

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**JESSICA FERNANDES LOPES**

**UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO PARA  
RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE  
DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DA ALOCAÇÃO DE CHAVES**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2015**

**JESSICA FERNANDES LOPES**

**UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO PARA  
RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE  
DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DA ALOCAÇÃO DE CHAVES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel no Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof. Dr. Gabriela Helena Bauab Shiguemoto

Coorientador: Prof. Dr. André Luis Shiguemoto

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2015**



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Cornélio Procópio  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Curso de Engenharia Elétrica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Jessica Fernandes Lopes**

### **Utilização de algoritmo genético para reconfiguração de redes de distribuição por meio da alocação de chaves**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 15:10hs do dia 12/11/2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Gabriela Helena Bauab Shiguemoto - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). André Luís Shiguemoto - (Coorientador)

---

Prof(a). Esp. Ulisses Pereira Rosa Borges - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

*“Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista.”*  
*Aldo Novak*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me guiado em toda esta jornada, iluminando as oportunidades viáveis e me auxiliando de modo a discernir os enlaces da vida.

Gostaria de agradecer, em especial, à Professora Dra. Gabriela Helena Bauab Shiguemoto pela orientação em todo o decorrer do trabalho desenvolvido, além do Professor Dr. André Luis Shiguemoto pela atenção, em especial, ao período de aperfeiçoamento do algoritmo proposto. Obrigada pela oportunidade e confiança de me ter concedido o desenvolvimento deste tema.

Aos professores que foram essenciais para minha formação tanto intelectual quanto profissional. Sempre presentes e indispensáveis em todas as ocasiões neste período de concretização da graduação.

Agradeço a todos os que me apoiaram para a realização deste trabalho, em particular:

- Aos meus pais, pelo incentivo e compreensão pela ausência devido à dedicação para conclusão deste trabalho;
  
- Aos meus colegas e amigos, que me auxiliaram tanto no desenvolvimento como na conclusão deste tema;
  
- À UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Cornélio Procopio, que sempre soube ser um diferencial entre as universidades, principalmente, em relação ao modo como incentiva os alunos ao interesse pelo estudo e aprendizado;
  
- Ao professor Rafael Staiger Bressan, por me ajudar e apoiar nas diversas etapas de conclusão do curso de Engenharia Elétrica.

## RESUMO

LOPES, Jessica Fernandes. **Utilização de Algoritmo Genético para Reconfiguração de Redes de Distribuição por meio da Alocação de Chaves.** 2015. 84f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Devido a demanda de energia elétrica e a complexidade das operações, tem-se um número elevado de interligações entre sistemas de proteção. A distribuição de energia, portanto, torna-se um grande desafio em relação ao seu fornecimento, de modo a torna-la sustentável e confiável. Por trás da utilização da energia disponibilizada, encontra-se um vasto problema conjunto com diversos fatores, os quais influenciam diretamente no fornecimento de energia, a interrupção e falhas no sistema de distribuição. A reconfiguração, portanto, consiste em alterar a topologia das redes através da abertura ou fechamento das chaves que interconectam os alimentadores, de modo a otimizar determinada função. Por meio da minimização de perdas ativas, isolamento de faltas e balanceamento de cargas entre os alimentadores ocorre a melhora dos níveis de tensão. Neste trabalho, considera-se a minimização da perda ativa total, através do desenvolvimento metodológico e implementação do Algoritmo Genético juntamente com o *Path Relinking* com o intuito de melhorar a busca, encontrando uma melhor solução factível. Propõe-se, portanto, através de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), nova formulação para o problema de Reconfiguração em Sistemas de Distribuição.

**Palavras-chave:** Reconfiguração de Sistemas de Distribuição, Algoritmo Genético, *Path Relinking*.

## ABSTRACT

LOPES, Jessica Fernandes. *Using Genetic Algorithm for Distribution Network Reconfiguration through the Keys Allocation*. 2015. 84p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bachelor of Engineering Electrical Engineering) Federal University of Technology - Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

The demand for electricity and the complexity of operations, has a large number of interconnections between protection systems. The power distribution thus becomes a major challenge in relation to the supply in order to make it sustainable and reliable. Behind the use of the available energy is a vast problem along with several factors, which directly influence the power supply, disruption and failures in the distribution system. The reconfiguration therefore is to change the topology of networks by opening or closing of the keys that interconnect the feeders, to optimize certain function. By minimizing asset losses, insulation faults, load balancing between the feeders improves the voltage levels. In this paper, we consider minimizing the total active loss through methodological development and implementation of Genetic Algorithm with Path Relinking in order to improve the searching to find the feasible solution. It is proposed, therefore, not via Mixed Integer Linear Programming (MILP), a new formulation for the Reconfiguration Problem in Distribution Systems.

**Keywords:** Reconfiguration Distribution Systems, Genetic Algorithm, Path Relinking.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de um Sistema Elétrico de Potência. ....	18
Figura 2. Sistema de proteção – Seletividade. ....	21
Figura 3. Chaves automatizadas em sistema radial aberto. ....	26
Figura 4. Cruzamento de um ponto. ....	30
Figura 5. Cruzamento de multipontos. ....	30
Figura 6. Cruzamento uniforme. ....	31
Figura 7. Estrutura da ocorrência de mutação. ....	31
Figura 8. Exemplificação de <i>path relinking</i> . ....	33
Figura 9. Sistema elétrico radial de 5 barras. ....	37
Figura 10. Representação do sistema radial de 5 barras em árvore conexa. ...	37
Figura 11. Representação de grafos. ....	37
Figura 12. Sistema de 14 barras sem ordenação. ....	41
Figura 13. Sistema de 14 barras com ordenação. ....	42
Figura 14. Representação de duas barras do sistema de distribuição. ....	42
Figura 15. Sistema de distribuição com 14 barras. ....	45
Figura 16. Análise de loops em uma rede malhada. ....	46
Figura 17. Solução exemplo de uma rede malhada. ....	47
Figura 18. Fluxograma simplificado do algoritmo genético para reconfiguração do sistema de distribuição. ....	50
Figura 19. Método de cruzamento. ....	53
Figura 20. Sistema de distribuição com 14 barras. ....	55
Figura 21. Sistema de Distribuição de 33 barras. ....	58
Figura 22. Representação dos nós com possíveis ramificações. ....	59
Figura A1. Diagrama unifilar do sistema de distribuição. ....	69
Figura A2. Diagrama unifilar de um sistema radial. ....	70
Figura A3. Diagrama unifilar de um sistema radial com recurso. ....	70
Figura A4. Diagrama unifilar de um sistema em anel. ....	71
Figura A5. Diagrama unifilar de um sistema reticulado. ....	71
Figura A6. Arranjo com Barramento Simples. ....	74
Figura A7. Duplo barramento simples. ....	75
Figura A8. Barramento simples com disjuntor de interligação. ....	76



Figura A9. Barra principal e de transferência. ....	77
Figura A10. Barramento duplo com disjuntor. ....	78
Figura A11. Barramento duplo com dupla proteção. ....	79
Figura A12. Barramento com disjuntor e meio. ....	80
Figura A13. Barramento em anel. ....	81

## LISTA DE SIGLAS

AG – Algoritmo Genético;  
AL – Alimentador;  
B-AT – Barramento de Alta Tensão;  
B-MT – Barramento de Média Tensão;  
BC – Banco de Capacitores;  
DNA – Ácido Desoxirribonucleico;  
EDL – Entrada de Linha;  
NA – Normalmente Aberta;  
NF – Normalmente Fechada;  
PNLIM – Programação Não Linear Inteiro Misto;  
SDL – Saída de Linha;  
SEP – Sistema Elétrico de Potência;  
TC – Transformador de Corrente;  
TF – Transformador de Frequência;  
TP – Transformador de Potência;

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tensões obtidas no sistema de 33 barras.....	58
Tabela 2 - Resultados obtidos com AG para sistema de 33 barras. ....	60
Tabela 3 - Resultados obtidos com AG e path relinking para sistema de 33 barras. ....	61
Tabela 4 - Resultados obtidos com AG e path relinking para sistema de 33 barras. ....	61

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1 OBJETIVO.....	15
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	16
<b>2 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA</b> .....	18
2.1 SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO .....	20
<b>3 RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO</b> .....	23
3.1 AUTOMAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO .....	24
<b>4 ALGORITMO GENÉTICO</b> .....	27
4.1 OPERADORES GENÉTICOS .....	29
4.2 PARÂMETROS GENÉTICOS .....	32
4.3 ALGORITMO GENÉTICO E <i>PATH RELINKING</i> .....	32
<b>5 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO</b> .....	35
5.1 APLICAÇÃO DE GRAFOS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA .....	37
5.2 FLUXO DE CARGA E MÉTODO <i>BACKWARD AND FORWARD</i> EM SISTEMAS RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO.....	38
5.2.1 Cálculo das Variáveis do Sistema .....	41
5.2.2 Particularidades do Sistema de Distribuição .....	44
<b>6 METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO A PROBLEMAS DE RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO</b> .....	48
6.1 ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO .....	48
<b>7 CONCLUSÃO</b> .....	63
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	65
<b>APÊNDICE A - Estrutura do Sistema de Distribuição</b> .....	69
Componentes de uma Subestação de Distribuição.....	73
Topologia.....	73
<b>APÊNDICE B – Dados dos Sistemas de Distribuição</b> .....	83
B1 – Dados do Sistema de 14 Barras .....	83
B2 – Dados do Sistema de 33 Barras .....	84

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas Elétricos de Potência possuem a função de fornecer energia elétrica aos usuários, com qualidade, no instante em que é solicitada. Estes são divididos em quatro segmentos: mercado de energia, geração, transmissão e distribuição, sendo que neste último, designa a subestação, ou seja, setor responsável por distribuí-la, de modo a atender a demanda dos consumidores (KAGAN, 2010). O sistema mencionado é essencialmente radial, no qual há uma única fonte de energia e todos os componentes que interligam essa fonte, associam-se em série. Deste modo, essa característica facilita a configuração e manutenção de equipamentos de proteção, que possuem como objetivo a função de impedir a propagação de falhas. Neste caso, chaves elétricas são indispensáveis para controle dos circuitos de uma instalação (BROADWATER, 1994).

