pode ser feita se compararmos o resultado do corte de carga obtido pela metodologia proposta após o primeiro chaveamento apresentado na Tabela 4.21, com o corte do primeiro chaveamento mostrado na Tabela 4.18. A inversão de manobra ocasionada pela influência do tempo, levou o corte da carga na Barra 10 como mostrado na Tabela 4.21. Isso se deve pois, um corte na Barra 6, como descrito na Tabela 4.18, levaria a uma subtensão de 0.9485 p.u. nessa mesma barra. Dessa forma, pode-se afirmar que a metodologia de corte de carga utilizando algoritmos bio-inspirados mostrou-se eficiente.

A consideração do tempo de chaveamento é um fator importante em sistemas que possuem chaves operadas manualmente para que o problema de restabelecimento seja resolvido visando otimizar fatores de continuidade como DIC, DMIC e DEC.

### **4.3 Sistema Teste 2: IEEE 33 Barras**

O sistema de IEEE 33 Barras proposto por (Baran e Wu, 1989) é composto por 33 barras de carga e 1 alimentador de 12,66 kV, carga total de 3.715 kW e 2.300 kVAr e possui um total de 37 chaves normalmente fechadas e 5 chaves de interconexão.

A Figura 4.13 ilustra a configuração inicial proposta por (Baran e Wu, 1989) em que os circuitos representados por linhas contínuas são as chaves normalmente fechadas (NF). O circuitos tracejados são as chaves normalmente abertas (NA).

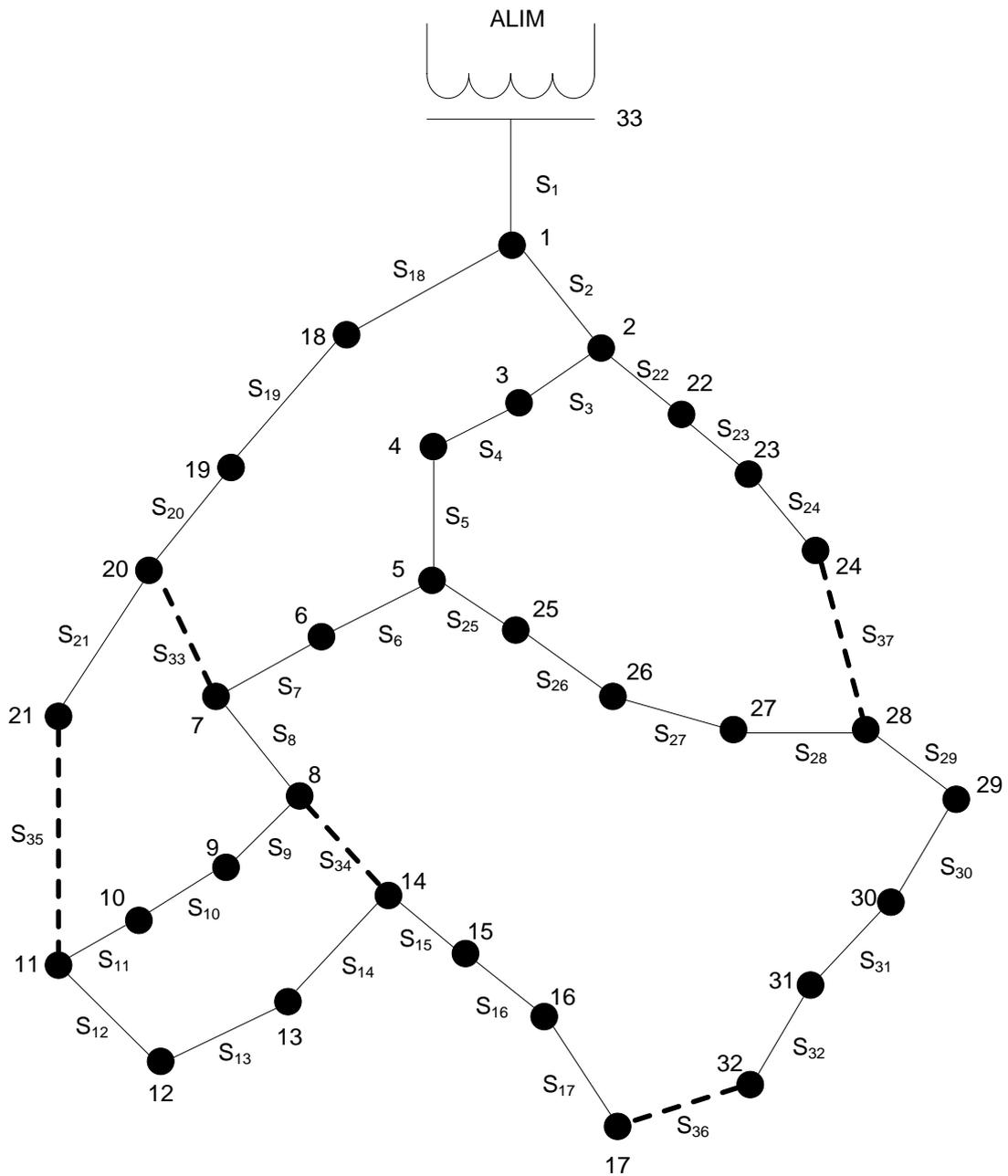


Figura 4.13: Sistema 33 Barras (BARAN; WU, 1989) - Topologia inicial.

Com o intuito de comparar a qualidade dos resultados obtidos pela presente metodologia com os trabalhos de (Lin e Chin, 1998), (Borges, 2012) e (Zidan e El-Saadany, 2011), o problema de restabelecimento será abordado no sistema reconfigurado da Figura 4.14. Neste sistema as chaves normalmente abertas são  $S_7$ ,  $S_9$ ,  $S_{14}$ ,  $S_{32}$ .

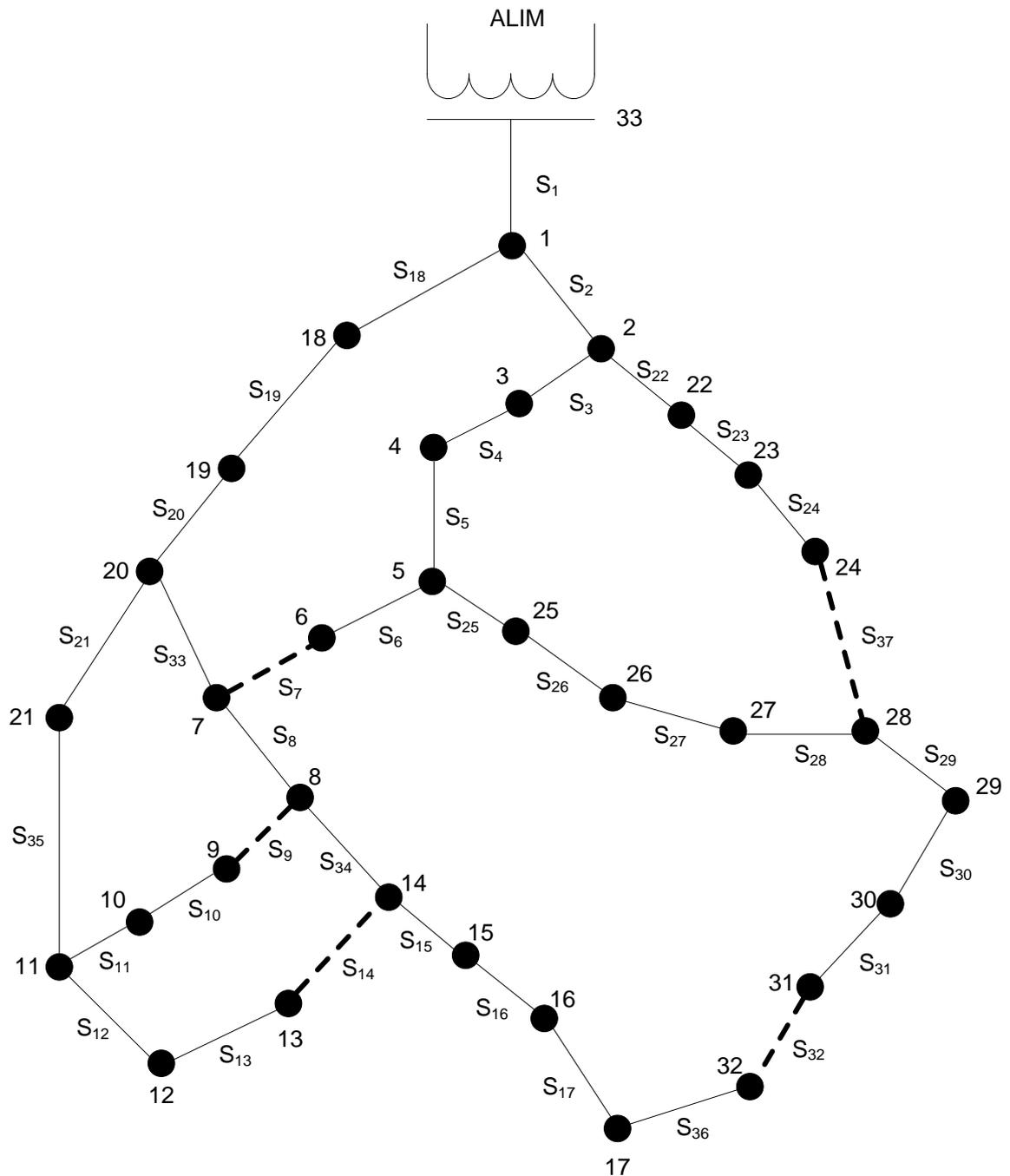


Figura 4.14: Sistema 33 Barras (LIN; CHIN, 1998) - Reconfigurado

Adicionalmente, no trabalho de (Lin e Chin, 1998) são aplicados defeitos simultâneos na circuitos  $S_5$  e  $S_{35}$ , deixando desenergizadas as barras de número 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 25, 26, 27, 28, 29, 30 e 31. A Figura 4.15 apresenta o sistema da Figura 4.14 com as respectivas faltas destacadas e, em cinza, a região afetada.



- 
4. Avaliação da influência de consumidores prioritários;
  5. Avaliação da influência de limites de tensão nas barras;
  6. Avaliação da influência de limites de fluxo de potência ativa nos circuitos.

