

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

FREDERICO TASSI DE SOUZA SILVA

**ALOCÇÃO DE SUBESTAÇÕES E ALIMENTADORES NO
PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO VIA
SISTEMA IMUNOLÓGICO ARTIFICIAL**

**JUIZ DE FORA
MARÇO DE 2016**

FREDERICO TASSI DE SOUZA SILVA

**ALOCAÇÃO DE SUBESTAÇÕES E ALIMENTADORES NO
PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO VIA
SISTEMA IMUNOLÓGICO ARTIFICIAL**

Dissertação submetida ao corpo docente da coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, área de Sistemas de Energia Elétrica, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de mestre em engenharia elétrica.

Orientadora: Prof. Leandro Ramos de Araujo, D. Sc.

Coorientadora: Prof^ª. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo, D. Sc.

**JUIZ DE FORA
MARÇO DE 2016**

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Frederico Tassi de Souza.

Alocação de subestações e alimentadores no planejamento da expansão de sistemas de distribuição via Sistema Imunológico Artificial / Frederico Tassi de Souza Silva. -- 2016.

108 p.

Orientador: Leandro Ramos de Araujo

Coorientadora: Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2016.

1. Expansão da distribuição. 2. Reconfiguração. 3. Alocação de subestações. 4. otimização. 5. Sistema Imunológico Artificial. I. Araujo, Leandro Ramos de, orient. II. Araujo, Débora Rosana Ribeiro Penido, coorient. III. Título.

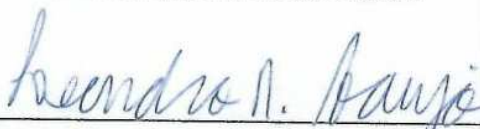
FREDERICO TASSI DE SOUZA SILVA

**ALOCÇÃO DE SUBESTAÇÕES E ALIMENTADORES NO
PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO VIA
SISTEMA IMUNOLÓGICO ARTIFICIAL**

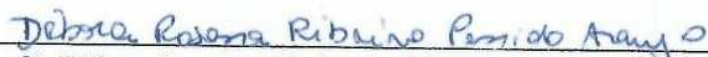
Dissertação submetida ao corpo docente da coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, área de Sistemas de Energia Elétrica, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de mestre em engenharia elétrica.

Aprovada em 11 de Março de 2016 por:

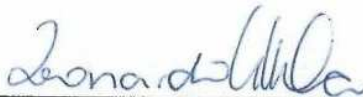
BANCA EXAMINADORA:



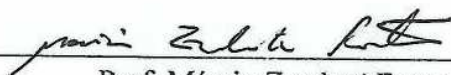
Prof. Leandro Ramos de Araujo, D. Sc. (Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)



Prof^a. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo, D. Sc. (Coorientadora)
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)



Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D. Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)



Prof. Márcio Zamboti Fortes, D. Sc.
Universidade Federal Fluminense (UFF)

À minha família

Aos meus amigos

Aos meus professores

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Juiz de Fora por ter me proporcionado crescimento pessoal e profissional e pela qual sempre terei apreço.

A todos os professores que compõem o corpo docente do curso de Engenharia Elétrica, por mais do que terem contribuído para minha formação, terem me inspirado a admirar a área que escolhi para minha carreira profissional.

Agradeço especialmente aos professores Leandro Ramos de Araujo e Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo, que contribuíram com seus conhecimentos e foram essenciais para a preparação do trabalho apresentado, além da constante disponibilidade para ajudar fora do ambiente da sala de aula.

Ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), pelo incentivo na continuidade dos estudos acadêmicos e pela contribuição técnica.

Agradeço à toda a minha família que acreditou desde sempre e esteve em todo momento ao meu lado.

Aos amigos, que acreditaram que este dia chegaria.

Agradeço também aos colegas de faculdade, que caminharam juntos, por todo o companheirismo e compartilhamento de conhecimentos.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPEE/UFJF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

ALOCAÇÃO DE SUBESTAÇÕES E ALIMENTADORES NO PLANEJAMENTO
DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO VIA SISTEMA
IMUNOLÓGICO ARTIFICIAL

Frederico Tassi de Souza Silva

Março / 2016

Orientadores: Leandro Ramos de Araujo
Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho propõe um método para a resolução de problemas de expansão de sistemas de distribuição, fazendo uma análise multi-objetivo que engloba a alocação de novas subestações, repotencialização das subestações já existentes e dimensionamento de alimentadores, selecionando o caminho dos circuitos para alimentação das cargas e o tipo de condutor utilizado em cada trecho. O problema de otimização apresentado visa minimizar os custos globais do sistema, considerando restrições físicas, técnicas e operacionais. Vários sistemas encontrados na literatura foram utilizados para testar o método e os resultados foram comparados, mostrando que o método pode ser aplicado também para outros sistemas, inclusive de grande porte. A técnica utilizada foi baseada na metaheurística Sistema Imunológico Artificial, que utiliza conceitos básicos de imunologia para a resolução de problemas de otimização combinatória.

Abstract of Thesis presented to PPEE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (D.Sc.)

LOCATION OF SUBSTATION AND FEEDERS FOR PLANNING OF
DISTRIBUTION SYSTEMS BY ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEM

Frederico Tassi de Souza Silva

March / 2016

Advisors: Leandro Ramos de Araujo
Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

Department: Electrical Engineering

This work proposes a method for solving radial distribution systems expansion problems, making a multi-purpose analysis that includes the allocation of new substations, reconditioning of existing substations and sizing feeders selecting the path of the circuits for feeding the fillers and the type of conductor used in each section. The presented optimization problem seeks to minimize overall system costs, involving physical, technical and operational constraints. Many systems found in the literature were used for the test method and the results were compared, showing that the method can also be applied to other systems, including large others. The technique used was based on the metaheuristic Artificial Immune System, which uses basic concepts of immunology for solving combinatorial optimization problems.

SUMÁRIO

Capítulo 1	<i>Introdução</i>	11
1.1	Considerações Iniciais	11
1.2	Motivações	13
1.3	Revisão Bibliográfica.....	14
1.4	Objetivos.....	17
1.5	Estrutura do Trabalho	18
1.6	Convenções e Nomenclaturas Utilizadas	19
Capítulo 2	<i>Definições e Fundamentação Teórica</i>	20
2.1	Introdução	20
2.2	Sistemas Imunológicos Artificiais.....	20
2.2.1	Introdução.....	20
2.2.2	Inspiração biológica.....	21
2.2.3	O sistema imunológico humano	22
2.2.4	Algoritmo de seleção clonal	24
2.3	Planejamento de Sistemas de Distribuição.....	27
2.3.1	Considerações iniciais	27
2.3.2	Projeto da expansão	28
2.3.3	Reconfiguração da rede	29
2.4	Conclusões do capítulo	31
Capítulo 3	<i>Método proposto</i>	32
3.1	Considerações.....	32
3.2	Modelo Matemático do Problema de Otimização.....	32
3.2.1	Introdução.....	32
3.2.2	Função objetivo e restrições	33
3.2.3	Modelo Matemático dos Componentes de Rede	35
3.2.3.1	Introdução	35
3.2.3.2	Modelo de Subestações.....	35
3.2.3.3	Modelo de Cargas	36
3.2.3.4	Modelo de Alimentadores.....	37
3.3	Algoritmo proposto.....	38
3.3.1	Introdução.....	38
3.3.2	Fluxograma Proposto.....	38
3.3.2.1	Inicialização	39
3.3.2.1.1	Modelagem dos anticorpos	39
3.3.2.1.2	Geração da população inicial	41
3.3.2.2	População.....	43
3.3.2.3	Convergência	44
3.3.2.4	Avaliação	44
3.3.2.5	Seleção.....	45
3.3.2.6	Clonagem.....	45
3.3.2.7	Mutação	46
3.3.2.8	Reavaliação.....	47
3.3.2.9	Reseleção	47
3.3.2.10	Substituição.....	47
3.3.2.11	Diversificação	47

3.3.2.12	Parâmetros do SIA	47
3.4	Considerações finais do capítulo.....	49
Capítulo 4	Resultados	50
4.1	Introdução	50
4.2	Problemas de expansão	52
4.2.1	Sistema 23 barras (NAHMAN e PERIC, 2008)	52
4.2.2	Sistema 23 barras modificado (OLIVEIRA, 2010)	57
4.2.3	Sistema 23 barras com alocação de uma subestação	60
4.2.4	Sistema 23 barras com alocação de duas subestações	62
4.2.5	Sistema 54 barras (RANJAN <i>et al.</i> , 2002).....	64
4.3	Problemas de reconfiguração.....	72
4.3.1	Sistema 33 barras (BARAN e WU, 1989).....	72
4.3.2	Sistema 84 barras (SU e LEE, 2003).....	74
4.3.3	Sistema 119 barras (ZHANG <i>et al.</i> , 2007)	77
4.4	Problemas de expansão com reconfiguração.....	79
4.5	Conclusão do capítulo.....	81
Capítulo 5	Conclusões	82
5.1	Conclusões gerais	82
5.2	Trabalhos futuros	83
Bibliografia.....		84
Anexo A.....		99
<i>Sistema 23 barras (NAHMAN e PERIC, 2008)</i>		<i>99</i>
<i>Sistema 23 barras modificado (OLIVEIRA, 2010)</i>		<i>99</i>
<i>Sistema 33 barras (BARAN e WU, 1989)</i>		<i>100</i>
<i>Sistema 54 barras (RANJAN <i>et al.</i>, 2003)</i>		<i>101</i>
<i>Sistema 84 barras (SU e LEE, 2003)</i>		<i>102</i>
<i>Sistema 119 barras (ZHANG <i>et al.</i>, 2007).....</i>		<i>105</i>

Capítulo 1 Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Atualmente a eletricidade é uma das formas de energia mais utilizadas pela humanidade e crucial para apoiar o cotidiano das pessoas e o desenvolvimento humano. O uso da tecnologia, o comportamento da sociedade moderna e a preocupação com o meio ambiente, vêm exigindo das concessionárias de distribuição uma maior demanda de energia elétrica e sistemas menos susceptíveis a falhas, mantendo níveis aceitáveis de qualidade e continuidade do fornecimento. Dessa forma, os sistemas passaram a operar muito próximos dos seus limites permissíveis, levando a diversos problemas como aumento das perdas elétricas e quedas de tensão, além do aumento de sua complexidade operacional (PENIDO, 2008).

O crescimento do fornecimento de energia elétrica em sistemas de distribuição nem sempre é acompanhado pela expansão adequada da estrutura física desse sistema e pelo aumento adequado de sua capacidade de distribuição, dado que, muitas vezes, restrições econômicas estão envolvidas neste processo. Assim, torna-se necessário assegurar um equilíbrio razoável na confiabilidade dentre as várias partes constituintes da rede elétrica (ALLAN e SILVA, 1995).

Em sistemas de distribuição, as perdas de energia não serão sempre mínimas para uma configuração de rede fixa, devido, dentre outros fatores, à natureza dinâmica das cargas. Desse modo, pode ser necessária uma reconfiguração na rede de distribuição, processo que modifica a topologia de alimentadores, alterando o estado aberto/fechado de chaves seccionadoras e outros equipamentos de manobra (RAO *et al.*, 2013). Em geral, as redes são reconfiguradas para reduzir as perdas de energia e aliviar a sobrecarga, porém nem sempre a capacidade da geração e dos alimentadores presentes será suficiente para atender toda a demanda da rede. Dessa forma, deve-se realizar um planejamento de expansão.

No contexto da expansão de sistemas de distribuição, uma concessionária de energia elétrica, ao prever um aumento de demanda a ser atendida em longo prazo, elabora um plano diretor que definirá o tipo, capacidade e localização da instalação de novos equipamentos (banco de capacitores, reguladores de tensão, novos alimentadores, entre outros) para uma dada área geográfica ou região com um conjunto de cargas

previamente estimadas, considerando as restrições de capacidade em alimentadores, queda de tensão, previsões de demanda (PORKAR *et al.*, 2011) de forma a minimizar os custos totais de instalação e operação, respeitando as exigências técnicas para um bom funcionamento do sistema (KHODR *et al.*, 2009), ou ainda considerando a avaliação dos índices de confiabilidade.

A busca pela melhor configuração da rede, minimizando os custos, é característica de um problema de otimização combinatória (DUMBRAVA *et al.*, 2011). Na literatura, encontram-se vários métodos de resolução para esse tipo de problema baseados em programação linear, não-linear e inteira.

O método baseado em programação linear necessita de um menor esforço computacional, porém faz uso de muitas simplificações na modelagem dos elementos e comportamento da rede. As equações não lineares que envolvem os cálculos das grandezas da rede e estudo de fluxo de potência caracterizam os métodos de programação não-linear. Por fim, a programação inteira é utilizada para a alocação eficiente de recursos limitados, de modo a atender a algum objetivo, quando alguns dos recursos em questão só podem ser divididos em partes distintas (HOFFMAN e RALPHS, 2013). No caso dos problemas de reconfiguração em sistemas de distribuição, por exemplo, as variáveis inteiras são comumente utilizadas para expressar o estado liga/desliga do funcionamento de alguns equipamentos de manobra como chaves seccionadoras (YOKOYAMA *et al.*, 2014).

Os problemas de planejamento da expansão vêm sendo remodelados, por conta do avanço da tecnologia de processamento computacional, utilizando-se modelos matemáticos mais completos e algoritmos mais eficientes (SEMPÉRTEGUI *et al.*, 2002), atendendo às exigências técnicas e econômicas de forma satisfatória. Diversas ferramentas computacionais têm sido propostas na literatura, envolvendo técnicas clássicas de otimização como o algoritmo *Branch and Bound* (SCHMIDT, 2005 e OLIVEIRA, 2010) e programação não linear (MOJTAHEDZADEH e RAVADANEGH, 2014), além das técnicas heurísticas como o *Branch Exchange* (AOKI *et al.*, 1990 e GOSWAMI, 1997) e metaheurísticas, como algoritmos genéticos (MIRANDA *et al.*, 1994, CHU e BEASLEY, 1997, SEPASIAN *et al.*, 2006 e CAMARGO, 2014), colônia de formigas (AMOIRALIS *et al.*, 2010, GOMÉZ *et al.*, 2004 e PEREIRA, 2010), busca tabu (NARA *et al.*, 1998), recozimento simulado (ATTIYA e HAMAM, 2006), *particle swarm optimization* (PRAKASH, 2007 e ZOU *et al.*, 2012), busca dispersa (RUPOLO e MANTOVANI, 2015), dentre outras.

1.2 Motivações

Sistemas de distribuição de energia elétrica constituem o maior risco para a interrupção do fornecimento de energia. Tem sido relatado na literatura que mais de 80% de todas as interrupções ocorrem devido a falhas no sistema de distribuição, sendo assim, a maioria dos operadores de rede de distribuição tentam melhorar a confiabilidade do sistema, sempre buscando a minimizando os custos (HASHEMI-DEZAKI *et al.*, 2015). O segmento da distribuição tem sido o elo mais fraco entre a fonte de alimentação e os pontos de entrega ao consumidor (LANTHARTHONG e PHANTHUNA, 2012), por isso, estudos sobre esse segmento tornam-se atrativos.

Dentre os objetivos principais que englobam os problemas de planejamento da expansão de sistemas elétricos de distribuição vale ressaltar a redução das perdas totais, o aumento da confiabilidade e a melhoria do perfil de tensão da rede (SHOJAEIAN e GHANDEHARI, 2013) visando proporcionar economia de dinheiro, redução de falhas, queda nas interrupções do sistema e aumento da qualidade da energia oferecida ao consumidor. Por conta disso, estes temas são muito discutidos na literatura e vários métodos vêm sendo propostos.

A natureza combinatória desses tipos de problema é imposta pela restrição da radialidade e conectividade da rede, pela variedade de opções para localização das novas subestações e topologia dos alimentadores, decisões de investimento multi-estágios, incerteza sobre a variação da demanda e da localização de faltas no sistema, disponibilidade de equipamentos, dentre outros (SINGH, 2004). O desafio, portanto, é integrar o maior número de subproblemas, de forma a maximizar os benefícios.

Recentemente, técnicas metaheurísticas têm sido utilizadas na resolução de problemas de otimização combinatória (MEKHAMER *et al.*, 2008) por conseguir obter soluções de boa qualidade para problemas mais robustos, em tempos viáveis.

Considerados os pontos apresentados, tem-se motivação para realizar desenvolvimentos no âmbito da distribuição, considerando aspectos técnicos e econômicos de interesse, tentando solucionar problemas de planejamento da distribuição, explorando as potencialidades das metaheurísticas.

A metaheurística Sistema Imunológico Artificial (SIA), escolhida como base para o método proposto nesta dissertação, mesmo ainda em evolução no campo da engenharia imunológica (BURKE e KENDALL, 2014), possui boas características para

aplicação em problemas de planejamento da distribuição como diversidade, reconhecimento de padrões, aprendizagem por esforço e memória. A técnica apresentou bons resultados em aplicações encontradas na literatura como CARRANO *et al.* (2007) e OLIVEIRA *et al.* (2014), e seu aprendizado e aplicação também podem ser considerados motivações para o presente trabalho.

1.3 Revisão Bibliográfica

Nesta seção serão apresentadas algumas das referências utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho. Através dessa revisão, foi possível conhecer as técnicas que vêm sendo utilizadas para resolver problemas de planejamento da expansão de sistemas elétricos de distribuição, inspirando o desenvolvimento do método proposto.

Em MERLIN e BACK (1975), o problema de planejamento de sistemas de distribuição foi um dos pioneiros a buscar a minimização de perdas técnicas da rede, pois desta forma, as condições operacionais também eram melhoradas. O método parte de uma configuração inicial malhada e a partir dela são realizadas aberturas sequenciais de chaves de manobra até que se chegue a uma configuração radial, sem violar as restrições do problema. A técnica utilizada foi o algoritmo *Branch and Bound*, que quando aplicada em sistemas reais, de grande porte, tornava-se pouco viável, por conta do alto esforço computacional.

Em GÖNEN e FOOTE (1981), o objetivo principal do estudo foi desenvolver modelos de planejamento do sistema de distribuição que podem ser usados na determinação de padrões de expansão ótimos ou alternativos, selecionando localizações e ampliação das subestações e capacidade dos transformadores; transferências de cargas ótimas entre subestações e centros de demanda, dentre outros, sujeitos a uma série de restrições, de forma a minimizar o valor dos custos totais envolvidos. O planejamento foi feito utilizando programação inteira mista.

Em CIVANLAR *et al.* (1988), utilizou-se uma técnica conhecida como *Branch Exchange*, que consistia em: dada uma configuração radial, realiza-se a abertura e fechamento de chaves de interconexão sem interferir na radialidade da rede. Com essa estratégia, ocorre uma redução no espaço de busca devido ao monitoramento das perdas diante das manobras realizadas. Os autores elaboraram uma fórmula que calcula as perdas aproximadas para cada configuração, reduzindo o esforço computacional,

evitando o cálculo de vários fluxos de potência. O método foi aprimorado, mais tarde, por BARAN e WU (1989).

Em SHIRMOHAMMADI e HONG (1989), os autores utilizaram técnicas heurísticas, partindo de uma rede malhada, com as chaves fechadas, e realizando aberturas sucessivas, monitorando os valores de corrente nos ramos, até atingir a radialidade da configuração da rede.

Em TEMRAZ e QUINTANA (1993), os autores apresentam a instalação e/ou reforço de subestações, alimentadores e unidades de geração distribuída como solução para o problema do planejamento da expansão da distribuição. A formulação proposta considera o investimento, operação e custos de interrupção do sistema. Um algoritmo genético combinado com fluxo de potência ótimo é desenvolvido como ferramenta de otimização para resolver o problema.

Em RAMÍREZ-ROSADO e BERNAL-AGUSTÍN (1998), o principal objetivo consiste em determinar o número ideal e localização das subestações de distribuição e a melhor forma de conectar as cargas nessas subestações através da interligação de alimentadores. A técnica utilizada pelo autor é baseada em algoritmos genéticos.

Em ASAKURA *et al.* (2003), foi proposto um método de planejamento de expansão do sistema de distribuição pela reconfiguração da rede e geração de planos de construção. O método avalia vários itens, incluindo novos equipamentos, custo de instalação, taxa de utilização de equipamento, a confiabilidade do sistema de distribuição por análise de contingência e minimização de perdas.

Em HAFFNER *et al.* (2004), o autor trabalha a otimização do caminho dos alimentadores até as cargas. O modelo pode ser utilizado para considerar a inserção, remoção e/ou substituição de cabos com diferentes tipos e tamanhos, com o objetivo de minimizar os custos de instalação e manutenção das redes, sujeitos aos limites de capacidade de linhas e subestações, e aos limites de tensão especificados no problema.

Em GOMES (2005), o método utilizado para resolver problemas de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica foi baseado em técnicas de programação matemática associadas a estratégias heurísticas. O algoritmo de solução consistia em aberturas sucessivas de chaves e fechamento das que provocassem um aumento nas perdas, verificando-se as restrições em cada passo. Um fluxo de potência ótimo foi utilizado para identificar as chaves com maior aptidão a serem abertas e inserir as restrições na função objetivo.

Em FORTES *et al.* (2006), é proposto um algoritmo genético para a resolução da alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição, no intuito de melhorar o perfil de tensão da rede e diminuir as perdas elétricas. Os autores validaram o algoritmo testando um sistema típico da literatura e obtiveram resultados satisfatórios.

Em OLIVEIRA *et al.* (2009), o autor trata o problema de reconfiguração ótima de sistemas de distribuição como um problema de programação não linear inteira mista (PNLIM), com o objetivo de minimizar as perdas de energias para diferentes níveis de carregamento. A técnica utilizada é um algoritmo passo a passo, onde em cada passo é utilizado o Método Primal-Dual de Pontos Interiores. Considera-se a rede inicialmente com todas as chaves de interconexão fechadas que vão sendo abertas até que uma configuração radial seja obtida, observando as restrições e os critérios de convergência do problema.

Em ATWA *et al.* (2010), é proposto um método para atribuição de diferentes tipos de unidades de geração distribuída renováveis no planejamento da expansão da distribuição, de forma a minimizar as perdas de energia. O problema de planejamento é formulado como um problema de PNLIM, com uma função objetivo de minimizar as perdas anuais de energia do sistema. As restrições incluem os limites de tensão nas barras, a capacidade dos alimentadores, o limite máximo de penetração, e o tamanho das unidades de geração disponíveis.

Em JUNIOR *et al.* (2011), o problema de redes de distribuição é definido como um problema PNLIM e envolve a construção de novos circuitos, recondutoramento, construção e/ou repotencialização de subestações de distribuição. A técnica utilizada é o algoritmo *tabu search*, muito utilizado em problemas de otimização combinatória (CHELOUAH e SIARRY, 2000), cuja função é, a partir de uma solução inicial, avançar para outra, dentro de um espaço de busca, verificando-se as condições de contorno do problema a cada passo.

Em SOUSA (2013), o autor utiliza técnicas de otimização clássicas em modelos de programação linear binária mista, considerando confiabilidade e restabelecimento da rede em condições de contingências. No planejamento da expansão são considerados os custos com instalação dos alimentadores, reconfigurações, construção de novas subestações, custos de operação, dentre outros.

Em PÁDUA (2014), três modelos de problema de PNLIM são formulados, destacando-se aqui o planejamento dinâmico de longo prazo, que considera os circuitos e subestações que serão construídos e/ou reconfigurados, minimizando o custo com

instalação e operação, sujeito às restrições físicas, operacionais, econômicas e análise de confiabilidade. Para resolver o problema, utilizam-se adaptações do algoritmo *scatter search* (busca dispersa), técnica evolutiva muito utilizada para resolver problemas de otimização discreta (GLOVER e LAGUNA, 2000), conduzindo a busca a regiões promissoras e explorando-as de forma eficiente.

Em ROSSETI (2015), é apresentado um método de otimização que determina a sequência de manobras das chaves de interconexão do sistema através dos multiplicadores de Lagrange, obtidos da resolução de um fluxo de potência ótimo. O algoritmo de otimização heurístico utilizado visa à minimização das perdas técnicas, baseando-se na elaboração e atualização de um conjunto dinâmico de chaves, que é alterado a cada passo do algoritmo, representando uma mudança no estado do sistema.

1.4 Objetivos

Os problemas no âmbito do planejamento da expansão da distribuição são muito complexos devido à grande quantidade de elementos presentes no sistema, como geradores, transformadores, alimentadores, equipamentos de controle e proteção, entre outros, além das características de funcionamento de cada um deles ao trabalharem em conjunto. Além disso, o sistema está sob constante variação de temperatura, clima e demanda de energia, tornando sua operação e táticas de planejamento tarefas complexas.

Face à complexidade mencionada e o interesse em melhorias nos sistemas de distribuição, o objetivo principal dessa dissertação consiste no desenvolvimento de um método para uma análise multi-objetivo do problema de otimização do planejamento da expansão de sistemas elétricos de distribuição.

O objetivo do método é minimizar várias parcelas dos custos globais envolvidos no planejamento, em um determinado horizonte, como custos de perdas elétricas, custo de instalação de subestações e alimentadores. A busca pela solução do problema envolve a alocação de novas e/ou repotencialização de subestações já existentes e alimentadores (considerando a topologia das ligações e tipo de cabo utilizado).

O problema envolve restrições físicas (como impossibilidade da construção de subestações em determinadas áreas), técnicas (análise do fluxo de potência nos alimentadores e a capacidade dos alimentadores e subestações, tensão nas cargas,

radialidade e conectividade da rede elétrica) e operacionais (disponibilidade de equipamentos).

A técnica escolhida neste trabalho para a resolução do problema de otimização combinatória foi baseada na metaheurística Sistema Imunológico Artificial, utilizando processos análogos ao comportamento do sistema imunológico humano no combate a agentes patogênicos (como vírus, bactérias, etc). A técnica consiste na escolha de um conjunto de topologias iniciais com boas características para a representação da expansão do sistema, que atenda às restrições do problema, e a partir dela, o algoritmo realiza modificações assistidas, avaliando o estado da rede a cada passo. Feito isso, as melhores topologias são replicadas de acordo com o grau de satisfação de sua avaliação e o processo seleciona os melhores resultados, propagando-os para as próximas iterações. O estudo desta técnica e sua aplicação foram também objetivos deste trabalho.

A implementação computacional foi realizada no software MATLAB.

1.5 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação contém um capítulo de introdução (Capítulo 1) e mais quatro, que serão descritos resumidamente nesta seção, além das referências bibliográficas e anexos.

O Capítulo 2 mostra as principais características da metaheurística Sistema Imunológico Artificial, englobando a inspiração biológica e as funcionalidades que serão utilizadas no método proposto, como o algoritmo de seleção clonal. Também são mostrados alguns conceitos em relação aos problemas de planejamento da expansão de sistemas de distribuição de forma a introduzir os conceitos que serão trabalhados ao longo da dissertação.

O Capítulo 3 mostra o método proposto nessa dissertação para a resolução de problemas de planejamento da expansão de sistemas elétricos de distribuição. Apresenta-se o modelo matemático do problema de otimização e dos componentes da rede, além da estrutura e funcionamento do algoritmo utilizado, fazendo-se a relação com os conceitos da metaheurística.

O Capítulo 4 apresenta os resultados encontrados da aplicação do método proposto em alguns sistemas encontrados na literatura. Para cada sistema, são mostradas as simplificações e considerações que tiveram que ser feitas a fim de tornar possível a utilização do método e comparação com os resultados da literatura.

O Capítulo 5 mostra as conclusões gerais do trabalho baseadas nos resultados encontrados e lista algumas propostas para trabalhos futuros.

Por fim, encontram-se as referências bibliográficas utilizadas e os anexos, que contém todos os dados dos sistemas utilizados na dissertação.

1.6 Convenções e Nomenclaturas Utilizadas

Apresenta-se nesta seção algumas convenções e nomenclaturas utilizadas neste trabalho, com o objetivo de facilitar a leitura e evitar possíveis interpretações errôneas.

Na Tabela 1.1 são mostrados os símbolos mais frequentes utilizados para designar variáveis, grandezas ou entidades matemáticas.

Tabela 1.1 – Convenções adotadas para designar grandezas e variáveis

Símbolo	Exemplo	Significado
C	C	Capacitância
L	L	Indutância
R, r	R, r	Resistência
X, x	X, x	Reatância
Y, y	Y, y	Admitância ($y=g+jb$)
V	V	Tensão complexa $V = ve^{j\theta}$
I_k	I_k	Contribuição de injeção de corrente de elemento conectado entre o nó k e a referência, corrente no sentido saindo do nó k
P	P	Potência ativa
Q	Q	Potência reativa
S	S	Potência aparente ($S=P+jQ$)
\mathbf{I}	\mathbf{I}	Vetor de injeções de correntes
\mathbf{V}	\mathbf{V}	Vetor de tensões nodais

Capítulo 2 Definições e Fundamentação Teórica

2.1 Introdução

O desenvolvimento do método proposto envolve o entendimento de alguns conceitos relativos ao planejamento da expansão de sistemas de distribuição e da técnica metaheurística utilizada como base para a resolução do problema de otimização. Os principais conceitos estudados serão apresentados neste capítulo.

Serão mostrados os aspectos funcionais da metaheurística Sistema Imunológico Artificial e o algoritmo de seleção clonal, cujas características principais serviram de inspiração para o desenvolvimento do método proposto.

No âmbito do planejamento da distribuição, serão discutidas as características dos problemas de otimização envolvendo a expansão desses, com ênfase nos aspectos relacionados à construção de subestações, escolha dos novos alimentadores e reconfigurações da rede existente.

2.2 Sistemas Imunológicos Artificiais

2.2.1 Introdução

A maioria dos algoritmos de otimização utilizados para a solução de problemas de engenharia elétrica são baseados em métodos de programação linear e não linear que requerem muitas informações e, geralmente, buscam a melhoria da solução na vizinhança através de um ponto de partida. Esses algoritmos, no entanto, revelam uma abordagem limitada para problemas de otimização do mundo real. Caso haja vários pontos de ótimo local, o resultado pode ser fortemente dependente da escolha do ponto inicial e o resultado obtido pode não ser a solução ótima global (LEE e GEEM, 2005).

Devido ao grande porte de sistemas reais, como os sistemas de energia elétrica, e inconvenientes computacionais dos algoritmos numéricos existentes, vêm se utilizando métodos heurísticos para a resolução de problemas de otimização. Eles requerem o conhecimento prévio do problema sob análise para uma correta aplicação de um conjunto de regras estabelecidas de acordo com as características do problema

(OLIVEIRA, 2009). Dessa forma, reduzem o espaço de busca, porém não garantem um resultado ótimo global e geralmente apresentam tempo de processamento superior.