Inicialmente, estes equipamentos possuíam um simples funcionamento, o qual era realizado por chaves tipo faca com esquema de acionamento de alavanca, formado por bases de madeira ou mármore. Com o desenvolvimento tecnológico, novos materiais e o aperfeiçoamento desses processos possibilitaram a criação de chaves elétricas mais elaboradas, eficientes e seguras, tanto para a instalação elétrica quanto para o operador (CUNHA, 2010). Denomina-se, portanto, sistemas de manobras como sendo constituído por chaves que podem estar em dois estados: normalmente fechadas (NF), que são posicionadas ao longo do tronco do alimentador, ou normalmente abertas (NA), opção de caminho alternativo dentro do próprio alimentador. A maior parte destes sistemas são operados de modo manual, a fim de buscar o local em que ocorreu a falha, identificando o problema e coordenando ações em campo para a determinação da sequência de abertura e fechamento de chaves (ANTILA et al., 2003). Com o emprego da reconfiguração do sistema de distribuição, tem-se a possibilidade de alimentação alternativa de forma imediata, através da transferência de carga entre os alimentadores.

Devido a novas tecnologias, principalmente, no âmbito industrial, impulsiona-se um mercado altamente competitivo, exigindo de concessionárias de energia elétrica medidas para que seja possível o aumento da eficiência,

envolvendo tanto a parte administrativa como técnica. O Sistema Elétrico de Potência tem como função o fornecimento de energia aos usuários, de modo a manter a qualidade no instante em que esta é solicitada (CABEZAS, 2007).

Para alcançar as metas em relação à exigência dos consumidores finais, tem-se uma técnica amplamente utilizada para a redução de perdas, principalmente, no sistema de distribuição, a qual é denominada por reconfiguração de alimentadores das redes. Ao otimizar a operação, altera-se a topologia do sistema através de manobras de comutação das chaves de interconexão (CABEZAS, 2007). Assim, possibilita-se reduzir perdas ativas nos alimentadores, melhorar o perfil de tensão e aumentar a confiabilidade, de modo a isolar faltas, restaurando o fornecimento de energia (SANTOS, 2007).

O objetivo fundamental de um sistema elétrico é a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, minimizando custos e maximizando benefícios. Tradicionalmente, dedicou-se estudos a geração e transmissão devido ao maior montante de recursos financeiros envolvidos. Porém, a distribuição está em crescente atenção, visto que nesta área ocorrem a maioria de falhas e perdas de potência ativa, influenciando na lucratividade e gastos da concessionária (GAUCHE, 1994).

Perdas técnicas do sistema de distribuição são produtos da dissipação de energia na forma de calor em condutores e equipamentos. Uma das alternativas para às minimizar é a reconfiguração de redes de distribuição, ou seja, método de redução de perdas baseado na modificação da topologia de redes através da redefinição dos estados (Normalmente Aberto ou Normalmente Fechado) das chaves de manobra (VIZCAINO, 2011). A alteração de chaves de interconexão baseia-se na transferência de cargas de um alimentador para outro. Devido ao número de chaves num sistema real de distribuição ser relativamente grande, a quantia de operações de comutação torna-se, praticamente, inviável. Para encontrar uma melhor modificação, necessita-se analisar todas as diversas opções radiais existentes na rede. O problema de reconfiguração de redes de distribuição, portanto, é considerado uma das melhores soluções para a minimização de perdas através da sua otimização. Deste modo, pesquisas envolvendo, principalmente, a parte relacionada à distribuição, torna-se foco para desenvolvimento de ferramentas computacionais para auxiliar a operação (SANTOS, 2007).

A solução exata para o problema envolve a seleção, dentre as configurações, a que possua como resultado satisfatório para determinado objetivo. Porém, esta possui um crescimento exponencial devido ao número factível de combinações geradas pelo chaveamento juntamente com o número de chaves no sistema, tendo como base sistemas reais. Por esta razão, algoritmos heurísticos aproximados são sugeridos para sua resolução, não garantindo a otimalidade da solução encontrada, mas uma solução que seja satisfatória, pois em condições normais de operação, possibilita-se obter modos de configuração que reduzam perdas através da manobra de chaves (MANTOVANI, 2000).

A reconfiguração do sistema de distribuição é caracterizado por ser de programação linear inteira mista (PNLIM) com função objetivo quadrática. Assim, propõe-se, neste trabalho, para modelagem e desenvolvimento do problema, a utilização do método *Backward and Forward* para cálculo do fluxo de potência, além da implementação do algoritmo genético juntamente com o *Path Relinking* (Religamento de Caminhos) na parte inteira.

## 1.1 OBJETIVO

Por trás da utilização de energia elétrica disponibilizada, tem-se uma rede de distribuição, a qual permite o consumo desta por clientes finais. Com uma vasta complexidade conjunta com diversos fatores, tanto climáticos como falhas mecânicas e erros de operação, estes provocam, de forma frequente, desligamentos que acabam por suspender, de forma temporária, o fornecimento de energia. Neste contexto, não se tem como descartar o fato da ocorrência de interrupções e falhas no sistema (ABRADEE).

De modo atual, há uma exigência cada vez maior dos consumidores de energia elétrica em relação a essas interrupções (SANTOS, 2007). Assim, em conjunto com as limitações dos equipamentos devido a tecnologia destes, os quais são vulneráveis a falhas e defeitos, o que são previstos, porém não controlados. Como forma de amenizar este problema, investe-se em novos equipamentos e tecnologias, além da formação e especialização da mão de obra envolvida para a capacitação da manutenção e controle.

Analisando os fatos, com a proposta de reduzir custos de operações no sistema de distribuição de energia elétrica, um dos principais estudos a serem realizados, refere-se à minimização de perdas técnicas, em destaque, metodologias de reconfiguração de sistemas.

Como objetivo principal, este trabalho consiste no desenvolvimento e implementação de um algoritmo genético para redução de perdas ativas do sistema de distribuição através da reconfiguração com a alocação de chaves. Baseado na técnica desenvolvida por Fioravanti (2014), utiliza-se estratégias para obter um algoritmo eficiente juntamente com árvores geradoras de grafos. Com o desenvolvimento do algoritmo genético com uso do método de *path relinking*, propõe-se a automação de sistemas de distribuição.

Baseado em métodos propostos em literatura, assim como em comparação com os resultados obtidos, tem-se a análise teórica, experimental e crítica, com a utilização da convergência e esforço computacional que o algoritmo apresenta em diversas situações. A solução proposta, neste trabalho, visa encontrar um ponto factível de operação.

Para que seja possível atingir este objetivo, necessita-se de uma estrutura, dividindo-se em tarefas, tais como:

- Estudo do algoritmo genético e *path relinking*;
- Estudo do modelo matemático e modelagem do sistema elétrico de distribuição para elaboração do projeto;
- Desenvolvimento e implementação do algoritmo proposto aplicado a um sistema de distribuição;
- Análise dos resultados obtidos em comparação com o sistema inicialmente obtido;
- Verificação da eficiência do algoritmo desenvolvido em modo computacional, juntamente com o *path relinking*.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Neste capítulo, apresentou-se uma breve introdução sobre o sistema elétrico de potência, contextualizado sobre as diversas complexidades que envolvem tanto a reconfiguração do sistema de distribuição, assim como a necessidade de



um fornecimento de energia cada vez mais constante e confiável ao consumidor final. O problema a ser tratado neste trabalho foi especificado, além dos objetivos tanto principal como específico.

- No Capítulo 2, aborda-se a estruturação teórica como base para entendimento do problema a ser solucionado no decorrer. Este se inclui o sistema elétrico de potência, bem como em específico o sistema de distribuição, foco deste trabalho.
- No Capítulo 3, apresenta-se de forma sucinta, a automação em sistemas de distribuição, bem como a reconfiguração destes.
- No Capítulo 4, complementa-se a introdução, com abordagem do algoritmo genético e o método de *path relinking* para aplicações.
- No Capítulo 5, tem-se a caracterização do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, de modo geral, além dos conceitos envolvidos para a modelagem e desenvolvimento do algoritmo proposto.
- No Capítulo 6, apresenta-se toda a estruturação para a implementação do algoritmo genético e *path relinking*, juntamente com os resultados obtidos.
- No Capítulo 7, encontra-se as conclusões deste trabalho.

## 2 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Sistemas Elétricos de Potência, em sua parte física, podem ser divididos, basicamente, em: geração, transmissão, subtransmissão e distribuição, e em cada um desses setores, necessita-se reduzir e elevar, de maneira conveniente, os níveis de tensão para que o transporte de energia elétrica seja viável. Deste modo, as subestações interconectam, de maneira confiável e segura, o sistema elétrico, sendo considerado os diversos níveis de tensão ao longo do percurso. Na Figura 1, ilustra-se o Sistema Elétrico de Potência numa visão geral. Para melhor entendimento, tem-se que este é composto por quatro subestações de energia elétrica: A e B (geração), uma subestação de subtransmissão e uma de distribuição (SOUZA, 2008).