### **4.3.1 Avaliação Comparativa de Resultados**

Na análise comparativa de resultados com outras metodologias da literatura as seguintes premissas foram feitas para o sistema da Figura 4.15:

- ✓ Tensão na subestação (SE) foi considerada 1,0 p.u. durante todo o estudo;
- ✓ Limites de tensões nas barras foram considerados entre 0,80 p.u. e 1,05 p.u.;
- ✓ Limites de fluxos nos circuitos não foram considerados;
- ✓ Chaves manobradas remotamente. Tempo de manobra desprezado;
- ✓ Todas as cargas foram consideradas com a mesma prioridade de atendimento.

A Tabela 4.22 apresenta os resultados obtidos na resolução do problema de restabelecimento comparando a metodologia proposta com os métodos: Busca exaustiva, (LIN; CHIN, 1998), (ZIDAN; EL-SAADANY, 2011) e (BORGES, 2012).

Tabela 4.22: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 33 Barras

Método	Chaveamento	Corte discreto de carga por chaveamento	Tensão mínima por chaveamento	Carga final restabelecida	Perdas
Busca Exaustiva*	Fechar S <sub>37</sub> Fechar S <sub>9</sub>	0%	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	189kW
(LIN; CHIN, 1998)	Fechar S <sub>7</sub> Fechar S <sub>9</sub>	0%	0,842 p.u. (Barra 31)	100%	301kW
(ZIDAN; EL-SAADANY, 2011)	Fechar S <sub>37</sub> Fechar S <sub>14</sub>	0%	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	195kW
(BORGES, 2012)	1° - Fechar S <sub>37</sub>	N/A	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	189kW
	2° - Fechar S <sub>9</sub>	0%			
Método Proposto	1° - Fechar S <sub>37</sub>	0%	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	189kW
	2° - Fechar S <sub>9</sub>	0%	0,928 p.u. (Barra 6)		

\*Ótimo global conseguido por busca exaustiva em um tempo de 10,33s.

A metodologia proposta assim como os trabalho de (BORGES, 2012) indica o restabelecimento ótimo para esse sistemas nas condições consideradas. Ambas as metodologias também indicam a sequência de chaveamento, a qual não é determinada nas metodologias de: (LIN; CHIN, 1998) e (ZIDAN; EL-SAADANY, 2011).

A sequência de chaveamento é de essencial importância para o Centro de Operações de uma concessionária de distribuição, pois somente com o seu conhecimento é possível minimizar efetivamente o montante de carga não suprida após a ocorrência de um defeito no sistema, levando, portanto, à concessionária a melhores indicadores de continuidade operacional (BORGES, 2012).

Apesar de todas as metodologias obterem resultados que restabelecem 100% da carga final, a metodologia proposta, assim como o método de (BORGES, 2012) ao encontrarem a configuração restabelecida ótima para esse caso, determinam menores perdas no sistema. Dessa forma, apesar de não ser o objetivo principal do problema de restabelecimento a minimização de perdas para a configuração restabelecida, fica demonstrado que a metodologia proposta ao levar em consideração em sua função objetivo uma parcela para

---

minimizar as perdas termina otimizando de certo modo a configuração do sistema o que também contribui para um melhoramento no perfil final de tensão.

Observa-se também pela Tabela 4.22 que a metodologia proposta, diferentemente dos outros trabalhos, realiza cortes discretos de carga por chaveamento executado.

### 4.3.2 Avaliação de Desempenho dos Métodos Bio-Inspirados

O primeiro estágio para o sistema da Figura 4.15 foi resolvido utilizando três métodos bio-inspirados para a resolução da função objetivo (3.37).

A seguir são listados os parâmetros gerais adotados nas simulações:

- Número de indivíduos:  $n_{chaves} = 37$
- Número da população: 30
- Número máximo de gerações: 100
- Número máximo de repetições do mesmo valor da função aptidão como melhor solução: aproximação  $\left(\frac{\text{Número da população}}{4}\right)$
- Número de simulações: 10

Os parâmetros individuais ajustados através de tentativa para cada um dos métodos são:

#### 1. Algoritmo Genético:

- Taxa de mutação:  $0,2 = 20\%$
- Taxa de recombinação (*crossover*):  $0,8 = 100\%$
- Elitismo: 2
- Função seleção de pais para a recombinação e mutação: Roleta
- Função de mutação: Gaussiana
- Função de recombinação: Função de dois pontos (*crossover two points*)
- Fração de migração:  $0.3 = 30\%$

- 
2. Algoritmo de eco localização de morcegos (*Bat Algorithm*):
    - Intensidade sonora inicial: 0,95
    - Constante da equação da intensidade sonora:  $\alpha = 0,90$
    - Taxa de emissão de pulsos inicial:  $r_0 = 0,95$
    - Constante da equação da taxa de emissão de pulsos:  $\gamma = 0,90$
    - Frequência mínima: 0
    - Frequência máxima: 1
  3. Método da reprodução dos pássaros Cuco (*Cuckoo Search*):
    - Fração de ovos descobertos:  $0,2 = 20\%$

Todas as técnicas bio-inspiradas chegaram no resultado da Tabela 4.22 para todas as simulações propostas.

A Tabela 4.23 revela os tempos computacionais médios em segundos e em porcentual da metaheurística “mais lenta” que para o sistema de 33 Barras também foi o Algoritmo Genético (AG).

Tabela 4.23: Comparação entre Tempos de Simulação dos Métodos Bio-Inspirados para o Sistema IEEE 33 Barras – Primeiro Estágio

Parâmetro	AG	BAT	CS
	Estágio 1	Estágio 1	Estágio 1
Tempo Médio (s)	4,570	1,219	1,775
Tempo Médio (%)	100	27	39

A observação da Tabela 4.23 evidencia que o desempenho do *Bat Algorithm* (BAT) é 73% superior ao do AG. O *Cuckoo Search* (CS) teve desempenho próximo sendo 61% superior ao AG, porém para o sistema de 33 Barras foi inferior ao BAT.

A Figura 4.16 apresenta o desempenho das metaheurística no primeiro estágio com respeito ao número de fluxos de potência médios executados. Na figura, pode-se perceber que o AG teve, novamente, o pior desempenho, executando um total de 323 fluxos de potência em média. O BAT executou 83 fluxos, desempenho próximo ao do CS com 118 fluxos.

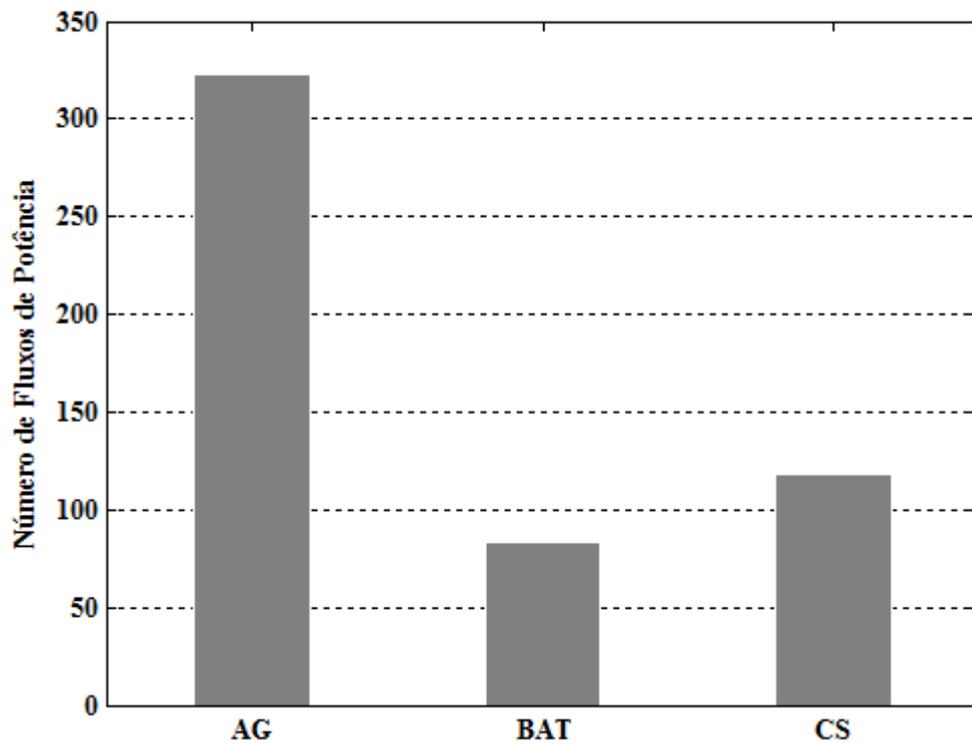


Figura 4.16: Gráfico de desempenho dos Métodos Bio-Inspirados em relação ao número médio de fluxos de potência do primeiro estágio para Sistema IEEE 33 BUS

O segundo estágio do método proposto, utiliza métodos bio-inspirados na resolução da função multi-objetivo de corte mínimo de carga discreto.

A seguir são listados os parâmetros gerais adotados nas simulações:

- Número de indivíduos:  $n^{\circ}$  de barras a sofrerem corte
- Número da população:  $3 \times (\text{Número de indivíduos})$
- Número máximo de gerações: 100
- Número máximo de repetições do mesmo valor da função aptidão como melhor solução: aproximação  $\left(\frac{(\text{Número da população})}{4}\right)$
- Número de simulações: 10

Os parâmetros individuais ajustados através de tentativa para cada um dos métodos são:

---

4. Algoritmo Genético:

- Taxa de mutação:  $0,2 = 20\%$
- Taxa de recombinação (*crossover*):  $0,8 = 100\%$
- Elitismo: 2
- Função seleção de pais para a recombinação e mutação: Roleta
- Função de mutação: Gaussiana
- Função de recombinação: Função de dois pontos (*crossover two points*)
- Fração de migração:  $0.3 = 30\%$

5. Algoritmo de eco localização de morcegos (*Bat Algorithm*):

- Intensidade sonora inicial: 0,95
- Constante da equação da intensidade sonora:  $\alpha = 0,90$
- Taxa de emissão de pulsos inicial:  $r_0 = 0,95$
- Constante da equação da taxa de emissão de pulsos:  $\gamma = 0,90$
- Frequência mínima: 0
- Frequência máxima: 1

6. Método da reprodução dos pássaros Cuco (*Cuckoo Search*):

- Fração de ovos descobertos:  $0,2 = 20\%$

No segundo estágio da metodologia, para o caso simulado segundo as premissas da seção 4.3.1, não foi necessário o corte discreto de carga em nenhum chaveamento. Esse fato pode ser comprovado analisando a Figura 4.17 em que para todas as metodologias bio-inspiradas utilizadas, no sistema de 33 Barras, a quantidade de fluxo de potência executados é igual a 5. Isso porque, para nesse caso, os limites pré-estabelecidos não foram violados em nenhum chaveamento, ou seja, não foi necessário realizar corte de carga.