Baseados em regras heurísticas, as metaheurísticas são métodos mais genéricos, que realizam uma busca ampla no espaço e podem proporcionar uma boa solução para um problema de otimização, especialmente com informações incompletas ou imperfeitas. Algoritmos de otimização metaheurísticos têm sido amplamente empregados para resolver problemas de otimização complexos. Esses algoritmos apresentam considerável eficiência em relação aos métodos convencionais que se baseiam em lógicas ou programação matemática em caso de problemas com informações incompletas ou em problema de explosão combinatória.

2.2.2 Inspiração biológica

Dentro das técnicas metaheurísticas, os algoritmos inspirados na natureza têm sido amplamente utilizados no desenvolvimento de sistemas para resolução de problemas complexos (ZANG *et al.*, 2010). A eficiência dos métodos de inspiração biológica se dá, dentre outros fatores, por requererem apenas a descrição aproximada das características que representam o comportamento global (BERBERT, 2008), e também por outros fatores como flexibilidade, generalidade, robustez e a possibilidade de escapar de ótimos locais para encontrar melhores soluções de melhor qualidade.

O uso de teorias do funcionamento do sistema imunológico para fins computacionais começou a ter representatividade dentro da inteligência computacional há cerca de uma década e passou a ser reconhecida como uma área de pesquisa denominada Sistema Imunológico Artificial (FRANÇA, 2005). Trata-se de uma área relativamente nova da computação bioinspirada, que utiliza metáforas do sistema imunológico humano para a criação de novas soluções para problemas de engenharia. Modelos biológicos do sistema imunológico natural como as teorias da seleção clonal, hipermutação somática e seleção negativa, têm fornecido a inspiração para os algoritmos, que vêm sendo utilizados em várias aplicações (TIMMIS *et al.*, 2008). Algumas delas são encontradas na literatura, como SARAFIJANOVIĆ e BOUDEC (2005), KIM *et al.* (2007), AGARWAL *et al.* (2007), TAN *et al.* (2008), VAN PETEGHEM e VANHOUCKE (2009), BASU (2011) e LI *et al.* (2014).

Técnicas convencionais de engenharia geralmente requerem uma especificação detalhada do comportamento exato de cada um dos componentes dos sistemas, o que

quase nunca não é possível. Por outro lado, a utilização de métodos bioinspirados exige apenas a especificação de alguns aspectos do comportamento global do sistema, como uma medida de desempenho ou uma função objetivo.

2.2.3 O sistema imunológico humano

Todos os seres vivos estão expostos ao ataque de agentes causadores de doenças e na maioria dos casos somos capazes de resistir a esses ataques. Esse mecanismo de defesa compõe o sistema imunológico, que protege o corpo contra doenças ou outros corpos estranhos potencialmente prejudiciais. Quando funciona adequadamente, o sistema imunológico ataca e identifica uma variedade de ameaças, incluindo vírus, bactérias e parasitas, distinguindo-os dos próprios tecidos saudáveis do corpo.

Os componentes do sistema imunológico humano incluem órgãos, células e moléculas imunológicas que agem juntos no reconhecimento de agentes patogênicos (organismos que pode produzir doenças infecciosas ao seu hospedeiro) e na elaboração de respostas aos ataques causados por eles. Alguns desses órgãos e suas funções podem ser encontrados em MACHADO (2005).

As células mais relevantes ao estudo proposto são linfócitos e anticorpos. Os linfócitos são células de defesa que apresentam moléculas especializadas em sua superfície e por conta disso permitem o reconhecimento de antígenos (substâncias de agentes patogênicos que quando detectadas ativam os processos de defesa do sistema imunológico), conduzindo às respostas imunológicas. Seus principais tipos são as células B, que secretam anticorpos no sangue que reconhecem determinado antígeno, e as células T, que atuam diretamente nas células atacadas. Já os anticorpos são proteínas secretadas pelos plasmócitos (derivações das células B) que reconhecem e atacam os antígenos, promovendo a defesa do organismo. Eles existem em diferentes classes e cada uma delas desempenha um papel na estratégia de defesa imunológica (VOLPE, 1993). Outras células do sistema imunológico e suas respectivas funções são encontradas em KLEIN (1991) e JANEWAY *et al.* (1999).

O sistema imunológico pode ser visualizado como um sistema de proteção multicamadas, onde cada camada fornece diferentes tipos de mecanismos de defesa ao organismo (DASGUPTA *et al.*, 2006), conforme a Figura 2.1.

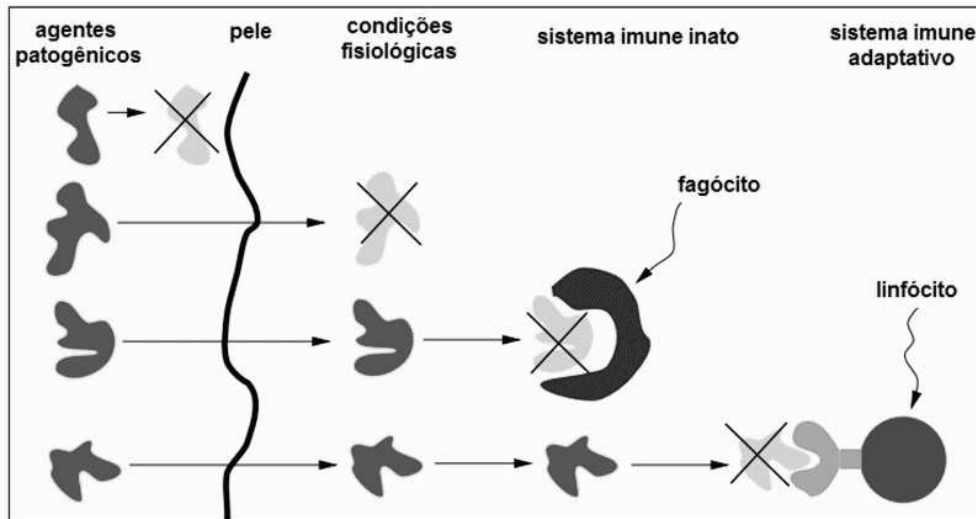


Figura 2.1 - Camadas de defesa do sistema imunitário (Fonte: Adaptado de HOFMEYR, 2000)

A primeira camada contra a ação dos agentes patogênicos é feita pela pele e mucosas, que bloqueia grande parte deles. A segunda camada de defesa é fisiológica, onde determinadas condições como temperatura corporal podem tornar o ambiente mais hostil para esses agentes. A terceira é o sistema imune inato, formado por células denominadas fagócitos que possuem receptores especializados para o reconhecimento dos agentes patogênicos. Sua resposta ao combate do invasor é rápida, efetiva e não específica para um determinado antígeno (MAYER, 2015). A camada final é o sistema imune adaptativo, constituído de linfócitos, que se adaptam à estrutura de agentes patogênicos específicos para eliminá-los, produzindo uma resposta especializada mais lenta, porém duradoura, por reter esse conhecimento em memória. Dessa forma, uma resposta a uma exposição futura, será mais rápida e eficiente (AICKELIN *et al.*, 2014).

Em relação à dinâmica do sistema imunológico, tudo começa com o processo de reconhecimento do antígeno. Quando não há afinidade entre os receptores das superfícies das células B e os antígenos, a ligação não acontece (ignorância antigênica). Caso haja a ligação das células a antígenos próprios, ou seja, um ataque ao próprio corpo, ocorre o processo de seleção negativa, que não permite que tal ligação aconteça.

Após isso, quando um linfócito encontra o antígeno com o qual pode interagir, a célula é ativada e se prolifera através de um processo de clonagem. Tal processo é chamado de seleção clonal e é mostrado na Figura 2.2. Fruto dessa proliferação surge uma diferenciação das células em plasmócitos e células de memória. Os plasmócitos são células que sintetizam e liberam os anticorpos com as mesmas características de seus receptores (KLIMPEL, 1996) e as células de memória são células que permitem que o

organismo tenha uma resposta mais rápida e eficiente numa futura exposição ao mesmo antígeno, permanecendo no corpo por longos períodos (BURNET, 1957).

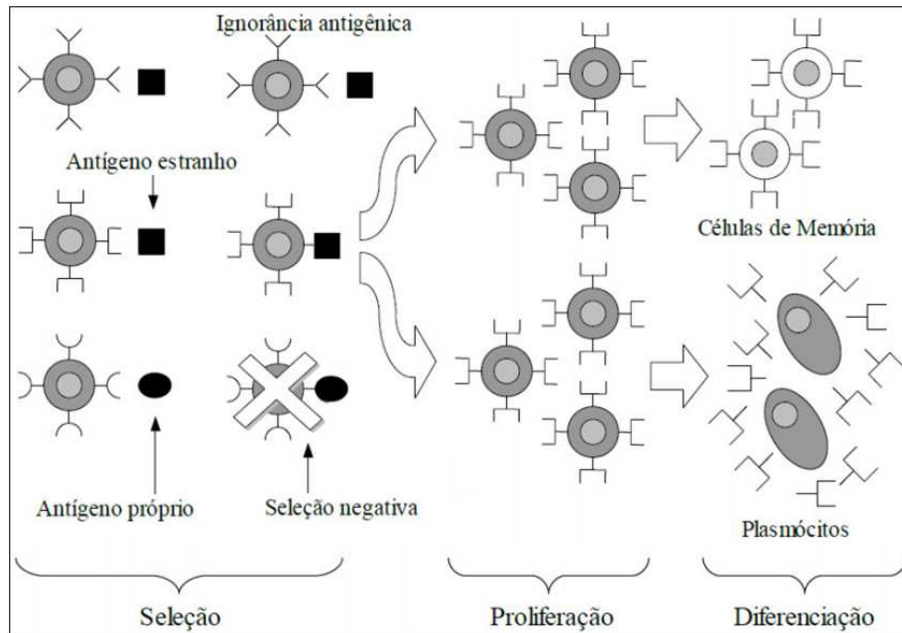


Figura 2.2 - Teoria da seleção clonal (Fonte: ASTIAZARA, 2012)

O sistema imunológico humano apresenta propriedades como detecção, diversidade, aprendizado e tolerância. A detecção está relacionada aos conceitos do reconhecimento do agente patogênico, a diversidade pelos mecanismos de hipermutação somática, que garantem uma diversidade nas células e uma proteção dinâmica do organismo, o aprendizado pelas células de memória que permitem que um organismo que se exponha novamente a um antígeno apresente uma resposta rápida e eficaz, e tolerância, ligado à propriedade do corpo de identificar a qual antígeno uma célula deve se atrelar e em qual intensidade, permitindo que as células imunológicas se reconheçam mutuamente e se comuniquem (HOFMEYR e FORREST, 1999).

Essas propriedades serviram de base para o desenvolvimento da metaheurística utilizada neste trabalho.

2.2.4 Algoritmo de seleção clonal

Vários algoritmos de otimização inspirados na imunologia foram desenvolvidos nas últimas décadas (GANDOMI e ALAVI, 2012). Neste tópico, será mostrado o algoritmo de seleção clonal aplicado a problemas de otimização conhecido como CLONALG (*CLONal Selection ALGORITHM*), proposto por DE CASTRO e VON

ZUBEN (2002), o qual será utilizado como base para este trabalho. Outros algoritmos, como o de seleção negativa, são encontrados em WANG *et al.* (2004) e ASTIAZARA (2012).

O CLONALG é baseado na teoria da seleção clonal, usada para explicar as características básicas da resposta do sistema imune adaptativo a um agente patogênico, estabelecendo a ideia de que os anticorpos que tem mais afinidade com os antígenos tendem a ser selecionados para proliferar em maior quantidade que os outros. Outros mecanismos são representados no algoritmo como a maturação de afinidade, que pode melhorar a afinidade dos anticorpos com os antígenos, e edição de receptores, que aumenta a diversidade da população de anticorpos.

O fluxograma do algoritmo de seleção clonal é mostrado na Figura 2.3 e as etapas numeradas (1-6) são descritas a seguir.

1. Uma população inicial é gerada contendo anticorpos variados, com receptores aleatórios, que inicialmente não contém células de memória;
2. Avalia-se a função objetivo, que mede a afinidade de ligação dos anticorpos com o antígeno, e seleciona-se uma quantidade de anticorpos com maior afinidade;
3. Ocorre a clonagem dos anticorpos da população numa taxa diretamente proporcional à sua afinidade com o antígeno (quanto maior a afinidade, maior a quantidade de clones), gerando uma população de clones;
4. A população de clones é submetida ao mecanismo de maturação de afinidade, ou seja, ocorrem mudanças nos receptores dos anticorpos numa taxa inversamente proporcional à afinidade com o antígeno, gerando uma população de mutantes;
5. Avalia-se a afinidade de ligação da população de mutantes com o antígeno, e seleciona-se uma quantidade de anticorpos com maior afinidade. Os anticorpos selecionados vão compor a memória da população e podem até substituir outros anticorpos com afinidade menor;
6. Substitui-se um determinado número de anticorpos de baixa afinidade por outros aleatórios, inserindo diversidade para a população. Este fenômeno é conhecido como edição de receptores.

As taxas de clonagem, mutação, maturação de afinidade e de edição de receptores dependem da aplicação e são escolhidas pelos usuários do método.

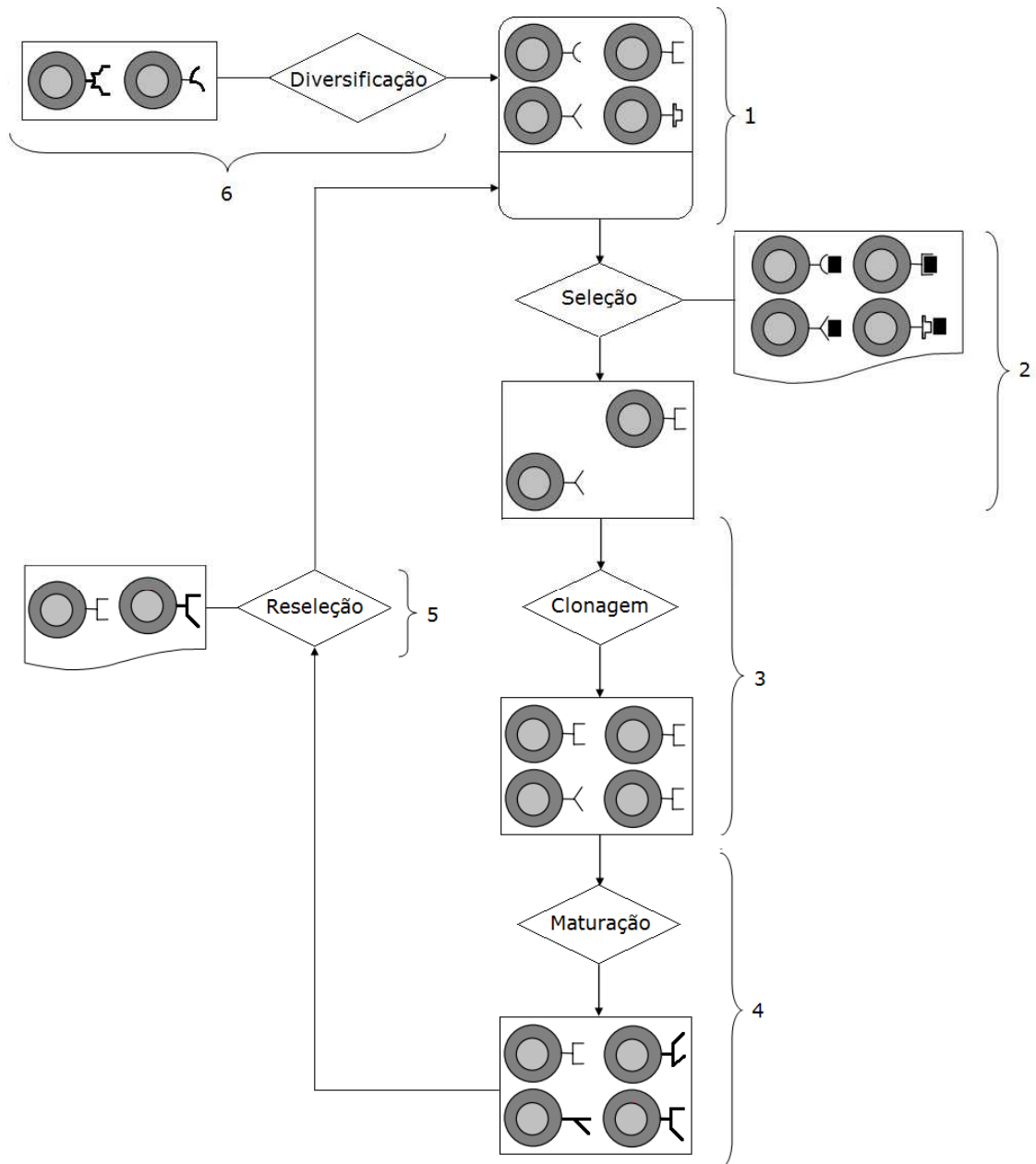


Figura 2.3 - Fluxograma do CLONALG (Fonte: Adaptado de DE CASTRO e VON ZUBEN, 2000)

O CLONALG, que inicialmente foi desenvolvido para resolução de problemas de reconhecimento de padrões e depois foi adaptado para a resolução de problemas de otimização é um algoritmo que têm sido referência quando o assunto é a utilização de sistemas imunológicos em problemas de otimização multi-objetivos. Nessa seção foi mostrado o algoritmo original, embora na literatura encontram-se vários métodos que utilizam apenas os conceitos da técnica, adaptando o algoritmo ao problema a ser solucionado, como em LALITHA *et al.* (2010), AYDIN *et al.* (2011), HOLANDA *et al.* (2013) e no método proposto nesta dissertação (que será apresentado no Capítulo 3).

2.3 Planejamento de Sistemas de Distribuição

2.3.1 Considerações iniciais

Redes de distribuição de energia elétrica, de tempos em tempos, são expandidas e reconfiguradas de forma a acompanhar as mudanças que ocorrem nas cargas, considerando seu comportamento num horizonte de tempo especificado (CARRANO *et al.*, 2007). As concessionárias de distribuição estão na constante busca por soluções mais econômicas para seus problemas de planejamento, que aumentem a flexibilidade da rede e que atendam a requisitos técnicos especificados e aspectos ambientais estratégicos.

O objetivo do planejamento de sistemas de distribuição de energia é satisfazer a crescente e variável demanda de carga do sistema durante o período de planejamento, considerando as restrições operacionais, econômicas, confiabilidade e segurança, tomando decisões otimizadas que envolvem análise dos níveis de tensão da rede de distribuição, localização e dimensionamento para a construção e expansão de subestações, definição dos tipos de condutores, topologia e construção de linhas de distribuição, tipo e localização de dispositivos de manobra, nível de confiabilidade da rede, dentre outros (TANG, 1996). Um exemplo de um sistema de distribuição com as subestações e cargas, conectados por condutores é mostrado na Figura 2.4.

Tradicionalmente, boas configurações são obtidas escolhendo-se um estado representativo das condições de carga na rede (normalmente o pico do sistema), para um dado período, e aplicando-se um método de otimização para minimização das perdas elétricas (TALESKI e RAJIČIĆ, 1997), que implicam diretamente na minimização dos custos de energia.

Em relação às suas características, o planejamento é considerado estático quando as mudanças previstas ocorrem em uma única etapa que é o objetivo principal desta dissertação. Se realizado em longo prazo, num horizonte de planejamento dividido em etapas, com as mudanças ocorrendo em diferentes períodos, o planejamento é conhecido como multi-estágios. A definição dos prazos em que as mudanças serão realizadas é analisada juntamente com os estágios, transformando a solução do problema em um planejamento dinâmico (COSSI, 2008). Problemas de planejamento multi-estágios são resolvidos na literatura de forma sequencial, ou seja, cada estágio é resolvido separadamente e carrega os resultados obtidos para os próximos estágios. Esse método é

conhecido como planejamento pseudodinâmico. Este tipo de planejamento não será abordado nesta dissertação.

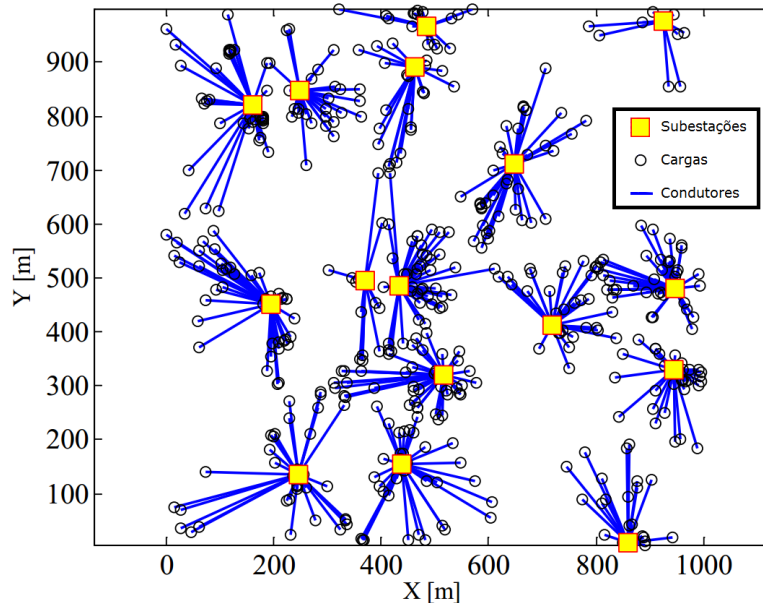


Figura 2.4 - Esquema de uma rede de distribuição contendo cargas que são alimentadas por subestações através de condutores (Fonte: HASAN *et al.*, 2014)

2.3.2 Projeto da expansão

A definição da configuração ótima das redes de energia elétrica é um problema comum no planejamento da distribuição. Restrições técnicas (estrutura radial e conexa, quedas de tensão, capacidade dos equipamentos, entre outros) e limites de confiabilidade devem ser cumpridos, garantindo a qualidade de fornecimento para alimentar as demandas do sistema (MÍGUEZ *et al.*, 2002).

As estratégias tradicionais de planejamento são baseadas na experiência e em regras pré-estabelecidas. Caso a demanda atinja um limite pré-determinado pela concessionária, uma nova instalação deve ser adicionada ao sistema, que pode ser a inclusão de novas subestações ou expansão da capacidade das mesmas, inserção de novos alimentadores ou ambos.

O planejamento envolve a seleção do número, localização e tamanho das subestações, além da configuração dos alimentadores de tal modo que o custo de instalação, juntamente com o custo da perda de energia, seja mínimo, mantendo a radialidade da rede e ao mesmo tempo não violando as limitações de capacidade e de queda de tensão em qualquer parte da rede.

A localização da subestação é fator preponderante no custo final de transporte da energia para o consumidor final. O processo para a escolha da melhor localização de subestações e alimentadores é um problema de locação de facilidades. Esse tipo de problema investiga onde será localizado fisicamente um conjunto de instalações ou recursos de modo a minimizar a soma dos custos do serviço, satisfazendo algum conjunto de demandas ou clientes, sujeitos a um conjunto de restrições (SCAPARRA e SCUTELLÀ, 2001).

Para lidar com a infinidade de aplicações encontradas para esses problemas, surgiram formulações e algoritmos de soluções que abordam a questão, que variam muito em termos de complexidade matemática e desempenho computacional (KLOSE e DREXL, 2005). Problemas de locação de facilidades são encontrados na literatura como em CHARIKAR e GUHA (1999), MEYERSON (2001) e DASKIN (2011).

A precisão do modelo de planejamento, bem como a eficiência da técnica de programação matemática, representam fatores cruciais para um método de planejamento bem sucedido. Os custos do sistema e a qualidade da energia fornecida estão diretamente relacionados com a configuração de rede. Várias técnicas de programação matemática foram aplicadas ao problema de otimização da configuração dos alimentadores e construção de subestações em sistemas de distribuição, como em SUN *et al.* (1982), FAWZI *et al.* (1983), PONNAVAIKKO *et al.* (1987), HSU e CHEN (1990) e HASSELFIELD *et al.* (1991). Muitos dos métodos existentes consideram as topologias ideais minimizando apenas os custos de investimento, manutenção e de perdas elétricas. A descrição completa das técnicas utilizadas no método proposto nesta dissertação é mostrada no Capítulo 3.

2.3.3 Reconfiguração da rede

Devido aos avanços na regulação dos sistemas de distribuição (como inserção de banco de capacitores e reguladores de tensão) e gestão automática da rede elétrica, a necessidade de redes mais eficientes está se tornando mais comum no setor energético. Além disso, por questões econômicas, busca-se cada vez mais a otimização da utilização dos recursos já existentes.

Uma das tarefas envolvidas neste processo é a reconfiguração de alimentadores de distribuição. Considerada um subproblema do planejamento da expansão, a

reconfiguração é utilizada nos estudos de planejamento para a determinação de uma configuração ótima para a rede.

Dentro do estudo da reconfiguração, o problema de alocação de chaves é um clássico problema de otimização que consiste em determinar a melhor quantidade, locais e tipos apropriados de chaves em redes de distribuição, aumentando a confiabilidade e minimizando os custos. A instalação de chaves seccionadoras, normalmente fechadas, e de manobras, normalmente abertas, busca melhorar os índices de confiabilidade do sistema de distribuição (BILLINTON e ALLAN, 1996). Em resposta a uma falha, algumas das chaves seccionadoras seriam abertas, a fim de isolar os ramos com falha. Ao mesmo tempo, uma chave de manobra normalmente aberta é fechada a fim de transferir uma parte isolada para outro alimentador ou para outro ramo do mesmo alimentador. Todas as chaves são restauradas para suas posições normais após a remoção da falta. A seleção de cada operação de troca de interruptor torna-se muito demorada em uma rede de distribuição de tamanho real, que pode conter milhares de ramos e centenas de interruptores (SHIRMOHAMMADI e HONG, 1989). Problemas de alocação de chaves são encontrados em FALAGHI *et al.* (2009) e ASSIS (2014).

Os principais pontos em comum entre planejamento e reconfiguração incluem a não observância dos fenômenos transitórios causados pelas mudanças na topologia das redes (considerando somente os aspectos estáticos), o conhecimento prévio dos equipamentos disponíveis para utilização, a existência de partes da rede fora de operação, que ao serem incluídas geram redes desconexas e que precisam ser analisadas, dentre outros.

Em termos de ferramenta de solução de problemas para planejamento e reconfiguração, a principal diferença existente entre eles é relativa à necessidade de eficiência computacional na obtenção da solução, visto que situações de reconfiguração podem ser aplicadas na ocorrência de faltas no sistema e é necessária uma rapidez na obtenção da solução, visto que pode haver interrupção do fornecimento de energia elétrica, acarretando em muitos prejuízos aos consumidores.

Todas as informações resumidas nesta seção precisam ser levadas em consideração no desenvolvimento dos métodos de solução.

2.4 Conclusões do capítulo

Neste capítulo, viu-se que uma rede de distribuição de energia é constituída por uma série de subestações ligadas umas às outras através de alimentadores e que os planejadores de distribuição devem assegurar que existe capacidade adequada para atender as previsões de carga dentro do horizonte de planejamento.

As decisões no planejamento do sistema de distribuição de energia incluem a busca de uma configuração ideal para a rede, considerando as leis de Kirchoff, radialidade de alimentadores, queda de tensão na rede, capacidade das subestações e alimentadores (KHATOR, 1997). Encontrar a configuração ótima exata de tal sistema torna-se uma difícil tarefa computacional mesmo para um número moderado de nós na rede (DUAN e YU, 2003).

Devido à natureza desses problemas de otimização combinatória, técnicas de otimização evolutiva vem se tornando a principal classe de técnicas aplicadas em tais problemas para encontrar as configurações ideais para redes de distribuição de energia elétrica. Estes algoritmos, no entanto, geralmente entregam uma única solução final, que é esperado estar próxima do ótimo global (CARRANO *et al.*, 2007).

O planejamento do sistema de distribuição ideal é reconhecido como um problema muito complexo, devido ao grande número de configurações de rede possíveis (BOULAXIS e PAPADOPOULOS, 2002).

Neste trabalho, apenas serão consideradas como alternativas de expansão da rede a alocação de subestações, a construção de novos alimentadores e a reconfiguração de ramos através da abertura/fechamento de chaves. Para isso, será utilizada a metaheurística Sistema Imunológico Artificial, que foi apresentada neste capítulo, e é uma técnica computacional inspirada na imunologia. Diferentemente de outros algoritmos evolutivos, entregam não somente uma única solução (a solução ótima) no final do processo de otimização, mas também todo um conjunto de soluções de boa qualidade (ótimos locais) que evoluem ao longo do desenvolvimento da técnica.

Capítulo 3 Método proposto

3.1 Considerações

Os modelos de expansão de sistemas de distribuição permitem várias alternativas a serem consideradas como aumento da capacidade das subestações existentes, instalação de novas subestações, uso de geração distribuída, mudança de alimentadores, substituição de condutores, entre outros. A função objetivo de um problema de planejamento deste tipo pode incluir muitas dessas alternativas, porém nenhum método de otimização abrange todos os aspectos do projeto de sistemas de distribuição, e nenhum método é completamente livre de aproximações e limitações (WILLIS *et al.*, 1996).

Partindo desse pressuposto, o método proposto tem como objetivo minimizar alguns dos custos globais envolvidos no processo de expansão da rede de distribuição. Os seguintes custos serão considerados: custo de perdas de energia elétrica, custo de instalação de novas subestações de distribuição e custo de instalação de novos alimentadores.

Diversas restrições são possíveis de serem consideradas em problemas de planejamento da distribuição. Neste trabalho, serão consideradas restrições técnicas que envolvem radialidade e conectividade da rede elétrica, limite de corrente dos alimentadores e limites de tensão nas cargas, restrições físicas como a impossibilidade de construção de subestações em certas áreas e restrições operacionais, relacionadas com a disponibilidade de equipamentos (ou seja, apenas serão alocados equipamentos com características pré-definidas, que estejam disponíveis para utilização).

3.2 Modelo Matemático do Problema de Otimização

3.2.1 Introdução

Com a indústria da eletricidade passando por um processo de reestruturação e privatização das empresas de distribuição, o principal objetivo é o de maximizar os lucros. Por outro lado, um dos desafios que essas empresas enfrentam neste novo ambiente é a confiabilidade do serviço de energia elétrica entregue aos clientes. Embora

haja uma variedade de abordagens para melhorar a confiabilidade do serviço prestado, as empresas de distribuição estão dispostas a atingir essa meta em muitos casos através da implementação das tecnologias de automação de distribuição, devido a muitas razões técnicas e econômicas.