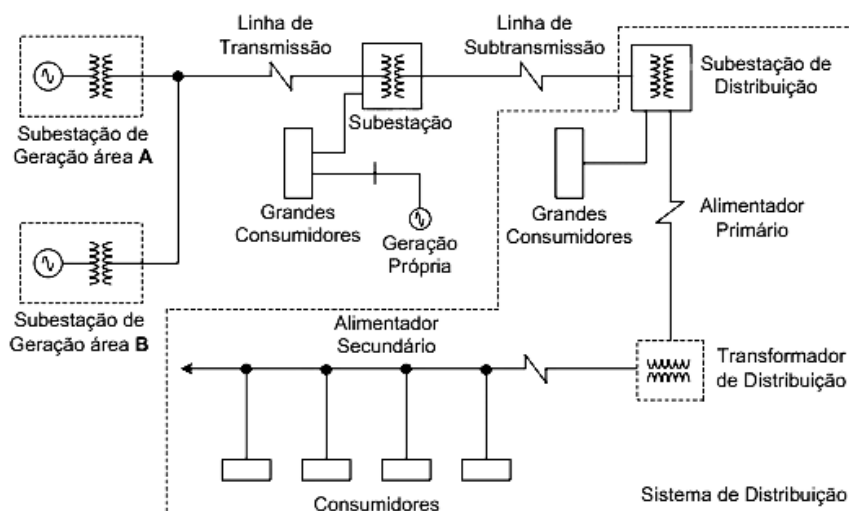


Figura 1. Diagrama de um Sistema Elétrico de Potência.

FONTE: SOUZA, 2008.

O sistema atual de energia elétrica no Brasil é baseado em usinas de geração de grande porte que transportam energia através de sistemas de transmissão de alta tensão, atingindo o sistema de distribuição de média e baixa tensão no qual se encontra os consumidores. Nos circuitos de transmissão e subtransmissão, tem-se redundância de redes elétricas por atenderem um número elevado de cidades e regiões. Já nos circuitos de distribuição, as concessionárias buscam maior confiabilidade com menor custo, visto que a

densidade de carga é pequena em relação a grandes investimentos (GARCIA; DUZZI, 2012).

Deste modo, o objetivo do Sistema Elétrico de Potência (SEP) é gerar, transmitir e distribuir energia elétrica com o escopo em atender determinados padrões de confiabilidade, disponibilidade, qualidade, segurança e custos (LEAO, 2009). Sendo assim, tem-se:

Sistema de Geração de Energia Elétrica: é produzida uma tensão alternada, a qual é caracterizada por onda senoidal, com frequência fixa e amplitude que varia em relação a modalidades do atendimento de baixa, média ou alta tensão (LEAO, 2009).

Rede de Transmissão: parte responsável pela ligação das grandes usinas de geração a áreas de grande consumo (LEAO, 2009).

Rede de Subtransmissão: esta recebe energia da rede de transmissão com a função de transportar energia elétrica a cidades de pequeno porte ou centros industriais (LEAO, 2009).

Rede de Distribuição: alimentam consumidores industriais de médio e pequeno porte, além de consumidores comerciais e residenciais (LEAO, 2009).

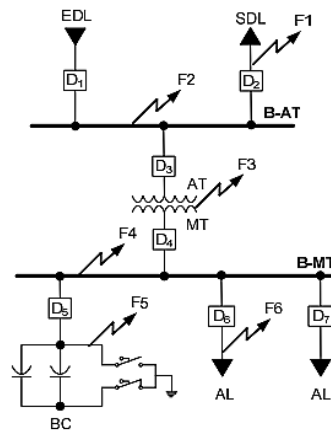
Devido à crescente demanda de energia elétrica, operações dos sistemas de potência tornaram-se de extrema complexidade, principalmente, em relação ao número de interligações entre os sistemas de proteção. Os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica têm aumentado, consideravelmente, em vista do aumento de núcleos populacionais e desenvolvimento industrial. O maior impacto a ser observado é no setor de distribuição, pois neste se encontra os circuitos terminais do fornecimento de energia, o que enseja em um grande desafio às concessionárias fornecer energia elétrica aos consumidores finais de maneira confiável (SOUZA, 2008).

## 2.1 SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO

As funções das subestações de distribuição, dentre a maioria, têm como foco a monitoração de *status* de equipamentos, proteção e supervisão dos protetores, religamento automático e localização de faltas na linha, sendo que uma falta pode ser classificada como temporária ou permanente. Assim, faltas temporárias são as quais desaparecem por operação de um equipamento de proteção ou religamento do sistema, e representam cerca de 80% do total. As causas mais comuns registradas estão entre descargas atmosféricas, contatos momentâneos entre condutores, abertura de arco elétrico e materiais sem isolamento adequada. Faltas permanentes são aquelas em que é necessária a intervenção do homem para ser corrigida antes de religar o equipamento operado. Dentre as várias constatações, tem-se a quebra de cabos, colisões em postes, dentre outros (SOUZA, 2008, p. 17).

Para minimização dos efeitos das possíveis falhas, existe o sistema de proteção. Para que este cumpra adequadamente com sua função, necessita-se de alguns requisitos, tais como: Seletividade, Rapidez e Velocidade, Sensibilidade, Confiabilidade e Economia (SOUZA, 2008).

1. Seletividade – o sistema de proteção deve isolar somente a área do sistema atingida pela falta, mantendo as demais partes em funcionamento contínuo. O objetivo, portanto, é evitar que faltas temporárias interfiram no sistema e que caso seja falta permanente, que a menor quantidade possível no sistema seja desligada. Na Figura 2, pode-se notar o funcionamento deste tipo de seletividade. Conforme faltas ocorridas, denominadas por: F1, F2, F3, F4, F5 e F6, tem-se os respectivos dispositivos de proteção demarcados por: D1, D2, D3, D4, D5 e D6. Para cada falta mencionada, o dispositivo mais próximo deve atuar como isolante, interrompendo de maneira eficaz a falta (SOUZA, 2008).



**Figura 2. Sistema de proteção – Seletividade.**

**FONTE: SOUZA, 2008.**

2. Rapidez e Velocidade – este requisito refere-se a resposta do sistema de proteção, o qual deve ser menor possível. Este tempo deve assegurar a continuidade do suprimento e manutenção das condições normais de operação nas regiões não afetadas. Assim como, auxiliar na manutenção da estabilidade através da remoção do distúrbio antes de causar perda de sincronismo (SOUZA, 2008).
3. Sensibilidade – considerada como a capacidade de identificação de uma condição que excede um valor limite, ou seja, relaciona-se ao nível mínimo de operação do sistema. Resumidamente, sensibilidade pode ser denominada como a capacidade de resposta às condições adversas para que o circuito foi projetado (SOUZA, 2008).
4. Confiabilidade – possibilidade de um sistema ou parte deste funcionar corretamente quando sua atuação for solicitada. O termo confiabilidade refere-se a veracidade de uma operação correta frente a ocorrência de uma falta. Neste caso, dispositivos de proteção devem operar no acontecimento de faltas que estejam na região (SOUZA, 2008).
5. Economia – o sistema de proteção deve possuir uma implantação economicamente viável, evitando-se um número excessivo de equipamentos e dispositivos de proteção (SOUZA, 2008).

Assim, para um bom funcionamento do sistema de distribuição caso haja alguma interferência/falta, necessita-se de uma proteção adequada. O uso correto de dispositivos de proteção auxiliam na manutenção, evitando danos materiais e equipamentos, além de menores custos de manutenção e maior vida útil (SOUZA, 2008).

Devido a demanda de energia elétrica e a complexidade das operações, tem-se um número elevado de interligações entre sistemas de proteção (Apêndice A). A distribuição de energia, portanto, torna-se um grande desafio em relação ao seu fornecimento. Para aumentar a sua qualidade, introduz-se sistemas considerados robustos, tais como sistemas de automação. Com tradicionais práticas de diagnósticos de defeitos juntamente com subestações automatizadas, tem-se a associação destes para uma melhor eficácia (SOUZA, 2008).

### 3 RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

A qualidade e a confiabilidade dos sistemas de distribuição podem ser afetados por modificações em sua topologia. Tais modificações são possíveis devido a atuação de dispositivos de proteção ocasionada por faltas ou mudanças programadas. Falhas prejudicam o sistema provocando danos em seu total ou parte dele, sendo necessária a interrupção de energia a consumidores (FERREIRA, 2010). Assim, manobras são essenciais para isolar ou restabelecer o fornecimento elétrico em trechos da rede.

A reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição consiste, portanto, em buscar uma topologia radial do sistema, com alguns alimentadores operando e outros sem operar, de modo a otimizar determinado objetivo. Existem diversas técnicas de soluções para este tipo de problema, as quais se diferem em relação ao tipo de estratégia utilizada. Como fora dito anteriormente, as redes de distribuição possuem conjuntos de dispositivos de controle e proteção que permitem a alteração da configuração do sistema através de manobras destes, tendo como principal objetivo a redução de perdas ativas e melhora nos níveis de tensão, mantendo a condição de radialidade (FIORAVANTI, 2014). O sistema deve operar de forma econômica e confiável, independentemente de sua condição. Assim, a reconfiguração das redes de distribuição é considerada uma importante ferramenta para aprimorar as condições de estabilidade, principalmente, em alta demanda (PEREIRA, 2010).