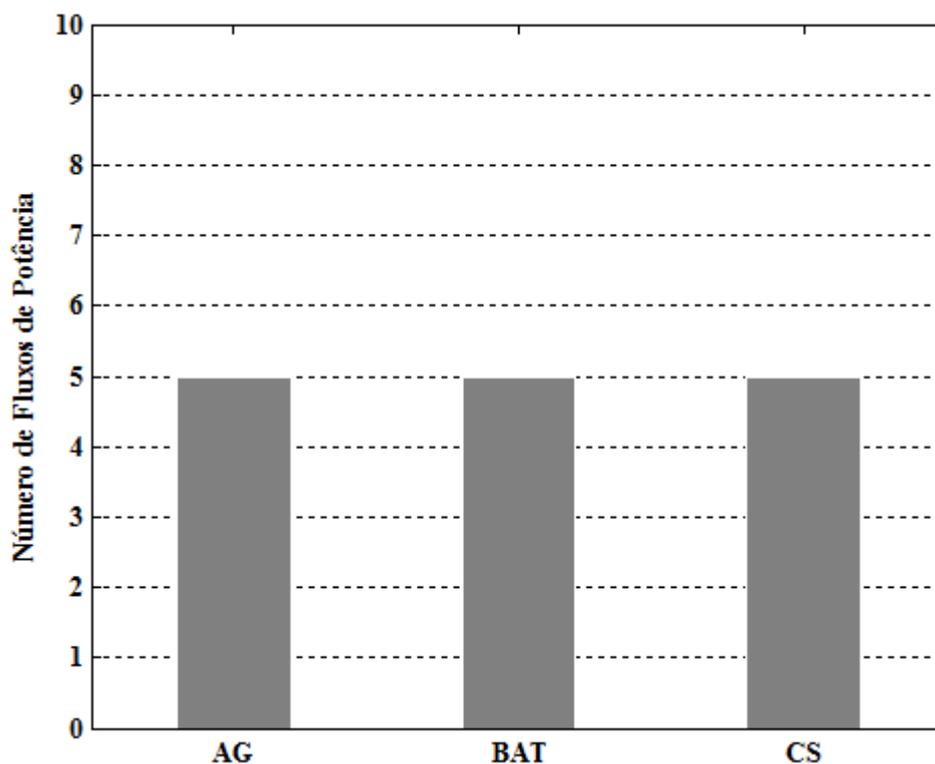


Figura 4.17: Gráfico de Desempenho dos Métodos Bio-Inspirados em relação ao número Médio de Fluxos de Potência do Segundo Estágio para Sistema IEEE 33 Barras

A quantidade de fluxo de potência executados é exatamente 5, neste caso, porque não havendo corte de carga são necessários:

- 2 fluxos executados na escolha da primeira chave a ser fechada;
- 1 fluxo de potência após a primeira manobra para verificação dos limites;
- 1 fluxo de potência executado na escolha da segunda chave a ser fechada;
- 1 fluxo de potência para verificação dos limites após a última manobra.

### 4.3.3 Avaliação da Influência do Tempo de Manobra

A presente seção tem por objetivo, mais uma vez, demonstrar a validade do método para sistemas cujas chaves manobráveis são operadas manualmente e, portanto o tempo de manobra deve ser considerado para que a energia não suprida em razão da falta seja minimizada.

O defeito e a configuração do sistema considerado são os mesmos apresentados na Figura 4.15. As seguintes premissas de simulação foram adotadas:

- ✓ Tensão na subestação (SE) foi considerada 1,0 p.u. durante todo o estudo;
- ✓ Limites de tensões nas barras foram considerados entre 0,80 p.u. e 1,05 p.u.;
- ✓ Limites de fluxos nos circuitos não foram considerados;
- ✓ Chaves de laço ( $S_7, S_9, S_{14}, S_{32}, S_{37}$ ) operadas manualmente: tempo de manobra para as chave  $S_7$  e  $S_9, S_{14} = 0.5h$ ; tempo de manobra para a chave  $S_{32}, S_{37} = 2,5h$ ;
- ✓ Todas as cargas foram consideradas com a mesma prioridade de atendimento.

A Tabela 4.24 apresenta uma comparação entre a solução encontrada pelo método proposto e o das metodologias encontradas em: (LIN; CHIN, 1998), (ZIDAN; EL-SAADANY, 2011) e (BORGES, 2012).

Tabela 4.24: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 33 Barras com Influência do Tempo de Manobra

Método	Chaveamento	Corte discreto de carga por chaveamento	Tensão mínima	Carga final restabelecida	Perdas
(LIN; CHIN, 1998)	Fechar $S_7$ Fechar $S_9$	0%	0,842 p.u. (Barra 31)	100%	301kW
(ZIDAN; EL-SAADANY, 2011)	Fechar $S_{37}$ Fechar $S_{14}$	0%	0,9284 p.u. (Barra 6)	100%	195kW
(BORGES, 2012)	1° - Fechar $S_{37}$	N/A	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	189kW
	2° - Fechar $S_9$	0%			
Método Proposto	1° - Fechar $S_9$	0%	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	189kW
	2° - Fechar $S_{37}$	0%	0,928 p.u. (Barra 6)		

Através da análise da Tabela 4.24 é possível observar, mais um vez, que a consideração do tempo de manobra impacta diretamente na ordem de chaveamento. Dessa forma, a diferença entre o resultado da metodologia proposta e o encontrado em (BORGES, 2012) é que a primeira determina o fechamento da chave  $S_9$  antes da chave  $S_{37}$ , pois a energia não suprida com o fechamento simples de  $S_9$  é maior que a de  $S_{37}$ . A consideração da energia não suprida, pois leva em conta o tempo em que uma região fica sem energia elétrica, tem um significativo resultado na otimização dos índices de continuidade da empresa como citado anteriormente neste trabalho.

#### 4.3.4 Influência de Consumidores Prioritários

A incorporação de consumidores prioritários ao problema de restabelecimento é de grande importância, pois em sistemas de distribuição reais sempre existem cargas prioritárias como hospitais, polícia militar, corpo de bombeiros, etc.

Dessa forma, a metodologia proposta assim como o método de (BORGES, 2012) considera esses consumidores prioritários na modelagem do problemas de otimização como explicitado na função objetivo (3.46).

A Tabela 4.25 apresenta os resultado da metodologia proposta juntamente com o do trabalho de (BORGES, 2012). A simulação foi conduzida considerando o defeito e a configuração do sistema apresentados na Figura 4.15. Adicionalmente, as seguintes premissas de simulação foram adotadas:

- ✓ Tensão na subestação (SE) foi considerada 1,0 p.u. durante todo o estudo;
- ✓ Limites de tensões nas barras foram considerados entre 0,90 p.u. e 1,05 p.u.;
- ✓ Limites de fluxos nos circuitos não foram considerados;
- ✓ Chaves manobradas remotamente. Tempo de manobra desprezado;
- ✓ Existência de consumidores prioritários na barra 9.

Tabela 4.25: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 33 Barras com Influência da Presença de Consumidores Prioritários

Método	Chaveamento	Corte discreto de carga por chaveamento	Tensão mínima por chaveamento	Carga final restabelecida
(BORGES, 2012)	1° - Fechar S <sub>9</sub>	N/A	0,928 p.u. (Barra 6)	100%
	2° - Fechar S <sub>37</sub>	0%	0,928 p.u. (Barra 6)	
Método Proposto	1° - Fechar S <sub>9</sub>	0%	0,928 p.u. (Barra 6)	100%
	2° - Fechar S <sub>37</sub>	0%		

Observando a Tabela 4.25 nota-se que a metodologia também incorpora de maneira eficiente os consumidores prioritários no processo de restabelecimento, adequando o algoritmo a uma exigência real dos Sistemas Elétricos de Distribuição como regulamenta o Módulo 1 dos Procedimentos de Distribuição da ANEEL (PRODIST).

---

### **4.3.5 Avaliação da Influência de Limites de Tensão nas Barras**

Essa seção apresenta os resultados comparativos entre a metodologia proposta e demais metodologias avaliando a influência da variação do limite de tensão na solução do problema de restabelecimento.

As análises consistem na variação dos limites inferiores de tensão em: 0,85 p.u., 0,90 p.u., 0,95 p.u. para o sistema IEEE 33 Barras. Os cortes de carga, quando necessários, foram feitos de maneira discreta utilizando o algoritmo do segundo estágio dessa dissertação em todas as metodologias comparadas. Os resultados de cada análise serão discutidos em subseções separadas para cada limite distinto de tensão.

#### **4.3.5.1 Limite Inferior de Tensão em 0,85 p.u.**

A Tabela 4.26 apresenta os resultados da metodologia proposta juntamente com os dos trabalhos de (LIN; CHIN, 1998), (ZIDAN; EL-SAADANY, 2011) e (BORGES, 2012). A simulação foi conduzida considerando que o defeito e a configuração do sistema considerado são os mesmos apresentados na Figura 4.15. Adicionalmente, as seguintes premissas de simulação foram adotadas:

- ✓ Tensão na subestação (SE) foi considerada 1,0 p.u. durante todo o estudo;
- ✓ Limites de tensões nas barras foram considerados entre 0,85 p.u. e 1,05 p.u.;
- ✓ Limites de fluxos nos circuitos não foram considerados;
- ✓ Chaves manobradas remotamente. Tempo de manobra desprezado;
- ✓ Todas as cargas foram consideradas com a mesma prioridade de atendimento.

Tabela 4.26: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 33 Barras – Limite Inferior de Tensão de 0,85p.u.