Para proporcionar uma operação com o mínimo de perdas de energia e com manutenção dos níveis adequados das tensões, a rede costuma ser equipada com equipamentos de comutação, sendo melhores aqueles operados remotamente, de preferência em todas as linhas da rede para alcançar o mais alto nível de flexibilidade. Mesmo que tal operação proporcione uma economia significativa, ela necessita de um aumento dos investimentos e dos custos operacionais necessários para o controle automatizado e sistemas de monitoramento (LEE e BROOKS, 1988).

É importante destacar que o modelo de planejamento da expansão proposto pressupõe que a rede de distribuição está equipada com um sistema de automação com tais capacidades.

3.2.2 Função objetivo e restrições

Com o objetivo de minimizar o custo global (considerando os itens citados nas considerações iniciais deste capítulo) no problema da expansão de sistemas de distribuição, tem-se o seguinte problema de otimização, cuja função objetivo é dada pela Equação (3.1).

$$\min \quad C_{total} = C_{perdas} + C_{circuitos} + C_{subestações} \quad (3.1)$$

s. a.

$$V_{min} \leq V \leq V_{max} \quad (3.2)$$

$$I \leq I_{max} \quad (3.3)$$

$$(P_{SE_s})^2 + (Q_{SE_s})^2 \leq (\bar{S}_{SE_s})^2 \quad (3.4)$$

$$(P_{ramo_k})^2 + (Q_{ramo_k})^2 \leq (\bar{S}_{ramo_k})^2 \quad (3.5)$$

Onde:

V vetor de tensões das cargas

V_{min} vetor de tensões mínimas das cargas

V_{max}	vetor de tensões máximas das cargas
I	vetor de correntes nos ramos
I_{max}	vetor de correntes máximas nos ramos
P_{SE_s}	potência ativa fornecida pela subestação s
Q_{SE_s}	potência reativa fornecida pela subestação s
\bar{S}_{SE_s}	limite de potência aparente da subestação s
P_{ramo_k}	fluxo de potência ativa no ramo k
Q_{ramo_k}	fluxo de potência reativa no ramo k
\bar{S}_{ramo_k}	fluxo de potência aparente máximo no ramo k

A Equação (3.2) se refere aos limites de tensão das barras na rede, fazendo com que elas permaneçam dentro de valores aceitáveis para um bom funcionamento do sistema. Já a Equação (3.3) se refere aos limites de corrente nominais dos ramos, fazendo com que os condutores funcionem dentro das margens previstas. As Equações (3.4) e (3.5) referem-se à capacidade máxima de potência permitida para as subestações e para os ramos do sistema, respectivamente.

As parcelas da função objetivo são detalhadas nas Equações (3.6) a (3.8).

$$C_{perdas} = 8760 C_{energia} F_{perdas_{elet}} \sum_{n=1}^{N_a} \left((1 + juros_{energia})^{-n} \sum_{k=1}^{N_r} (r_k |I_k|^2) \right) \quad (3.6)$$

$$C_{circuitos} = \sum_{k=1}^{N_r} \left(C_{cabo_k} \sqrt{(x_{1,r} - x_{2,r})^2 + (y_{1,r} - y_{2,r})^2} \right) \quad (3.7)$$

$$C_{subestações} = \sum_{s=1}^{N_{SE_{novas}}} C_{SE_s} \quad (3.8)$$

Onde:

C_{perdas}	custo com perdas de energia elétrica
$C_{circuitos}$	custo com construção/reconfiguração de circuitos elétricos
$C_{subestações}$	custo com construção de subestações
n	n-ésimo ano de planejamento
N_a	número de anos do horizonte de planejamento (anos)

$juros_{energia}$	taxa de juros relativa ao custo de energia elétrica (a.a.)
$C_{energia}$	custo unitário de energia elétrica (US\$/kWh)
$F_{perdas_{elet}}$	fator de perdas relacionado ao consumo de energia elétrica
k	k -ésimo ramo da rede elétrica
N_r	número de ramos da rede elétrica
r_k	resistência do ramo k
I_k	corrente elétrica do ramo k
C_{cabo_k}	custo do cabo utilizado no trecho k (US\$/km)
$x_{1,r}$	abscissa do ponto de origem do trecho r
$x_{2,r}$	abscissa do ponto de destino do trecho r
$y_{1,r}$	ordenada do ponto de origem do trecho r
$y_{2,r}$	ordenada do ponto de destino do trecho r
s	s -ésima subestação
$N_{SE_{novas}}$	número de novas subestações construídas
C_{SE_s}	custo unitário da subestação s em US\$

3.2.3 Modelo Matemático dos Componentes de Rede

3.2.3.1 Introdução

Tendo em vista a importância do problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição e a complexidade envolvida, é necessário desenvolver modelos de componentes do sistema, sem comprometer a eficácia do método. Esta seção mostra como foi realizada a modelagem dos componentes da rede de distribuição considerados para análise realizada neste trabalho.

3.2.3.2 Modelo de Subestações

Uma subestação s , seja ela nova ou já existente, será definida pelas características:

S_{SE_s}	potência instalada da subestação s (unidade: VA)
x_{SE_s}	abscissa da localização da subestação s (unidade: km)
y_{SE_s}	ordenada da localização da subestação s (unidade: km)

Caso $S_{SE_1} = \bar{S}_{SE_1}$, tem-se uma subestação 1 cujo limite de potência é o mesmo de suas características nominais, logo ela não pode ser repotencializada. Na prática, isso pode estar atrelado, dentre outros fatores, a um limite de espaço físico para a ampliação.

A construção de novas subestações de distribuição está regulamentada pela norma ABNT NBR 14039:2005. Ela define as características quanto aos materiais utilizados e localização de todos os tipos de subestações, de forma a fornecer condições de bem-estar e segurança aos operadores. Neste trabalho, não serão analisados os tipos de arranjos utilizados, modo de instalação dos equipamentos em relação ao meio ambiente, equipamentos utilizados e condições de suprimento, mas apenas será pressuposto que a subestação será instalada e funcionará adequadamente durante o horizonte de planejamento definido.

Dessa forma, os únicos pontos relevantes serão o custo das subestações e a localização, pois as decisões de localização são essenciais para dimensionar o sistema elétrico e satisfazer suas demandas de forma eficiente (HALE e MOBERG, 2003).

3.2.3.3 Modelo de Cargas

As cargas (demanda) do sistema de distribuição serão modeladas como potência constante, não sendo representadas as variações das cargas ao longo do dia. Assim como as subestações, possuem uma coordenada cartesiana que representa o ponto no espaço onde está localizada.

S_{C_n} potência aparente de pico da n -ésima carga (unidade: VA)

fp_{C_n} fator de potência da n -ésima carga

x_{C_n} abscissa da localização da carga n no plano cartesiano (unidade: km)

y_{C_n} ordenada da localização da carga n no plano cartesiano (unidade: km)

Normalmente, os sistemas de distribuição são projetados para serem mais eficientes na demanda de carga de pico (SONG *et al.*, 1997), portanto a escolha da demanda de pico representando a carga será utilizada neste trabalho.

3.2.3.4 Modelo de Alimentadores

A maioria dos alimentadores de distribuição é configurada radialmente, para uma coordenação eficaz dos seus sistemas de proteção (SHIRMOHAMMADI e HONG, 1989).

Redes radiais têm algumas vantagens sobre redes malhadas, como menores correntes de curto-circuito, comutação mais simples e mais fácil dimensionamento e operação de equipamentos de proteção. Por outro lado, a estrutura radial proporciona menor confiabilidade global. Portanto, utilizando-se dos benefícios da estrutura radial, e ao mesmo tempo para superar as dificuldades, os sistemas de distribuição são planejados e construídos como redes fracamente malhadas (possibilidade de fechamento em anel através de chaves N.A.), mas operado como redes radiais. Dispositivos de seccionamento N.A. e N.F. são utilizados no processo de reconfiguração da rede.

O modelo pi é utilizado na modelagem dos alimentadores, conforme Figura 3.1. Esse modelo tem os comportamentos indutivo e resistivo da linha concentrados numa impedância longitudinal Z e o capacitivo numa admitância transversal da linha, Y .

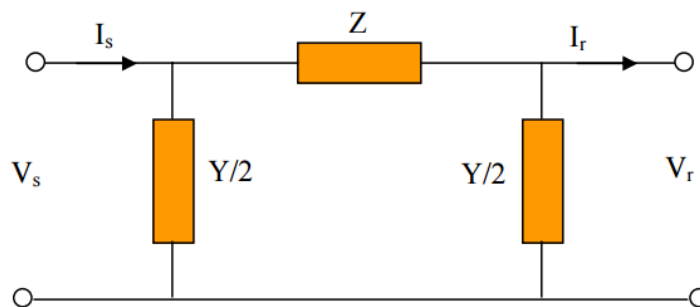


Figura 3.1 - Modelo pi dos alimentadores

Onde:

$$Z = (R + j \cdot 2\pi f \cdot l) \cdot d \quad (3.9)$$

$$Y = j \cdot 2\pi f \cdot C \cdot d \quad (3.10)$$

Sendo:

R resistência por unidade de comprimento (Ω/m)

l indutância por unidade de comprimento (H/m)

C capacitância por unidade de comprimento (F/km)

d comprimento (km)

A equação matricial da linha é mostrada na Equação (3.11). As variáveis citadas estão representadas na figura do modelo.

$$\begin{bmatrix} I_s \\ -I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y}{2} + \frac{1}{Z} & -\frac{1}{Z} \\ -\frac{1}{Z} & \frac{Y}{2} + \frac{1}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.3 Algoritmo proposto

3.3.1 Introdução

Em problemas de planejamento, devido a seu grau de importância, complexidade e por exigir aplicações para longo prazo, métodos que necessitem de muitas horas de planejamento e que levem a procedimentos lentos de solução são admissíveis (GOMES, 2005). Portanto o tempo de processamento computacional não será uma das prioridades no desenvolvimento do método proposto, embora as técnicas utilizadas sejam eficazes e produzam respostas em tempo hábil para aplicação nos problemas a que se propõe resolver.

O algoritmo proposto é embasado na teoria da seleção clonal e possui funções baseadas em algoritmos de seleção negativa. Os métodos heurísticos são a alternativa atual para os modelos matemáticos de otimização. Eles realizam buscas locais com a orientação de regras e/ou sensibilidades (regras heurísticas) lógicas ou empíricas. Essas regras são usadas para gerar e classificar as opções durante a busca. O processo de heurística é realizado até que o algoritmo de geração não seja mais capaz de encontrar uma resposta melhor, considerando os critérios de avaliação que foram estabelecidos.

3.3.2 Fluxograma Proposto

Baseada na metaheurística Sistema Imunológico Artificial, o método proposto tem seu funcionamento esquematizado no fluxograma da Figura 3.2. Todas as etapas representadas no fluxograma serão explicadas nas subseções a seguir.

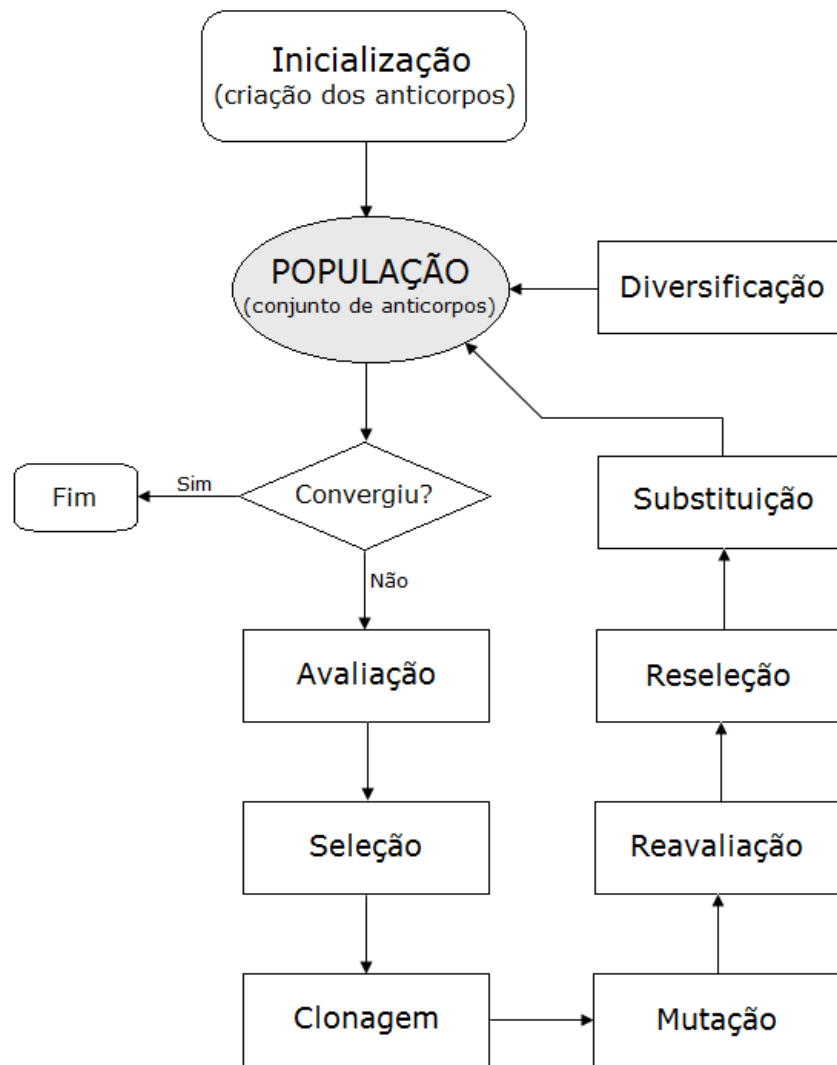


Figura 3.2 - Fluxograma do algoritmo proposto

3.3.2.1 Inicialização

3.3.2.1.1 Modelagem dos anticorpos

Neste método, os anticorpos são estruturas que contém as informações necessárias para caracterizar a rede quanto a sua topologia, localização das subestações e características dos alimentadores. No método aqui apresentado, o anticorpo é um vetor dividido em três partes, cada uma representando uma característica da rede: topologia, posição das subestações (novas e antigas) e tipos de alimentadores. Além disso, cada subestação é identificada por um número inteiro diferente um do outro e o mesmo vale para as cargas, sem repetir a identificação das subestações. A Figura 3.3 contém um modelo genérico de anticorpo.

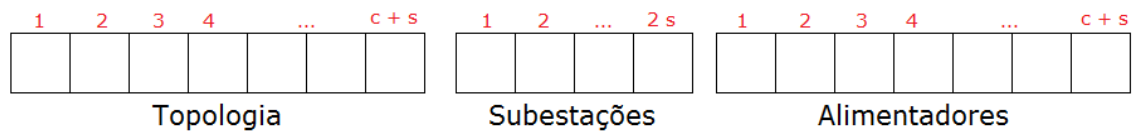


Figura 3.3 - Modelo de anticorpo

Na primeira parte, o vetor possui $c + s$ posições, onde c é o número total de pontos de cargas do sistema e s o número de subestações (novas e antigas). Cada posição do vetor contém um número de 1 a $(c + s)$ que é a identificação do elemento ao qual aquela posição está conectada. Por exemplo, se a posição 4 contém o elemento 2, isso quer dizer que o elemento 4 está ligado ao elemento 2 (esses elementos podem ser carga ou subestação). A diferenciação de um elemento em carga ou subestação é feita dentro do algoritmo, de acordo com os dados dos sistemas teste. Na maior parte dos casos, as subestações começam sua identificação a partir do número 1 até s e as cargas são identificadas por $(s + 1)$ até $(c + s)$.

Na segunda parte, são indicadas as coordenadas (x e y) das subestações já existentes e das novas. Dessa forma, para um teste de um sistema que possui 1 subestação e terá 1 nova, a segunda parte do anticorpo terá 4 elementos, correspondendo às abscissas e ordenadas de cada umas das 2 subestações. Caso o teste seja feito com 2 subestações novas e 1 antiga, o anticorpo apresentará 6 elementos e assim por diante.

Na terceira parte, o anticorpo mostra o tipo de alimentador utilizado para cada ligação da primeira parte do anticorpo. O alimentador é definido pelo usuário e retrata o tipo de instalação da rede (aérea, protegida, subterrânea) bem como a bitola dos condutores, resistência, reatância e preço. Por exemplo, a posição 3 da terceira parte do anticorpo representa o tipo de condutor utilizado na ligação representada pela posição 3 da primeira parte do anticorpo. O elemento interno associado a essa posição indica o código do tipo de cabo utilizado nessa ligação.

Um exemplo fictício de anticorpo é mostrado na Figura 3.4. Na primeira parte, por exemplo, tem-se 7 elementos (2 subestações + 5 cargas). Na primeira posição da primeira parte do anticorpo é indicado que elemento 4 é conectado ao elemento 1 (sendo que o elemento 1 é uma subestação e o elemento 4 é uma carga). A ligação se dá através do alimentador do tipo #1 (por causa da posição 1 do vetor da terceira parte do anticorpo que contém o #1 como elemento interno); na segunda posição do vetor de topologias é indicado que o elemento 5 é conectado ao elemento 2 através do alimentador do tipo #3 (de acordo com o vetor de alimentadores), e assim por diante. O

valor 5 na posição 5 é preenchido só para completar o vetor e não deixar nenhum elemento nulo, já que todas as ligações da rede foram feitas.

Ex:

1	2	3	4	5	6	7
4	5	1	5	5	2	4

1	2	3	4
X1	Y1	X2	Y2

1	2	3	4	5	6	7
#1	#3	#3	#1	#2	#2	#3

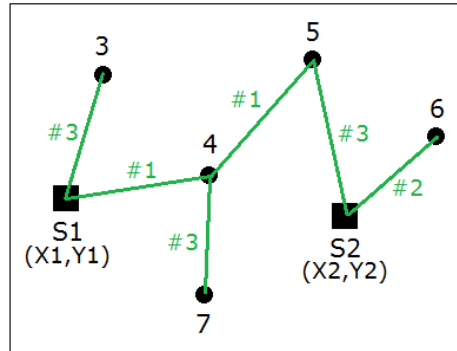


Figura 3.4 - Exemplo fictício de anticorpo com a rede que representa

3.3.2.1.2 Geração da população inicial

Como em todo método de busca, uma boa solução inicial é necessária para que a convergência seja rápida, ou até mesmo viável, no caso de problemas de alta explosão combinatória, como é o caso de problemas de planejamento de sistemas de distribuição.

Neste trabalho, a parte dos anticorpos que define os tipos de cabos que serão utilizados em cada ligação será feita de maneira randômica, uma vez que normalmente são poucas as possibilidades por conta da disponibilidade dos mesmos e experiências anteriores de uso dos cabos. Além do fato de, pela quantidade de anticorpos utilizada juntamente com os processos de clonagem e mutação, permite-se que essa escolha aleatória seja suficiente para a obtenção de boas soluções.

A posição das subestações existentes é fixada e obviamente não sofrerá mutações ao longo do processo iterativo, já a posição das subestações novas será escolhida de forma aleatória, com maior possibilidade de serem construídas próximas às regiões com maiores densidades de carga, eliminando-se as regiões impossibilitadas de receberem a construção de uma nova subestação (ex.: um lago, um parque, entre outros). As regiões que serão vetadas do processo de busca serão indicadas em cada sistema teste, caso houver.

A escolha de como serão feitas as ligações entre cargas e subestações (topologia da rede) inicia-se com a escolha do número de alimentadores principais que sairão de cada subestação e irão até as cargas, sendo que esse número vai variando de acordo com as gerações, embora em alguns sistemas teste esse número seja fixado. Para saber quais cargas serão alimentadas por cada um desses alimentadores, decidiu-se realizar o processo resumido na Figura 3.5 e explicado a seguir.

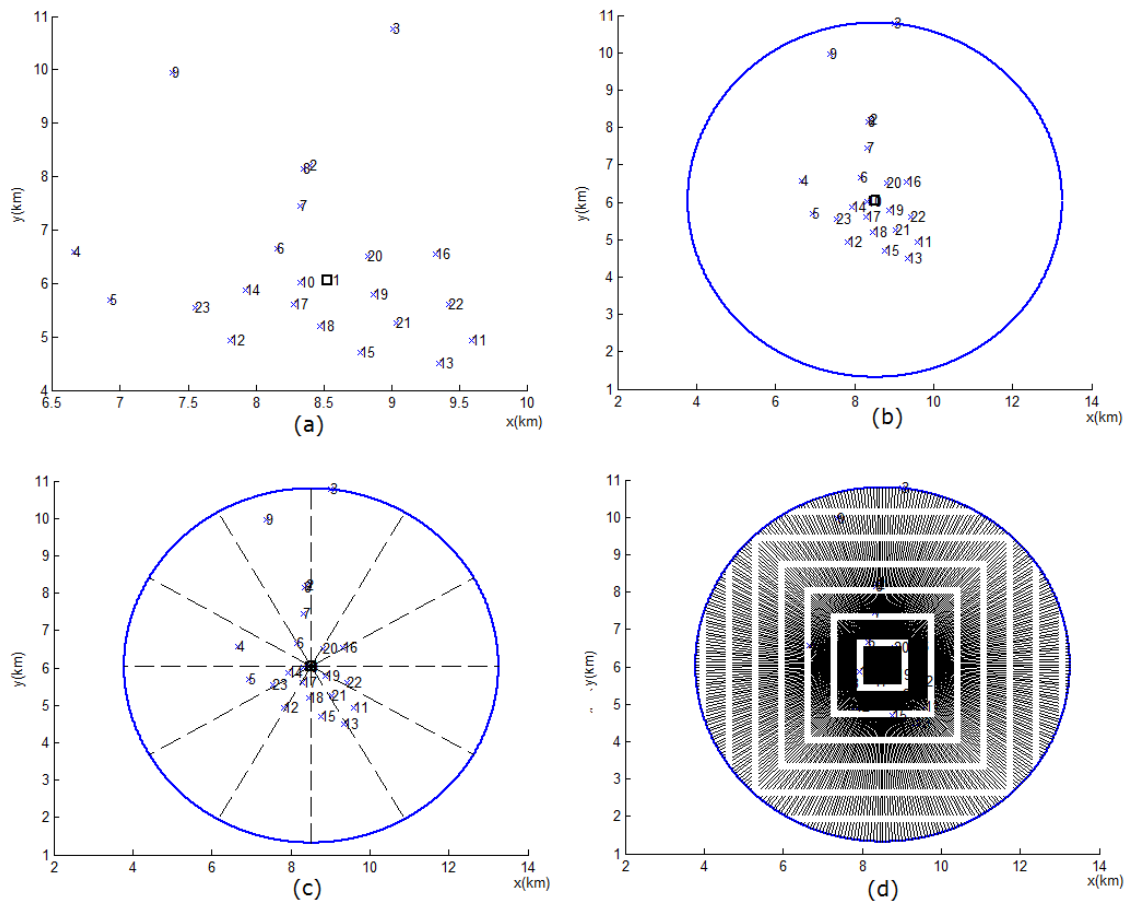


Figura 3.5 - (a) Sistema com as cargas e uma subestação; (b) Círculo fictício envolvendo todos os elementos; (c) Setorização do círculo (ângulos de 30°, para melhor visualização do processo); (d) Setorização com ângulos mínimos (ex.: 1°).

Partindo de cada subestação, cria-se um círculo imaginário compreendendo todas as cargas do sistema, e então setoriza-se o mesmo com ângulos mínimos. Dessa forma, escolhe-se um dos setores de forma aleatória e varre-se todo o círculo, no sentido anti-horário, analisando sua potência instalada, de modo a definir quais serão cobertos por cada um dos alimentadores que saem de cada subestação, considerando uma margem de folga em relação à capacidade nominal de cada alimentador. A utilização de setores

mínimos garante uma melhor distribuição das cargas pelos setores, fazendo com que na construção dos alimentadores haja pouca extrapolação da capacidade deles e crie mais topologias diferentes para varrer ainda mais o processo de busca.

Definidos os setores em que cada alimentador vai passar, resta definir o caminho realizado por cada um para alimentar as cargas. Neste trabalho, foi definido para que a maioria dos anticorpos tenha o caminho dos alimentadores sendo definidos pela análise da menor distância, pois é uma medida rápida que está diretamente relacionado às perdas de energia. Caso a distância seja a mesma, dá-se prioridade às cargas de maior potência, que pode ser um indicativo da importância de seu atendimento e de suas características elétricas, o que pode implicar em diminuição de perdas de energia.

Durante todo o processo, alguns anticorpos terão seus caminhos modificados ao longo do percurso. Uma das modificações mais realizadas é a escolha aleatória de alguma carga do sistema e troca de sua ligação por outra tal que não atrapalhe a radialidade do sistema. A escolha de qual nova ligação é feita é proporcional à distância para a carga, considerando apenas os caminhos possíveis (em um processo de reconfiguração) e todos os caminhos (para um planejamento da expansão).

A modificação das características de alguns anticorpos no decorrer do processo é extremamente importante para inserir diversidade na população. Isso é semelhante ao mecanismo de hipermutação somática realizado pelo sistema imunológico humano. Ao realizar essas variações, ele permite que os anticorpos criados tenham mais chances de sofrerem boas mutações que caminhem para a solução ótima.

A quantidade de anticorpos que sofrerá essas modificações e a taxa com que ocorrem é definida de acordo com a experiência das simulações realizadas e é variável no decorrer do processo iterativo no sentido de inserir diversidade neles.

3.3.2.2 População

A população é o conjunto de anticorpos que representa a rede elétrica. O número de anticorpos da população inicial é definido previamente e seu valor é definido de acordo com a experiência com as simulações. Quanto maior o número de anticorpos da população, mais refinado será o processo de busca pela solução ótima. Em alguns casos, além da rotina de geração de anticorpos para a população inicial já mencionada, foram inseridas topologias encontradas na literatura.

3.3.2.3 Convergência

A convergência do método acontece quando é atingido o número de gerações máximas pré-estabelecidas ou quando uma resposta ótima não apresenta uma melhora por um número razoável de gerações, que também é definido previamente, de acordo com a experiência com as simulações.

3.3.2.4 Avaliação

A etapa de avaliação da metaheurística consiste na verificação de cada anticorpo da população quanto à radialidade e continuidade do circuito, limite de corrente dos alimentadores, limites de tensão das cargas, existência das rotas para os alimentadores nos casos de reconfiguração da rede, disponibilidade da localização das novas subestações.

Além disso, é feito o cálculo do custo total da rede, incluindo custos com perdas elétricas (para essa avaliação, é feito o cálculo do fluxo de potência da rede representada por cada anticorpo), construção de novos alimentadores e subestações.

A radialidade do sistema é verificada por uma rotina específica que analisa se existe algum laço na rede. O mesmo vale para a continuidade, que representa o fato, de partindo das subestações, garantir que existe caminho para alimentar toda a demanda da rede. As equações matemáticas para essas características são mostrada em OLIVEIRA (2010). Essas verificações são boas no início para direcionar o processo de busca, porém no decorrer do processo iterativo elas vão sendo menos utilizadas, no intuito de permitir que topologias próximas a boas soluções não sejam descartadas previamente. Além disso, as demais análises (como fluxo de potência) já tendem a eliminar soluções com topologias sem continuidade. Se na etapa de avaliação, ela receber uma avaliação negativa (por exemplo, um valor infinito para as perdas), tenderá a ser pouco clonada e desaparecer do processo iterativo, porém ela pode estar próxima de uma solução de boa qualidade, devendo ser clonada em maior quantidade para sofrer mutação e ter maiores chances de vir a se tornar um anticorpo com boa avaliação.

Um fluxo de potência é calculado com a topologia da rede e várias informações são extraídas dele como tensões nas barras, fluxos nos ramos, perdas elétricas, potências produzidas pelas subestações, entre outras.

O número de alimentadores utilizados e a potência de cada um deles de acordo com o tipo selecionado também é verificada, de acordo com os valores obtidos do fluxo de potência. Caso o número seja pré-fixado, como foi em alguns sistemas, o anticorpo recebe uma avaliação negativa e tende a ser mutado e pouco clonado. O mesmo vale para quando o limite de corrente dos alimentadores é ultrapassado.

O limite de potência de cada subestação e o limite de tensão de cada barra são verificados em outra rotina. Caso sejam violados, a rotina impede que o anticorpo seja a solução do problema.

Outra função de verificação criada é para saber se as rotas de uma topologia são condizentes às rotas factíveis do problema, principalmente nos problemas de reconfiguração. Caso alguma rota de algum problema de expansão seja impossível de ser realizada, basta ser indicada, que será barrada por essa rotina de avaliação.

3.3.2.5 Seleção

A etapa de seleção consiste na escolha dos anticorpos com maiores afinidades, ou seja, os mais bem avaliados na etapa anterior, que apresentam os menores custos globais.

O número de anticorpos selecionados é definido previamente, de acordo com a experiência com as simulações.

3.3.2.6 Clonagem

A etapa de clonagem consiste na repetição dos anticorpos selecionados na etapa anterior, de modo a gerar uma população com anticorpos mais bem avaliados.

O número de clones gerados é proporcional à afinidade do anticorpo como mostra a Equação (3.12).

$$N_{clones_k} = \text{round} \left(\frac{t_{clonagem} \cdot n_{selec}}{pos_{afinid_k}} \right) \quad (3.12)$$

Onde:

N_{clones_k} número de clones gerados do anticorpo k

round operador que arredonda o valor para o inteiro mais próximo

$t_{clonagem}$	taxa de clonagem (parâmetro do SIA, citada na seção 3.3.2.12)
n_{selec}	número de anticorpos escolhidos na etapa de seleção
pos_{afinid_k}	posição de k na ordem crescente de afinidade dos anticorpos selecionados

3.3.2.7 Mutaç o

A etapa de muta o consiste na altera o de alguns elementos dos anticorpos que possuem uma baixa afinidade, ou seja, que representam redes el tricas com custos muito elevados ou at  mesmo redes que violam as restri es do problema.

Em alguns m todos encontrados na literatura como em SETA *et al.* (2013) e FERREIRA *et al.* (2015), os anticorpos eram compostos por valores bin rios chamados de bits, e ocorria uma normaliza o desses valores, de modo que eles passaram a representar valores decimais e assim a muta o era realizada invertendo-se alguns bits aleatoriamente. No m todo aqui apresentado, o processo de muta o n o   totalmente aleat rio, tendendo a acontecer com maiores chances em certos pontos.