Realizada durante a operação em redes de distribuição, a reconfiguração é feita através de abertura e fechamento de chaves de manobra. Seu objetivo tem como foco a melhoria do balanceamento de cargas, redução de perdas ou restabelecimento do fornecimento de energia. Caso seja atingida uma das finalidades determinadas, tem-se quantitativamente um indicador de melhoria. Quando a quantidade de chaves que constituem o sistema permite a alternância entre elas, tem-se a possibilidade de mudança, consistindo o problema na identificação de combinação das chaves existentes para exercer melhor impacto. Cada possibilidade de configuração da rede caracteriza-se a uma situação (aberta ou fechada) das chaves instaladas. Assim, pode-se definir combinações diversas para satisfazer as necessidades (FERREIRA, 2010).

Deste modo, o problema está diretamente relacionado ao número de chaves que interconectam o sistema e, muitas vezes, as soluções tornam-se insatisfatórias por não cumprirem restrições de radialidade, resultando em uma topologia inactível (SCHMDT et al., 2005). Uma das técnicas mais utilizadas para sua resolução é a implementação de algoritmo genético, pois mesmo não garantindo uma solução ótima, este fornece resultados factíveis (PEREIRA, 2010). Deste modo, consiste-se em encontrar configurações radiais que produzam perdas mínimas de potência no sistema.

### 3.1 AUTOMAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Definido como conjunto de instalações que permitem operação de sistemas de distribuição por chaveamentos remotos, os recursos de automação possuem diversas funcionalidades, tais como:

- Seccionamento e isolamento de faltas;
- Reconfiguração remota;
- Chaveamento de banco de capacitores (DUARTE, 2008).

Qualitativamente, a aplicação da automação em redes de distribuição tem como foco a melhoria da qualidade de serviço, aumentando a flexibilidade e utilização da rede. Este tipo de investimento inclui projetos de novos sistemas que usam tecnologias que permitam a automação dos processos de operação (DUARTE, 2008).

O planejamento dos sistemas de energia elétrico utiliza como critério principal, a garantia da continuidade do fornecimento de energia, através da redundância das instalações. Considerando-se a reserva de capacidade local, parte do sistema deve continuar em operação caso ocorra alguma falha em um de seus componentes. Na maioria dos casos, a consequência do uso de critérios de planejamento, deve-se a ocorrência de baixo fator de utilização da capacidade instalada, o que requer investimentos significativos para a concessionária (DUARTE, 2008).

Com o exponencial crescimento e complexidade do sistema elétrico de distribuição, tem-se cada vez mais dificuldades em realizar o processo de controle e operação, o que é agravado também pela grande área física que este se estende. Com a utilização de um sistema de automação nas redes, o qual



funciona em virtude das funções de coleta de dados e atuação sobre equipamentos de campo, tem-se como resultado o conjunto de um sistema inteligente integrado para monitorar, coordenar e operar alguns dos componentes do sistema elétrico em tempo real. O gerenciamento e operação da rede elétrica são conduzidos por instalações específicas, que se concentram, em sua maioria, nas subestações e redes de distribuição de energia de uma determinada região, garantindo, assim, o fornecimento de energia elétrica, praticamente, contínuo com qualidade ao consumidor (DUARTE, 2008).

Concessionárias de energia elétrica têm, de modo contínuo, empregado esforços para melhorar a continuidade e qualidade da energia transmitida, explorando, cada vez mais recursos tecnológicos. Uma solução cada vez mais eficaz é o uso da automação em redes de distribuição por meio da instalação de equipamentos telecomandados. Estes mostram ser economicamente viáveis, principalmente, devido ao surgimento de novas tecnologias de comunicação (ABRADEE).

Sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica são projetados para operar em modo radial, o que faz apresentarem possibilidades de alteração na topologia através da abertura e fechamento de chaves localizadas em pontos estratégicos. Qualquer alteração faz com que se mantenha a radialidade, alterando-se, também, a confiabilidade do sistema. Com o fato exposto, acredita-se que a reconfiguração de redes aéreas de distribuição de energia elétrica está diretamente relacionada a um problema de programação de natureza combinatória (PEREIRA, 2010). Sistemas de reconfiguração são de difícil tratamento devido a estas características e a formulação matemática com relação às restrições utilizadas para modelar o comportamento dos elementos do sistema (ABRADEE).

Assim, um dos primeiros passos para melhorar a qualidade deste fornecimento é a automação em subestações de distribuição. Substituindo-se relés eletromecânicos por dispositivos eletrônicos inteligentes que realizam funções de monitoramento e controle em conjunto com equipamentos motorizados. A automação de circuitos radiais abertos é o tipo de configuração mais empregado em empresas que adotam automação em redes de distribuição. O esquema de seu funcionamento pode ser notado na Figura 3, este é baseado em um circuito com duas fontes de alimentação e um ponto NA (normalmente

abertas). Nesta, há seis zonas de proteção independentes, por exemplo, na ocorrência de uma falha permanente, apenas o trecho entre duas chaves é isolado aguardando reparo, tendo reestabelecimento das cargas após o seccionamento, transferindo-as para outro alimentador, ou seja, reconfigurando o sistema (LEHTONEN et al., 2001).

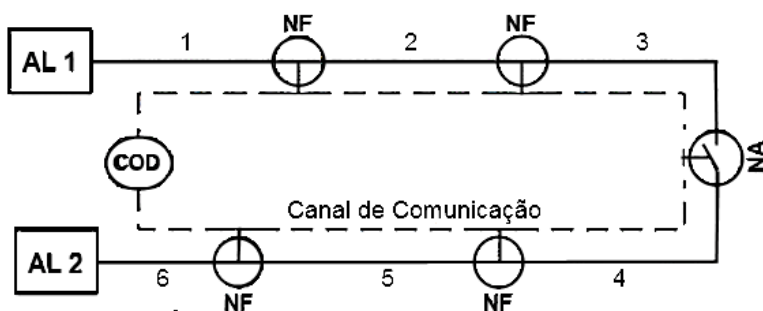


Figura 3. Chaves automatizadas em sistema radial aberto.

FONTE: LEHTONEN et al., 2001.

## 4 ALGORITMO GENÉTICO

Tarefas de busca e otimização possuem vários componentes, que abrangem desde o espaço de busca, considerando as possíveis soluções para um determinado objetivo, a funções de avaliação. As técnicas mais tradicionalmente utilizadas, iniciam-se com uma única solução a qual, iterativamente, é manipulada através de heurísticas diretamente relacionadas ao problema em questão. Deste modo, o algoritmo genético difere do método tradicional de busca e otimização, principalmente em aspectos relacionados tanto a codificação quanto relacionado à população (CARVALHO, 2014).

Algoritmos Genéticos (AG) são algoritmos baseados nos mecanismos de seleção natural e da genética. O desenvolvimento de simulações computacionais em sistemas genéticos iniciou-se em meados de 1960, por John Holland, com pesquisas na área, cujo objetivo inicial era estudar os fenômenos relacionados à adaptação das espécies. Estes usam estratégias de busca paralela e estruturada, porém aleatória, ignorando o aproveitamento de regiões promissoras do espaço, tendo melhores soluções e exploração do ambiente de busca. Mesmo assim, cada caminho é direcionado, pois se explora informações históricas para encontrar novos pontos de busca, resultando em um melhor desempenho. Em cada iteração, há princípios de seleção e reprodução que são aplicados a uma população de candidatos que se modificam a cada geração. Com a seleção, determina-se quais indivíduos irão se reproduzir, gerando novos descendentes para a próxima geração. Baseado na evolução biológica, geralmente mantém-se constante o número de soluções potenciais, e a cada iteração, modifica-se a maneira com que as soluções são postas. Assim, para utilizar o algoritmo genético como ferramenta para soluções, necessita-se a representação do problema de maneira que este possa trabalhar de modo adequado. Um modo usual é o uso de vetores de tamanho finito. Os indivíduos são reproduzidos por vetores binários, no qual cada elemento refere-se a ausência (0) ou presença (1) de uma característica (CARVALHO, 2014).

Um AG inicia-se com a criação de uma população inicial, geralmente gerada de maneira aleatória, como fora citado anteriormente, formada por indivíduos que serão utilizados para originar novas populações até encontrar a

solução final. Esta deve possuir uma vasta diversidade com características necessárias para que esteja presente as propriedades do sistema na população. Associando-se a avaliação desta, cada indivíduo recebe um valor *fitness* (adaptação) que indica quão adaptado o indivíduo está, sendo que a função *fitness* é dependente do problema a ser resolvido. Após avaliação da população, gera-se subgrupos desta, selecionando-se os que serão aplicados operadores genéticos: cruzamento e mutação, eliminando-se os menos aptos. Este processo, chamado de reprodução, é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada (CARVALHO, 2014).

A seleção separa os indivíduos mais adaptados da população, ou seja, indivíduos com melhores chances de sobreviver, para determinar quais irão participar da próxima fase e contribuir na formação da próxima geração. Existem diversos métodos de seleção, tais como os principais são: *rank*, roleta e torneio (KOZA, 1992).