Método	Chaveamento	Corte discreto de carga por chaveamento	Tensão mínima por chaveamento	Carga final restabelecida	Perdas
Busca Exaustiva*	Fechar S <sub>37</sub> Fechar S <sub>9</sub>	0%	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	189kW
(LIN; CHIN, 1998)	Fechar S <sub>7</sub> Fechar S <sub>9</sub>	Barra 28 (8%)	0,854 p.u. (Barra 31)	92%	292kW
(ZIDAN; EL-SAADANY, 2011)	Fechar S <sub>37</sub> Fechar S <sub>14</sub>	0%	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	195kW
(BORGES, 2012)	1° - Fechar S <sub>37</sub>	N/A	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	189kW
	2° - Fechar S <sub>9</sub>	0%			
Método Proposto	1° - Fechar S <sub>37</sub>	0%	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	189kW
	2° - Fechar S <sub>9</sub>	0%	0,928 p.u. (Barra 6)		

\*Ótimo global conseguido por busca exaustiva em um tempo de 10,25s.

A análise da Tabela 4.26 mostra que o trabalho de (LIN; CHIN, 1998), restabelece 92% da carga. No entanto, a metodologia proposta e o método de (BORGES, 2012) chegam na solução ótima global para este caso restabelecendo 100% da carga. O trabalho de (ZIDAN; EL-SAADANY, 2011) também restabelece 100% da carga desse sistema, porém as perdas nessa configuração (195kW) são maiores que as perdas obtidas pela configuração da metodologia proposta (189kW).

#### 4.3.5.2 Limite Inferior de Tensão em 0,90 p.u.

A Tabela 4.27 apresenta os resultados da metodologia proposta juntamente com os trabalhos de (LIN; CHIN, 1998), (ZIDAN; EL-SAADANY, 2011) e (BORGES, 2012). A simulação foi conduzida considerando o defeito e a configuração do sistema considerado são os mesmos apresentados na Figura 4.15. Adicionalmente, as seguintes premissas de simulação foram adotadas:

- ✓ Tensão na subestação (SE) foi considerada 1,0 p.u. durante todo o estudo;
- ✓ Limites de tensões nas barras foram considerados entre 0,90 p.u. e 1,05 p.u.;
- ✓ Limites de fluxos nos circuitos não foram considerados;
- ✓ Chaves manobradas remotamente. Tempo de manobra desprezado;
- ✓ Todas as cargas foram consideradas com a mesma prioridade de atendimento.

Tabela 4.27: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 33 Barras –Limite Inferior de Tensão de 0,90p.u.

Método	Chaveamento	Corte discreto de carga por chaveamento	Tensão mínima por chaveamento	Carga final restabelecida	Perdas
Busca Exaustiva*	Fechar S <sub>37</sub> Fechar S <sub>9</sub>	0%	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	189kW
(LIN; CHIN, 1998)	Fechar S <sub>7</sub> Fechar S <sub>9</sub>	Barras:12,25,27,29 (26%)	0,900 p.u. (Barra 31)	74%	167kW
(ZIDAN; EL-SAADANY, 2011)	Fechar S <sub>37</sub> Fechar S <sub>14</sub>	0%	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	195kW
(BORGES, 2012)	1° - Fechar S <sub>37</sub>	N/A	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	189kW
	2° - Fechar S <sub>9</sub>	0%			
Método Proposto	1° - Fechar S <sub>37</sub>	0%	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	189kW
	2° - Fechar S <sub>9</sub>	0%	0,928 p.u. (Barra 6)		

\*Ótimo global conseguido por busca exaustiva em um tempo de 10,5/s.

Observando a Tabela 4.27 percebe-se que o trabalho de (LIN; CHIN, 1998), restabelece 74% da carga. Em contra partida a metodologia proposta e o método de (BORGES, 2012) chegam na solução ótima global para este caso restabelecendo 100% da carga. O trabalho de (ZIDAN; EL-SAADANY, 2011), novamente, restabelece 100% da carga desse sistema com mesma de tensão mínima na barra 6, porém as perdas nessa configuração (195kW) são maiores que as perdas obtidas pela configuração da metodologia proposta (189kW).

---

#### 4.3.5.3 Limite Inferior de Tensão em 0,95 p.u.

A simulação considerando o limite inferior de tensão em 0,95 p.u. foi conduzida considerando o defeito e a configuração do sistema considerado são os mesmos apresentados na Figura 4.15. Adicionalmente, as seguintes premissas de simulação foram adotadas:

- ✓ Tensão na subestação (SE) foi considerada 1,0 p.u. durante todo o estudo;
- ✓ Limites de tensões nas barras foram considerados entre 0,95 p.u. e 1,05 p.u.;
- ✓ Limites de fluxos nos circuitos não foram considerados;
- ✓ Chaves manobradas remotamente. Tempo de manobra desprezado;
- ✓ Todas as cargas foram consideradas com a mesma prioridade de atendimento.

O sistema da Figura 4.15 com as considerações acima, trata-se de um caso bem restritivo para as condições padrões do Sistema original de IEEE Barras de (BARAN; WU, 1989). Dessa forma, diferentemente, dos demais casos anteriores nos quais a matriz de população inicial foi criada considerando o fechamento simples de até duas chaves de laço, nesse exemplo teste a matriz de população inicial dos algoritmos bio-inspirados para o primeiro estágio foi inicializada com combinações simples de até 4 chaves de laço fechadas como mostra a Tabela 4.28.

Tabela 4.28: População Inicial com Codificação Binária para o Sistema IEEE 33 Barras – Limite inferior de tensão de 0,95 p.u.

		Chaves Manobráveis																																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37				
Indivíduos	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1			
	2	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0		
	3	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0		
	4	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0		
	5	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0		
	6	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
	7	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1		
	8	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1		
	9	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
	10	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
	11	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	12	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	13	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	14	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	15	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	16	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	17	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	18	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	19	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	20	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	21	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	22	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	23	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	24	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	25	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	26	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	27	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	28	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	29	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	30	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
31	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
32	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
33	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
34	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
35	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
36	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
37	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	

A Tabela 4.29 apresenta os resultado da metodologia proposta juntamente com o dos trabalhos de (LIN; CHIN, 1998), (ZIDAN; EL-SAADANY, 2011) e (BORGES, 2012).

Tabela 4.29: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 33 Barras –Limite Inferior de Tensão de 0,95p.u.

Método	Chaveamento	Corte discreto de carga por chaveamento	Tensão mínima por chaveamento	Carga final restabelecida	Perdas
(LIN; CHIN, 1998)	Fechar S <sub>7</sub> Fechar S <sub>9</sub>	Barras: 6,9,10,12,13,25,26, 27,28,29,30,31 (92%)	0,951 p.u. (Barra 32)	8%	48kW
(ZIDAN; EL-SAADANY, 2011)	Fechar S <sub>37</sub> Fechar S <sub>14</sub>	Barras: 5,9,10, 12,13, 28,29 (45%)	0,950 p.u. (Barra 6)	55%	94kW
(BORGES, 2012)	1° - Fechar S <sub>37</sub>	N/A	0,952 p.u. (Barra 16)	64%	97kW
	2° - Fechar S <sub>9</sub>	N/A			
	3° - Fechar S <sub>32</sub>	N/A			
	4° - Abrir S <sub>17</sub>	N/A			
	5° - Fechar S <sub>7</sub>	N/A			
	6° - Abrir S <sub>25</sub>	Barras: 11,13,29,30 (36%)			
Método Proposto	1° - Fechar S <sub>9</sub>	Barras: 9,10,12 (48%)	0,951 p.u. (Barra 32)	66%	100kW
	2° - Fechar S <sub>37</sub>	Barras: 9,10,12,13,25, 28,29 (45%)	0,951 p.u. (Barra 6)		
	3° - Fechar S <sub>32</sub>	Barras: 9,11,25,26, 29,30 (40%)	0,951 p.u. (Barra 6)		
	4° - Abrir S <sub>17</sub>	Barras: 10,26,27,29, 31 (39%)	0,952 p.u. (Barra 13)		
	5° - Fechar S <sub>7</sub>	Barras: 11,13,28,29,30 (43%)	0,951 p.u. (Barra 16)		
	6° - Abrir S <sub>27</sub>	Barras: 11,12,13,27,29 (34%)	0,951 p.u. (Barra 16)		

A partir da análise da Tabela 4.29 revela que o trabalho de (LIN; CHIN, 1998) restabeleceu somente 8% da carga do sistema enquanto que a metodologia de (ZIDAN; EL-SAADANY, 2011) restabelece 55%.

Continuando a observação da Tabela 4.29, nota-se que a metodologia proposta restabelece 66% da carga do sistema, 2% a mais que o método encontrado em (BORGES, 2012) que restabelece 64%.

---

Analisando a sequência de chaveamento entre as duas metodologias, nota-se que existem dois grupos de manobras distintas:

1. Inversão na sequência de chaveamento entre  $S_9$  e  $S_{37}$  que é ocasionada pois a metodologia proposta leva em conta, como parcela da função objetivo (3.46) do segundo estágio, o perfil de tensão para chaveamentos que violam os limites de tensão nas barras.
2. O método utilizando nessa dissertação determina a abertura da chave  $S_{27}$  e o algoritmo proposto por (BORGES, 2012) realiza a abertura da  $S_{25}$ .

A inversão na sequência de chaveamento fez com que, para este caso, o algoritmo proposto escolhesse fechar a chave  $S_9$  primeiro que a  $S_{37}$  o que na prática restabelece parcialmente um menor montante de carga, porém leva o sistema a um melhor perfil intermediário de tensão.

A abertura da chave  $S_{27}$  realmente faz com que o sistema em um estado restabelecido final tenha uma porcentagem maior de carga restaurada.

Uma confirmação de que a configuração final obtida pela presente metodologia, realmente, minimiza mais a função objetivo (3.46) foi a substituição do primeiro indivíduo da população inicial mostrada na Tabela 4.28 pela configuração final de (BORGES, 2012). Ao simular o algoritmo proposto com a população inicial mencionada em 100% dos casos foi obtida configuração final em que a última chave a ser aberta é a  $S_{27}$ .