Obviamente, anticorpos com piores resultados tendem mais a sofrer muta o que aqueles com melhores resultados. Assim, um anticorpo tem a probabilidade de sofrer uma muta o dada pela Equa o 3.13.

$$Prob_{mutacao_k} = e^{-\left(\frac{t_{mutacao}}{FOB_k}\right)} \cdot \left(\frac{FOB_k}{FOB_{clonesmax}}\right) \quad (3.13)$$

Onde:

$Prob_{mutacao_k}$	n�mero de clones gerados do anticorpo k
$t_{mutacao}$	constante de muta�o (par�metro do SIA, citada na se�o 3.3.2.12)
FOB_k	valor da fun�o objetivo (custo total) para o anticorpo k
$FOB_{clonesmax}$	valor m�ximo da fun�o objetivo (custo total) da popula�o de clones

O processo de muta o em si consiste na escolha aleat ria de uma posi o do anticorpo, que representa uma carga ou subesta o do sistema. Essa carga tem uma lista de poss veis cargas a que ela pode se ligar (em casos de reconfigura o) e cada uma delas ter  uma probabilidade de ser escolhida, inversamente proporcional  s dist ncias entre as cargas.

3.3.2.8 Reavaliação

A etapa de reavaliação é a mesma mostrada na seção 3.3.2.4, porém o processo se dá para a população de mutantes criada na etapa de mutação (Seção 3.3.2.7).

3.3.2.9 Reseleção

A etapa de reseleção é a mesma mostrada na seção 3.3.2.5, porém o processo se dá para a população de mutantes criada na etapa de mutação (Seção 3.3.2.7). As afinidades de cada anticorpo são aquelas obtidas da reavaliação da seção 3.3.2.8.

3.3.2.10 Substituição

Esta etapa consiste na substituição dos anticorpos com pior afinidade da população pelos mutantes selecionados na etapa de reseleção (Seção 3.3.2.9), formando uma nova população de anticorpos. O número de anticorpos substituídos é definido no início do problema.

3.3.2.11 Diversificação

A etapa de diversificação consiste na troca de elementos dos anticorpos de modo a inserir diversidade na população e fugir de ótimos locais. Algumas estratégias são: reescrita de alguns anticorpos de uma maneira diferente, mas que represente a mesma rede, realização de alterações na estrutura dos anticorpos que ao serem modificados violaram alguma restrição do problema, de modo a corrigir as lacunas deixadas por essa mudança, variação das taxas que envolvem a mutação ao longo das gerações, inserção de novos anticorpos da função de população inicial, entre outras. A variável $N_{antic\ diversific}$ define o número de elementos que sofrerão diversificação.

3.3.2.12 Parâmetros do SIA

A metaheurística utilizada no problema é composta por diversas constantes, que caracterizam todo o processo para a obtenção da solução. Os valores utilizados variam de acordo com o caso que foi testado e foram escolhidas de acordo com o que foi sendo observado em relação ao comportamento do algoritmo para os problemas testados.

Além disso, algumas dessas constantes têm seus valores alterados no decorrer das iterações, proporcionando maior varredura no espaço de busca. As constantes mencionadas são mostradas a seguir.

$N_{repeticoes}$	número de repetições do processo iterativo
$N_{ger_{max}}$	número máximo de gerações
$N_{ger_{maxlimite}}$	número máximo de gerações sem melhora da afinidade do anticorpo
$N_{anticorpos_{inicial}}$	número de anticorpos gerados na população inicial
$N_{anticorpos_{selec}}$	número de anticorpos escolhidos na etapa de seleção
$t_{clonagem}$	taxa de clonagem (orienta a quantidade de clones produzidos)
$N_{antic_{selec_{clon}}$	número de anticorpos selecionados para a etapa de clonagem
$t_{mutacao}$	constante de mutação (orienta a quantidade de mutantes criados)
$N_{antic_{selec_{mut}}$	número de anticorpos selecionados que sofrerão mutação
$N_{antic_{diversific}}$	número de anticorpos que sofrerão diversificação
$P_{diversific_{antic}}$	probabilidade dos anticorpos serem modificados
$N_{tent_{diversif_{antic}}$	número de tentativas de diversificar um anticorpo

Os valores utilizados para cada caso dependem do sistema teste utilizado e alguns variam durante o processo iterativo. Serão mencionados o número de anticorpos em cada caso e o número de gerações em cada teste. Alguns valores comuns utilizados nas simulações encontram-se abaixo.

$$\begin{aligned}
 N_{repeticoes} &= 20 \\
 N_{ger_{maxlimite}} &= 0,4 N_{ger_{max}} \\
 N_{anticorpos_{selec}} &= 0,3 N_{anticorpos_{inicial}} \\
 t_{clonagem} &= 3,2 \\
 t_{mutacao} &= 0,07 \\
 N_{antic_{selec_{mut}} &= 60 \\
 N_{antic_{diversific}} &= 30 \\
 P_{diversific_{antic}} &= 0,075
 \end{aligned}$$

3.4 Considerações finais do capítulo

O método apresentado nesse capítulo para a resolução de problemas de expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizou-se de conceitos do sistema imunológico humano para a modelagem de funções computacionais que permitissem uma busca eficaz da solução do problema proposto.

Diversas estratégias computacionais foram utilizadas no decorrer do algoritmo de acordo com a observância do comportamento dos anticorpos na procura pela solução do problema, como por exemplo, o armazenamento de anticorpos com boas soluções e sua posterior utilização em outras repetições, modificação dos atributos de alguns anticorpos de acordo com o número de ligações que realizavam, alteração gradual dos anticorpos até que alimentadores principais ou ramificações do mesmo fossem representados de outra maneira, tudo no sentido de varrer mais o espaço de busca.

Em todo o processo, buscou-se minimizar os custos envolvidos considerando a projeção futura da demanda. A proposta do algoritmo foi buscar a melhor solução para o problema, ou seja, a mais econômica, diminuindo ao máximo a quantidade de violações características do problema.

Capítulo 4 Resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados resultados obtidos utilizando o método proposto para o planejamento da expansão de sistemas de distribuição. As simulações realizadas tiveram como objetivo validar a implementação computacional, bem como testar a eficácia do método.

Os sistemas analisados encontram-se na Tabela 4.1. Para a análise de alguns resultados encontrados na literatura foram necessárias adaptações, no sentido de testar o algoritmo e fazer uma comparação dos resultados. Em algumas situações o método utilizado no trabalho original, onde o caso foi proposto, não abordava todos os aspectos que o método proposto neste trabalho aborda. Isto será explicado adiante.

Tabela 4.1 - Sistemas utilizados

Sistema	Fonte
23 barras	NAHMAN e PERIC, 2008
23 barras modificado	OLIVEIRA, 2010
33 barras	BARAN e WU, 1989
54 barras	RANJAN <i>et al.</i> , 2002
84 barras	SU e LEE, 2003
119 barras	ZHANG <i>et al.</i> , 2007

Apesar de o método proposto ter sido originalmente projetado para otimização do dimensionamento de alimentadores e alocações de subestação, é possível utilizá-lo também para a solução da reconfiguração de sistemas de distribuição. Ainda, é possível utilizá-lo para projetar uma parte inexistente do sistema de distribuição (alocando subestações se necessário) e otimizar a configuração da parte existente.

Os sistemas testes na Seção 4.2 foram utilizados para a análise e comparação com casos de expansão dos sistemas de distribuição encontrados na literatura, buscando validar o método proposto. Ressalta-se que cada sistema possui especificidades próprias, que foram definidas em sua criação, nos trabalhos originais. Dessa forma, cada

um deles foi analisado de forma a englobar o máximo de características possíveis relacionadas ao método proposto.

Por exemplo, o sistema 23 barras, no seu trabalho de origem, é composto por uma rede com rotas candidatas para a localização dos alimentadores e que, no trabalho original, não prevê a construção de novas subestações. Dessa forma, o método proposto considerou para esse caso apenas as parcelas da função objetivo relativas aos custos de construção de circuitos e as perdas, além de limitar a topologia da rede apenas aos caminhos disponíveis. Isto para verificar os resultados com o trabalho original e validar o método proposto.

Já no sistema 23 barras modificado, uma nova subestação é prevista para ser construída, podendo ser incluídos os custos com construção, porém no trabalho original sua posição é fixada (o que não é necessário no método proposto neste trabalho).

Ou seja, para que as rotinas que compõem o método proposto possam ser testadas e comparadas com a literatura são necessárias adaptações ao método. Todas essas adaptações são explicadas quando se fizerem necessárias e entende-se serem suficientes para que o método seja avaliado. Salienta-se que o método proposto é mais geral, englobando mais funcionalidades que alguns dos métodos encontrados na literatura.

Os sistemas teste utilizados na Seção 4.3 são relacionados aos problemas clássicos de reconfiguração de sistemas de distribuição. Neste tipo de problema, normalmente, tem-se uma rede com rotas já existentes e o objetivo é definir quais as chaves de manobra devem ser abertas ou fechadas para garantir uma rede com, por exemplo, menores perdas elétricas. Dessa forma, no sentido de testar o método aqui proposto, no algoritmo desenvolvido, os anticorpos relativos às posições das subestações e dos tipos de cabos utilizados foram pré-fixados, variando-se apenas os anticorpos relativos à topologia da rede. Assim, a única parcela da função objetivo relevante para estes casos seria o custo de perdas, e como a maior parte da literatura pesquisada trabalha apenas com os valores reais de perdas elétricas na análise dos problemas, optou-se por considerar a função objetivo apenas como minimização das perdas elétricas da rede para esses sistemas.

Por fim, a Seção 4.4 analisa expansão e reconfiguração simultaneamente, ou seja, dado um sistema já existente e a previsão de demanda futura, planeja-se como ficarão as ligações das novas cargas e sugere-se mudanças (reconfiguração) na rede já existente com manobras de chaves a fim de reduzir os custos globais envolvidos, entendendo ser este um teste bem completo.

4.2 Problemas de expansão

4.2.1 Sistema 23 barras (NAHMAN e PERIC, 2008)

O sistema de 23 barras encontrado em NAHMAN e PERIC (2008) é um sistema de distribuição de 34,5 kV, e contém uma subestação de 10 MVA que alimenta uma região de produção de óleo com 21 barras de carga.

As rotas pré-existentes para o sistema encontram-se na Figura 4.1. As opções de condutores para serem utilizados nas rotas são cabos de alumínio do tipo 1/0 e do tipo 4/0, tendo seus dados apresentados na Tabela 4.2. As demais informações utilizadas para os testes encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.2 - Dados dos condutores utilizados para o sistema 23 barras

Tipo	Capacidade (A)	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Custo (US\$/km)
1/0	230	0,6045	0,4290	10000
4/0	340	0,3017	0,4020	40000

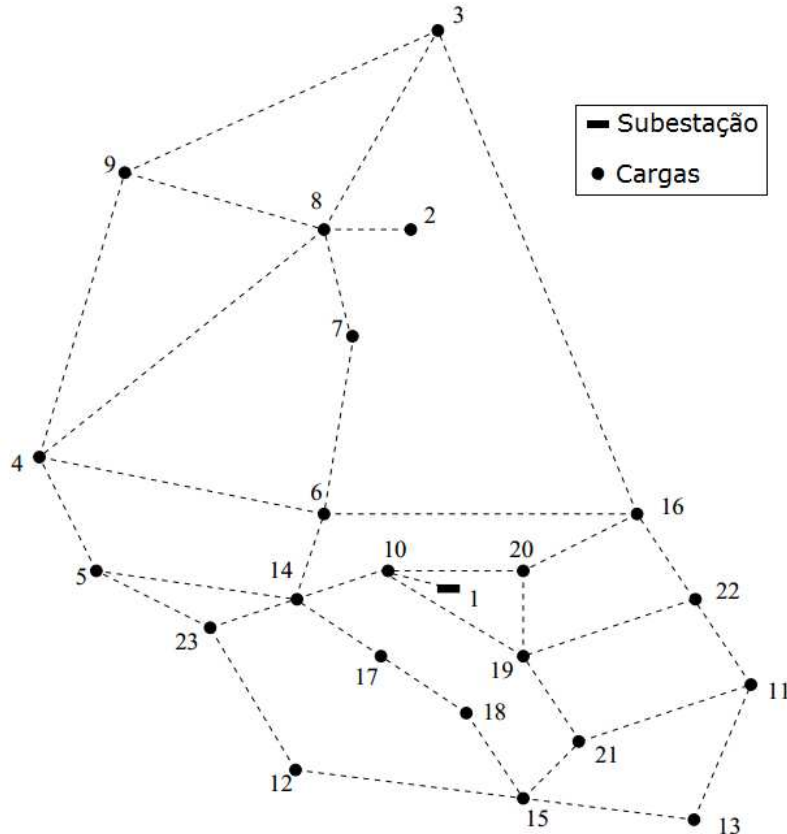


Figura 4.1 - Rotas factíveis para o sistema de 23 barras (OLIVEIRA, 2010)

Tabela 4.3 - Dados para os testes realizados no sistema 23 barras

Característica	Valor
Desvio máximo de tensão permitido	3%
Fator de potência médio das cargas	0,9
Custo de perdas de energia elétrica	0,05 US\$/kWh
Fator de perdas	0,35
Taxa de juros (ao ano)	0,10
Horizonte de planejamento	20 anos

As referências encontradas na literatura que trataram do sistema 23 barras analisaram basicamente os custos envolvidos com a construção de circuitos e os custos de perdas de energia. Assim, buscando validar o método proposto, esses aspectos foram levados em consideração no teste realizado. Logo, considerando apenas esses custos, os resultados do método proposto e os obtidos na literatura estão na Tabela 4.4.

A topologia ótima da rede, encontrada por GOMEZ (2004), NAHMAN e PERIC (2008), OLIVEIRA (2010) e SOUZA (2011) é mostrada na Figura 4.2. Todos os condutores utilizados foram do tipo 1/0.

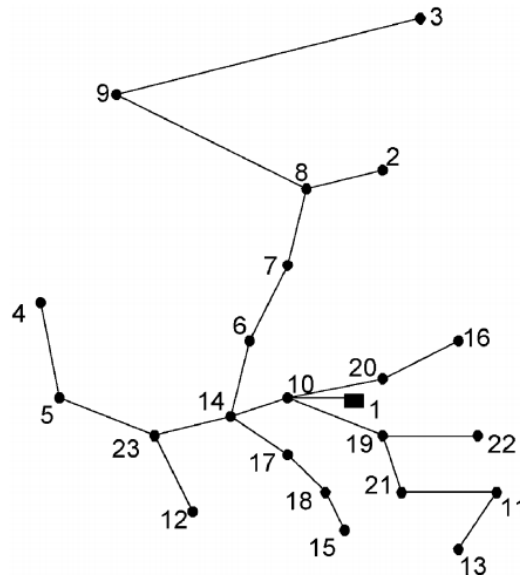


Figura 4.2 - Solução encontrada na literatura para o sistema 23 barras

As soluções encontradas em GOMEZ (2004), NAHMAN e PERIC (2008), OLIVEIRA (2010) e SOUZA (2011) apresentaram a mesma topologia como solução ótima (isso fica mais claro no custo dos circuitos que foi idêntico). A diferença entre os custos de perdas se deve aos parâmetros utilizados ou variações no modelo matemático.

Verifica-se também que CAMARGO (2014) encontrou um valor menor para o custo de circuitos porque não considerou o alimentador da ligação entre as cargas 8 e 2 (que tem demanda nula). Essa consideração também foi feita neste método (Figura 4.3), acreditando-se que o ponto 2 não possa ser considerado demanda.

Tabela 4.4 – Custos encontrados para o sistema 23 barras

Fonte	Custo de circuitos (US\$)	Custo de perdas (US\$)	Total (US\$)
GOMEZ (2004)	151.892	21.021	172.913
NAHMAN e PERIC (2008)	151.892	21.007	172.899
OLIVEIRA (2010)	151.892	20.227	172.119
SOUZA (2011)	151.892	20.227	172.119
CAMARGO (2014)	151.136	20.217	171.353
Método Proposto (SIA)	151.135,52	20.217,54	171.353

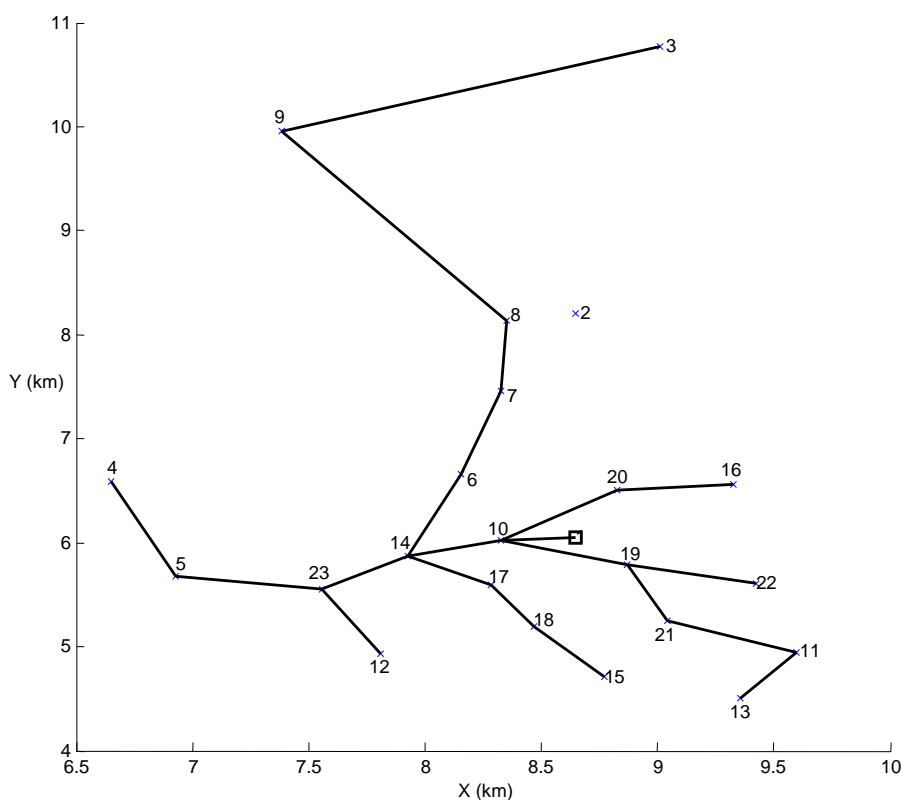


Figura 4.3 - Solução ótima para o sistema de 23 barras (Fonte: obtida da simulação no MATLAB).

Uma observação com relação à figura anterior é a seguinte: a subestação 1 e a carga 2 tiveram sua posição alterada para facilitar a visualização na figura (os cabos utilizados são todos do tipo 1/0).

As perdas ativas totais foram de 15,49 kW e a potência aparente fornecida pela subestação de 7,06 MVA, sendo 6,3515 MW e 3,0797 Mvar. Esses valores foram iguais aos encontrados em CAMARGO (2014), que foi a única referência que mostrou esses resultados.

Nas simulações com o método proposto, o número de anticorpos utilizados foi de 400, escolhido de acordo com a experiência com as simulações. O comportamento do algoritmo de acordo com o número de gerações é mostrado na Figura 4.4. As demais taxas envolvidas no processo variam no decorrer das iterações, uma vez que assim foi definido pelo método, de modo a diversificar ainda mais o espaço de busca. A população inicial foi gerada pelo algoritmo e nenhuma solução inicial disponível na literatura foi utilizada, para que a rotina do método fosse testada. Para sistemas maiores, a utilização de anticorpos com topologias já conhecidas é interessante, pois diminui o tempo computacional total e ajuda o método a caminhar para uma boa solução. Cada geração demandou um tempo computacional aproximado de 27 segundos.

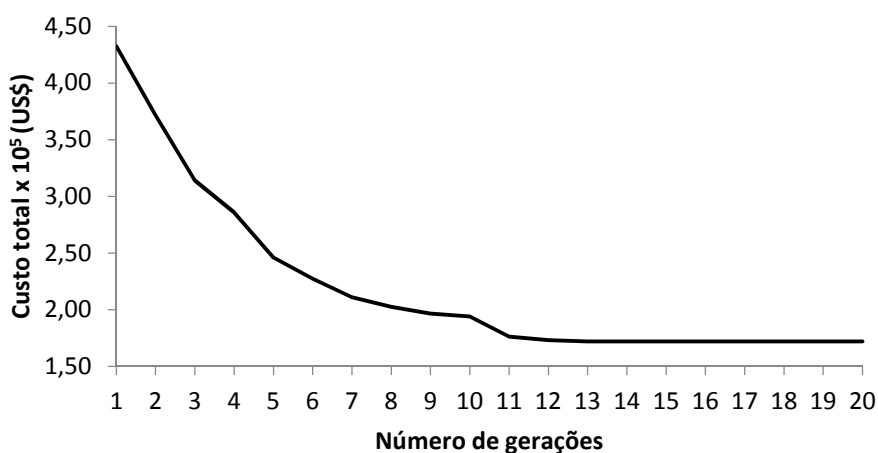


Figura 4.4 - Comportamento da solução para o sistema 23 barras

Uma análise importante a se fazer é que a definição dos custos que serão analisados é crucial para a definição da topologia ótima da rede. Quando considerado apenas o custo de perdas da rede, o método encontra a configuração ótima mostrada na Figura 4.5, onde todos os condutores também são do tipo 1/0.

Para encontrar a solução ótima, os trabalhos encontrados na literatura analisavam conjuntamente os custos com circuitos (US\$) e os custos com perdas (US\$). Porém, entende-se ser importante analisar o maior número de custos possíveis envolvidos no processo de expansão. Ao se analisar apenas o custo de perdas (que é uma prática bastante comum na literatura), a topologia ótima encontrada é a mostrada na Figura 4.5. As perdas encontradas foram menores do que o caso ótimo (Tabela 4.5), porém o custo de circuitos associado a essa topologia é 416,58% maior (US\$ 784.646,93). A soma dos dois custos para este caso (US\$ 790.999,37) foi 359,59% maior que o custo da solução ótima (US\$ 172.109,10). Assim, mostra-se que é bom analisar o sistema como um todo. Para essa solução, a subestação produziu 6,3409 MW e 3,0752 Mvar.

Tabela 4.5 – Comparação entre a solução ótima e a solução com menor custo de perdas

Configuração utilizada	Custo de perdas (US\$)
Considerando apenas os custos de perdas	6.352,43
Topologia ótima da Tabela 4.4	20.217,54

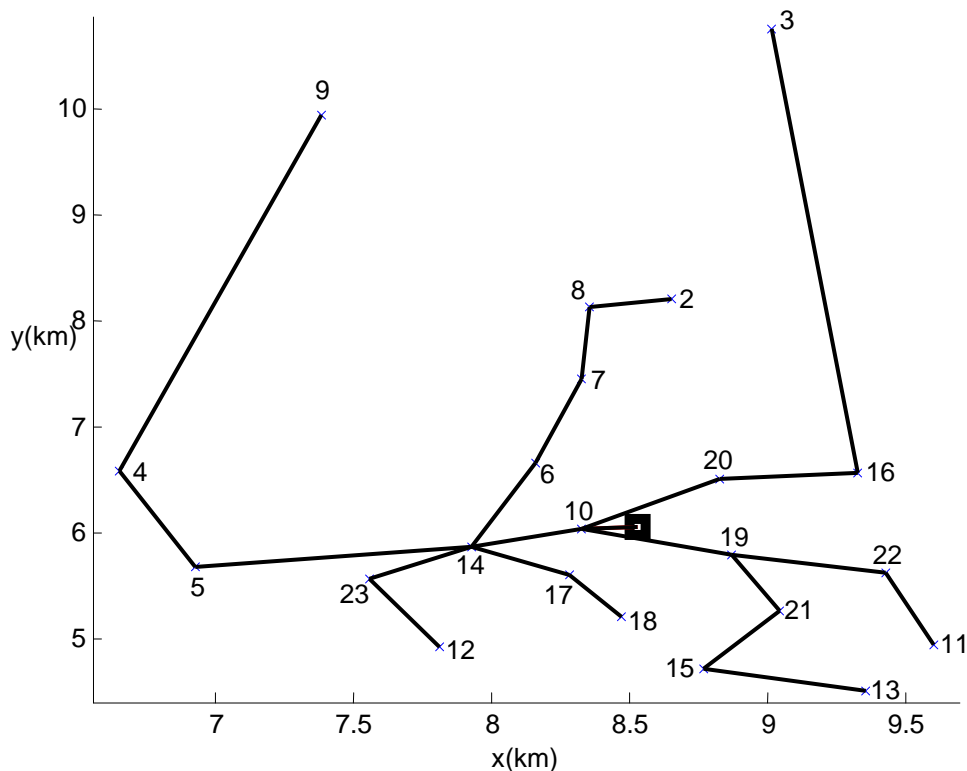


Figura 4.5 - Solução para o sistema 23 barras, em uma análise que considera apenas o custo com as perdas de energia

4.2.2 Sistema 23 barras modificado (OLIVEIRA, 2010)

O sistema de 23 barras modificado tem as mesmas características do sistema encontrado em NAHMAN e PERIC (2008), analisado na seção 4.2.1, com a diferença de que a capacidade da subestação 1 foi modificada para 4 MVA, sem possibilidade de ser expandida. Deste modo, permitiu-se a alocação de uma segunda subestação com localização pré-fixada e com as características apresentadas na Tabela 4.6, como uma possibilidade para o algoritmo. Os demais custos foram mantidos em relação ao sistema 23 barras original.

Tabela 4.6 - Dados para os testes realizados no sistema 23 barras modificado

Característica	Valor
Custo de construção da subestação candidata (10 MVA)	US\$ 1.000.000

Os resultados encontrados considerando a possibilidade de alocação de uma nova subestação, e conseqüentemente os custos de construção da nova subestação, encontram-se na Tabela 4.7.

Os resultados encontrados em OLIVEIRA (2010), SOUZA (2011) e CAMARGO (2014) para o sistema 23 barras modificado foram os mesmos. Porém, a topologia ótima encontrada pelo método proposto foi diferente, conforme explicado a seguir.

Tabela 4.7 – Custos encontrados para o sistema 23 barras modificado

Fonte	Custo de circuitos (US\$)	Custo de perdas (US\$)	Custo de subestações (US\$)	Total (US\$)
OLIVEIRA (2010)	149.712	14.259	1.000.000	1.163.971
SOUZA (2011)	149.712	14.259	1.000.000	1.163.971
CAMARGO (2014)	149.712	14.259	1.000.000	1.163.971
Método (SIA)	149.181,09	14.661,02	1.000.000	1.163.842,11

A potência fornecida pela subestação 1 foi de 3,1728 MW e 1,5377 Mvar e pela subestação 2 foi de 3,1744 MW e 1,5389 Mvar. Os resultados encontrados pelo método proposto (Figura 4.6) foram semelhantes aos encontrados na literatura (Figura 4.7) com uma diferença na ligação da carga 11, que agora está ligada à carga 21. Todos os condutores utilizados em ambos os métodos foram do tipo 1/0.

Pode-se verificar que a solução encontrada com o método proposto tem um custo menor que a encontrada em outros métodos apresentados na literatura. A mudança da ligação 11-22 para 11-21 atende aos requisitos de radialidade, continuidade e todos os outros e apresenta um resultado com menor custo total. A distância euclidiana entre as cargas 11 e 21 é de 0,6394 km e entre as cargas 11 e 22 de 0,6924 km. Ou seja, em relação ao custo com os circuitos tem-se uma vantagem do resultado obtido pelo método proposto em relação ao resultado da literatura por conta da menor distância entre as ligações. O custo de perdas aumenta um pouco por conta da mudança da topologia, mas analisando os dois custos, conjuntamente, o método proposto apresentou melhor resultado.

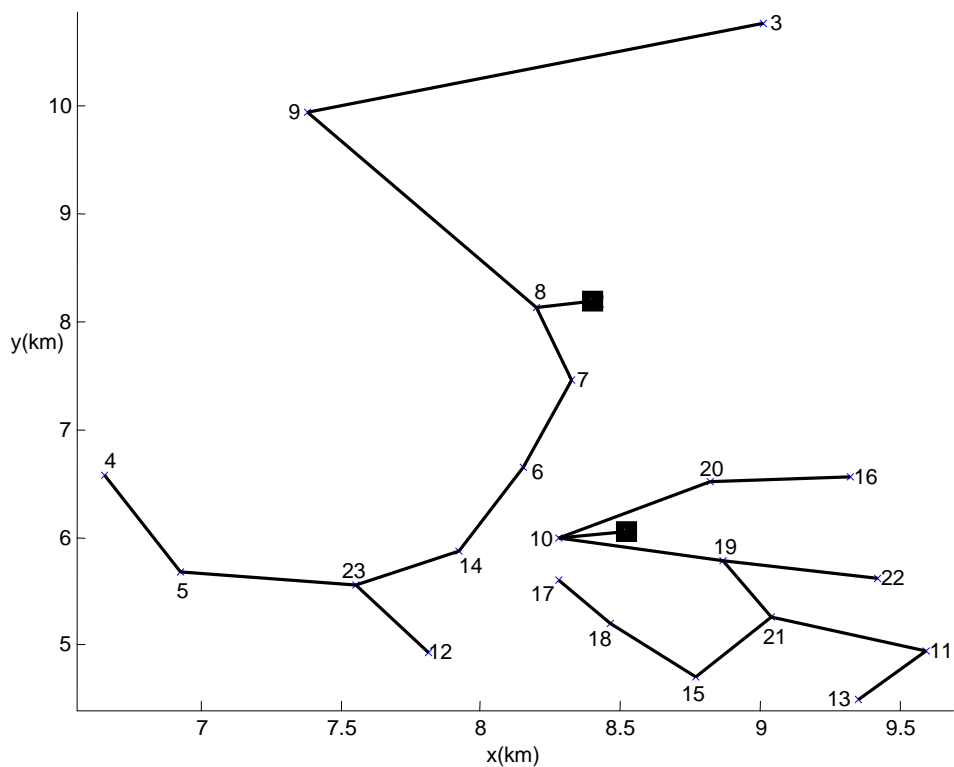


Figura 4.6 - Solução ótima para o sistema 23 barras modificado encontrada pelo método

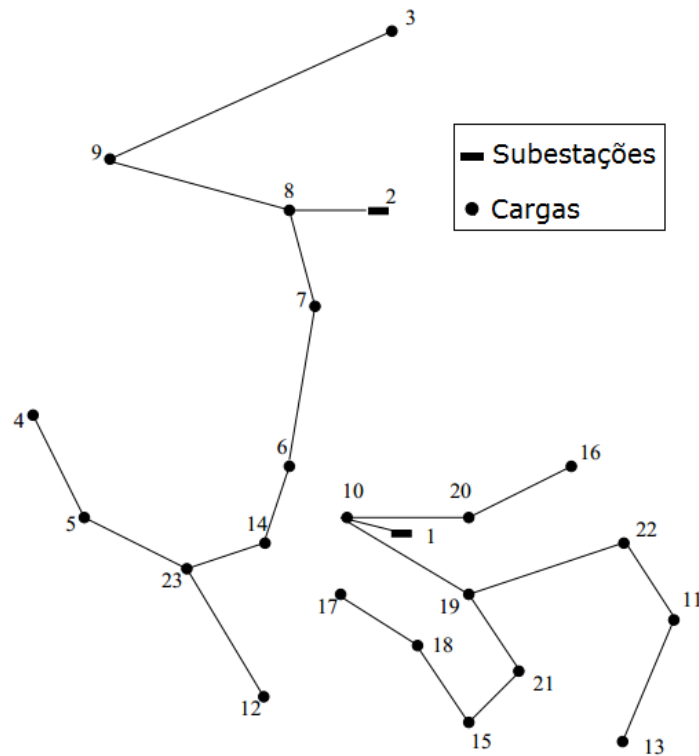


Figura 4.7 - Solução ótima para o sistema 23 barras modificado encontrada em OLIVEIRA (2010)

Na simulação do método proposto, o número de anticorpos utilizados foi de 500, escolhido de acordo com a experiência com as simulações. O comportamento do algoritmo de acordo com o número de gerações é mostrado na Figura 4.8. Cada geração custou um tempo de processamento de aproximadamente 44 segundos.