Método por Rank – os indivíduos são classificados por seus valores *fitness*. Assim, mantém-se a população de forma ordenada em valores decrescentes. Melhores indivíduos possuem melhores posições, conseqüentemente, maiores chances de reprodução (BENNETT, 1997);

Método da Roleta – um dos métodos mais utilizados, este funciona como uma “roleta virtual” no qual cada indivíduo é alocado numa seção que é proporcional ao seu valor. Indivíduos com alta aptidão recebem uma porção maior da roleta, enquanto que os de baixa aptidão recebem uma porção menor, que está diretamente relacionada a probabilidade de ser escolhido. Para a seleção, usa-se um gerador de números aleatórios que simula o giro de uma roleta. Este processo é repetido quantas vezes for necessário, até que escolhe-se os que darão origem a próxima geração (CARVALHO, 2014);

Método por Torneio – método de seleção com  $n$  indivíduos, porém usualmente tem-se dois, os quais são escolhidos aleatoriamente, ou seja, com mesma probabilidade. Os escolhidos são comparados entre si, caracterizando um torneio. Aquele que possuir melhor valor de função é escolhido para reprodução (CARVALHO, 2014).

## 4.1 OPERADORES GENÉTICOS

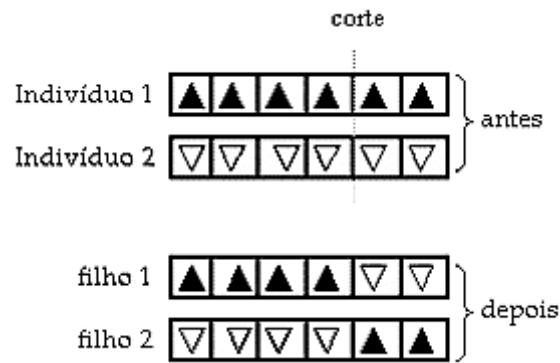
Procedimentos que ocorrem de modo iterativo para melhorar a qualidade genética de cada indivíduo, os operadores genéticos têm como função definir regras para uma renovação eficaz da população. Assim, seu princípio básico é transformá-la, através de sucessivas gerações, buscando resultados satisfatórios. Os operadores genéticos são essenciais, pois a população necessita manter sua diversidade, além das características adquiridas posteriormente. Deste modo, os principais operadores são: cruzamento (*crossover*) e mutação (CARVALHO, 2014).

### 1. Cruzamento

O algoritmo genético combina elementos das soluções existentes para gerar outras demais, com algumas características de cada. Nessa combinação, a operação é determinada como cruzamento, pois é inspirada em processos de reprodução dos seres vivos. Após a seleção dos indivíduos, o operador é aplicado de modo a realizar a troca de material genético entre os pares selecionados (CARVALHO, 2014).

Há diversas maneiras de executar uma operação de cruzamento, seus principais tipos são: Cruzamento de um ponto; Cruzamento de multipontos e Cruzamento uniforme (CARVALHO, 2014).

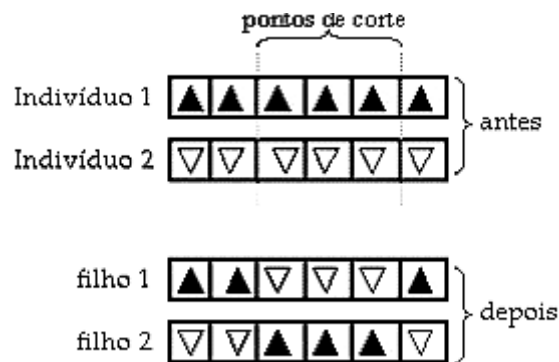
Cruzamento de um Ponto – este é aplicado a um par de indivíduos escolhidos de modo aleatório na população. Um ponto qualquer é escolhido para cruzamento, sendo assim, as informações posteriores a este ponto são concatenadas com as informações anteriores (CARVALHO, 2014). Na Figura 4, pode-se observar este processo.



**Figura 4. Cruzamento de um ponto.**

**FONTE: CARVALHO, 2014.**

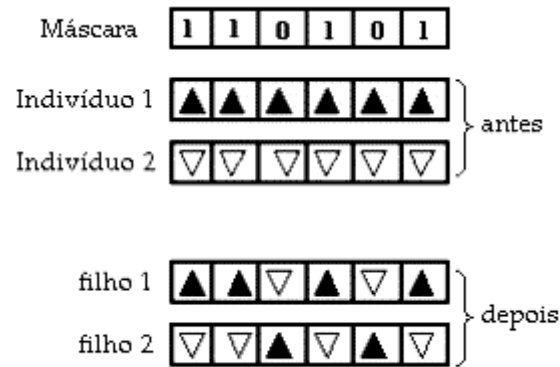
Cruzamento de Multipontos – difere-se do cruzamento de um ponto por haver muitos pontos de cruzamento (CARVALHO, 2014). Na Figura 5, tem-se dois pontos de corte escolhidos de modo aleatório.



**Figura 5. Cruzamento de multipontos.**

**FONTE: CARVALHO, 2014.**

Cruzamento Uniforme – este tipo de cruzamento utiliza uma máscara de *bits* aleatórios e esta é gerada para cada par de indivíduo. Na Figura 6, tem-se que o primeiro *bit* da máscara possui valor 1, assim o primeiro *bit* do indivíduo 1 é copiado para o primeiro *bit* do segundo indivíduo. Caso seja contrário, o primeiro *bit* do indivíduo 2 é copiado para a geração do indivíduo 1. O processo é repetido para todos os *bits* (CARVALHO, 2014).



**Figura 6. Cruzamento uniforme.**

**FONTE: CARVALHO, 2014.**

## 2. Mutação

Processo inspirado na mutação genética do DNA, o algoritmo faz periódicas variações aleatórias em um ou mais membros da população atual, de modo a produzir uma solução com novos candidatos. Assim, operadores de mutação têm como objetivo a introdução e manutenção da diversificação genética dos indivíduos, evitando possíveis perdas no cruzamento. Há diversos modos de executar uma mutação, a mais simples delas é no modo randômico. Este consiste na alteração de um gene em dado indivíduo escolhido de modo aleatório. Portanto, é possível controlar todo o processo de busca, influenciando diretamente na convergência (CARVALHO, 2014). Na Figura 7, pode-se observar um esquema gráfico do processo de mutação para inserção da variabilidade genética na população.



**Figura 7. Estrutura da ocorrência de mutação.**

**FONTE: Autoria Própria.**

## 4.2 PARÂMETROS GENÉTICOS

São denominados parâmetros genéticos características do algoritmo que se relacionam ao desempenho. O valor desses parâmetros são essenciais para melhorar seu comportamento, ou seja, fator determinante para se obter resultados satisfatórios para o problema (CARVALHO, 2014). Os principais parâmetros são:

População – a escolha do tamanho da população afeta a eficiência do algoritmo genético, influenciando na identificação de soluções factíveis. Com uma população relativamente pequena, o desempenho pode cair, pois o espaço de busca se torna limitado. Já com uma população grande, fornece-se uma cobertura representativa em relação ao problema, evitando convergências locais. Porém, para utilizar populações maiores, necessita-se de recursos computacionais mais sofisticados e maiores tempos para processamento (CARVALHO, 2014).

Taxa de Cruzamento – probabilidade de ocorrer cruzamento entre indivíduos selecionados. Quanto mais alta a taxa, mais rapidamente novos indivíduos são introduzidos na população. Porém, caso esta seja extremamente alta, pode-se provocar perda de bons indivíduos por serem retirados mais rapidamente da população. Se a taxa for muito baixa, a busca torna-se lenta a convergência (CARVALHO, 2014).

Taxa de Mutação – indica a possibilidade de mutação de indivíduos ao longo da evolução. Uma vez que esta taxa seja baixa, tem-se uma maior varredura do espaço de busca. Se esta for alta, a busca é considerada aleatória (CARVALHO, 2014).

## 4.3 ALGORITMO GENÉTICO E *PATH RELINKING*

De acordo com Glover et al. (2003), *Path Relinking* ou, também conhecido, Religamento de Caminhos, é sugerido com o objetivo de integrar estratégias para intensificar e diversificar um esquema de busca. Ou seja,



procura incorporar tributos e soluções de alta qualidade, para favorecer movimentos selecionados. Um processo equivalente seria a construção de caminhos utilizando uma combinação de várias soluções, com todas sendo examinadas.

Para qualquer método de busca, deve-se tratar com a ideia de manter um equilíbrio entre as soluções durante o processo. A proposta de *Path Relinking* é caracterizada como um instrumento capaz de permitir a integração das estratégias. Como esclarecimento, este pode ser utilizado em fase terminal de uma metaheurística para gerar novas soluções. A exploração de características e seleções são já conhecidas através de soluções guia (PARAJARA, 2013).

Como motivação, o Religamento de Caminhos tem como enfoque gerar um novo caminho entre soluções previamente determinadas por processos de busca. Na Figura 8, há duas seqüências de movimentos,  $x_1$ , considerada como solução início e  $x_n$ , a solução alvo. O caminho original é representado por segmentos de linha interrompida, enquanto o Religamento de Caminhos é representado por segmentos de linha sólida. Os caminhos gerados são baseados na seleção de movimentos e adotam trajetórias em que passos intermediários são determinados por uma função de avaliação. Essa função de avaliação, denominada solução guia, auxilia na tomada de decisões, neste caso, na escolha do trajeto em relação a  $x_{min}$  (PARAJARA, 2013).

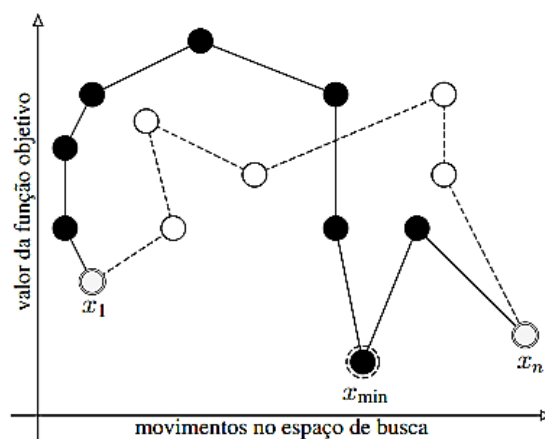


Figura 8. Exemplificação de *path relinking*.