#### **4.3.6 Avaliação da Influência de Limites de Fluxo de Potência Aparente nos Circuitos**

A inclusão dos limites de fluxo na metodologia de restabelecimento não é abordado pela maioria dos trabalhos da literatura como comenta (BORGES, 2012). No entanto, a presente metodologia assim como o trabalho de (BORGES, 2012) incorpora a avaliação dos limites das linhas no cálculo do valor da função objetivo.

A simulação considerando o limite de potência aparente nos circuitos foi conduzida considerando que o defeito e a configuração do sistema considerado são os mesmos

apresentados na Figura 4.15. Adicionalmente, as seguintes premissas de simulação foram adotadas:

- ✓ Tensão na subestação (SE) foi considerada 1,0 p.u. durante todo o estudo;
- ✓ Limites de tensões nas barras foram considerados entre 0,80 p.u. e 1,05 p.u.;
- ✓ Limites de fluxos nos seguintes circuitos:  $S_2=2.942,74\text{kVA}$ ,  $S_{22}=1.044,86\text{kVA}$ ;  $S_{23}=938,30\text{kVA}$ ;  $S_{24}=466,77\text{kVA}$ .
- ✓ Chaves manobradas remotamente. Tempo de manobra desprezado;
- ✓ Todas as cargas foram consideradas com a mesma prioridade de atendimento.

A Tabela 4.30 apresenta os resultados da metodologia proposta juntamente com o do trabalho de (BORGES, 2012).

Tabela 4.30: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema IEEE 33 Barras com Influência do Limite de fluxo de Potência Aparente nos Circuitos.

Método	Chaveamento	Corte discreto de carga por chaveamento	Tensão mínima por chaveamento	Carga final restabelecida
Busca Exaustiva*	Fechar $S_7$ Fechar $S_9$	0%	0,842 p.u. (Barra 31)	100%
(BORGES, 2012)	1° - Fechar $S_7$	N/A	0,928 p.u. (Barra 6)	100%
	2° - Fechar $S_9$	0%		
Método Proposto	1° - Fechar $S_7$	0%	0,862 p.u. (Barra 31)	100%
	2° - Fechar $S_9$	0%	0,842 p.u. (Barra 31)	

\*Ótimo global conseguido em um tempo de 10,46s.

Assim como o trabalho de (BORGES, 2012), ao considerar o limite de fluxos nas linhas:  $S_2$ ,  $S_{22}$ ;  $S_{23}$ ;  $S_{24}$  igual aos valores de fluxo aparente nessas linhas para o caso base do sistema desconsiderando a falta, criou-se uma restrição para manobra da chave  $S_{37}$  que, anteriormente, com o sistema relaxado da comparação da seção 4.3.1, era a chave a ser selecionada. Dessa forma, de maneira esperada, a metodologia proposta também foi capaz de encontrar um caminho alternativo de tal modo que essa chave não fosse selecionada. Adicionalmente, verifica-se pela observação da Tabela 4.30 que esse caminho alternativo foi, para esse sistema, com as atuais condições da rede, a solução ótima global.

---

#### 4.4 Sistema Teste 4: Sistema de 476 Barras

A simulação utilizando o Sistema de 476 Barras tem o objetivo de validar a metodologia proposta tanto em qualidade de solução quanto em viabilidade computacional para um sistema de médio porte. Dessa forma, o problema de restabelecimento foi abordado em um sistema de distribuição real apresentado pela primeira vez em (GOMES, F. V. *et al.*, 2006).

O sistema de distribuição possui 476 barras, 479 circuitos sendo 22 desses manobráveis com 4 chaves de laço. A Figura 4.18 ilustra a parte do sistema onde se encontram os circuitos manobráveis. As 4 chaves NA são:  $S_{10643}$ ,  $S_{5380}$ ,  $S_{1167}$ ,  $S_{10647}$ .

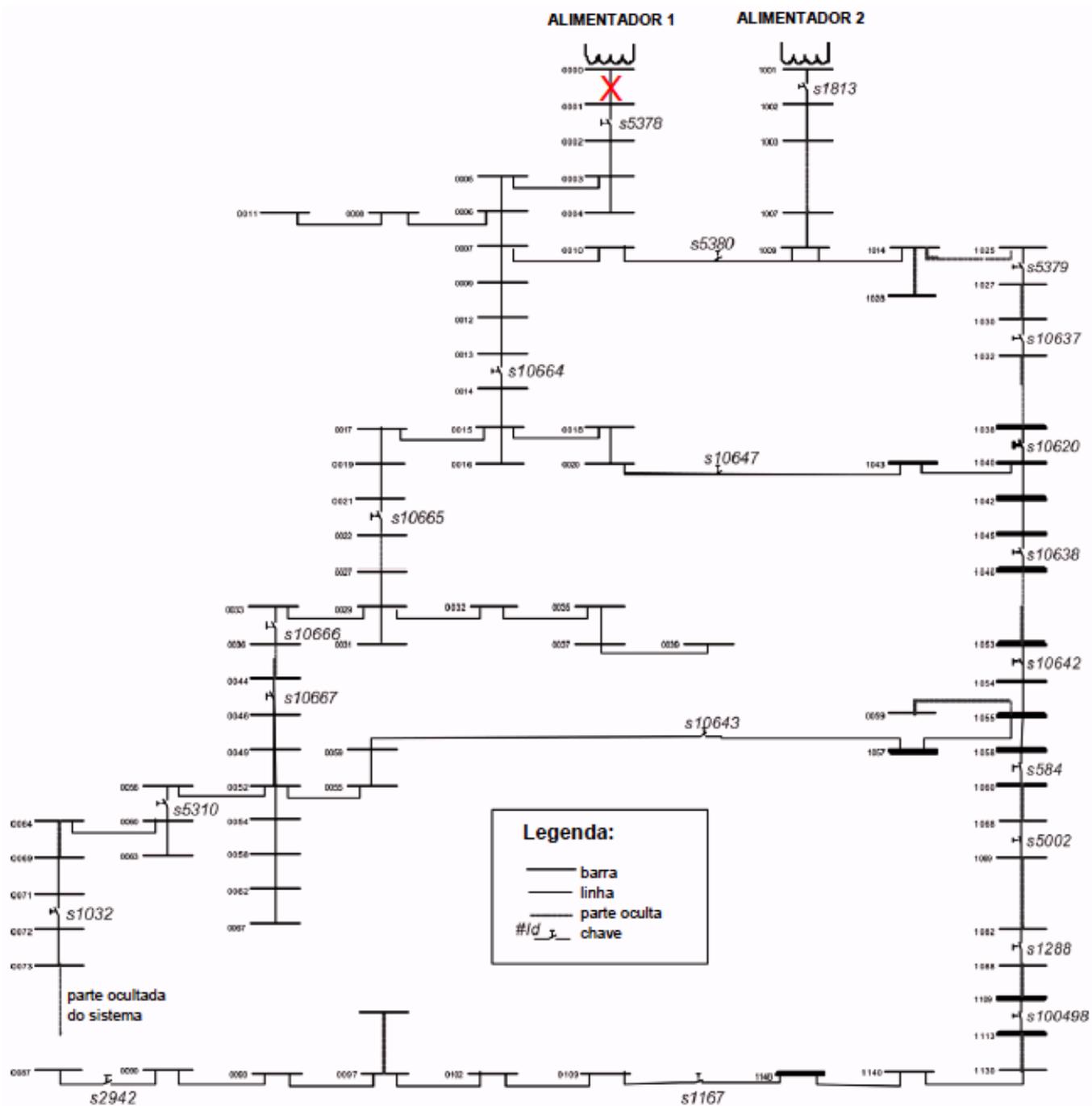


Figura 4.18: Sistema de 476 Barras (BORGES, 2012).

Neste sistema, como mostrado na Figura 4.18, é considerado um curto-circuito permanente entre as Barras 0 e 1(BORGES, 2012).

#### 4.4.1 Avaliação Comparativa de Resultados

As seguintes premissas foram adotadas na execução do algoritmo de restabelecimento para o sistema de 476 Barras ilustrado, parcialmente, através da Figura 4.18:

- ✓ Tensão na subestação (SE) foi considerada 1,0 p.u. durante todo o estudo;
- ✓ Limites de tensões nas barras foram considerados entre 0,90 p.u. e 1,05 p.u.;
- ✓ Limites de fluxos nos circuitos não foram considerados;
- ✓ Chaves manobradas remotamente. Tempo de manobra desprezado;
- ✓ Todas as cargas foram consideradas com a mesma prioridade de atendimento.

A Tabela 4.31 apresenta os resultado da metodologia proposta juntamente com o dos trabalhos de (BORGES, 2012).

*Tabela 4.31: Comparação do Resultado Final do Restabelecimento do Sistema de 476 Barras*

<b>Método</b>	<b>Chaveamento</b>	<b>Corte discreto de carga por chaveamento</b>	<b>Tensão mínima por chaveamento</b>	<b>Carga final restabelecida</b>
Busca Exaustiva*	Fechar S <sub>5380</sub>	0%	0,935 p.u. (Barra 214)	100%
(BORGES, 2012)	1º - Fechar S <sub>5380</sub>	0%	0,935 p.u. (Barra 214)	100%
Método Proposto	1º - Fechar S <sub>5380</sub>	0%	0,935 p.u. (Barra 214)	100%

\*Ótimo global conseguido por busca exaustiva em um tempo de 16,29s.

A análise da Tabela 4.31 revela que tanto a metodologia proposta quanto o trabalho de (BORGES, 2012) chegam à solução ótima global, para este caso, com o fechamento do circuito S<sub>5380</sub>.

#### **4.4.2 Avaliação do Desempenho dos Algoritmos Bio-Inspirados**

O primeiro estágio para o sistema 476 Barras foi resolvido utilizando três métodos bio-inspirados na resolução da função objetivo (3.37).