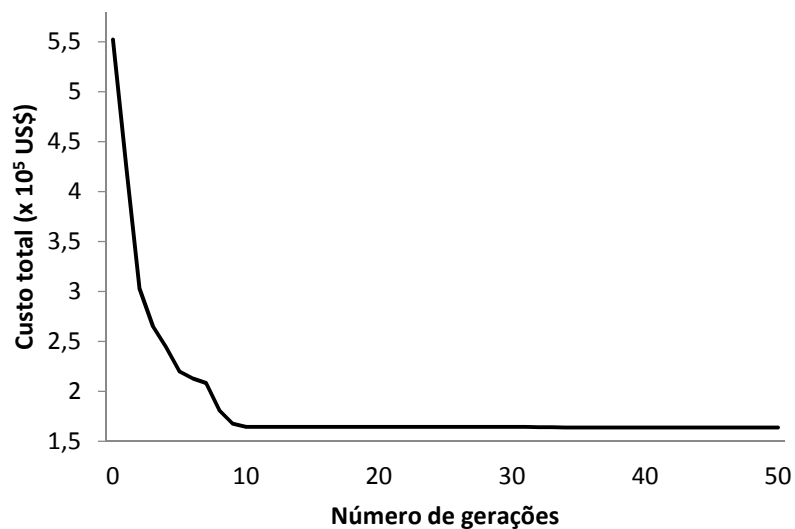


Figura 4.8 - Comportamento da solução do sistema 23 barras modificado

4.2.3 Sistema 23 barras com alocação de uma subestação

Para testar a rotina desenvolvida para livre alocação de subestação, nesta seção o sistema 23 barras será otimizado com a subestação podendo ser construída em qualquer ponto. Dessa forma, desprezam-se as rotas pré-definidas, assim as cargas podem ligar-se livremente umas as outras e as distâncias entre elas será a distância euclidiana entre suas coordenadas cartesianas.

Os resultados encontrados por meio desta nova abordagem com subestação em localização livre (chamado no texto de SE variável) são comparados com os anteriores, encontrados com a subestação nova pré-fixada (chamado no texto de SE fixa), na Tabela 4.8. A topologia ótima é mostrada na Figura 4.9. Todos os condutores utilizados são do tipo 1/0. Destaca-se que a carga 10 teve sua posição deslocada na figura para facilitar a visualização.

Tabela 4.8 – Comparação dos custos para o sistema 23 barras otimizado encontrado no método

Fonte	Custo de circuitos (US\$)	Custo de perdas (US\$)	Total (US\$)
Método Proposto (SIA) – SE fixa	151.135,52	20.217,54	171.353,06
Método Proposto (SIA) – SE variável	145.475,29	9.068,96	154.544,25

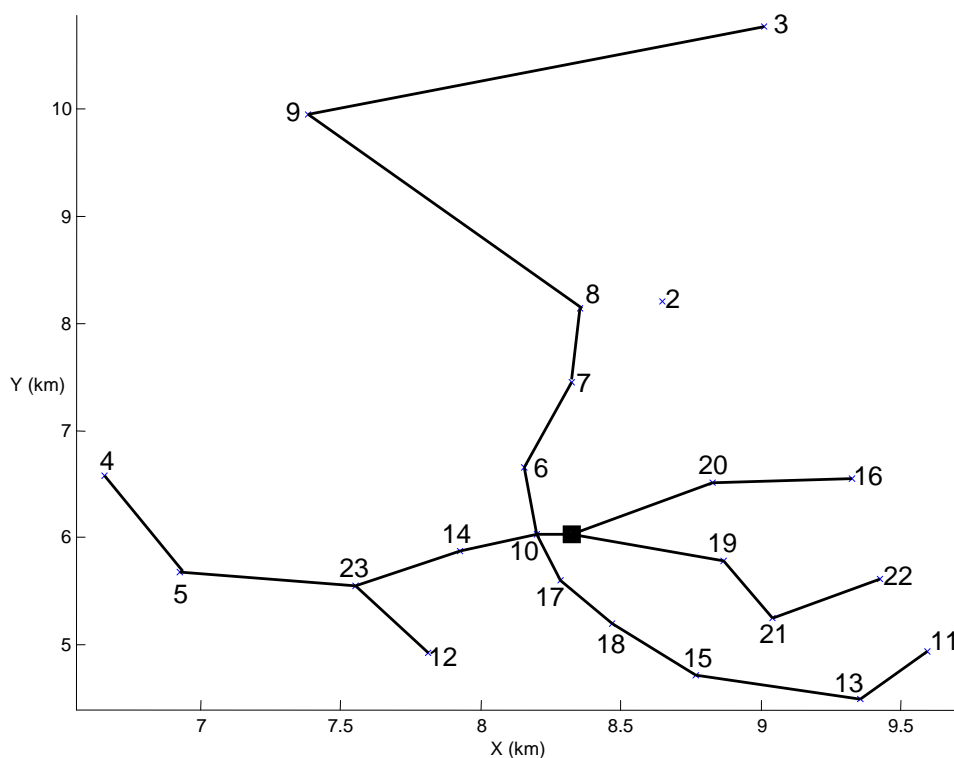


Figura 4.9 - Topologia ótima considerando a posição variável para a SE (sistema 23 barras)

Percebe-se que nesta nova solução o uso do alimentador do tipo 1/0 foi preterido em relação ao 4/0 por conta do alto custo do segundo. E também que muitas rotas entre as cargas são semelhantes às do caso original, pois a busca pela minimização das perdas tende a passar por topologias com mínimas distâncias de cabos. A localização da subestação é próxima da coordenada ($x = 8,33$; $y = 6,03$). A subestação produziu 6,3429 MW e 3,0736 Mvar.

Os resultados nesta nova solução foram melhores porque ampliou-se o espaço de busca ao desconsiderar as rotas pré-definidas e ao permitir a alocação das subestações em quaisquer pontos cria-se maiores possibilidades para a obtenção da topologia ótima.

Anteriormente, a subestação se localizava em ($x = 8,525$; $y = 6,055$), nesta nova simulação se localizou em ($x = 8,33$; $y = 6,03$). Esses são valores bastante próximos fisicamente, mas o mais importante é salientar que a construção de uma subestação envolve diversas outras características como tipo de terreno, disponibilidade de linhas próximas e outras considerações, que não foram aqui tratados.

Nesse resultado em particular, a grande diferença entre os custos de perdas se deu principalmente pela mudança da topologia, que utilizou 3 alimentadores saindo da subestação e distribuiu melhor o fluxo de energia, diminuindo as perdas. Porém, também salienta-se que a utilização de muitos alimentadores saindo da subestação tem outros custos associados (como por exemplo inserção de disjuntores e dispositivos de manobra e proteção) que não são abordados neste exemplo.

Nesta simulação, o número de anticorpos utilizados foi de 600, escolhido de acordo com a experiência com as simulações. O comportamento do algoritmo de acordo com o número de gerações é mostrado na Figura 4.10. Cada geração custou um tempo de processamento de aproximadamente 47 segundos.

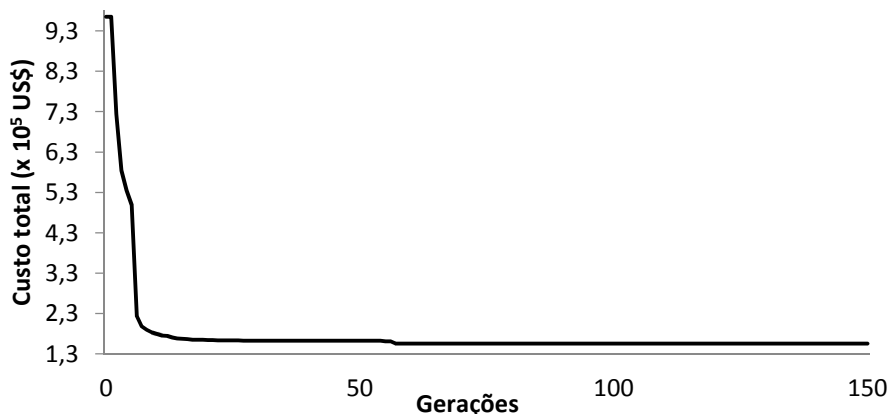


Figura 4.10 - Comportamento da solução do sistema 23 barras com alocação livre de uma subestação

4.2.4 Sistema 23 barras com alocação de duas subestações

O sistema 23 barras foi otimizado com duas subestações podendo ser construídas em quaisquer pontos. As mesmas considerações das rotas da seção anterior seguem nesta análise, ou seja, despreza-se as rotas pré-fixadas apresentadas originalmente para o sistema. Neste caso, o limite de 4 MVA para cada uma das subestações será respeitado para que algumas comparações possam ser feitas. Os resultados encontrados pelo método proposto são comparados com os da seção 4.2.2 na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Comparação dos custos para o sistema 23 barras com duas subestações alocadas

Fonte	Custo de circuitos (US\$)	Custo de perdas (US\$)	Custo de subestações (US\$)	Custo Total (US\$)
Método proposto (SIA) – SEs fixas	149.181,09	14.661,02	1.000.000,00	1.163.842,11
Método proposto (SIA) – SEs variáveis	144.420,66	7.438,94	1.000.000,00	1.151.859,60

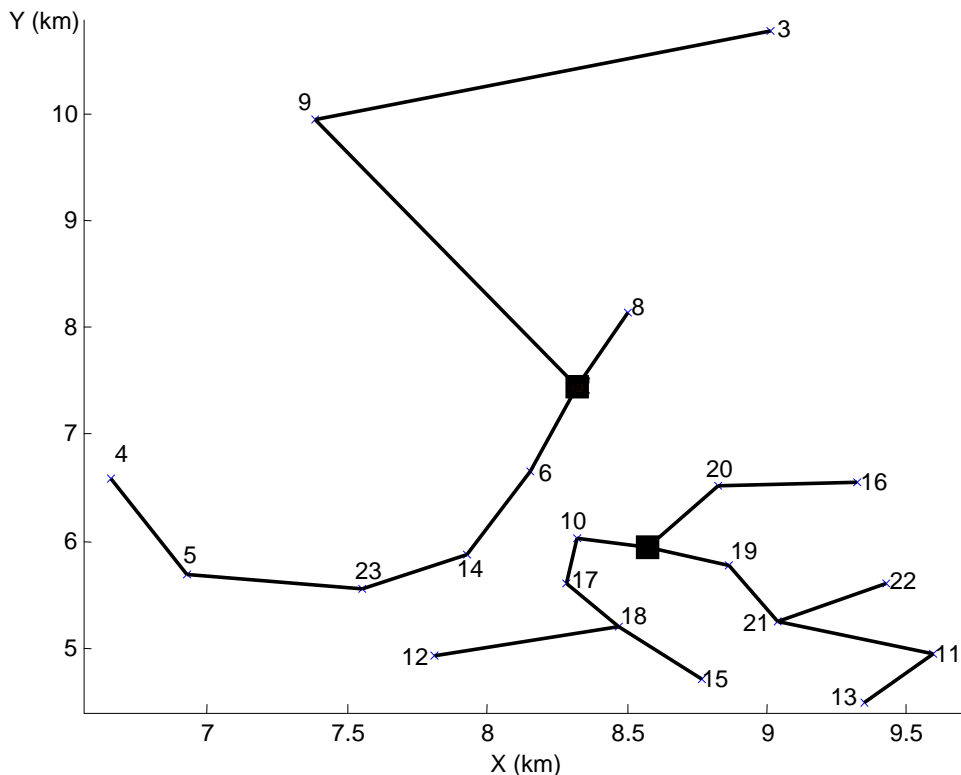


Figura 4.11 - Topologia ótima encontrada pelo método considerando posições variáveis para as subestações (sistema 23 barras modificado).

Nesta figura algumas cargas tiveram suas posições modificadas na imagem para facilitar a visualização.

Na topologia encontrada, utilizou-se também apenas o alimentador 1/0. As subestações estão localizadas próximas às coordenadas ($x = 8,58$; $y = 5,94$) e ($x = 8,32$; $y = 7,45$). As potências produzidas pelas subestações foram de 3,4581 MW e 1,6753 Mvar e 2,8836 MW e 1,3974 Mvar, respectivamente.

Nesta simulação o número de anticorpos utilizados foi de 100, escolhido de acordo com a experiência com as simulações e o comportamento do algoritmo de acordo com o número de gerações é mostrado na Figura 4.12. Cada geração custou um tempo de processamento de aproximadamente 21 segundos. Necessitou-se um número maior de gerações pela quantidade de anticorpos escolhidos para a população e pela maior complexidade do problema.

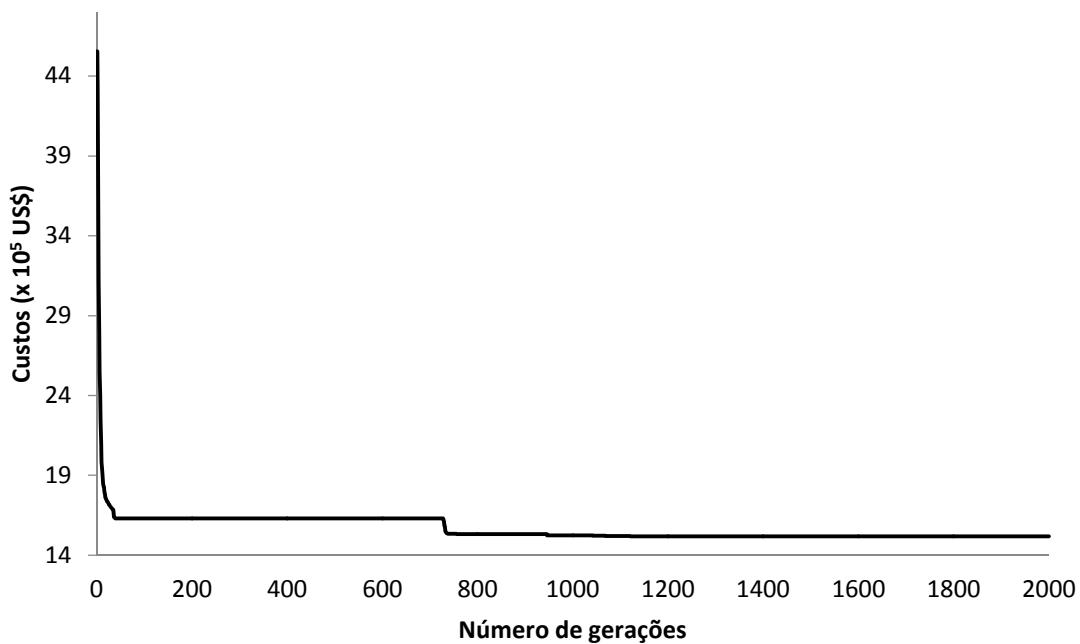


Figura 4.12 - Comportamento da solução ao longo das gerações para o sistema 23 barras com alocação de 2 subestações

4.2.5 Sistema 54 barras (RANJAN *et al.*, 2002)

O sistema 54 barras proposto em RANJAN *et al.* (2002) possui 53 barras de carga que totalizam uma demanda de 2,183 MVA. Uma subestação deve ser construída e ela deve ser capaz de suprir toda a demanda. Quatro tipos de condutores foram utilizados (*squirrel*, *weasel*, *rabbit* e *raccon*), cujos dados foram retirados de RANJAN *et al.* (2003).

RANJAN *et al.* (2002) calcularam a topologia ótima para 1, 2 ou 3 alimentadores saindo da subestação (Figuras 4.13a, 4.14a e 4.15a) e consideraram apenas a redução das perdas elétricas como objetivo do problema.

Infelizmente, a posição final da subestação e os níveis de tensão do sistema não foram informados pelos autores. Para fins de comparação e análise do método proposto, esses valores foram estimados, de modo que o tamanho total dos condutores e as perdas elétricas totais do sistema ficassem próximos aos resultados encontrados na literatura.

Os dados de condutores são apresentados na Tabela 4.10 e os dados utilizados são apresentados na da Tabela 4.11.

Tabela 4.10 - Dados dos condutores utilizados para o sistema 54 barras

#	Tipo	Capacidade máxima de corrente (A)	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Seção (mm^2)
1	Squirrel	115	1,3760	0,3896	12,90
2	Weasel	150	0,9108	0,3797	19,35
3	Rabbit	209	0,5441	0,3673	32,26
4	Raccon	270	0,3657	0,3579	48,39

Tabela 4.11 - Dados econômicos utilizados para o sistema 54 barras (RANJAN *et al.*, 2003)

Característica	Valor
Custo de perdas de energia elétrica	0,50 Rs*/kWh
Custo dos condutores	500 Rs*/ mm^2/km
Taxa de juros	10% a.a.
Horizonte de planejamento	20 anos
Fator de perdas de energia	0,20

* Rs: sigla da moeda da Índia

Devido à falta de dados em RANJAN *et al.* (2002), a comparação entre as topologias da rede obtidas foi prejudicada e foi realizada basicamente em forma visual. Na simulação também foi restringido o número de alimentadores principais em cada caso, porém a posição da subestação foi otimizada.

Para efeitos de comparação, também será apresentada, mais a frente, a solução final sem restringir o número de alimentadores principais, sempre atendendo às restrições do problema.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Resultados encontrados para o sistema 54 barras com limitação da quantidade de alimentadores principais partindo da subestação

Número de alimentadores principais	Fonte	Custos de Circuitos (Rs)	Custos de perdas (Rs)	Custo total (Rs)	Tensão Mínima (pu)
1	RANJAN <i>et al.</i> (2002)	1.803.870,53	1.084.718,93	2.888.589,47	0,8711 (barra 33)
	Método proposto (SIA)	1.027.201,76	985.766,54	2.012.968,30	0,8703 (barra 33)
2	RANJAN <i>et al.</i> (2002)	879.484,00	480.366,25	1.359.850,25	0,9458 (barra 33)
	Método proposto (SIA)	807.431,48	406.336,54	1.213.768,02	0,9507 (barra 2)
3	RANJAN <i>et al.</i> (2002)	948.594,21	431.290,58	1.379.884,79	0,9527 (barra 33)
	Método proposto (SIA)	832.380,22	388.391,56	1.220.771,78	0,9433 (barra 33)

As soluções encontradas pelo método proposto em cada um dos casos apresentam menores custos comparados aos resultados verificados da literatura. Em alguns casos, a menor tensão diminuiu ligeiramente em relação ao equivalente encontrado na literatura, ficando dentro da margem de 7% considerada nos problemas dessa dissertação apenas para os casos em que foram utilizados mais de 1 alimentador. Um aspecto interessante de se notar é a utilização dos condutores mais caros (porém com menores resistências que produzem menos perdas) próximos às subestações, onde passam grandes blocos de

energia e tendem a ser substituídos por cabos mais baratos conforme vão chegando às cargas mais afastadas, o que é uma tendência da prática.

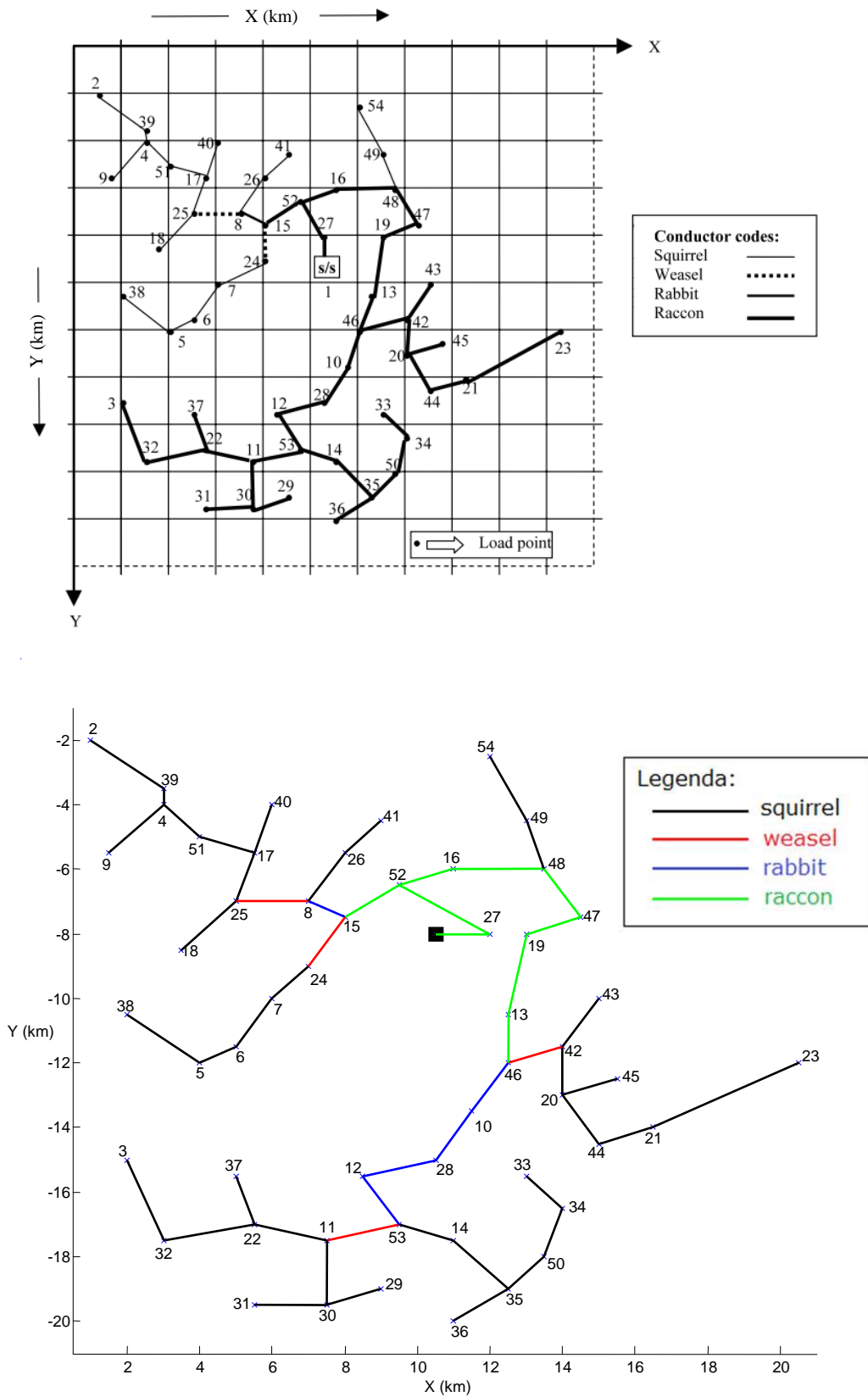


Figura 4.13 - 1 alimentador a) RANJAN et al. (2002) b) Método proposto

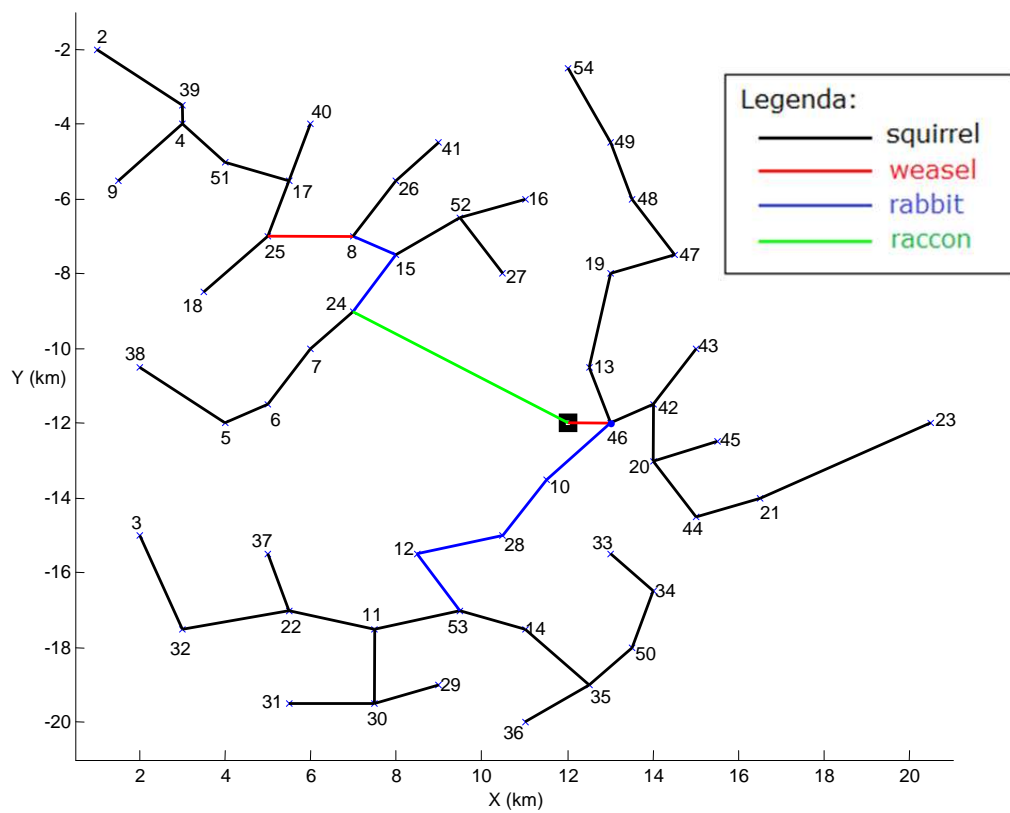
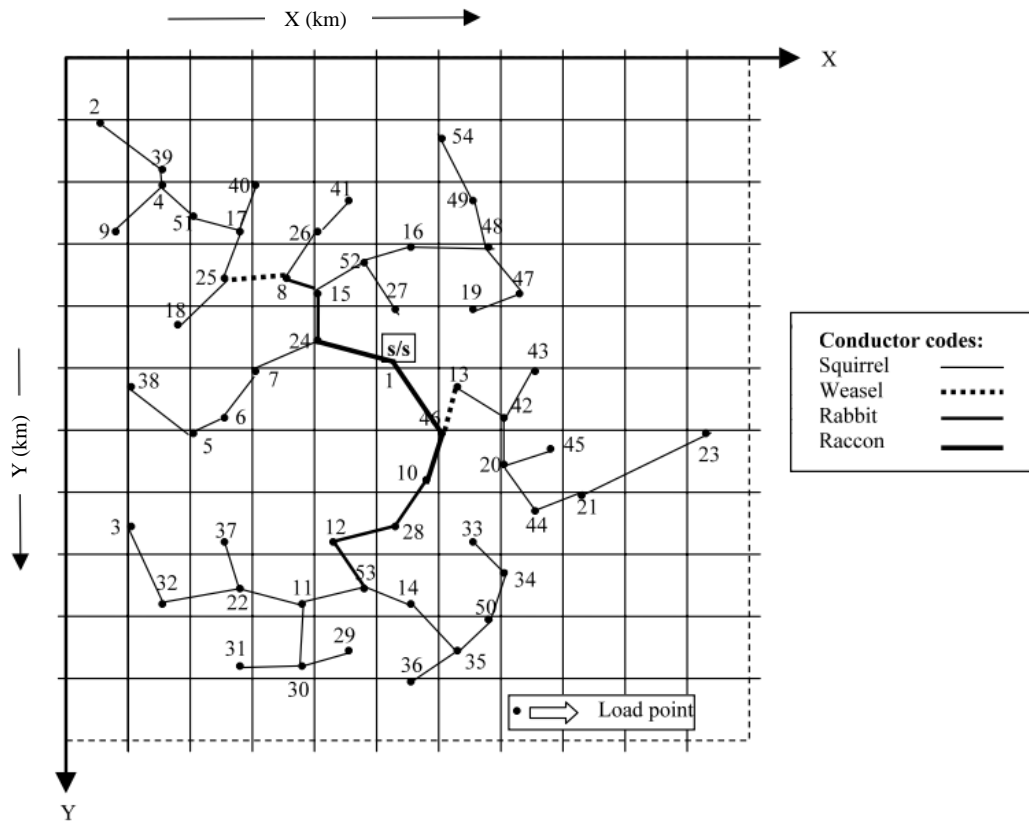


Figura 4.14 - 2 alimentadores a) RANJAN et al. (2002) b) Método proposto

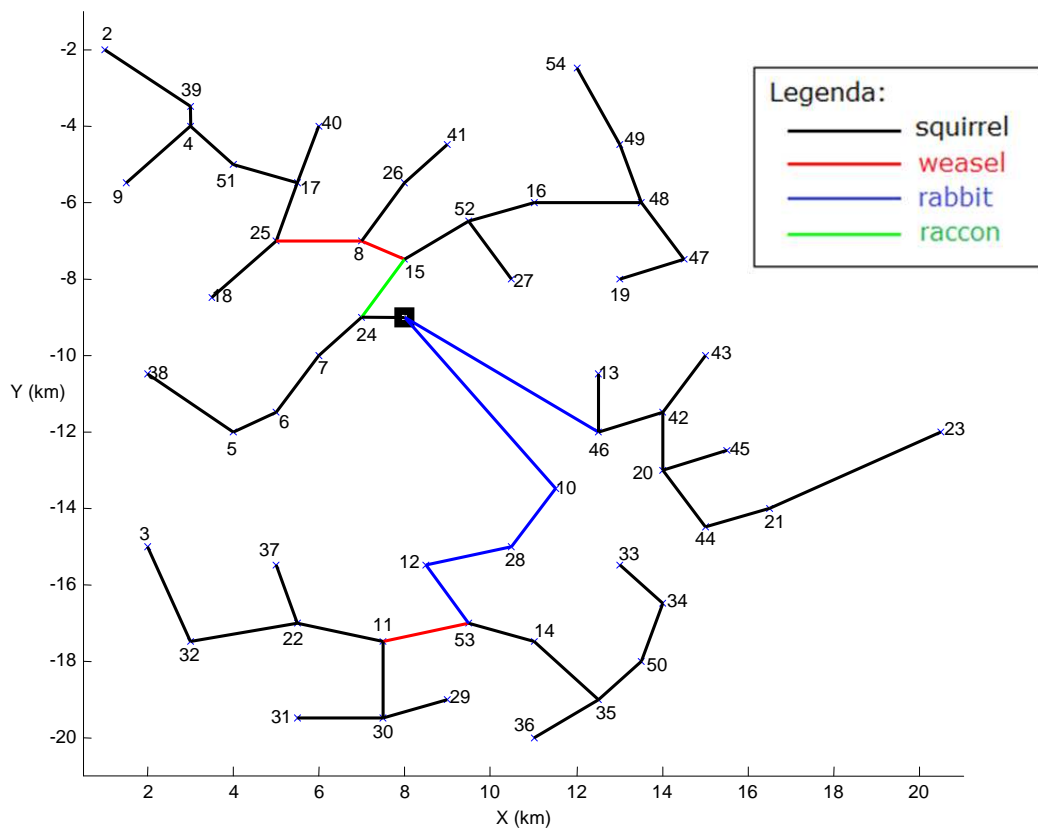
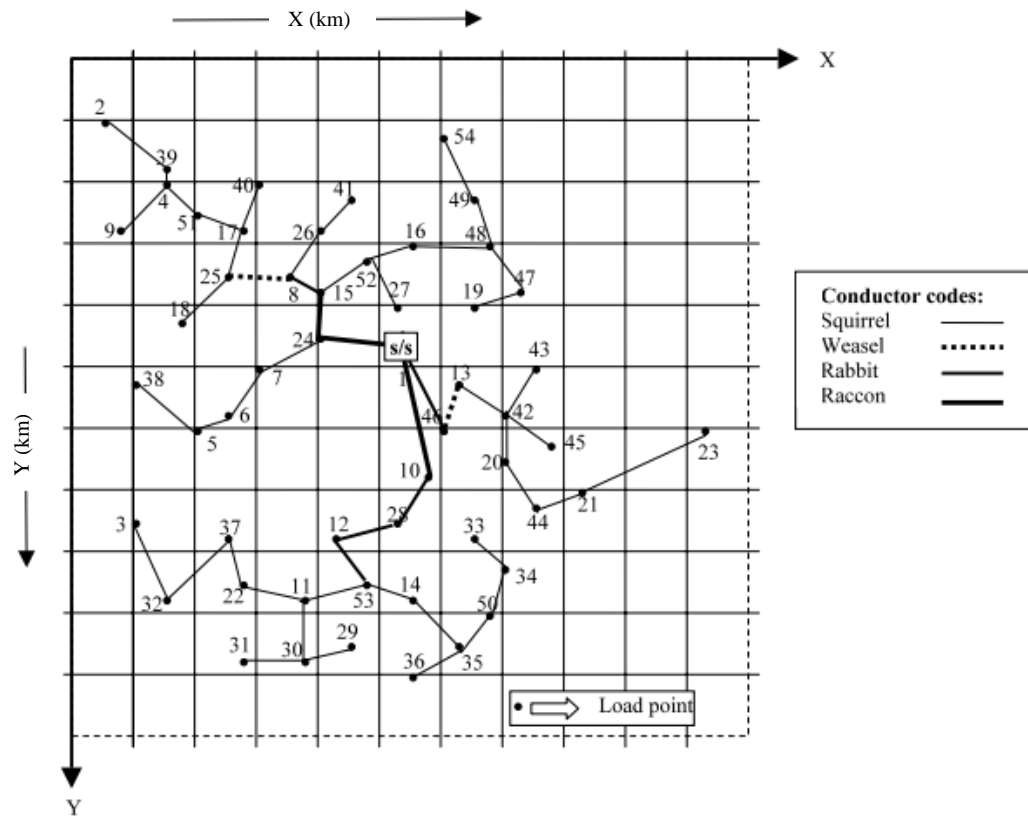


Figura 4.15 - 3 alimentadores a) RANJAN et al. (2002) b) Método proposto

Nas figuras 4.13b, 4.14b e 4.15b são apresentadas comparações entre o método proposto e aqueles obtidos em RANJAN *et al.* (2002), quando utilizando-se 1, 2 e 3 alimentadores. As figuras indicadas por ‘a’ referem-se a solução proposta por RANJAN *et al.* (2002) e as figuras indicadas por ‘b’ referem-se ao resultado do método proposto.