FONTE: PARAJARA, 2013.

Com o objetivo de desenvolver um procedimento que intensifique a busca em regiões onde soluções de qualidade são encontradas, propõe-se a combinação de Algoritmo Genético e *Path Relinking*. O método proposto utiliza

o AG para armazenar um conjunto de soluções para serem utilizadas como propósito de guia. A cada iteração do AG, o *path relinking* é aplicado, através da melhor solução gerada, a uma dada solução. Ao testar todos os indivíduos gerados, busca-se verificar se houve melhora em uma das soluções em comparação com a solução dada como de partida. Caso haja, esta solução passa a ser a nova solução guia, até que todas as utilizadas convirjam para um mesmo resultado.

## 5 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

O problema de reconfiguração de alimentadores do sistema de distribuição de energia elétrica é modelado como um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM). Sua caracterização está relacionada a dois tipos de restrições, sendo físicas e operacionais. As restrições denominadas físicas referem-se aos limites dos componentes, tal como fluxo de potência aparente nos circuitos. As restrições operacionais são referidas a operações do sistema, tais como modo radial, cumprimento da lei de Kirchhoff, limite de tensão na barra, dentre outros. O modelo proposto segue descrito conforme o equacionamento seguinte (FIORAVANTI, 2014).

$$\text{Min } v = \sum_{(km) \in \Omega_k} [g_{km} n_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km})] \quad \text{Equação (1)}$$

s. a.

$$PS_k - Pd_k - \sum_{m \in \Omega_{km}} (x_{km} P_{km}) = 0 \quad \text{Equação (2)}$$

$$QS_k - Qd_k - \sum_{m \in \Omega_{km}} (x_{km} Q_{km}) = 0 \quad \text{Equação (3)}$$

$$\underline{V} \leq V_k \leq \bar{V} \quad \text{Equação (4)}$$

$$x_{km} (P_{km}^2 + Q_{km}^2) \leq \overline{S_{km}^2} \quad \text{Equação (5)}$$

$$x_{km} \in \{0,1\} \quad \text{Equação (6)}$$

$$\sum_{(km) \in \Omega_{km}} x_{km} = n_b - 1 \quad \text{Equação (7)}$$

$$P_{km} = V_k^2 \cdot g_{km} - V_k \cdot V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad \text{Equação (8)}$$

$$Q_{km} = V_k^2 \cdot g_{km} - V_k \cdot V_m (g_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad \text{Equação (9)}$$

Em que:

$\underline{V}$  – Magnitude de tensão mínima;

$\bar{V}$  – Magnitude de tensão máxima;

$n_b$  – Número de barras;

$Pd_k$  – Demanda de potência ativa na barra k;

$Qd_k$  – Demanda de potência reativa na barra k;

$g_{km}$  – Condutância do circuito k-m;

$b_{km}$  – Susceptância do circuito k-m;

$P_{km}$  – Fluxo de potência ativa da barra k para a barra m;

$Q_{km}$  – Fluxo de potência reativa da barra  $k$  para a barra  $m$ ;

$v$  – Perda total de energia;

$x_{km}$  – Variável binária relacionada ao circuito entre barra  $k$  e barra  $m$ ;

$V_k$  – Magnitude de tensão na barra  $k$ ;

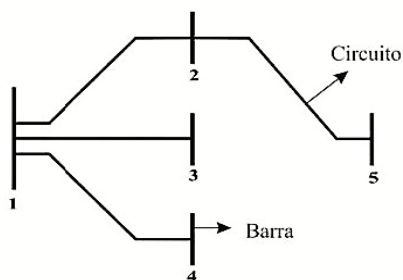
$\theta_{km}$  – Diferença de ângulo de fase entre barras  $k$ - $m$ ;

$PS_k$  – Potência ativa fornecida pela subestação na barra  $k$ ;

$QS_k$  – Potência reativa fornecida pela subestação na barra  $k$ .

Cada equação representada anteriormente possui sua particularidade. A Equação (1) é denominada como função objetivo do problema, no qual possui como objetivo a minimização de perdas ativas no sistema. As Equações (2) e (3) estão relacionadas a lei de Kirchhoff. Assim, quando há o balanço das potências em cada barra, estas garantem o cumprimento da primeira lei, onde em qualquer nó, a soma das correntes que o deixam iguala-se a soma das correntes que chegam até ele. No equacionamento (4), tem-se a restrição quanto aos limites de magnitude de tensão em cada barra do sistema. A Equação (5) equivale ao limite do fluxo de potência no circuito. A restrição (6) representa a característica binária da variável de decisão do problema, no qual se pode assumir dois estados: 0 (zero) quando o circuito está desligado e 1 (um) o circuito está ligado. A Equação (7) garante a radialidade juntamente com a Equação (2), sendo considerada como exigência típica do sistema de distribuição elétrico, assim como na reconfiguração. Por fim, os equacionamentos (8) e (9) garantem a segunda lei de Kirchhoff, no qual em qualquer malha é igual à soma algébrica das quedas de potencial (FIORAVANTI, 2014).

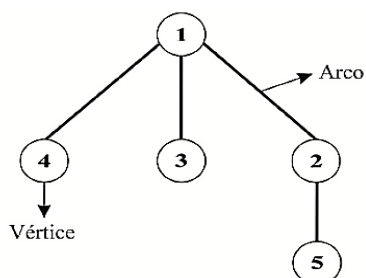
A caracterização radial do sistema de distribuição pode ser equiparada à árvore de um grafo. Assim, sabe-se que para este tipo de topologia para o sistema de distribuição com  $\Omega_b$  barras, deve-se ter  $\Omega_b - 1$  circuitos conectados. Para melhor entendimento, na Figura 9, pode-se observar um exemplo de um sistema com 5 barras.



**Figura 9. Sistema elétrico radial de 5 barras.**

**FONTE: SOUZA, 2008.**

Na Figura 10, representa-se o sistema apresentado na Figura 9, porém como uma árvore conexa.

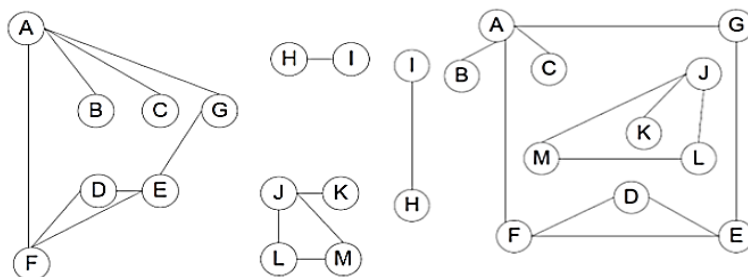


**Figura 10. Representação do sistema radial de 5 barras em árvore conexa.**

**FONTE: SOUZA, 2008.**

## 5.1 APLICAÇÃO DE GRAFOS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Há diversos problemas que são formulados com a composição de objetos e suas interconexões, sendo o circuito elétrico um exemplo, visto que seus elementos estão fisicamente conectados entre si. Desta forma, várias situações podem ser adequadamente representadas através de grafos. Na Figura 11, tem-se uma dessas situações (BENTO, 2013).



**Figura 11. Representação de grafos.**

**FONTE: BENTO, 2013.**

Assim, define-se como grafo o conjunto de vértices e arestas, os quais vértices denominam-se objetos simples que podem possuir nomes e propriedades. Já arestas, é a conexão entre dois vértices. Porém, para se processar grafos de modo computacional, necessita-se mapeá-los. Uma forma direta é a chamada Matriz de Adjacência. Trata-se de uma matriz quadrada com valores booleanos. Cada elemento da linha e coluna for equivalente a 1 (*true*) é porque se tem conexão entre estes vértices, 0 (*false*), não há conexão. Caso seja um grafo direcionado, seria da linha  $x$  para coluna  $y$  (BENTO, 2013).

A teoria de grafos é utilizada em diversas aplicações de representação, simulação e análise, principalmente, em redes de energia elétrica. Com a junção de métodos baseados em algoritmos genéticos para reconfiguração e restauração da interrupção de fornecimento de energia em situações de contingência, cria-se estratégias para rejeição de cargas em redes de distribuição. Esta é utilizada para demonstrar todo o sistema elétrico a partir da configuração de chaves que interligam seus componentes. No algoritmo genético, configura-se o conjunto destas chaves como cromossomos. Assim, armazena-se em cadeia dígitos binários como forma de identificação de estados Normalmente Abertos ou Normalmente Fechados (BENTO, 2013).

## 5.2 FLUXO DE CARGA E MÉTODO *BACKWARD AND FORWARD* EM SISTEMAS RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO

Como solução para a rede elétrica, em regime permanente para uma dada condição de operação, tem-se o cálculo do fluxo de carga. Para o resolver, necessita-se de dados do sistema, tais como: tensão na subestação, impedâncias dos ramos e as cargas nas barras. Deste modo, com o módulo de tensões nas barras e os respectivos ângulos, é possível calcular os fluxos de potência ativa e reativa nos elementos da rede. Assim, o algoritmo de fluxo de carga resulta na solução de um sistema de equações não lineares para buscar o estado de operação de uma determinada rede (FIORAVANTI, 2014).