A seguir são listados os parâmetros gerais adotados nas simulações:

- Número de indivíduos:  $n_{chaves} = 22$
- Número da população: 30
- Número máximo de gerações: 100

- 
- Número máximo de repetições do mesmo valor da função aptidão como melhor solução: aproximação  $\left(\frac{(\text{Número da população})}{4}\right)$
  - Número de simulações: 10

Os parâmetros individuais ajustados através de tentativa para cada um dos métodos cada são:

7. Algoritmo Genético:

- Taxa de mutação:  $0,2 = 20\%$
- Taxa de recombinação (*crossover*):  $0,8 = 100\%$
- Elitismo: 2
- Função seleção de pais para a recombinação e mutação: Roleta
- Função de mutação: Gaussiana
- Função de recombinação: Função de dois pontos (*crossovertwopoints*)
- Fração de migração:  $0.3 = 30\%$

8. Algoritmo de eco localização de morcegos (*Bat Algorithm*):

- Intensidade sonora inicial: 0,95
- Constante da equação da intensidade sonora:  $\alpha = 0,90$
- Taxa de emissão de pulsos inicial:  $r_0 = 0,95$
- Constante da equação da taxa de emissão de pulsos:  $\gamma = 0,90$
- Frequência mínima: 0
- Frequência máxima: 1

9. Método da reprodução dos pássaros Cuco (*Cuckoo Search*):

- Fração de ovos descobertos:  $0,2 = 20\%$

Todos as técnicas bio-inspiradas chegaram no resultado da Tabela 4.32 para todas as simulações propostas.

A Tabela 4.32 revela os tempos computacionais médios em segundos e em porcentual da metaheurística “mais lenta” que neste caso foi, mais uma vez, o Algoritmo Genético (AG) .

Tabela 4.32: Comparação entre Tempos de Simulação Métodos Bio-Inspirados para o Sistema de 476 Barras – Primeiro Estágio

Parâmetro	AG	BAT	CS
	Estagio 1	Estagio 1	Estagio 1
Tempo Médio (min)	29,683	3,247	3,386
Tempo Médio (%)	100	10,9	11,4

A observação da Tabela 4.32 revela que o desempenho computacional do *Bat Algorithm* (BAT) é 89.1% superior ao do AG. O *Cuckoo Search* (CS) teve desempenho bem semelhante ao BAT, sendo 88.6% superior ao AG.

A Figura 4.19 apresenta o desempenho das metaheurística no primeiro estágio com respeito ao número de fluxos de potência médios executados. Através da figura, percebe-se que o AG teve o pior desempenho, executando um total de 537 fluxos de potência em média. O CS executou 74 fluxos, desempenho próximo ao do BAT com 72 fluxos.

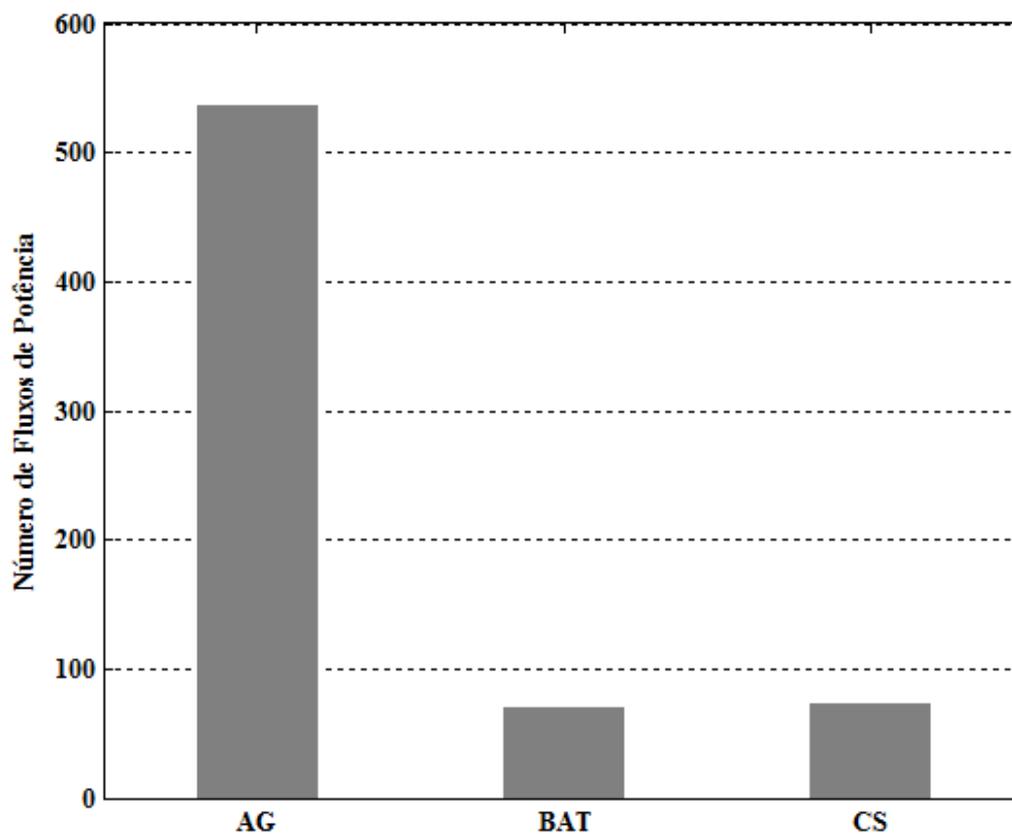


Figura 4.19: Gráfico de Desempenho dos Métodos Bio-Inspirados em relação ao Número Médio de Fluxos de Potência do Primeiro Estágio para Sistema de 476 Barras

---

O segundo estágio do algoritmo proposto, utiliza métodos bio-inspirados na resolução da função multi-objetivo de corte de carga discreto.

A seguir são listados os parâmetros gerais adotados nas simulações:

- Número de indivíduos:  $n^{\circ}$  de barras a sofrerem corte
- Número da população:  $3 \times$  (Número de indivíduos)
- Número máximo de gerações: 100
- Número máximo de repetições do mesmo valor da função aptidão como melhor solução: aproximação  $\left(\frac{(\text{Número da população})}{4}\right)$
- Número de simulações: 10

Os parâmetros individuais ajustados através de tentativa para cada um dos métodos são:

1. Algoritmo Genético:

- Taxa de mutação:  $0,2 = 20\%$
- Taxa de *crossover*:  $0,8 = 100\%$
- Elitismo: 2
- Função seleção de pais para o *crossover* e mutação: Roleta
- Função de mutação: Gaussiana
- Função de *crossover*: Função de dois pontos (*crossover two points*)
- Fração de migração:  $0,3 = 30\%$

2. Algoritmo de eco localização de morcegos (*Bat Algorithm*):

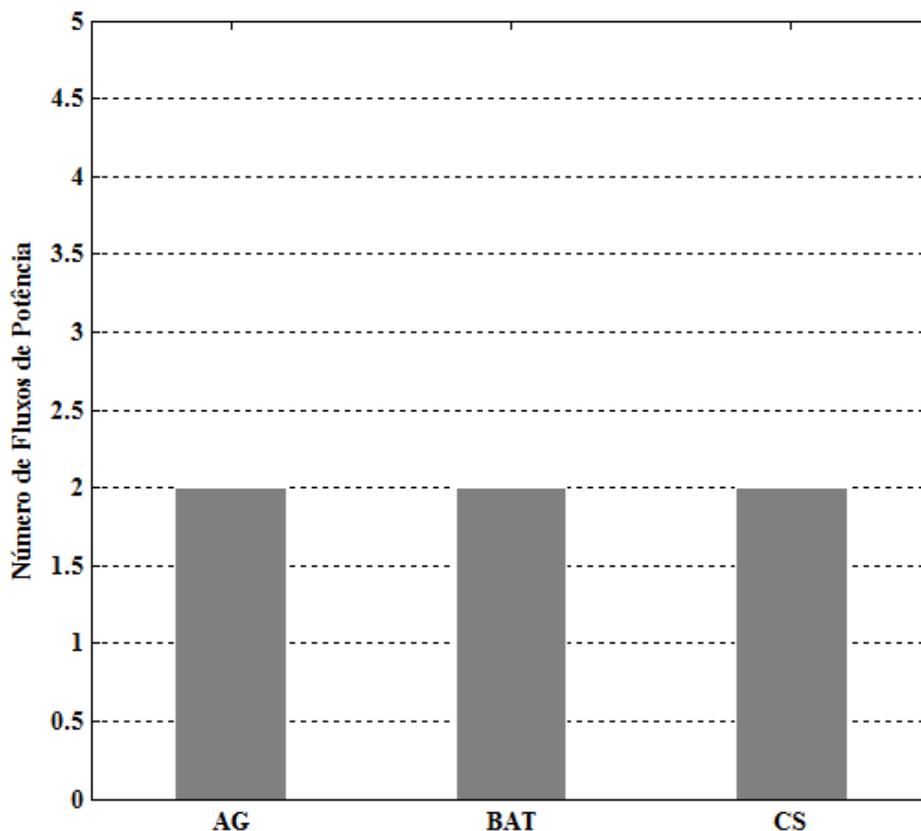
- Intensidade sonora inicial: 0,95
- Constante da equação da intensidade sonora:  $\alpha = 0,90$
- Taxa de emissão de pulsos inicial:  $r_0 = 0,95$
- Constante da equação da taxa de emissão de pulsos:  $\gamma = 0,90$
- Frequência mínima: 0
- Frequência máxima: 1

3. Método da reprodução dos pássaros Cuco (*Cuckoo Search*):

- Fração de ovos descobertos:  $0,2 = 20\%$

---

No segundo estágio da metodologia, para o caso simulado segundo as premissas da seção 4.4.1, não foi necessário o corte discreto de carga em nenhum chaveamento. Esse fato pode ser comprovado analisando a Figura 4.20 em que para todas as metodologias bio-inspiradas utilizadas, no sistema de 476 Barras, a quantidade de fluxo de potência executados é igual a 2. Isso porque, para nesse caso, os limites pré-estabelecidos não foram violados em nenhum chaveamento, ou seja, não foi necessário realizar corte de carga.



*Figura 4.20: Gráfico de Desempenho dos Métodos Bio-Inspirados em relação ao Número Médio de Fluxos de Potência do Segundo Estágio para Sistema de 476 Barras*

A quantidade de fluxo de potência executados é exatamente 2, neste caso, porque não havendo corte de carga são necessários:

- 1 fluxo executado na escolha da primeira e única chave a ser fechada;
- 1 fluxo de potência após a manobra para verificação dos limites;

## 4.5 Desempenho Computacional

O restabelecimento em Sistemas Elétricos de Distribuição é um problema em tempo real, tendo a necessidade de, computacionalmente, ser resolvido na escala de até alguns minutos para que o plano de restabelecimento, contendo as manobras a serem realizadas, possa ser enviado ao setor operacional que irá realizar, efetivamente, as manobras de forma remota ou manual dependendo dos tipos de chaves/religadores presentes no sistema.