Algumas cargas próximas às subestações foram deslocadas nas figuras para facilitar a visualização.

Os demais resultados encontram-se na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Resultados para o sistema 54 barras encontrados pelo método

Número de alimentadores	Potência ativa SE (MW)	Potência reativa SE (Mvar)	Coordenada encontrada para a SE
1	1,7694	1,5563	(x = 8,00; y = 9,00)
2	1,6917	1,4786	(x = 12,00; y = 12,00)
3	1,6893	1,4725	(x = 8,00; y = 9,00)

Os resultados encontrados mostram que nas três análises a maioria dos cabos utilizados foi do tipo *squirrel* (cor preta) e poucos foram dos outros tipos (demais cores). Isso ocorre porque os cabos *squirrel* são mais baratos e tendem a baratear o custo total de circuitos. Os demais cabos apesar de serem mais caros, apresentam menores valores de resistência e reatância, e com isso menores perdas. E a escolha desses em detrimento dos mais baratos nessas poucas situações se mostrou mais favorável economicamente se utilizados em alguns trechos.

Outra análise que pode ser feita é que a utilização dos cabos mais caros (vermelho, azul e verde) ocorre em trechos mais curtos, ou seja, com pequenas distâncias, para não encarecer tanto no que diz respeito ao custo total do cabo. Além disso, eles tendem a aparecer próximos às subestações, por onde passam grandes blocos de potência, assim, a redução de perdas se torna mais vantajosa na análise global do custo. Na prática, as companhias muitas vezes padronizam os cabos a serem utilizados, porém neste trabalho isso não é considerado e a busca é pelo caso ótimo, mostrando que a escolha correta dos cabos impacta nos resultados.

Para ilustrar o que foi dito, analisa-se a Figura 4.13b, onde o único alimentador que sai da subestação foi escolhido como do tipo *raccoon*, que é o mais caro dentre as opções, porém com maior ampacidade e menores R e X. Naquela região passará todo o

bloco de energia do sistema, e a corrente que sai do alimentador é de aproximadamente 224A, logo este seria o único condutor possível mesmo para não violar essa restrição. Dessa forma, ele foi escolhido em detrimento dos demais.

A Figura 4.14b apresentou menos cabos do tipo *raccoon* do que o caso anterior, porque com 1 alimentador a mais ocorre uma melhoria na distribuição do fluxo de energia. Já na figura 4.15b pode-se destacar a melhoria na distribuição da alimentação nas cargas. Alguns cabos com menor resistência foram usados principalmente nas ramificações para grupos com maior demanda.

A topologia da solução onde não foi fixada a quantidade de alimentadores encontra-se na Figura 4.16 e o resultado final na Tabela 4.14. Ressalta-se que neste caso não foram considerados os custos do religadores/disjuntores dos alimentadores. Algumas cargas foram deslocadas na imagem para facilitar a visualização dos alimentadores.

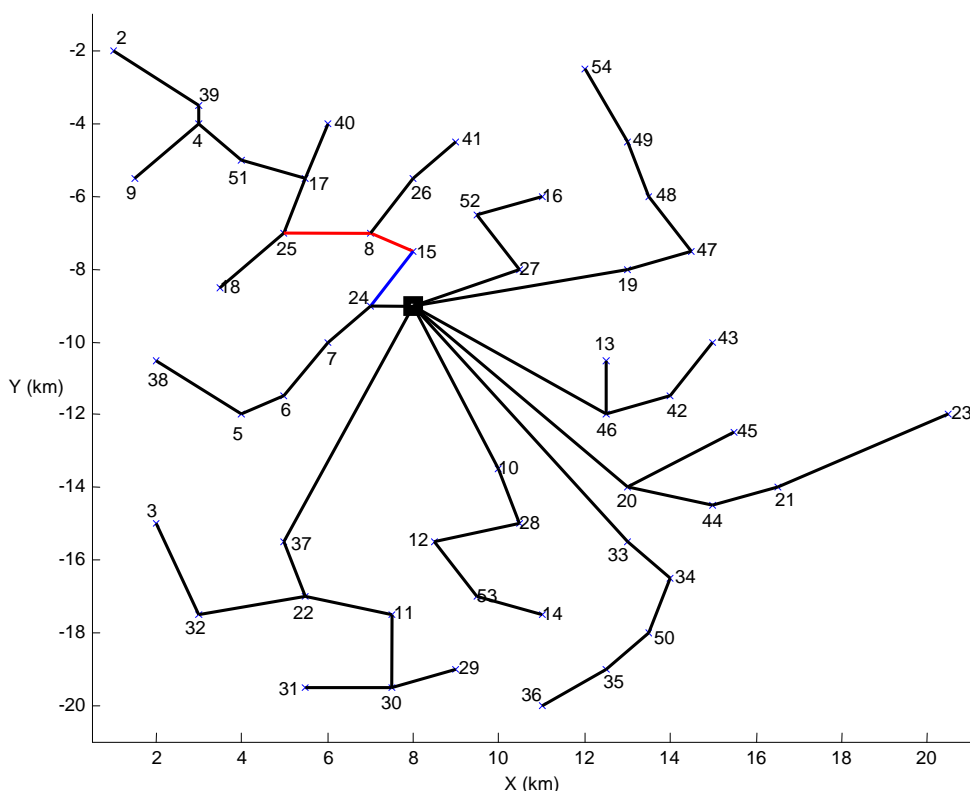


Figura 4.16 - Solução final sem restrição quanto ao número de alimentadores (sistema 54 barras)

A melhor solução encontrada necessitou de 8 alimentadores principais e a subestação foi alocada próxima à coordenada $(x = 8,00; y = 9,00)$, com potência

demandada de 1,6764 MW e 1,4565 Mvar. A tensão mínima foi de 0,9643 pu na barra 3, um valor maior do que os encontrados na Tabela 4.12. O valor atende à recomendação exigida pela ANEEL (2010), que estabelece que para níveis de 1 kV a 69 kV, uma tensão de atendimento adequada está entre 0,93 e 1,05 pu.

Tabela 4.14 – Resultados encontrados pelo método proposto para o sistema 54 barras sem limitação da quantidade de alimentadores principais partindo da subestação

Fonte	Custos de circuitos (Rs)	Custos de perdas (Rs)	Custo total (Rs)	Tensão mínima (pu)	Número de alimentadores principais
Método proposto (SIA)	776.130,02	291.891,18	1.068.021,20	0,9605 (barra 31)	8

A solução obtida anteriormente contém uma grande quantidade de alimentadores principais saindo da subestação e na prática isso é muito caro por conta do custo com disjuntores/religadores. Portanto, considerando um custo fictício extra de 800.000 Rs para cada inserção de um alimentador, as soluções encontradas para esse sistema ficariam da seguinte forma, conforme mostra a Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Comparação dos custos encontrados no método considerando também custos com disjuntores

Número de Alimentadores principais	Custo total sem disjuntores (Rs)	Custo com disjuntores/Religadores (Rs)	Novo Custo Total (Rs)
1	2.012.968,30	800.000	2.812.968,30
2	1.213.768,02	1.600.000	2.813.768,02
3	1.220.771,78	2.400.000	3.620.771,78
8	1.068.021,20	6.400.000	7.468.021,20

Analisando a tabela anterior, conclui-se que embora a solução para 1 alimentador tenha apresentado um custo maior que as soluções para 2 ou 3 alimentadores anteriormente, agora ao considerar o custo de disjuntores/religadores, ela pode ser vantajosa em relação as demais, tudo vai depender do valor do disjuntor adotado e dos limites de tensão aceitáveis para a rede (para 1 alimentador, a menor tensão ficou próxima de 0,87 pu, podendo se tornar uma solução descartável). Essa análise reforça o fato de se analisar a rede como um todo em problemas de otimização em sistemas elétricos.

4.3 Problemas de reconfiguração

4.3.1 Sistema 33 barras (BARAN e WU, 1989)

O sistema de 33 barras encontrado em BARAN e WU (1989) é um sistema de distribuição de 12,66 kV, com uma subestação, que alimenta uma região com 32 pontos de demanda. A rede é composta de 37 circuitos de conexão, conforme Figura 4.17. O sistema possui uma carga total de 3,175 MW de potência ativa e 2,300 Mvar de potência reativa.

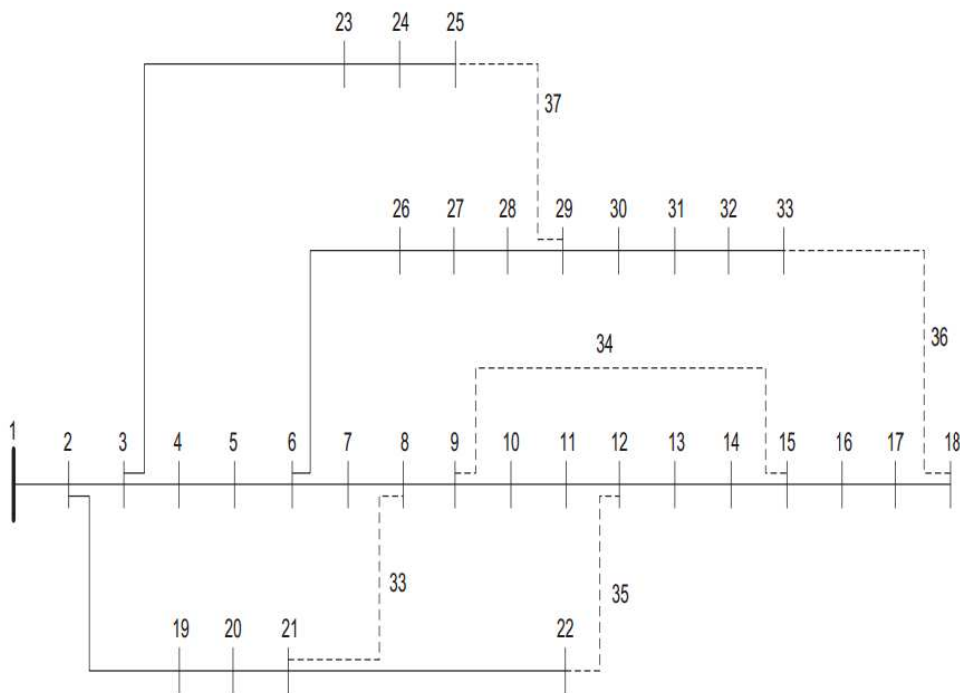


Figura 4.17 - Sistema 33 barras

Os estudos encontrados na literatura que utilizam esse sistema analisam métodos para a redução das perdas elétricas através de chaveamentos, sendo que o sistema deve ser radial. Dessa forma, a fim de se testar o algoritmo do método proposto, que também é válido para reconfiguração de redes elétricas, considerou-se apenas o custo de perdas elétricas.

A Tabela 4.16 mostra a comparação dos resultados encontrados na literatura e o resultado encontrado com o algoritmo proposto. A topologia ótima da rede, com as devidas chaves abertas é representada na Figura 4.18. A identificação das chaves está nos dados no Anexo A. Os trechos tracejados correspondem aos ramos desligados. A análise dos tipos de condutores não ocorre porque os mesmos já existem e só são fornecidas as resistências e reatâncias dos trechos.

Tabela 4.16 – Perdas encontradas para o sistema 33 barras

Fonte	Perdas (kW)	Configuração ótima
ZVIETCOVICH (2006)	139,55	Chaves abertas: 7, 9, 14, 32, 37
SOUZA (2013)	139,55	
Método proposto (SIA)	139,55	

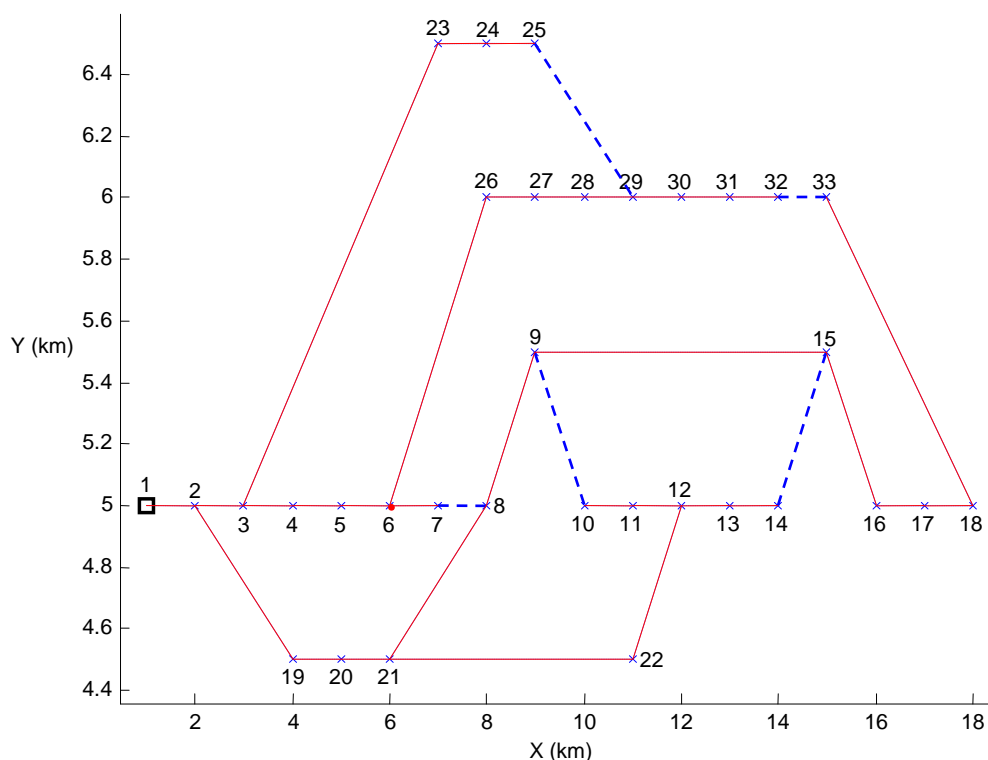


Figura 4.18 - Topologia da solução final para o sistema 33 barras retirada do MATLAB

A topologia encontrada foi a mesma daquelas encontradas na literatura, ou seja, as chaves 7 (ramo 7-8), 9 (ramo 9-10), 14 (ramo 14-15), 32 (ramo 32-33) e 37 (25-29) abertas. A subestação 1 gera 3,8546 MW e 2,4023 Mvar. A barra com menor tensão foi a barra 32 com 0,9378 pu. Não foram encontradas na literatura restrições quanto aos limites de tensão das barras para este sistema, porém a solução alcançada atende à recomendação da ANEEL (2010). As pequenas diferenças nas casas decimais entre os valores foram decorrentes de aproximações dos métodos, modelos utilizados e variáveis de convergência.

Na simulação o número de anticorpos utilizados para esse problema foi de 200, escolhido de acordo com a experiência com as simulações e o comportamento do algoritmo de acordo com o número de gerações é mostrado na Figura 4.19. Cada geração custou um tempo de processamento de aproximadamente 20 segundos.

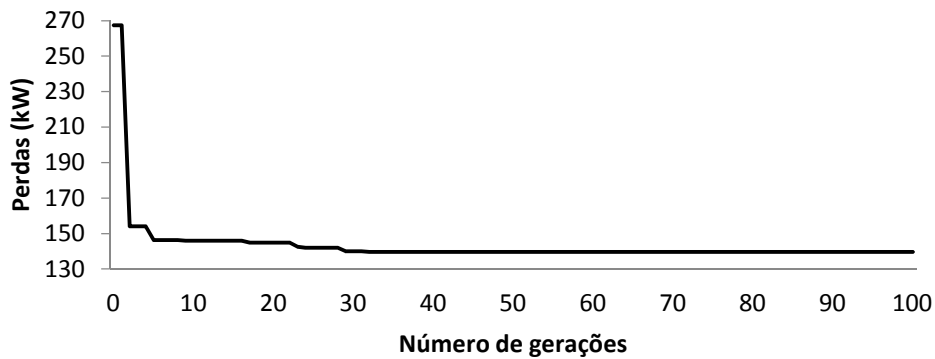


Figura 4.19 - Comportamento da solução do sistema 33 barras ao longo das gerações

4.3.2 Sistema 84 barras (SU e LEE, 2003)

O sistema de 84 barras, encontrado em SU e LEE (2008), é um sistema de distribuição de Taiwan, com nível de tensão de 11,4 kV. Os condutores utilizados são do tipo ACSR 477 KCM e 500 KCM, porém neste sistema os trechos do circuito só são mostrados em função da sua resistência e reatância conforme dados no Anexo A. Dessa forma, a características dos cabos está embutida nos dados e não foi possível fazer uma análise detalhada da escolha do tipo dos alimentadores. O sistema é composto por 11 alimentadores, 83 chaves normalmente fechadas e 13 chaves normalmente abertas. A carga total é de 28,35 MW de potência ativa e de 20,70 Mvar de potência reativa.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.17. A configuração inicial foi retirada de SU e LEE (2003). A tensão mínima para a configuração inicial é de 0,928519 pu, na barra 9, tendo a subestação 84 uma potência demandada de 16,7444 MW e 12,8779 Mvar, enquanto a subestação 85 demanda 12,1376 MW e 9,1964 Mvar.

A topologia ótima encontrada é mostrada na Figura 4.21 e é a mesma encontrada na literatura. As ligações pontilhadas em azul representam os ramos desligados (chaves abertas). A numeração dos ramos e sua localização estão representadas no Anexo A.

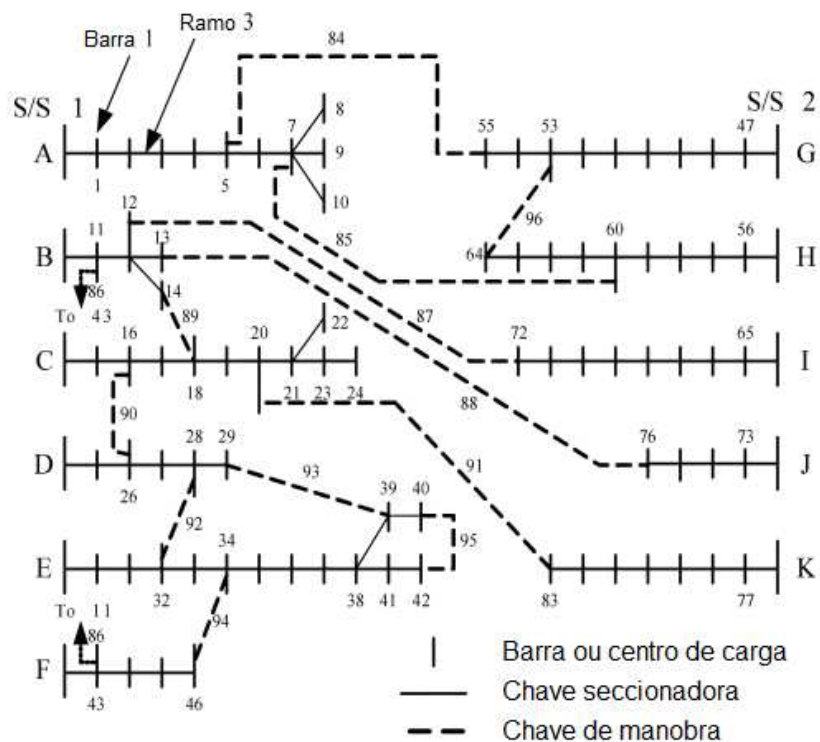


Figura 4.20 - Topologia do sistema 84 barras (Fonte: Adaptado de SU e LEE, 2003)

Tabela 4.17 – Perdas encontradas para o sistema 84 barras

Fonte	Perdas (kW)	Configuração ótima (ramos desligados)
Inicial (SU e LEE, 2003)	531,99	84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96
SU e LEE (2003)	469,88	7, 13, 34, 39, 41, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92
CHIOU <i>et al.</i> (2005)		
WANG e CHENG (2008)		
OLIVEIRA (2010)		
SOUZA (2013)		
Método proposto (SIA)		

A topologia final possui uma tensão mínima de 0,95318 pu na barra 71. A queda de tensão nesse caso não está ultrapassando o limite mínimo exigido pela ANEEL (2010). A subestação 84 produz 15,3425 MVA e 11,6351 Mvar. Já a subestação 85 produziu 13,4774 MW e 10,3129 Mvar.

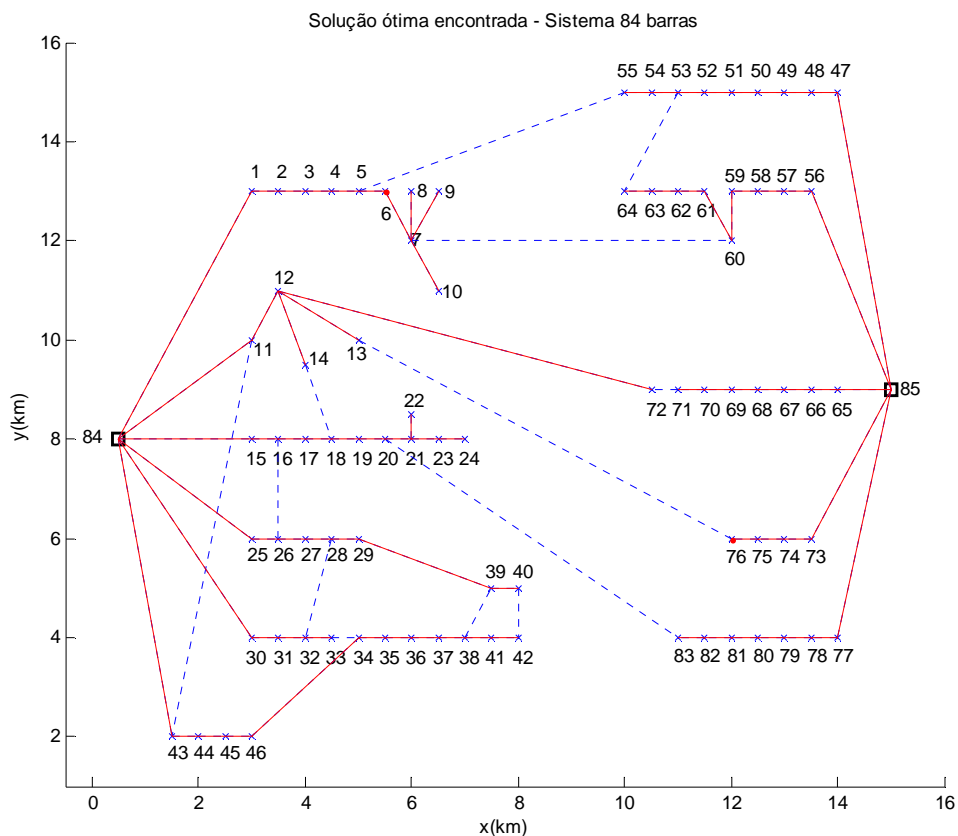


Figura 4.21 - Topologia da solução final para o sistema 84 barras retirada do MATLAB

Na simulação, o número de anticorpos utilizados para esse problema foi de 100, escolhido de acordo com a experiência com as simulações e o comportamento do algoritmo de acordo com o número de gerações é mostrado na Figura 4.22. Cada geração custou um tempo de processamento de aproximadamente 20 segundos.

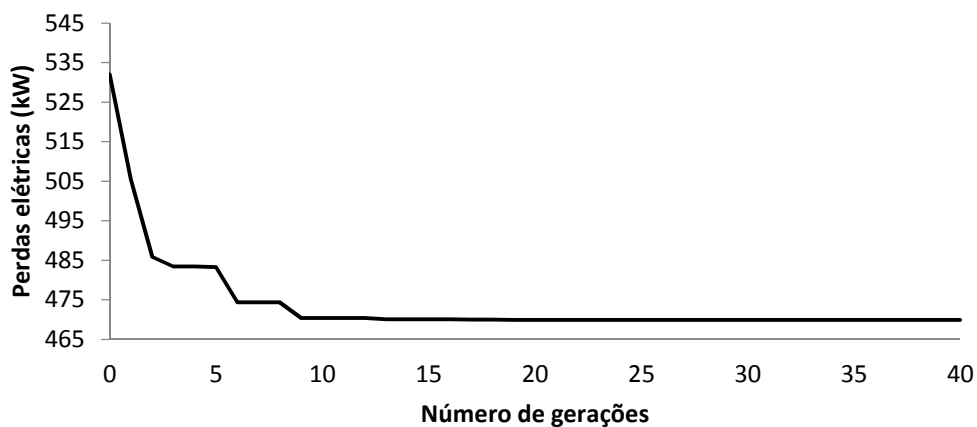


Figura 4.22 – Comportamento da solução do sistema 84 barras ao longo das gerações

4.3.3 Sistema 119 barras (ZHANG *et al.*, 2007)

O sistema de 119 barras encontrado em ZHANG *et al.* (2007) é composto por 118 barras de carga, 1 subestação e 133 ramos factíveis, tensão base de 11 kV e demanda total de 22,71 MW e 17,0404 Mvar. Os dados do sistema encontram-se no Anexo A. O sistema original é mostrado na Figura 4.23.