Existem diversos algoritmos para cálculo do fluxo de carga, tais como Gauss, Gauss-Seidel, Newton-Raphson e suas versões desacopladas. Porém, o método de Newton-Raphson apresenta um desempenho computacional mais

elevado em comparação com os demais métodos. Este é um dos mais utilizados em análise de sistemas de transmissão de energia elétrica, já para sistemas de distribuição, há particularidades, como: operação em forma radial, o que simplifica a complexidade do problema, além da relação R/X ser elevada, mas dificulta a convergência com o uso deste método (FIORAVANTI, 2014).

Como representação matemática por impedância, os ramos (linhas e circuitos) interconectam barras onde podem estar localizadas cargas do sistema. Assim, as equações básicas são obtidas impondo a conservação das potências ativas e reativas em cada uma das barras. Como forma básica para este tipo de problema, associa-se quatro grandezas, as quais são descritas posteriormente (FIORAVANTI, 2014).

$\theta_k$  – Ângulo da tensão nodal na barra  $k$ ;

$P_k$  – Geração da potência ativa na barra  $k$ ;

$Q_k$  – Injeção da potência reativa na barra  $k$ ;

$I_{km}$  – Fluxo de corrente que sai da barra  $k$  em direção a barra  $m$ .

As barras podem ser caracterizadas em três tipos levando em consideração suas variáveis:

$PQ$  – Com  $V_k$  e  $\theta_k$  variáveis e  $P_k$  e  $Q_k$  constantes;

$PV$  –  $Q_k$  e  $\theta_k$  variáveis e  $P_k$  e  $V_k$  constantes;

$V\theta$  –  $P_k$  e  $Q_k$  variáveis e  $V_k$  e  $\theta_k$  constantes.

Dentre os tipos apresentados, a barra PQ representam a maioria do sistema elétrico, pois possuem cargas conectadas. O segundo tipo mais comum é a PV, nestas se tem uma tensão controlada, porém, normalmente não estão presentes nos sistemas de distribuição. Deste modo, constata-se que a barra de referência é única e suficiente para a formulação do problema, esta permite a fixação do valor do ângulo de referência, além de fechar o balanço de potência na rede. Entretanto, as perdas ativas não são conhecidas, sendo necessário um conjunto de equações para satisfazer a Primeira Lei de Kirchhoff. Sendo assim, tem-se as Equações (10) e (11) (GUIMARÃES, 2005).

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad \text{Equação (10)}$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad \text{Equação (11)}$$

$k = 1, \dots, NB$  – Número de barras da rede;

$\Omega_k$  – Conjunto de barras vizinhas a  $k$ ;

$Q_k^{sh}$  - Componente de injeção de potência reativa devido a *shunt* na barra  $k$ .

Como finalização, o equacionamento geral para encontrar os fluxos de potência ativo e reativo nos ramos do sistema são expressos nas Equações (12) e (13).

$$P_{km} = (V_k^2)g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - V_k V_m b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad \text{Equação (12)}$$

$$Q_{km} = -(V_k^2)(b_{km} + b_{km}^{sh}) - V_k V_m b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - V_k V_m g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad \text{Equação (13)}$$

$b_{km}^{sh}$  – Susceptância *shunt* entre as barras  $k$  e  $m$ .

Para cálculo das variáveis e apresentar o processo iterativos das barras finais em direção à subestação e vice-versa, utiliza-se o método determinado como varredura. Este consiste na escolha de um valor para módulo de tensão nas barras, assumindo  $V_k = V_{ref} + j0$ , denominando  $V_{ref}$  como módulo de tensão da subestação, pois com as tensões escolhidas, possibilita-se conhecer a corrente de carga em todas as barras e em todos os ramos do sistema (BRANDINI, 2000).

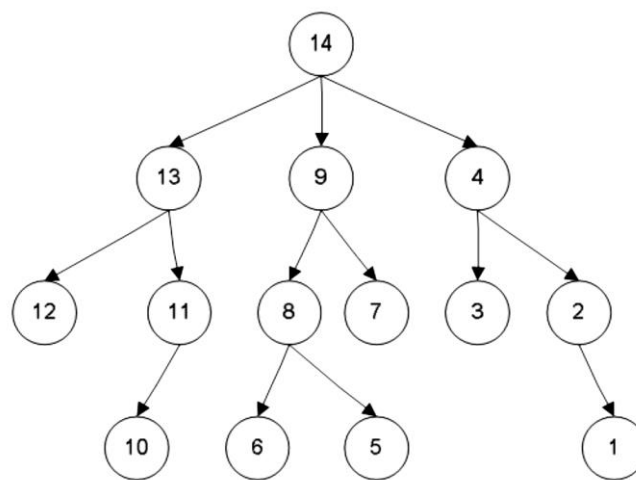
Inicialmente, implementa-se o algoritmo com iterações percorrendo das barras extremas em direção a subestação, método denominado como *backward*. Deste modo, as correntes são calculadas nos ramos, conseqüentemente, as perdas ativas e reativas, encontrando um valor aproximado para a perda do sistema. Com este método, conhece-se a corrente que está saindo da subestação. Em contrapartida, através dos resultados obtidos, inicia-se o processo a partir da subestação, encontrando novos valores de tensões em todas as barras do sistema, sendo com direção a partir da subestação até os ramos extremos (*forward*). Assim, com novos valores de correntes nos ramos, tem-se novos valores de perdas ativas e reativas (BORGES, 2011). O critério de parada é determinado através da variação de perdas ativas entre duas iterações



consecutivas, expressa por  $\Delta P_{ativa}$ , especificado pela tolerância, sendo menor ou igual,  $\Delta P_{ativa} \leq \epsilon$  (BRANDINI, 2000).

### 5.2.1 Cálculo das Variáveis do Sistema

Para implementação do algoritmo de fluxo de carga radial em um sistema de distribuição de energia elétrica, é necessário organiza-lo de modo a facilitar a identificação das barras e os sentidos dos fluxos (FIORAVANTI, 2014). Nas Figuras 12 e 13, pode-se observar o funcionamento do processo de ordenação.



**Figura 12. Sistema de 14 barras sem ordenação.**

**FONTE: BORGES, 2011.**

A ordenação ocorre escolhendo-se uma barra para ser a inicial, a partir desta, é feita uma renumeração das demais por camada, identificando novos sentidos do fluxo do sistema. Como o problema apresentado tem como foco a reconfiguração do sistema de distribuição, determina-se a barra inicial como sendo a subestação. Na Figura 13, ilustra-se o sistema ordenado (FIORAVANTI, 2014).

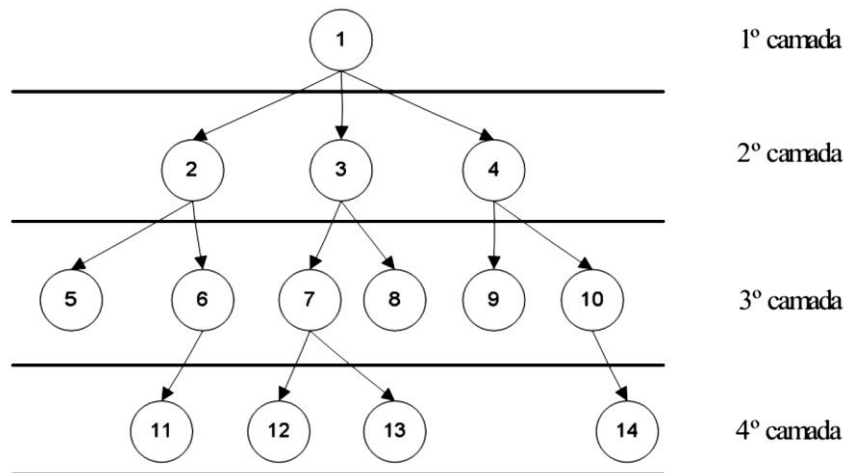


Figura 13. Sistema de 14 barras com ordenação.

FONTE: BORGES, 2011.

Com o sistema organizado, inicia-se o processo do cálculo de corrente e tensão de carga nas barras, conseqüentemente, das perdas de potência ativa e reativa. Dado duas barras no sistema de distribuição radial, a carga da barra  $k$  é representada pela variável  $S_k$  e a tensão por  $V_k$  (FIORAVANTI, 2014). Na Figura 14, tem-se esta representação.

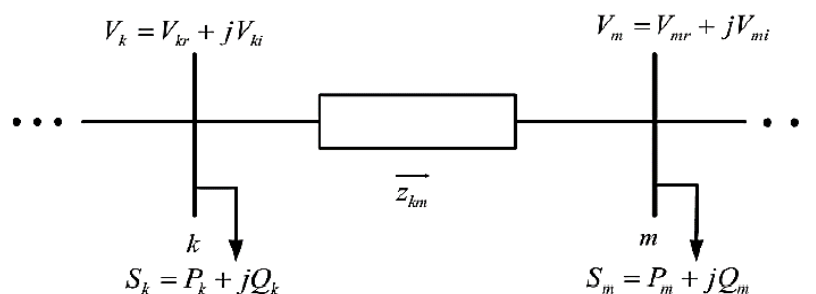


Figura 14. Representação de duas barras do sistema de distribuição.

FONTE: BRANDINI, 2000.