Dessa forma, uma análise do desempenho geral, para os sistemas analisados, da metodologia proposta é mostrada na Tabela 4.33.

*Tabela 4.33: Desempenho Computacional Geral da Metodologia Proposta*

Sistema Teste	Método Bio-Inspirado	Tempo Médio	
		1º Estágio	2º Estágio
IEEE 16 Barras	Algoritmo Genético	2,253s	2,875s
	Método Baseado na Eco Localização de Morcegos	0,407s	0,404s
	Método Baseado na Reprodução de Pássaros Cucos	0,394s	0,272s
IEEE 33 Barras	Algoritmo Genético	4,570s	0,101s
	Método Baseado na Eco Localização de Morcegos	1,219s	0,093s
	Método Baseado na Reprodução de Pássaros Cucos	1,775s	0,089s
476 Barras	Algoritmo Genético	29,683 min	7,371s
	Método Baseado na Eco Localização de Morcegos	3,247 min	7,338 s
	Método Baseado na Reprodução de Pássaros Cucos	3,386 min	7,613

A metodologia proposta, mesmo utilizando Métodos Bio-Inspirados na resolução dos problemas de otimização em cada estágio pode ser considerada, analisando a Tabela 4.33, de boa eficiência computacional.

---

Os resultados obtidos para o sistema real de 476 barras comprovam a afirmativa a eficiência computacional do método proposto, pois nele o cálculo de fluxo de potência é mais demorado, e mesmo assim, é o problema é resolvido em questão de menos de 4 minutos com os Métodos de Eco Localização de Morcegos e Reprodução dos Pássaros Cucos cujos desempenhos são muito próximos.

Vale ressaltar, mais uma vez, que todos as metaheurísticas foram implementadas em um formulação básica a fim de comparar o desempenho mais original de cada uma delas na resolução dos problemas de otimização modelados.

O baixo desempenho do Algoritmo Genético em relação os demais métodos utilizados, principalmente no, não invalida a utilização dessa metaheurísticas em uma versão especialista voltada a resolução da metodologia proposta. Porém, é notório que a investigação de outros métodos Bio-Inspirados de solução, como a apresentada neste trabalho, é de fundamental importância para metodologias que utilizam metaheurísticas a fim de validar o trabalho em questão enfatizando qual seria o melhor método de solução.

Finalmente, destaca-se que apesar dos métodos matemáticos baseados em orientação gradiente (BORGES, 2012), serem mais rápidos computacionalmente que os métodos baseados em metaheurísticas, como é o caso do presente trabalho, o mais importante para a operação dos sistemas elétricos de distribuição é que a qualidade da resposta seja elevada e os tempos não sejam proibitivos.

#### **4.6 Sumário do Capítulo**

O Capítulo 4 apresentou o Estudo de Casos realizado com o objetivo de validar a metodologia proposta para o Restabelecimento de Sistema Elétrico de Distribuição.

Os resultados obtidos foram comparados com outros métodos da literatura com a finalidade de avaliar a qualidade das soluções. Em todos os casos simulados, a metodologia proposta apresentou sempre os melhores resultados até então obtidos na literatura sendo que em um caso foi melhor, isoladamente, que todos os métodos comparados. Adicionalmente verificou-se que e o tempo computacional exigido pela metodologia proposta está dentro do intervalo tolerado.

---

# Capítulo 5. -

## Conclusões

### 5.1 Considerações Gerais

Esta dissertação apresentou uma metodologia multi-estágio para o restabelecimento de SED.

O algoritmo proposto possui dois estágios. No primeiro estágio é definida a configuração final do sistema utilizando técnicas bio-inspiradas. No segundo estágio é determinada a sequência de chaveamento levando-se em conta o tempo de manobra caso o sistema de distribuição em questão possua chaves manobradas manualmente. Adicionalmente, no segundo estágio, é realizado o corte discreto de carga por chaveamento caso os limites operativos do sistema sejam violados.

Pode-se concluir que, por basear-se em cálculos de fluxo de potência convencional a metodologia proposta não apresenta problemas de convergência associados ao ponto de partida ou às discontinuidades no espaço de busca. Essa característica é válida na solução das funções objetivos formuladas no primeiro estágio na obtenção da configuração do sistema restabelecido e no segundo estágio para o corte mínimo discreto de carga. Os únicos valores que devem ser ajustados convenientemente são os pesos de cada parcela das funções objetivo como foi descrito na seções 3.4.1 e 3.4.2.

No presente trabalho com o intuito de validar a modelagem do primeiro estágio e o corte discreto de carga, no segundo estágio, foi comparado o desempenho de três metodologias bio-inspiradas: Algoritmo Genéticos, Método de Eco Localização de Morcegos e Método de Reprodução dos Pássaros Cucos. Essa comparação foi de grande importância, pois analisa a robustez e o desempenho computacional dos algoritmos bio-inspirados e a sua capacidade de resolver o problema de restabelecimento formulado em tempo real (escala de até alguns minutos).

---

Também, verificou-se que o Método de Eco Localização de Morcegos e o Método de Reprodução dos Pássaros Cucos possuem desempenhos computacionais bem superiores ao desempenho dos Algoritmos Genéticos na resolução do problema de otimização proposto. Deve-se ainda mencionar que os dois primeiros métodos bio-inspirados possuem menos parâmetros a serem ajustados que os Algoritmos Genéticos.

A qualidade dos resultados obtidos pela metodologia proposta foi positivamente avaliada quando comparada com um dos métodos, atualmente, mais eficazes da literatura (BORGES, 2012) e busca exaustiva. Também foi observado que a metodologia proposta conseguiu melhor resultado que (BORGES, 2012) para um caso teste, mostrado na seção 4.3.5.3, comprovando a eficiência da modelagem proposta e a validade na utilização de algoritmos de bio-inspirados para uma maior exploração do espaço de busca do problema.

Finalmente, pode-se listar como principais contribuições do trabalho:

- ✓ A consideração do tempo de chaveamento na determinação da sequência de manobra;
- ✓ O corte mínimo discreto de carga por chaveamento;
- ✓ A utilização da teoria de grafos na abertura de laço, simplificando a função objetivo do primeiro estágio após a retirada da penalização por radialidade, uma vez que todos os indivíduos do primeiro avaliados neste estágio são obrigatoriamente radiais;
- ✓ A utilização de métodos bio-inspirados considerando simultaneamente: consumidores prioritários, limites de tensão nas barras, limite de fluxo de potência nos circuitos.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

O presente trabalho suscita a investigação de alguns tópicos como:

- ✓ Implementação da metodologia em linguagem orientada a objetivos utilizando linguagem computacional eficiente como C++;
- ✓ Paralelização das metodologias bio-inspiradas e investigação em sistema de grande porte;

- 
- ✓ Formulação de uma plataforma híbrida de restabelecimento considerando como um indivíduo da população inicial a solução obtida em (BORGES, 2012) para garantir qualidade de resposta orientando mais a busca através de uma solução reconhecidamente boa;
  - ✓ Implementação de metodologia para otimizar os fatores de penalização para violação das funções multi-objetivo do primeiro estágio e segundo estágio (corte discreto de carga);
  - ✓ Inclusão do corte discreto de carga, também, na função objetivo do primeiro estágio;
  - ✓ Investigação de sistemas trifásicos desbalanceados utilizando fluxo de potência trifásico;
  - ✓ Paralelização das metodologias Bio-Inspiradas e investigação em sistema de grande porte;
  - ✓ Investigação da eficiência computacional de outras técnicas bio-inspiradas para a resolução matemática desse problema de otimização não-linear inteiro misto como: o *Monkey Search* (DUQUE; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2012) e Sistemas Imunológicos Artificiais (DE OLIVEIRA *et al.*, 2014).

---

# Referências Bibliográficas

- ADIBI, M. *et al.* Power system restoration-a task force report. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 2, n. 2, p. 271–277, 1987.
- ANEEL. **Nota Técnica n° 0022/2011-SRD/ANEEL**. Brasil: Brasil, 2011.
- \_\_\_\_\_. **Resolução Normativa n° 502, de 7 de Agosto de 2012**. Brasil: Brasil, 2012.
- ANEEL, P. D. E. **Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8- Qualidade da Energia Elétrica**. Brasil: Brasil, 2007.
- AOKI, K. *et al.* A new algorithm for service restoration in distribution systems. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 4, n. 3, p. 1832–1839, 1989.
- ARCANJO, D. N. *et al.* **Cuckoo search optimization technique applied to capacitor placement on distribution system problem** Industry Applications (INDUSCON), 2012 10th IEEE/IAS International Conference on. **Anais... In: INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON), 2012 10TH IEEE/IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON**. IEEE, 2012
- BALABANIAN, N.; BICKART, T. A. **Linear network theory: analysis, properties, design and synthesis**. [s.l.] Matrix Pub, 1981.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 4, n. 2, p. 1401–1407, 1989.
- BORGES, T. T. **Restabelecimento de Sistemas de Distribuição Utilizando Fluxo de Potência Ótimo**. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- BROWN, C. T.; LIEBOVITCH, L. S.; GLENDON, R. Lévy flights in Dobe Ju/'hoansi foraging patterns. **Human Ecology**, v. 35, n. 1, p. 129–138, 2007.
- CARVALHO, P. M. S.; CARVALHO, F. J. D.; FERREIRA, L. A. F. **Dynamic Restoration of Large-Scale Distribution Network Contingencies: Crew Dispatch Assessment** Power Tech, 2007 IEEE Lausanne. **Anais... In: POWER TECH, 2007 IEEE LAUSANNE**. 2007
- CHEN, C. S.; LIN, C. H.; TSAI, H. Y. A rule-based expert system with colored Petri net models for distribution system service restoration. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 17, n. 4, p. 1073–1080, 2002.
- CHEN, W. H. Quantitative decision-making model for distribution system restoration. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 25, n. 1, p. 313–321, 2010.
- CIVANLAR, S. *et al.* Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988.
- COELHO, F. C. R. **Alocação de Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Via Otimização Bioinspirada na Ecolocalização de Morcegos**. Juiz de Fora: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013.
- COSTA, J. S. **Técnicas de Otimização Aplicadas a Sistemas Elétricos de Distribuição**. Juiz de Fora: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008.