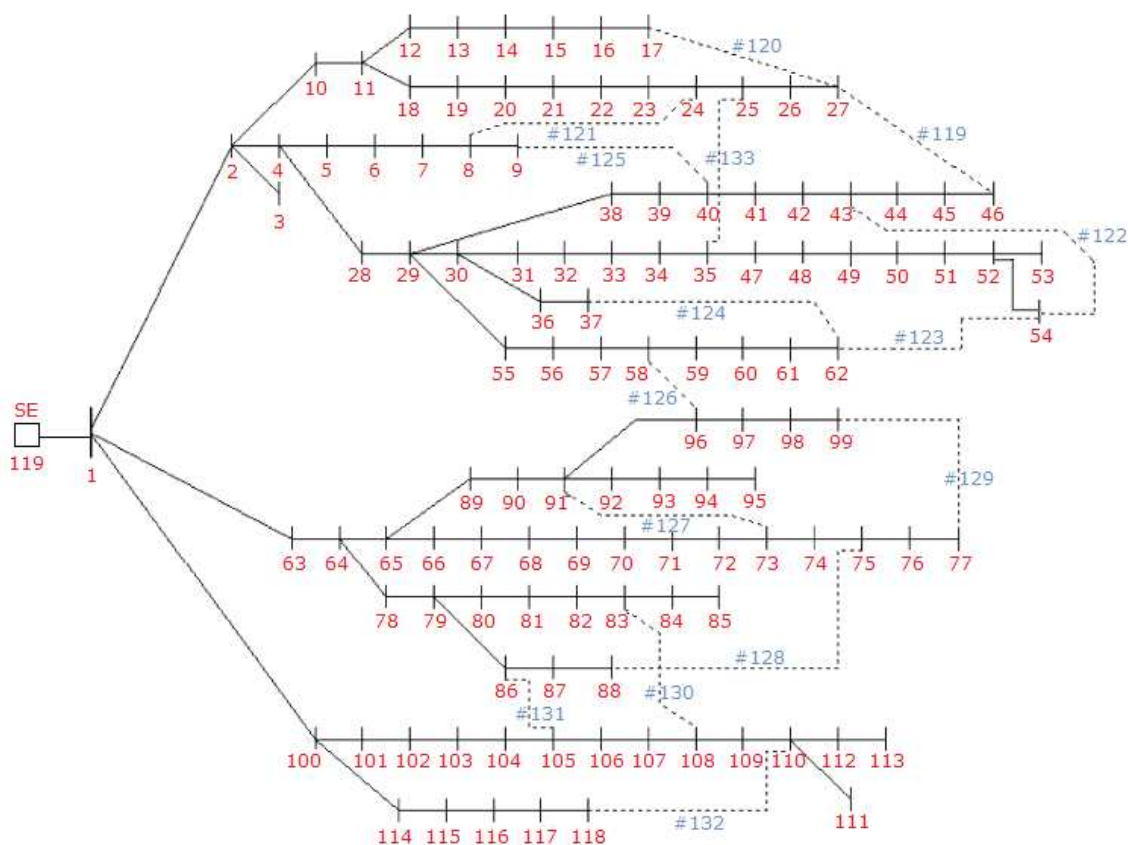


Figura 4.23 - Configuração inicial para o sistema 119 barras (Adaptado de ZHANG *et al.*, 2007)

A configuração inicial do sistema encontrada na literatura é com 15 ramos (119 a 133, representados na Figura 4.23) desligados e apresenta perdas totais de 1296,62 kW. Para esta configuração inicial, a tensão mínima encontrada foi de 0,868779 pu localizada na barra 77 e a subestação produziu 24,0063 MW e 18,0199 Mvar.

Os resultados para a solução ótima do problema de reconfiguração encontrados na literatura e com a aplicação do método proposto estão na Tabela 4.18. A topologia encontrada (Figura 4.24) foi igual a de OLIVEIRA (2010), OLIVEIRA (2011) e SOUZA (2013), apresentando perdas de 853,61 kW. A tensão mínima para a solução foi de 0,9323 pu, na barra 111, não violando o limite mínimo regulamentado pela ANEEL

(2010). Neste caso, a subestação da rede produziu 23,5633 MW de potência ativa e 17,6767 Mvar de potência reativa.

Tabela 4.18 – Perdas encontradas para o sistema 119 barras

Fonte	Perdas (kW)	Configuração ótima (circuitos desligados)
Inicial	1294,3	119-120-121-122-123-124-125-126-127-128-129-130-131-132-133
ZHANG <i>et al.</i> (2007)	865,7	24-27-35-40-43-53-59-72-75-96-98-110-123-130-131
OLIVEIRA (2010)	853,6	24-26-35-40-43-51-59-72-75-96-98-110-122-130-131
OLIVEIRA (2011)		
SOUZA (2013)		
Método proposto (SIA)		

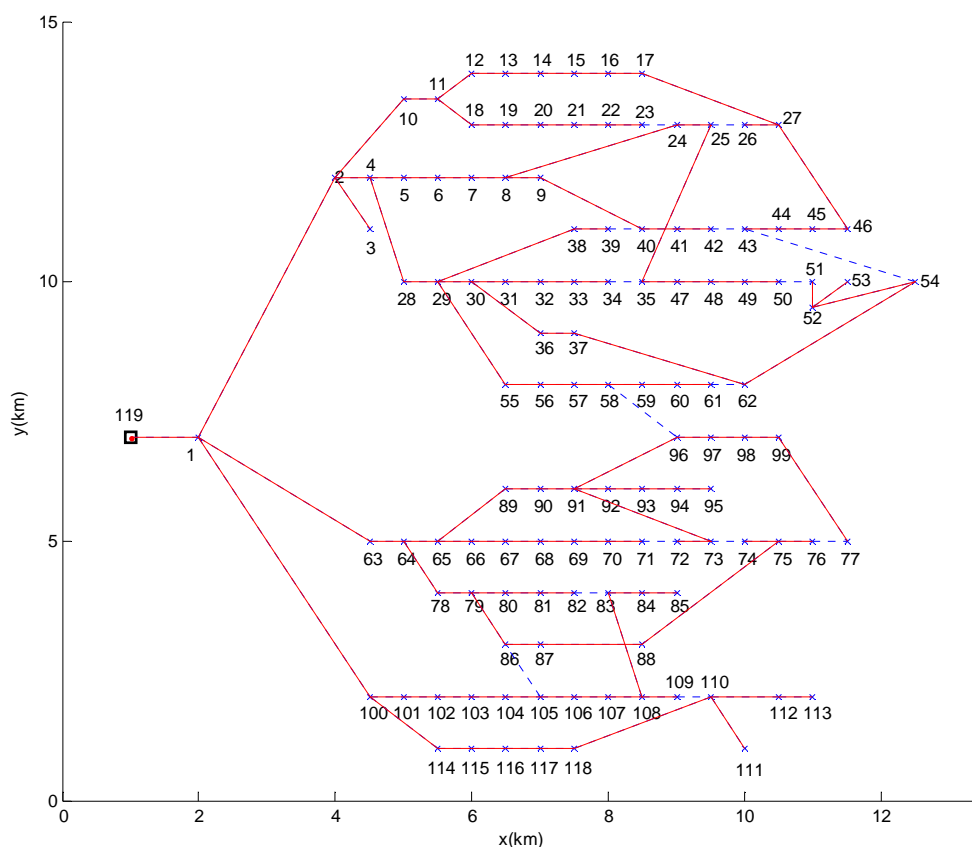


Figura 4.24 - Topologia da solução final para o sistema 119 barras retirada do MATLAB

Nesta simulação o número de anticorpos utilizados para esse problema foi de 700, escolhido de acordo com a experiência com as simulações e o comportamento do algoritmo de acordo com o número de gerações é mostrado na Figura 4.22. Cada geração custou um tempo de processamento de aproximadamente 65 segundos.

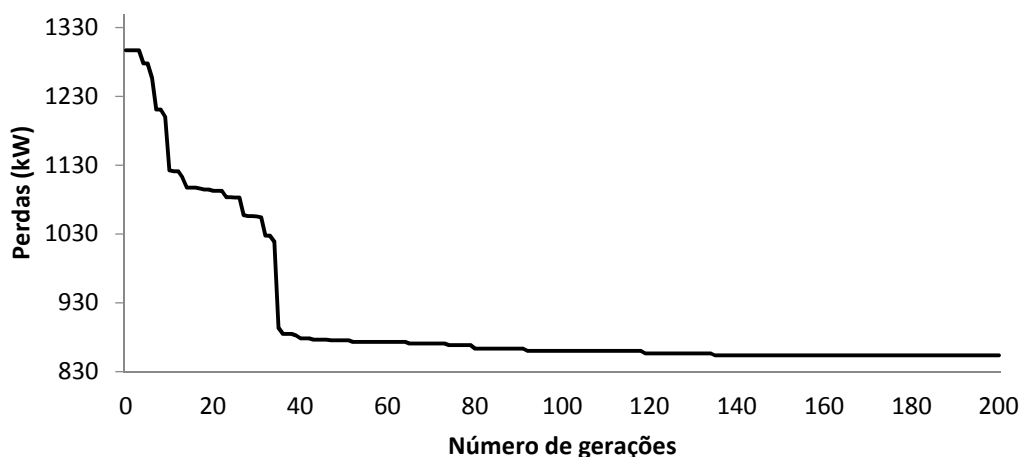


Figura 4.25 - Comportamento da solução ao longo das gerações para o sistema 119 barras

4.4 Problemas de expansão com reconfiguração

O método apresentado, embora tenha sido testado até aqui em casos de expansão e reconfiguração separadamente, funciona para casos em que se devem considerar os dois processos, como por exemplo, quando se tem uma rede inicial e se deseja fazer o planejamento da expansão prevendo-se novas demandas na região, sendo possível a utilização de estratégias de reconfiguração dos circuitos já existentes através de abertura e fechamentos de chaves em conjunto com a construção de novos circuitos.

Para que o método possa ser aplicado para essa situação, é necessário definir previamente as condições do sistema e interpretar os resultados da forma conveniente. Para um caso de expansão já trabalhado nas seções anteriores, bastaria considerar algumas das cargas já existentes como novas ou vice-versa. Dessa forma, as ligações sugeridas poderiam representar uma nova ligação (expansão da rede) ou, por exemplo, o fechamento de uma chave de um circuito já existente, assim como a ausência de uma ligação poderia ser interpretada como a abertura de uma chave de um circuito existente (reconfiguração). Para isso, as restrições características devem ser inseridas no problema, como a não alteração do tipo de cabo em circuitos já existentes, dentre outras.

Para ilustrar a análise anterior, considere o sistema 23 barras (NAHMAN e PERIC, 2008) representado à esquerda da Figura 4.26 e o mesmo sistema visto de outra forma, considerando a existência de uma rede inicial e uma nova demanda representada por cargas novas em azul (à direita da Figura 4.26).

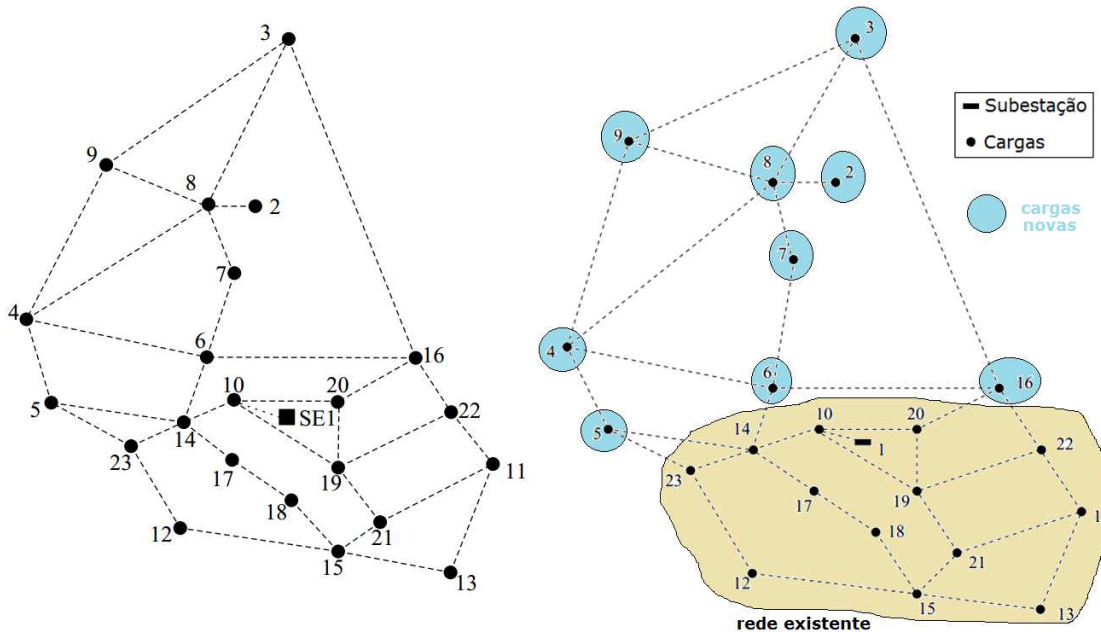


Figura 4.26 - Sistema 23 barras (esquerda) e o novo sistema considerando uma rede já existente e cargas novas (direita)

Uma topologia ótima fictícia para esse sistema encontra-se à esquerda da Figura 4.27, e contém duas modificações em relação à solução original: a nova ligação entre as cargas 13 e 15 (linha vermelha) e a retirada da ligação 11 e 13 (linha preta pontilhada), sendo essas modificações apenas ilustrativas. Analisando o caso como foi feito nas seções anteriores, ou seja, considerando o caso como de expansão, essas modificações significariam a construção ou não dos circuitos mencionados.

A interpretação deste resultado numa análise que envolve reconfiguração e expansão simultaneamente é mostrada no lado direito da Figura 4.27. As ligações contínuas em preto dentro da rede representam os circuitos que não tiveram suas chaves alteradas. A ligação pontilhada entre as cargas 11 e 13 que antes significava a não construção do circuito, representa agora sua retirada da rede através da abertura de uma chave (reconfiguração). Já a ligação em vermelho entre as cargas 13 e 15, representa a inserção da ligação no circuito através do fechamento da chave. Para finalizar, as

ligações que englobam cargas que estão fora da rede já existente, são mostradas em verde e representam circuitos que serão construídos (expansão).

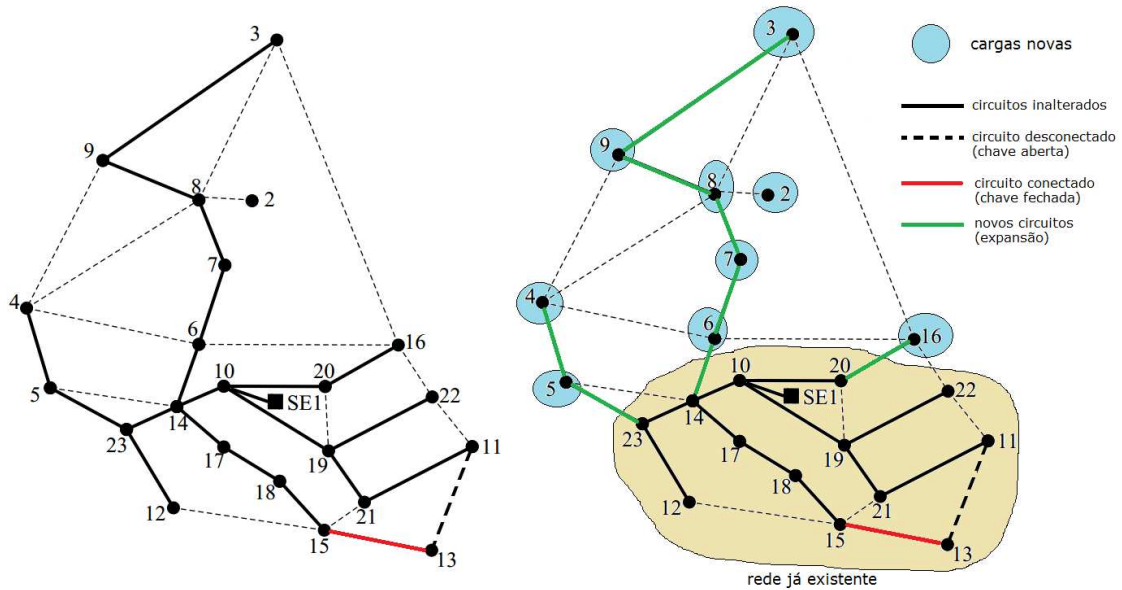


Figura 4.27 - Comparação da topologia ótima sugerida no sistema original (esquerda) e sua interpretação na nova análise (direita)

4.5 Conclusão do capítulo

A análise dos resultados encontrados para os sistemas mostra que o planejamento da expansão e reconfiguração de sistemas de distribuição deve abranger o maior número de características da rede possíveis para tornar o resultado mais próximo da realidade e os benefícios para a rede serem maximizados.

A definição do número de alimentadores que saem das subestações é importante no processo de expansão da rede de distribuição uma vez que custos com equipamentos de proteção/manobra estão associados a ele. Dessa forma, é preciso fazer uma análise técnico-econômica que avalie esses custos e os benefícios técnicos que esse aumento de alimentadores traz como diminuição da queda de tensão da rede.

O balanço entre custo de perdas e custo de circuitos deve ser feito de forma cautelosa, atendendo sempre aos requisitos técnicos do problema, de modo a não interferir no funcionamento adequado da rede.

Capítulo 5 Conclusões

5.1 Conclusões gerais

Neste trabalho foi desenvolvido e implementado um método para solução e análise de problemas de expansão de sistemas elétricos de distribuição baseado no algoritmo de seleção clonal da metaheurística Sistema Imunológico Artificial.

O método proposto permite minimizar várias parcelas dos custos globais envolvidos no planejamento, em um determinado horizonte, como custos de perdas elétricas, custo de instalação subestações e alimentadores, além de tratar restrições físicas (como impossibilidade da construção de subestações em determinadas áreas), técnicas (análise do fluxo de potência nos alimentadores e a capacidade dos alimentadores e subestações, tensão nas cargas, radialidade e conectividade da rede elétrica) e operacionais (disponibilidade de equipamentos).

A análise do comportamento da solução dos sistemas conforme o número de gerações mostra que quanto maior o número de anticorpos escolhidos para a população, um menor número de gerações é necessário para encontrar a solução ótima. Além disso, o uso da rotina computacional de criação da população inicial foi essencial para que o resultado fosse encontrado. Caso ela não existisse e os anticorpos iniciais fossem gerados aleatoriamente, as chances de se chegar a uma solução viável se tornariam mínimas. Outra forma de acelerar o processo é introduzir topologias já conhecidas da literatura na população inicial, facilitando a obtenção de uma solução de boa qualidade.

O método desenvolvido permite realizar a reconfiguração e expansão do sistema, alocação de subestações ou todas as características simultaneamente. A ferramenta indica a melhor topologia encontrada, bem como a localização de subestações e os tipos de cabos.

O método proposto foi testados nos sistema de 23, 23 barras modificado, 33, 54, 84 e 119 barras e comparou-se as soluções encontradas com os resultados da literatura. Em quase todos os sistemas, os resultados foram iguais, exceto para o sistema 23 barras modificado em que foi encontrada uma solução com menor custo global.

Nos testes de validação da ferramenta desenvolvida, as pequenas variações encontradas entre valores obtidos pelo método proposto e aqueles apresentados na literatura ocorrem em razão de algumas diferenças nos algoritmos e cálculos, como por

exemplo, do método utilizado para o cálculo do fluxo de potência, dos parâmetros de convergência adotados, diferenças na modelagem dos equipamentos, dentre outros. No entanto, observa-se que os resultados encontrados pelo método proposto são satisfatórios em relação aos obtidos na literatura, validando a ferramenta desenvolvida.

5.2 Trabalhos futuros

O método proposto pode ser melhorado e incrementado com mais decisões do planejamento e mais restrições de acordo com a particularidade de cada sistema. Algumas sugestões para trabalhos futuros ligados ao tema são listadas a seguir:

- Modelar a rede com mais equipamentos tornando o sistema cada vez mais próximo da realidade;
- Acrescentar como variáveis de decisão a inserção de banco de capacitores nas barras, reguladores de tensão e outros equipamentos, no intuito de diminuir as perdas elétricas e os custos;
- Considerar planejamentos dinâmicos e multi-estágios, aprimorando as variáveis econômicas envolvidas de acordo com o mercado;
- Considerar outros custos como manobras de chaves seccionadoras, custo com conexões de alimentadores, custo do terreno onde será construída a subestação, custo de operação e manutenção dos equipamentos, entre outros.
- Analisar a possibilidade da inserção de geração distribuída no planejamento do sistema de distribuição como é feito em vários trabalhos na literatura;
- Análise de confiabilidade de rede elétrica de acordo com as mudanças realizadas no sistema e o papel que ela desempenha;
- Utilizar modelos mais completos de cálculo de fluxo de potência, com mais informações da rede;

Bibliografia

- AGARWAL, R., TIWARI, M. K., MUKHERJEE, S. K., 2007, “Artificial immune system based approach for solving resource constraint project scheduling problem”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 34, n. 5-6, pp. 584-593. September.
- AICKELIN, U., DASGUPTA, D., GU, F., 2014, “Artificial immune systems”, *Search Methodologies*, pp. 187-211, Springer US.
- ALLAN, R. N., SILVA, M. G., 1995, “Evaluation of Reliability Indices and Outage costs in distribution system”, *IEEE Transactions Power Systems*, v. 10, n. 1, pp. 413-419, February.
- AMOIRALIS, E. I., GEORGILAKIS, P. S., TSILI, M. A., KLADAS, A. G., 2010, “Ant colony optimization solution to distribution transformer planning problem”, *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*, v. 2, n. 4, pp. 316-335.
- ANEEL, 2010, *Módulo 8 – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)*, ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.
- AOKI, K., NARA, K., SATOH, T., KITAGAWA, M., YAMANAKA, K., 1990, “New approximate optimization method for distribution system planning”, *IEEE Transactions Power Systems*, v. 5, n. 1, pp. 126-132. February.
- ASAKURA, T., FUKUYAMA, Y., GENJI, T., YURA, T., HAYASHI, N., 2003, “Long-term Distribution Network Expansion Planning by Network Reconfiguration and Generation of Construction Plans”, *IEEE Conference Power Engineering Society General Meeting*, v. 1. August.
- ASSIS, L. S., 2014, “Otimização de alocação de chaves em redes de distribuição de energia elétrica”, Tese de D.Sc., Universidade Estadual de Campinas, SP,

Brasil.

ASTIAZARA, M. V., 2012, “Sistema imunológico artificial para predição de fraudes e furtos de energia elétrica”, Dissertação de M. Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

ATTIYA, G., HAMAM, Y., 2006, “Task allocation for maximizing reliability of distributed systems: A simulated annealing approach”, *Journal of parallel and distribute computing*, v. 66, n. 10, pp. 1259-1266. October.

ATWA, Y. M., EL-SAADANY, E. F., SALAMA, M. M. A., SEETHAPATHY, R., 2010, “Optimal renewable resource mix for distribution system energy loss minimization”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 25, n. 1, pp. 360-370. February.

AYDIN, I., MEHMET, K., AKIN, E., 2011, “A multi-objective artificial immune algorithm for parameter optimization in support vector machine”. *Applied Soft Computing*, v. 11, n. 1, pp. 120-129. January.

BARAN, M. E., WU, F. F., 1989, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 2, pp. 1401-1407. April.

BASU, M., 2011, “Artificial immune system for dynamic economic dispatch”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 33, n. 1, pp. 131-136.

BERBERT, P. C., 2008, “Sistema imunológico artificial para otimização multi-objetivo”, Dissertação de M. Sc., Universidade Estadual de Campinas, SP. Brasil. Março.

BILLINTON, R., ALLAN, R. N., 1996, “Reliability Evaluation of Power Systems”, *2nd Plenum Press*, New York, NY.

BOULAXIS, N. G., PAPADOPOULOS, M. P., 2002, “Optimal feeder routing in

- distribution system planning using dynamic programming technique and GIS facilities”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 1, pp. 242-247.
- BURKE, E. K., KENDALL, G., 2014, “Search methodologies: Introductory tutorials in optimization and decision support techniques”, ed. 2, Springer US.
- BURNET, F. M., 1957, “A modification of Jerne’s theory of antibody production using the concept of clonal selection”. *Australian Journal of Science*, v. 20, 86P. 67-69.
- CAMARGO, V. L. V., 2014, “Algoritmo genético especializado aplicado ao planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica”, Tese de D.Sc., Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, Brasil.
- CARRANO, E. G., TAKAHASHI, F. G., NETO, R. H., 2007, “Electric distribution network expansion under load-evolution uncertainty using an immune system inspired algorithm”, *IEEE Transactions Power Systems*, v. 22, n. 2, pp. 851-861. May.
- CHARIKAR, M., GUHA, S., 1999, “Improved combinatorial algorithms for the facility location and k-median problems”, *40th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 378-388.
- CHELOUAH, R., SIARRY, P., 2000, “Tabu Search applied to global optimization”, *European Journal of Operational Research*, v. 123, p. 256-270.
- CHIOU, J. P., CHANG, C. F., SU, C. T., 2005, “Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 2, pp. 668-674.
- CHU, P., BEASLEY, J. E., 1997, “A genetic algorithm for the generalized assignment problem”, *Computers and Operations Research*, v. 20, n. 1, pp. 17–23, Kidlington, Oxfordshire, UK. January.

- CIVANLAR, S., GRAINGER, H. Y., LEE, S., “Distribution feeder reconfiguration for loss reduction”, 1988, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, pp. 1217-1223, July.
- COSSI, A. M., 2008, “Planejamento de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão”, Tese de D.Sc., Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, Brasil.
- DASGUPTA, D., TIMMIS, J., CLARK, E., HONE, A., 2006, “Theoretical advances in artificial immune systems”, *IEEE Computational Intelligence Magazine*. November.
- DASKIN, M. S., 2011, “Network and discrete location: models, algorithms, and applications”, *Journal of the Operational Research Society*, v. 48, n. 7, pp. 763-763.
- DE CASTRO, L. N., VON ZUBEN, F. J., 2000, “The Clonal Selection Algorithm with engineering applications”, *Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference (CECCO), Workshop on Artificial Immune Systems and their applications*, pp. 36-37, Las Vegas, USA. July.
- DE CASTRO, L. N., VON ZUBEN, F. J., 2002, “Learning and optimization using the clonal selection principle”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 6, n. 3, pp. 239-251. June.
- DUAN, G., YU, Y., 2003, “Power distribution system optimization by an algorithm for capacitated Steiner tree problems with complex-flows and arbitrary cost functions”, *International journal of electrical power & energy systems*, v. 25, n. 7, pp. 515-523.
- DUMBRAVA, V., LAZAROIU, C., ROSCIA, C., ZANINELLI, D., 2011, “Expansion planning and reliability evaluation of distribution networks by heuristic algorithms”, *10th International Conference on Environment and Electrical*

Engineering (EEEIC). Rome, Italy. May.

FALAGHI, H., HAGHIFAM, M. R., SINGH, C., 2009, “Ant colony optimization-based method for placement of sectionalizing switches in distribution networks using a fuzzy multiobjective approach”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 1, pp. 268-276. January.

FAWZI, T. H., ALI, K. F., EL-SOBKI, S. M., 1983, “A new planning model for distribution systems”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 102, n. 9, pp. 3010-3017. September.

FERREIRA, E. L., OLIVEIRA, L. W., OLIVEIRA, E. J., 2015, *XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Porto de Galinhas, PE. Brasil.

FORTES, M. Z., JUNIOR, H. P. A., MACHADO, T. G., 2006, “Alocação ótima de capacitores para redução de perdas em sistemas de distribuição usando algoritmos genéticos”, *XXVII Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades Industriais*. Porto Alegre, RS. Agosto.

FRANÇA, F. O., 2005, “Algoritmos bio-inspirados aplicados na otimização dinâmica”, Tese de M. Sc., Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil.

GANDOMI, A. H., ALAVI, A. H., 2012, “Krill herd: a new bio-inspired optimization algorithm”, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, v. 17, n. 12, pp. 4831-4845. December.

GLOVER, F., LAGUNA, M., 2000, “Fundamentals of scatter search and path relinking”, *Control and Cybernetics*, v. 29, n. 3, pp. 653–684, June.

GOMES, F. V., 2005, “Reconfiguração de sistemas de distribuição utilizando técnicas de otimização contínua e heurística para minimização de custos”, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GOMÉZ, J. F., KHOR, H. M., OLIVEIRA, P. M., OCQUE, L., YUSTA, J. M.,

- VILLASANA, R., URDANETA, J., 2004, "Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits", *IEEE Transactions Power Systems*, v. 19, n. 2, pp. 996-1004. May.
- GÖNEN, T., FOOTE, B. L., 1981, "Distribution system planning using mixed-integer programming", *IEEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, v. 128, n. 2, pp. 70-79. March.
- GOSWAMI, S. K., "Distribution system planning using branch Exchange technique", 1997, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 12, n. 2. May.
- HAFFNER, S., PEREIRA, L. A., PEREIRA, L. F. A., LEMOS, F. A. B., 2004, "Optimization model for expansion planning of distributed systems", *Transmission and Distributed Conference and Exposition: Latin America IEEE/PES*, pp. 457-463, November.
- HALE, T. S., MOBERG, C. R., 2003, "Location science research: a review", *Annals of Operations Research*, v. 123, n. 1-4, pp. 21-35. Netherlands.
- HASAN, I. J., GAN, C. K., SHAMSHIRI, M., Ab GHANI, M. R., Omar, R. B., 2014, "Optimum Feeder Routing and Distribution Substation Placement and Sizing Using PSO and MST", *Indian Journal of Science and Technology*, v. 7, n. 10, pp. 1682-1689.
- HASHEMI-DEZAKI, H., ASKARIAN-ABYANEH, H., HAERI-KHIAVI, H., 2015, "Reliability optimization of electrical distribution systems using internal loops to minimize energy not-supplied (ENS)". *Journal of applied research and technology*, v. 13, n. 3, pp. 416-424.
- HASSELFIELD, C. W., WILSON, P., PENNER, L., LAU, M., GOLE, A. M., 1991, "An automated method for least cost distribution planning", *IEEE Western Canada Conference on Computer, Power and Communications Systems in a Rural Environment*, pp. 179-185. May.

- HOFFMAN, K. L., RALPHS, T. K., 2013, “Integer and combinatorial optimization”, *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, pp. 771-783.
- HOFMEYR, S. A., 2000, “An interpretative introduction to the immune system”, *Oxford University Press*. April.
- HOFMEYR, S. A., FORREST, S., 1999, “Immunity by design: an artificial immune system”, *Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference*, v. 2, pp. 1289-1296, Orlando, Florida, USA.
- HOLANDA, L., RABELO, R., LEMOS, M., BARBOSA, D., 2013, “Power system harmonics estimation using Clonal Selection Algorithm”, *IEEE Latin America Transactions*, v. 11, n. 1, pp. 525-530.
- HSU, Y. Y., CHEN, J. L., 1990, “Distribution planning using a knowledge-based expert system”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 3, pp. 1514-1519. July.
- JANEWAY, C. A., TRAVERS, P., WALPORT, M., 1999, *Immunobiology: the immune system in health and disease – Current Biology Publications.*, v. 157, pp. 174-176. New York, NY.
- JUNIOR, B. R. P., COSSI, A. M., MONTOVANI, J. R. S., 2011, “Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica através de um modelo de programação não linear inteiro misto e busca tabu”, *XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Ubatuba, SP, Brasil. Agosto.
- KATHOR, S. K., LEUNG, L. C., 1997, “Power distribution planning: a review of models and issues”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 12, n. 3, pp. 1151-1159. August.
- KHODR, H. M., VALE, Z., RAMOS, C., FARIA P., 2009, “Optimization techniques for power distribution planning with uncertainties: A comparative study”, *IEEE Power & Energy Society General Meeting PES*. July.

- KIM, J., BENTLEY, P. J., AICKELIN, U., GREENSMITH, J., TEDESCO, G., TWYCROSS, J., 2007, "Immune system approaches to intrusion detection—a review", *Natural computing*, v. 6, n. 4, pp. 413-466.
- KLEIN, Jan., 1991, "Blood cells and their origin". *Immunology*, 2nd, Blackwell Scientific Publications, pp. 8-28. Boston, USA.
- KLIMPEL, G. R., 1996, "Immune defenses", *Medical Microbiology 4th edition*, The University of Texas Medical Branch. Galveston. USA.
- KLOSE, A., DREXL, A., 2005, "Facility location models for distribution system design", *European Journal of Operational Research*, v. 162, n. 1, pp. 4-29. April.
- LALITHA, M. P., REDDY, V. V., REDDY, N. S., REDDY, K. S., 2010, "Clonal selection algorithm for DG sources allocation for minimum loss in distribution system", *International Journal of Computer Science & Emerging Technologies*, v. 1, pp. 85-91.
- LANTHARTHONG, T., PHANTHUNA, N., "Techniques for reliability evaluation in distribution system planning", 2012, World Academy of Science, Engineering and Technology, v. 64.
- LEE, K. S., GEEM, Z. W., 2005, "A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice", *Computer methods in applied mechanics and engineering*, v. 194, n. 36, pp. 3902-3933.
- LEE, R. E., BROOKS, C. L., 1988, "A method and its application to evaluate automated distribution control", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 3, pp. 1232-1240. October.
- LI, Z., HE, C., LI, J., HUANG, X., 2014, "RFID reader anti-collision algorithm using adaptive hierarchical artificial immune system", *Expert Systems with Applications*, v. 41, n. 5, pp. 2126-2133.

- MACHADO, R. B., 2005, “Uma abordagem de detecção de intrusão baseada em sistemas imunológicos artificiais e agentes móveis”, Dissertação de M. Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- MAYER, G., 2015, “Overview of the immune system”, *Microbiology and Immunology online*, University of South Carolina, USA.
- MEKHAMER, S. F., ABDELAZIZ, A. Y., MOHAMMED, F. M., BADR, M. A. L., 2008, “A new intelligent optimization technique for distribution systems reconfiguration”, *12th International Middle-East Power System Conference*, pp. 397-401. March.
- MERLIN, A., BACK, G., 1975, “Search for minimum-loss operational spanning tree configuration for urban power distribution system”, *Proceedings 5th Power System Conference*, Cambridge, UK, Setembro, pp. 1-18.
- MEYERSON, A., 2001, “Online facility location”, 2001, *IEEE Proceedings. 42nd IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 426-431. October.
- MÍGUEZ, E., CIDRÁS, J., DÍAZ-DORADO, E., GARCÍA-DORNELAS, J. L., 2002, “An improved branch-exchange algorithm for large-scale distribution network planning”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 17, n. 4, pp. 931-936. November.
- MIRANDA, V., RANITO, J. V., PROENCA, L. M., 1994, “Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning”, *IEEE Transactions Power Systems*, v. 9, n. 4, pp. 1927-1923. November.
- MOJTAHEDZADEH, S., RAVADANEGH, S. N., 2014, “Optimizing reliability of distribution network using a method based on nonlinear programming”, *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, v. 6, n. 21, pp. 94-97. December.
- NAHMAN, J. M., PERIC, D. M., 2008, “Optimal planning of radial distribution

- networks by simulated annealing technique”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 23, n. 2, pp. 790-795.
- NARA, K., HAYASHI, Y., MUTO, S., TUCHIDA, K., 1998, “A new algorithm for distribution feeder expansion planning in urban area”, *Electric Power Systems Research*, v. 46, n. 3, pp.185-193. September.
- NBR 14039, 2005, “Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0 kV a 36,2 kV” , Norma Técnica Brasileira – ABNT.
- OLIVEIRA, L. W., 2009, “Reconfiguração e alocação ótima de capacitores em sistemas de distribuição”, Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- OLIVEIRA, L. W., JUNIOR, S. C., COSTA, J. S., OLIVEIRA, E. J., PEREIRA, J. L. R., JUNIOR, I. C. S., 2009, “Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição para minimização de perdas de energia”, *Revista Controle & Automação*, v. 20, n. 2, Abril-Junho.
- OLIVEIRA, L. W., OLIVEIRA, E. J., GOMES, F. V., JUNIOR, I. C. S., MARCATO, A. L. M., RESENDE, P. V. C., 2014, “Artificial immune systems applied to the reconfiguration of electrical Power distribution networks for energy loss minimization”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 56, pp. 64-74. March.
- OLIVEIRA, M. L. de, 2010, “Planejamento integrado da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica”, Tese de D.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.
- PÁDUA, S. G. B., 2014, “Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica de média tensão através de um algoritmo de busca dispersa”, Tese de D.Sc., Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, Brasil.
- PENIDO, D. R. R., 2008, “Uma metodologia para análise de sistemas elétricos a N

- condutores pelo Método de Injeção de Correntes”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PEREIRA, F. S., 2010, “Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônia de formigas”, Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
- PONNAVAIKKO, N., RAO, K. S., VENKATA, S. S., 1987, “Distribution system planning through a quadratic mixed integer programming approach”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 2, n. 4, pp. 1157-1163.
- PORKAR, S., ABBASPOUR-TEHRANI-FARD, A., POURE, P., SAADATE, S., 2011, “Distribution system planning considering integration of distributed generation and load curtailment options in a competitive electricity market”, *Electrical Engineering Journal*, vol. 93, n. 1, pp. 23-32.
- PRAKASH, K., SYDULU, M., 2007, “Particule swarm optimization based capacitor placement on radial distributed systems”. *Power Engineering Society General Meeting*. pp. 1-5. Tampla. FL. June.
- RAMÍREZ-ROSADO, I. J., BERNAL-AGUSTÍN, J. L., 1998, “Genetic algorithms applied to the design of large power distribution systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 13, n. 2, pp. 696-703. May.
- RANJAN, R., CHATURVEDI, A., SOLANKI, P. S., DAS, D., 2003, “Optimal conductor selection of radial distribution feeders using evolutionary programming”. *IEEE Conference on Convergent Technologies for the Asia-Pacific Region*, v. 1, pp. 456-459. October.
- RANJAN, R., VENKATESH, B., DAS, D., 2002, “A new algorithm for power distribution system planning”, *Electric Power Systems Research*, v. 62, n. 1, pp. 55-65.
- RAO, R. S., RAVINDRA, K., SATISH, K., NARASIMHAM, S. V. L., 2013, “Power

loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, n. 1, pp. 317-325. February.

ROSSETI, G. J. S., OLIVEIRA, E. J., OLIVEIRA, L. W., 2015, “Algoritmo para reconfiguração e procedimentos de operação de sistemas de distribuição de energia elétrica usando FPO”, *XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Porto de Galinhas, PE, Brasil. Agosto.

RUPOLO, D., MANTOVANI, J. R. S., 2015, “Reconfiguration of radial electric Power distribution system via a scatter search algorithm”, *Revista IEEE América Latina*, v. 13, n. 4. April.

SARAFIJANOVIĆ, S., BOUDEC, J. Y. L., 2005, “An artificial immune system approach with secondary response for misbehavior detection in mobile ad hoc networks”, *IEEE Transactions on Neural Networks*, v. 16, n. 5, pp. 1076-1087.

SCAPARRA, M. P., SCUTELLÀ, M. G., 2001, “Facilities, Locations, Customers: Building Blocks of Location Models. A Survey”. Università di Pisa, Italia. September

SCHMIDT, H. P., 2005, “Reconfiguração de redes de distribuição através de programação não linear inteira mista”, Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

SEMPÉRTEGUI, R., BAUTISTA J., CUBERO, R. G., PEREIRA, J., 2002, “Models and procedures for electric energy distribution planning. A review”. *15th Triennial World Congress*, Barcelona, Spain.

SEPASIAN, M. H., SEIFI, H., FOROUD, A. A., HOSSEINI, S. H., KABIR, E. M., 2006, “A new approach for substation expansion planning”, *IEEE Transactions Power Systems*, v. 21, n. 2, pp.997-1004. May.

SETA, F. S., OLIVEIRA, L. W., JUNIOR, I. C. S., GOMES, F. V., DIAS, B. H.,

- “Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição com representação das incertezas da carga através de fluxo de potência probabilístico”, 2013, *XLV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Natal, RN, Brasil.
- SHIRMOHAMMADI, D., HONG, H. W., 1989, “Reconfiguration of electric distribution for resistive line loss reduction”, *IEEE Transactions Power Delivery*, v. 4, n. 2, pp. 1492-1498. April.
- SHOJAEIAN, S., GHANDEHARI, E., “A heuristic multiobjective method for radial distribution networks reconfiguration”, 2013, *Chinese Journal of Engineering*, v. 2013, ID 654074. 4 pages.
- SINGH, K. J., 2004, “Electricity distribution network expansion planning”, *Department of Engineering Science, The University of Auckland*. Auckland. New Zealand.
- SONG, Y. H., WANG, G. S., JOHNS, A. T., WANG, P. Y., 1997, “Distribution network reconfiguration for loss reduction using fuzzy controlled evolutionary programming”. *IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, v. 144, n. 4, pp. 345-350. July.
- SOUSA, J. de, 2013, “Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica através de um modelo de programação linear inteiro misto (PLIM)”, Tese de D.Sc., Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, Brasil.
- SOUZA, R. F., 2011, “Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição Usando a Metaheurística de Busca em Vizinhança Variável”, Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual Paulista. Campus Ilha Solteira. São Paulo, SP, Brasil.
- SOUZA, S. S. F., 2013, “Algoritmo GASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radial”, Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual Paulista. Campus Ilha Solteira. São Paulo, SP, Brasil.

- SU, C. T., LEE, C. S., 2003, "Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.18, n. 3, pp. 1022-1027.
- SUN, D. I., FARRIS, D. R., COTE, P. J., SHOULTS, R. R., CHEN, M. S., 1982, "Optimal distribution substation and primary feeder planning via the fixed charge network formulation". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 101, n. 3, pp. 602-609. March.
- TALESKI, K.; RAJIČIĆ, D., 1997, "Distribution network reconfiguration for energy loss reduction". *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 12, n. 1, pp. 398-406.
- TAN, K. C., GOH, C. K., MAMUN, A. A., EI, E. Z., 2008, "An evolutionary artificial immune system for multi-objective optimization", *European Journal of Operational Research*, v. 187, n. 2, pp. 371-392.
- TANG, Y., 1996, "Power distribution system planning with reliability modeling and optimization", *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 1, pp. 181-189.
- TEMRAZ, H. K., QUINTANA, V. H., 1993, "Distribution system expansion planning models: an overview", *Electric Power Systems Research*, v. 26, n. 1, pp. 61-70.
- TIMMIS, J., HONE, A., STIBOR, T., CLARK, E., 2008, "Theoretical advances in artificial immune systems", *Theoretical Computer Science*, v. 403, n. 1, pp. 11-32, August.
- VAN PETEGHEM, V., VANHOUCHE, M., 2009, "An artificial immune system for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem", *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, v. 5482, pp. 85-96. Heidelberg.
- VOLPE, E. P., 1993, "Biology and human concerns", 4th edition. Ed. [S.1.]: WCB. ISBN 0697165388.
- WANG, C., CHENG, H. Z., 2008, "Optimization of network configuration in large

- distribution systems using plant growth simulation algorithm”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 23, n. 1, pp. 119-126.
- WANG, X., GAO, X. Z., OVASKA, S. J., 2004, “Artificial immune optimization methods and applications – a survey”, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, v. 4, pp. 3415-3420. October.
- WILLIS, H. L., TRAM, H., ENGEL, M. V., FINLEY, L., 1996, “Selecting and applying distribution optimization methods”, *IEEE Computer Applications in Power*, v. 9, n. 1, pp. 12-17.
- YOKOYAMA, R., SHINANO, Y., TANIGUCHI, S., 2014, “Optimization of energy supply systems by MILP branch and bound method in consideration of hierarchical relationship between design and operation”, *Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin*. Germany. April.
- ZANG, H., ZHANG S., HAPESHI, K., 2010, “A review of nature-inspired algorithms”, *J. Bionic Eng*, v. 7, pp. 232-327.
- ZHANG, D., FU, Z., ZHANG, L., 2007, “An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems”, *Electric Power Systems Research*, v. 77, n. 5, pp. 685-694.
- ZOU, K., AGALGAONKAR, A. P., MUTTAQI, K. M., PEREIRA, S., 2012, “Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 3, n. 1, pp. 112-123. January.
- ZVIETCOVICH, W. G., 2006, “Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando a Metaheurística Busca em Vizinhança Variável”, Dissertação de M. Sc., Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, Brasil.

Anexo A

Neste anexo serão apresentados os dados referentes aos sistemas utilizados neste trabalho.

Sistema 23 barras (NAHMAN e PERIC, 2008)

Os pontos 1 e 2 do sistema são subestações. No sistema 23 barras, o ponto 2 é uma carga de potência nula e no sistema 23 barras modificado é uma subestação.

Carga	X (km)	Y (km)	Potência (kVA)
1	8,525	6,055	0
2	8,400	8,200	0
3	9,011	10,767	640
4	6,654	6,583	320
5	6,926	5,683	320
6	8,154	6,654	320
7	8,325	7,454	320
8	8,354	8,140	320
9	7,383	9,953	320
10	8,325	6,026	320
11	9,596	4,941	320

12	7,811	4,927	320
13	9,353	4,498	320
14	7,925	5,869	320
15	8,768	4,712	320
16	9,325	6,555	320
17	8,282	5,598	320
18	8,468	5,198	320
19	8,868	5,783	320
20	8,825	6,512	320
21	9,039	5,255	320
22	9,425	5,612	320
23	7,554	5,555	320

Sistema 23 barras modificado (OLIVEIRA, 2010)

No sistema de 23 barras modificado, o sistema é idêntico ao anterior, porém o ponto 2, modelado anteriormente como uma carga de potência nula, agora é modelado como uma subestação.

Sistema 33 barras (BARAN e WU, 1989)

Os dados utilizados para o sistema 33 barras encontram-se na tabela a seguir, considerando a tensão nominal do sistema 12,66 kV.

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Potência ativa da barra Ramo (kW)	Potência reativa da barra Ramo (kVAr)
1	1	2	0,0922	0,0470	0	0
2	2	3	0,4930	0,2511	100	60
3	3	4	0,3660	0,1864	90	40
4	4	5	0,3811	0,1941	120	80
5	5	6	0,8190	0,7070	60	30
6	6	7	0,1872	0,6188	60	20
7	7	8	0,7114	0,2351	200	100
8	8	9	1,0300	0,7400	200	100
9	9	10	1,0440	0,7400	60	20
10	10	11	0,1966	0,0650	60	20
11	11	12	0,3744	0,1238	45	30
12	12	13	1,4680	1,1550	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	60	35
14	14	15	0,5910	0,5260	120	80
15	15	16	0,7463	0,5450	60	10
16	16	17	1,2890	1,7210	60	20
17	17	18	0,7320	0,5740	60	20
18	2	19	0,1640	0,1565	90	40
19	19	20	1,5042	1,3554	90	40
20	20	21	0,4095	0,4784	90	40
21	21	22	0,7089	0,9373	90	40
22	3	23	0,4512	0,3083	90	40
23	23	24	0,8980	0,7091	90	50
24	24	25	0,8960	0,7011	420	200
25	6	26	0,2030	0,1034	420	200
26	26	27	0,2842	0,1447	60	25
27	27	28	1,0590	0,9337	60	25
28	28	29	0,8042	0,7006	60	20
29	29	30	0,5075	0,2585	120	70
30	30	31	0,9744	0,9630	200	600
31	31	32	0,3105	0,3619	150	70
32	32	33	0,3410	0,5302	210	100

33	8	21	2,0000	2,0000	60	40
34	9	15	2,0000	2,0000	-	-
35	12	22	2,0000	2,0000	-	-
36	18	33	0,5000	0,5000	-	-
37	25	29	0,5000	0,5000	-	-

Sistema 54 barras (RANJAN *et al.*, 2003)

Os dados utilizados para o sistema 54 barras encontram-se na tabela a seguir. Ele é composto por 53 barras de carga e uma subestação, totalizando 2183 MVA de potência aparente de demanda. O fator de potência médio das cargas de 0,75.

Carga	X (km)	Y (km)	Potência (kVA)
1	(SE: a ser definida)		0
2	1,0	2,0	25
3	2,0	15,0	25
4	3,0	4,0	25
5	4,0	12,0	50
6	5,0	11,5	63
7	6,0	10,0	63
8	7,0	7,0	50
9	1,5	5,5	25
10	11,5	13,5	16
11	7,5	17,5	16
12	8,5	15,5	25
13	12,5	10,5	50
14	11,0	17,5	63
15	8,0	7,5	63
16	11,0	6,0	25
17	5,5	5,5	16
18	3,5	8,5	16
19	13,0	8,0	16
20	14,0	13,0	63
21	16,5	14,0	25
22	5,5	17,0	25
23	20,5	12,0	50

24	8,0	9,0	100
25	5,0	7,0	100
26	8,0	5,5	100
27	10,5	8,0	50
28	10,5	15,0	50
29	9,0	19,0	25
30	7,5	19,5	63
31	5,5	19,5	63
32	3,0	17,5	25
33	13,0	15,5	50
34	14,0	16,5	50
35	12,5	19,0	25
36	11,0	20,0	25
37	5,0	15,5	50
38	2,0	10,5	50
39	3,0	3,5	63
40	6,0	4,0	25
41	9,0	4,5	25
42	14,0	11,5	50
43	15,0	10,0	50
44	15,0	14,5	25
45	15,5	12,5	25
46	12,0	12,0	63
47	14,5	7,5	63
48	13,5	6,0	25

49	13,0	4,5	16
50	13,5	18,0	16
51	4,0	5,0	25

52	9,5	6,5	16
53	9,5	17,0	25
54	12,0	2,5	50

Sistema 84 barras (SU e LEE, 2003)

O sistema 84 barras, encontrado em (SU e LEE, 2003) possui tensão nominal de 11,4 kV, 84 barras e 96 circuitos. Os dados utilizados encontram-se a seguir.

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Potência ativa da barra Ramo (kW)	Potência reativa da barra Ramo (kVAr)
1	84	1	0,1944	0,6624	0	0
2	1	2	0,2096	0,4304	100	50
3	2	3	0,2358	0,4842	300	200
4	3	4	0,0917	0,1883	350	250
5	4	5	0,2096	0,4304	220	100
6	5	6	0,0393	0,0807	1100	800
7	6	7	0,0405	0,1380	400	320
8	7	8	0,1048	0,2152	300	200
9	7	9	0,2358	0,4842	300	230
10	7	10	0,1048	0,2152	300	260
11	84	11	0,0786	0,1614	0	0
12	11	12	0,3406	0,6944	1200	800
13	12	13	0,0262	0,0538	800	600
14	12	14	0,0786	0,1614	700	500
15	84	15	0,1134	0,3864	0	0
16	15	16	0,0524	0,1076	300	150
17	16	17	0,0524	0,1076	500	350
18	17	18	0,1572	0,3228	700	400
19	18	19	0,0393	0,0807	1200	1000
20	19	20	0,1703	0,3497	300	300
21	20	21	0,2358	0,4842	400	350
22	21	22	0,1572	0,3228	50	20
23	21	23	0,1965	0,4035	50	20
24	23	24	0,1310	0,2690	50	10

25	84	25	0,0567	0,1932	50	30
26	25	26	0,1048	0,2152	100	60
27	26	27	0,2489	0,5111	100	70
28	27	28	0,0486	0,1656	1800	1300
29	28	29	0,1310	0,2690	200	120
30	84	30	0,1965	0,3960	0	0
31	30	31	0,1310	0,2690	1800	1600
32	31	32	0,1310	0,2690	200	150
33	32	33	0,0262	0,0538	200	100
34	33	34	0,1703	0,3497	800	600
35	34	35	0,0524	0,1076	100	60
36	35	36	0,4978	1,0222	100	60
37	36	37	0,0393	0,0807	20	10
38	37	38	0,0393	0,0807	20	10
39	38	39	0,0786	0,1614	20	10
40	39	40	0,2096	0,4304	20	10
41	38	41	0,1965	0,4035	200	160
42	41	42	0,2096	0,4304	50	30
43	84	43	0,0486	0,1656	0	0
44	43	44	0,0393	0,0807	30	20
45	44	45	0,1310	0,2690	800	700
46	45	46	0,2358	0,4842	200	150
47	85	47	0,2430	0,8280	0	0
48	47	48	0,0655	0,1345	0	0
49	48	49	0,0655	0,1345	0	0
50	49	50	0,0393	0,0807	200	160
51	50	51	0,0786	0,1614	800	600
52	51	52	0,0393	0,0807	500	300
53	52	53	0,0786	0,1614	500	350
54	53	54	0,0524	0,1076	500	300
55	54	55	0,1310	0,2690	200	80
56	85	56	0,2268	0,7728	0	0
57	56	57	0,5371	1,1029	30	20
58	57	58	0,0524	0,1076	600	420
59	58	59	0,0405	0,1380	0	0
60	59	60	0,0393	0,0807	20	10
61	60	61	0,0262	0,0538	20	10
62	61	62	0,1048	0,2152	200	130

63	62	63	0,2358	0,4842	300	240
64	63	64	0,0243	0,0828	300	200
65	85	65	0,0486	0,1656	0	0
66	65	66	0,1703	0,3497	50	30
67	66	67	0,1215	0,4140	0	0
68	67	68	0,2187	0,7452	400	360
69	68	69	0,0486	0,1656	0	0
70	69	70	0,0729	0,2484	0	0
71	70	71	0,0567	0,1932	2000	1500
72	71	72	0,0262	0,0528	200	150
73	85	73	0,3240	1,1040	0	0
74	73	74	0,0324	0,1104	0	0
75	74	75	0,0567	0,1932	1200	950
76	75	76	0,0486	0,1656	300	180
77	85	77	0,2511	0,8556	0	0
78	77	78	0,1296	0,4416	400	360
79	78	79	0,0486	0,1656	2000	1300
80	79	80	0,1310	0,2640	200	140
81	80	81	0,1310	0,2640	500	360
82	81	82	0,0917	0,1883	100	30
83	82	83	0,3144	0,6456	400	360
84	5	55	0,1310	0,2690	0	0
85	7	60	0,1310	0,2690	0	0
86	11	43	0,1310	0,2690	-	-
87	12	72	0,3406	0,6994	-	-
88	13	76	0,4585	0,9415	-	-
89	14	18	0,5371	1,0824	-	-
90	16	26	0,0917	0,1883	-	-
91	20	83	0,0786	0,1614	-	-
92	28	32	0,0524	0,1076	-	-
93	29	39	0,0786	0,1614	-	-
94	34	46	0,0262	0,0538	-	-
95	40	42	0,1965	0,4035	-	-
96	53	64	0,0393	0,0807	-	-

Sistema 119 barras (ZHANG *et al.*, 2007)

O sistema de 119 barras encontrado em ZHANG *et al.* (2007) é composto por 118 barras de carga, 1 subestação e 133 ramos factíveis, tensão base de 11 kV e demanda total de 22,71 MW e 17,04 Mvar.

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Potência ativa da barra Ramo (kW)	Potência reativa da barra Ramo (kVAr)
1	119	1	0,0000	0,0001	0	0
2	1	2	0,0360	0,0130	133,840	101,140
3	2	3	0,0330	0,0119	16,214	11,292
4	2	4	0,0450	0,0162	34,315	21,845
5	4	5	0,0150	0,0540	73,016	63,602
6	5	6	0,0150	0,0540	144,200	68,604
7	6	7	0,0150	0,0125	104,470	61,725
8	7	8	0,0180	0,0140	28,547	11,503
9	8	9	0,0210	0,0630	87,560	51,073
10	2	10	0,1660	0,1344	198,200	106,770
11	10	11	0,1120	0,0789	146,800	75,995
12	11	12	0,1870	0,3130	26,040	18,687
13	12	13	0,1420	0,1512	52,100	23,220
14	13	14	0,1800	0,1180	141,900	117,500
15	14	15	0,1500	0,0450	21,870	28,790
16	15	16	0,1600	0,1800	33,370	26,450
17	16	17	0,1570	0,1710	32,430	25,230
18	11	18	0,2180	0,2850	20,234	11,906
19	18	19	0,1180	0,1850	156,940	78,523
20	19	20	0,1600	0,1960	546,290	351,400
21	20	21	0,1200	0,1890	180,310	164,200
22	21	22	0,1200	0,0789	93,167	54,594
23	22	23	1,4100	0,7230	85,180	39,650
24	23	24	0,2930	0,1348	168,100	95,178
25	24	25	0,1330	0,1040	125,110	150,220
26	25	26	0,1780	0,1340	16,030	24,620
27	26	27	0,1780	0,1340	26,030	24,620
28	4	28	0,0150	0,0296	594,560	522,620
29	28	29	0,0120	0,0276	120,620	59,117

30	29	30	0,1200	0,2766	102,380	99,554
31	30	31	0,2100	0,2430	513,400	318,500
32	31	32	0,1200	0,0540	475,250	456,140
33	32	33	0,1780	0,2340	151,430	136,790
34	33	34	0,1780	0,2340	205,380	83,302
35	34	35	0,1540	0,1620	131,600	93,082
36	30	36	0,1870	0,2610	448,400	369,790
37	36	37	0,1330	0,0990	440,520	321,640
38	29	38	0,3300	0,1940	112,540	55,134
39	38	39	0,3100	0,1940	53,963	38,998
40	39	40	0,1300	0,1940	393,050	342,600
41	40	41	0,2800	0,1500	326,740	278,560
42	41	42	1,1800	0,8500	536,260	240,240
43	42	43	0,4200	0,2436	76,247	66,562
44	43	44	0,2700	0,0972	53,520	39,760
45	44	45	0,3390	0,1221	40,328	31,964
46	45	46	0,2700	0,1779	39,653	20,758
47	35	47	0,2100	0,1383	66,195	42,361
48	47	48	0,1200	0,0789	73,904	51,653
49	48	49	0,1500	0,0987	114,770	57,965
50	49	50	0,1500	0,0987	918,370	1.205,100
51	50	51	0,2400	0,1581	210,300	146,660
52	51	52	0,1200	0,0789	66,680	56,608
53	52	53	0,4050	0,1458	42,207	40,184
54	52	54	0,4050	0,1458	433,740	283,410
55	29	55	0,3910	0,1410	62,100	26,860
56	55	56	0,4060	0,1461	92,460	88,380
57	56	57	0,4060	0,1461	85,188	55,436
58	57	58	0,7060	0,5461	345,300	332,400
59	58	59	0,3380	0,1218	22,500	16,830
60	59	60	0,3380	0,1218	80,551	49,156
61	60	61	0,2070	0,0747	95,860	90,758
62	61	62	0,2470	0,8922	62,920	47,700
63	1	63	0,0280	0,0418	478,800	463,740
64	63	64	0,1170	0,2016	120,940	52,006
65	64	65	0,2550	0,0918	139,110	100,340
66	65	66	0,2100	0,0759	391,780	193,500
67	66	67	0,3830	0,1380	27,741	26,713

68	67	68	0,5040	0,3303	52,814	25,257
69	68	69	0,4060	0,1461	66,890	38,713
70	69	70	0,9620	0,7610	467,500	395,140
71	70	71	0,1650	0,0600	594,850	239,740
72	71	72	0,3030	0,1092	132,500	84,363
73	72	73	0,3030	0,1092	52,699	22,482
74	73	74	0,2060	0,1440	869,790	614,775
75	74	75	0,2330	0,0840	31,349	29,817
76	75	76	0,5910	0,1773	192,390	122,430
77	76	77	0,1260	0,0453	65,750	45,370
78	64	78	0,5590	0,3687	238,150	223,220
79	78	79	0,1860	0,1227	294,550	162,470
80	79	80	0,1860	0,1227	485,570	437,920
81	80	81	0,2600	0,1390	243,530	183,030
82	81	82	0,1540	0,1480	243,530	183,030
83	82	83	0,2300	0,1280	134,250	119,290
84	83	84	0,2520	0,1060	22,710	27,960
85	84	85	0,1800	0,1480	49,513	26,515
86	79	86	0,1600	0,1820	383,780	257,160
87	86	87	0,2000	0,2300	49,640	20,600
88	87	88	0,1600	0,3930	22,473	11,806
89	65	89	0,6690	0,2412	62,930	42,960
90	89	90	0,2660	0,1227	30,670	34,930
91	90	91	0,2660	0,1227	62,530	66,790
92	91	92	0,2660	0,1227	114,570	81,748
93	92	93	0,2660	0,1227	81,292	66,526
94	93	94	0,2330	0,1150	31,733	15,960
95	94	95	0,4960	0,1380	33,320	60,480
96	91	96	0,1960	0,1800	531,280	224,850
97	96	97	0,1960	0,1800	507,030	367,420
98	97	98	0,1866	0,1220	26,390	11,700
99	98	99	0,0746	0,3180	45,990	30,392
100	1	100	0,0625	0,0265	100,660	47,572
101	100	101	0,1501	0,2340	456,480	350,300
102	101	102	0,1347	0,0888	522,560	449,290
103	102	103	0,2307	0,1203	408,430	168,460
104	103	104	0,4470	0,1608	141,480	134,250
105	104	105	0,1632	0,0588	104,430	66,024

106	105	106	0,3300	0,0990	96,793	83,647
107	106	107	0,1560	0,0561	493,920	419,340
108	107	108	0,3819	0,1374	225,380	135,880
109	108	109	0,1626	0,0585	509,210	387,210
110	109	110	0,3819	0,1374	188,500	173,460
111	110	111	0,2445	0,0879	918,030	898,550
112	110	112	0,2088	0,0753	305,080	215,370
113	112	113	0,2301	0,0828	54,380	40,970
114	100	114	0,6102	0,2196	211,140	192,900
115	114	115	0,1866	0,1270	67,009	53,336
116	115	116	0,3732	0,2460	162,070	90,321
117	116	117	0,4050	0,3670	48,785	29,156
118	117	118	0,4890	0,4380	33,900	18,980
119	46	27	0,5258	0,2925	-	-
120	17	27	0,5258	0,2916	-	-
121	8	24	0,4272	0,1539	-	-
122	54	43	0,4800	0,1728	-	-
123	62	54	0,3600	0,1296	-	-
124	37	62	0,5700	0,5720	-	-
125	9	40	0,5300	0,3348	-	-
126	58	96	0,3957	0,1425	-	-
127	73	91	0,6800	0,6480	-	-
128	88	75	0,4062	0,1464	-	-
129	99	77	0,4626	0,1674	-	-
130	108	83	0,6510	0,2340	-	-
131	105	86	0,8125	0,2925	-	-
132	110	118	0,7089	0,2553	-	-
133	25	35	0,5000	0,5000	-	-