---

DELBEM, A. C. B.; BRETAS, N. G.; CARVALHO, A. Algoritmo de Busca com Heurísticas Fuzzy para Restabelecimento de Energia em sistemas Radiais de Distribuição. **Revista Controle & Automação, SBA**, v. 11, n. 1, p. 55–60, 2000.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. **Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on**, v. 26, n. 1, p. 29–41, 1996.

EL-FERGANY, A. A.; ABDELAZIZ, A. Y. Capacitor allocations in radial distribution networks using cuckoo search algorithm. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 8, n. 2, p. 223–232, 2014.

FUKUYAMA, Y.; CHIANG, H. D. **A parallel genetic algorithm for service restoration in electric power distribution systems**Fuzzy Systems, 1995. International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and The Second International Fuzzy Engineering Symposium., Proceedings of 1995 IEEE International Conference on. **Anais... In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE OF THE FOURTH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS AND THE SECOND INTERNATIONAL FUZZY ENGINEERING SYMPOSIUM., PROCEEDINGS OF 1995 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON. 1995**

GOLDBERG, D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. 1989.

GOMES, F. V. *et al.* A new distribution system reconfiguration approach using optimum power flow and sensitivity analysis for loss reduction. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 21, n. 4, p. 1616–1623, 2006.

GOMES, P. **Segurança Elétrica do SIN. In: Tutorial sobre recomposição de sistemas**CEPEL, Rio de Janeiro, 2008.

GOMIDE, F.; GUDWIN, R.; TANSCHKEIT, R. **Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações**Proceedings of 6th International Fuzzy Systems Association World Congress-IFSA95, Tutorials. **Anais... In: PROCEEDINGS OF 6TH INTERNATIONAL FUZZY SYSTEMS ASSOCIATION WORLD CONGRESS-IFSA95, TUTORIALS. 1995**

GRAHAM, R. L.; HELL, P. On the history of the minimum spanning tree problem. **Annals of the History of Computing**, v. 7, n. 1, p. 43–57, 1985.

GROSS, J. L.; YELLEN, J. **Handbook of graph theory**. [s.l.] CRC, 2003.

HSU, Y. Y. *et al.* **Distribution system service restoration using a heuristic search approach**Transmission and Distribution Conference, 1991., Proceedings of the 1991 IEEE Power Engineering Society. **Anais... In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE, 1991., PROCEEDINGS OF THE 1991 IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. 1991**

HSU, Y. Y.; KUO, H. C. A heuristic based fuzzy reasoning approach for distribution system service restoration. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 9, n. 2, p. 948–953, 1994.

IPAKCHI, A.; ALBUYEH, F. Grid of the future. **Power and Energy Magazine, IEEE**, v. 7, n. 2, p. 52–62, 2009.

KAEWMANEE, J.; SIRISUMRANNUKUL, S. **Multiobjective service restoration in distribution system using fuzzy decision algorithm and node-depth encoding**Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2011 8th International Conference on. **Anais... In: ELECTRICAL ENGINEERING/ELECTRONICS, COMPUTER, TELECOMMUNICATIONS AND**

---

INFORMATION TECHNOLOGY (ECTI-CON), 2011 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON. 2011

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. DE; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de Energia Elétrica**. [s.l.] Edgard Blücher, 2005.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle swarm optimization** Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on. **Anais... In: NEURAL NETWORKS, 1995. PROCEEDINGS., IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON. 1995**

KHALID, A. R. *et al.* **A comprehensive power restoration approach using rule-based method for 11kV distribution network** Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International. **Anais... In: POWER AND ENERGY CONFERENCE, 2008. PECON 2008. IEEE 2ND INTERNATIONAL. 2008**

KRUSKAL, J. B. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. **Proceedings of the American Mathematical society**, v. 7, n. 1, p. 48–50, 1956.

KUO, H. C.; HSU, Y. Y. Distribution system load estimation and service restoration using a fuzzy set approach. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 8, n. 4, p. 1950–1957, 1993.

LIM, S. I. *et al.* Service restoration methodology for multiple fault case in distribution systems. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 21, n. 4, p. 1638–1644, 2006.

LIN, W. M.; CHIN, H. C. A new approach for distribution feeder reconfiguration for loss reduction and service restoration. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 13, n. 3, p. 870–875, 1998.

LIU, C. C.; LEE, S. J.; VENKATA, S. S. An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 3, n. 2, p. 619–626, 1988.

LU, Z. *et al.* **On service restoration considering frequency property of distributed generation** Electricity Distribution (CICED), 2010 China International Conference on. **Anais... In: ELECTRICITY DISTRIBUTION (CICED), 2010 CHINA INTERNATIONAL CONFERENCE ON. 2010**

MATHIAS-NETO, W. P.; LEÃO, F. B.; MANTOVANI, J. R. S. **Distribution system restoration in a DG environment using a heuristic constructive multi-start algorithm** Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010 IEEE/PES. **Anais... In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA (T&D-LA), 2010 IEEE/PES. 2010**

MIU, K. N. *et al.* Fast service restoration for large-scale distribution systems with priority customers and constraints. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 13, n. 3, p. 789–795, 1998.

MOMOH, J. A.; CAVEN, A. C. **Distribution system reconfiguration scheme using integer interior point programming technique** Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES. **Anais... In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 2003 IEEE PES. 2003**

MONTICELLI, A. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. [s.l.: s.n.].

MORELATO, A. L.; MONTICELLI, A. J. Heuristic search approach to distribution system restoration. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 4, n. 4, p. 2235–2241, 1989.

MUN, K. J. *et al.* **Development of real-time-service restoration system for distribution automation system** Industrial Electronics, 2001. Proceedings. ISIE 2001. IEEE International

---

Symposium on. **Anais... In: INDUSTRIAL ELECTRONICS**, 2001. PROCEEDINGS. ISIE 2001. IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON. 2001

OLIVEIRA, L. **Reconfiguração e alocação ótima de capacitores em sistemas de distribuição**. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

PACHECO, M. A. C. Algoritmos genéticos: princípios e aplicações. **ICA: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada. Departamento de Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Fonte desconhecida**, 1999.

PAYNE, R. B. **The cuckoos**. [s.l.] Oxford University Press, 2005. v. 15

PERES, W. *et al.* **Power system stabilizers tuning using bio-inspired algorithm**PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble. **Anais... In: POWERTECH (POWERTECH)**, 2013 IEEE GRENoble. IEEE, 2013

PHAM, T. T. H.; BÉSANGER, Y.; HADJSAID, N. New challenges in power system restoration with large scale of dispersed generation insertion. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 24, n. 1, p. 398–406, 2009.

POPOVIC, D. S.; POPOVIC, Z. N. A risk management procedure for supply restoration in distribution networks. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 19, n. 1, p. 221–228, 2004.

PRIM, R. C. Shortest connection networks and some generalizations. **Bell system technical journal**, v. 36, n. 6, p. 1389–1401, 1957.

RAJU, G.; BIJWE, P. R. An efficient algorithm for minimum loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 23, n. 3, p. 1280–1287, 2008.

REYNOLDS, A. M.; FRYE, M. A. Free-flight odor tracking in *Drosophila* is consistent with an optimal intermittent scale-free search. **PloS one**, v. 2, n. 4, p. e354, 2007.

SARMA, N. D. R. *et al.* A new network reconfiguration technique for service restoration in distribution networks. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 9, n. 4, p. 1936–1942, 1994.

SHIRMOHAMMADI, D. **Service restoration in distribution networks via network reconfiguration**Transmission and Distribution Conference, 1991., Proceedings of the 1991 IEEE Power Engineering Society. **Anais...1991**

SILVA, I. C. DA *et al.* A heuristic constructive algorithm for capacitor placement on distribution systems. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 23, n. 4, p. 1619–1626, 2008.

SILVA JR, J. L. DA; MEDEIROS JR, M. F.; FILHO, M. C. P. **Comparing Performance of Classical Methods for Service Restoration in MV Networks with a New Method Based on Sensitivity Parameters**10th IEEE/IAS International Conference on Industrial Applications - INDUSCON. **Anais... In: 10TH IEEE/IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL APPLICATIONS - INDUSCON**. Fortaleza: 2012

SUSHEELA DEVI, V.; ANANDALINGAM, G. Optimal restoration of power supply in large distribution systems in developing countries. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 10, n. 1, p. 430–438, 1995.

TAYLOR, T.; LUBKEMAN, D. Applications of knowledge-based programming to power engineering problems. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 4, n. 1, p. 345–352, 1989.

- 
- TSAI, M. S. Development of an object-oriented service restoration expert system with load variations. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 23, n. 1, p. 219–225, 2008.
- TSAI, M. S.; WU, W. C. **Development of an object-oriented expert system for multi-period load transfer** Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES. **Anais...**2002
- UCAK, C.; PAHWA, A. An analytical approach for step-by-step restoration of distribution systems following extended outages. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 9, n. 3, p. 1717–1723, 1994.
- WALTON, S. *et al.* Modified cuckoo search: A new gradient free optimisation algorithm. **Chaos, Solitons & Fractals**, v. 44, n. 9, p. 710–718, 2011.
- YANG, X. S. **Nature-inspired metaheuristic algorithms**. [s.l.] Luniver Press, 2011.
- YANG, X.-S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm. *In: Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)*. [s.l.] Springer, 2010. p. 65–74.
- YANG, X.-S.; DEB, S. Engineering optimisation by cuckoo search. **International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation**, v. 1, n. 4, p. 330–343, 2010.
- YI-XIONG, Y.; YAN, W.; YONG-SHENG, S. **The Research on Fault Restoration Considering Distributed Generation Based Particle Swarm Optimization** Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific. **Anais...** *In: POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE (APPEEC), 2011 ASIA-PACIFIC*. 2011
- ZIDAN, A.; EL-SAADANY, E. F. **Service restoration in balanced and unbalanced distribution systems with high DG penetration** Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE. **Anais...**2011