Analisando o circuito esquemático da Figura 14, a corrente injetada no sistema dado pela barra  $k$  é expressa nas Equações (14) e (15).

$$I_k = \left(\frac{S_k}{V_k}\right)^* \rightarrow I_k^* = \frac{P_k + jQ_k}{V_{kr} + jV_{ki}} = \frac{P_k + jQ_k}{V_{kr} + jV_{ki}} \cdot \frac{(V_{kr} - jV_{ki})}{(V_{kr} - jV_{ki})} \quad \text{Equação (14)}$$

$$I_k = \frac{(P_k + jQ_k) \cdot (V_{kr} - jV_{ki})}{(V_{kr} + jV_{ki})^2} = \frac{(P_k V_{kr} + Q_k V_{ki}) + j(P_k V_{ki} - Q_k V_{kr})}{(V_{kr} + jV_{ki})^2} \quad \text{Equação (15)}$$

Isolando a parte real da parte imaginária na equação resultante, tem-se as Equações (16) e (17).

$$I_k^{re} = \frac{(P_k V_{kr} + Q_k V_{ki})}{(V_{kr} + jV_{ki})^2} \quad \text{Equação (16)}$$

$$I_k^{im} = \frac{j(P_k V_{ki} - Q_k V_{kr})}{(V_{kr} + jV_{ki})^2} \quad \text{Equação (17)}$$

Para cálculo das tensões, usa-se o método de varredura em barras do sistema de distribuição. Porém, para as calcular, necessita-se conhecer o fluxo de corrente nos ramos do sistema. A corrente complexa em um determinado ramo  $km$  pode ser representado conforme Equação (18).

$$I_{km} = I_{km}^{re} + jI_{km}^{im} \quad \text{Equação (18)}$$

$I_k^{re}$  – componente real da corrente no ramo  $km$ ;

$I_k^{im}$  – componente imaginária da corrente no ramo  $km$ .

A corrente  $I_{km}$  é calculada através das correntes injetadas em cada barra do sistema. Deste modo, por definição, tem-se que a tensão pode ser encontrada através do equacionamento (19), (20), (21) e (22).

$$V_k = V_{kr} + jV_{ki} = V_m + (r_{km} + jx_{km})(I_{km}^{re} + jI_{km}^{im}) \quad \text{Equação (19)}$$

$$V_{kr} + jV_{ki} = V_{mr} + jV_{mi} + (r_{km}I_{km}^{re} - x_{km}I_{km}^{im}) + j(x_{km}I_{km}^{re} + r_{km}I_{km}^{im}) \quad \text{Equação (20)}$$

$$V_{mr} = V_{kr} - r_{km}I_{km}^{re} + x_{km}I_{km}^{im} \quad \text{Equação (21)}$$

$$V_{mi} = V_{ki} - r_{km}I_{km}^{im} - x_{km}I_{km}^{re} \quad \text{Equação (22)}$$

Após calculadas as tensões e correntes do sistema, possibilita-se encontrar as perdas ativas e reativas. Juntamente com os parâmetros encontrados, representa-se estas pela Equação (23).

$$S_{km} + S_{mk} = P_{kmp} + jQ_{kmp} = \Delta V_{km} I_{km}^* = (r_{km} + jx_{km}) I_{km} I_{km}^* = (r_{km} + jx_{km}) I_{km}^2 \quad \text{Equação (23)}$$

Por fim, as perdas de potência ativa e reativa do ramo que interliga a barra  $k$  à barra  $m$  pode ser expressa nas Equações (24) e (25), respectivamente.

Considerando como totais do sistema elétrico de distribuição, soma-se as resultantes, gerando as Equações (26) e (27).

$$P_{kmp} = r_{km} I_{km}^2 \quad \text{Equação (24)}$$

$$Q_{kmp} = x_{km} I_{km}^2 \quad \text{Equação (25)}$$

$$P_{total} = \sum_{(k,m) \in \Omega} r_{km} I_{km}^2 \quad \text{Equação (26)}$$

$$Q_{total} = \sum_{(k,m) \in \Omega} x_{km} I_{km}^2 \quad \text{Equação (27)}$$

O encerramento das iterações dá-se pela variação das perdas ativas entre a atual e sua consecutiva. Caso a variação for menor que a tolerância estipulada, este é finalizado, porém, se o critério de parada não for satisfeito, o algoritmo executa mais iterações até que este seja atendido (FIORAVANTI, 2014).

### 5.2.2 Particularidades do Sistema de Distribuição

Uma das restrições relacionadas a reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição é a radialidade, pois esta é de extrema importância, devendo ser adequada ao planejamento para uma operação eficiente e confiável. O principal objetivo deste tipo de problema é encontrar uma solução radial com o número mínimo possível em relação a perdas. Caracterizado por sua programação não linear inteira mista, a radialidade torna-se complexa (FIORAVANTI, 2014).

Conforme Equação (28), este problema pode ser resolvido por uma relação entre  $n_r$ , número de ramos ativos, e  $n_b$ , número de barras do sistema (LAVORATO et al., 2012).

$$n_r = n_b - 1 \quad \text{Equação (28)}$$

A topologia radial é uma condição necessária, porém não suficiente para determinar uma solução factível. Para resolver problemas do sistema de distribuição em relação a sua caracterização, tem-se como foco a utilização de grafos, nós e ramos. Comparada a uma árvore, a topologia representada por um grafo deve ser interligada, porém sem presença de laços. Deste modo, para ser

representado o sistema como um todo, satisfaz-se duas condições (LAVORATO et al., 2012):

1. A topologia deve se enquadrar a  $n_b-1$  ramos;
2. A topologia deve ter todas as barras conectadas.

Para ilustrar as questões apresentadas com suas restrições respeitadas, na Figura 15 ilustra-se um sistema com 14 barras e 16 ramos. As condições são satisfeitas, pois há apenas 13 ramos ativos com todas as barras conectadas (FIORAVANTI, 2014).

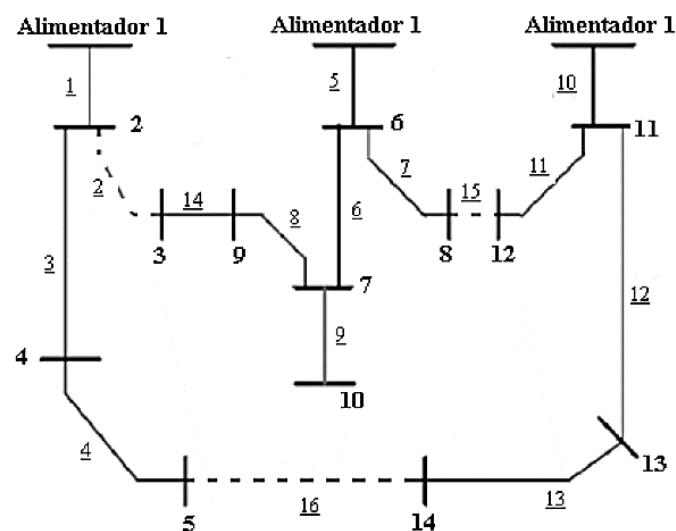


Figura 15. Sistema de distribuição com 14 barras.

FONTE: FIORAVANTI, 2014.

Para que uma reconfiguração seja dada como aceitável, é preciso analisar na rede se não há presença de laços, alterando sua topologia. Para isto, em uma rede malhada, determina-se quantos laços há independentes, o seja, quantos *loops* existem. A Equação (29) leva em consideração o número de ramos e o número de barras para encontrar a quantia de laços fundamentais (LF) (FIORAVANTI, 2014).

$$LF = n_r - n_b + 1$$

Equação (29)

Com o auxílio da Figura 16, pode-se identificar através de um sistema esquemático, a quantia de *loops* existentes tornando a rede malhada.

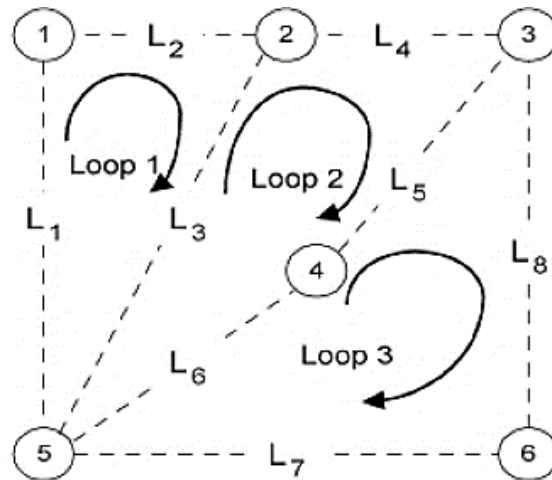


Figura 16. Análise de loops em uma rede malhada.

FONTE: MENDOZA et al., 2006.

Após análise do sistema em rede malhada, cria-se vetores  $L_i$ , estes são compostos por um conjunto de ramos que formam o laço independente. Nenhum desses possuem ramos de modo repetido, ou seja, um pertencente a mais de um *loop*. Iniciando-se pelo primeiro laço  $L_1$ , as lacunas são preenchidas com todos os ramos que fazem parte do *Loop1*;  $L_2$  é formado por todos os ramos que fazem parte deste laço, retirando-se os que estão presentes em  $L_1$ , os que estão em comum tanto com  $L_1$  quanto com  $L_2$ ; por fim,  $L_3$  possui os demais ramos do circuito pertencente ao *Loop3*. Deste modo, os três vetores são apresentados nas Equações (30), (31) e (32), respectivamente.

$$Loop_1 = [L_1, L_2, L_3] \quad \text{Equação (30)}$$

$$Loop_2 = [L_4, L_5, L_6] \quad \text{Equação (31)}$$

$$Loop_3 = [L_7, L_8] \quad \text{Equação (32)}$$

Para idealizar as comutações do sistema, são utilizadas codificações binárias. Com a Figura 17, tem-se que a necessidade da representação dos estados das chaves, Normalmente Aberta ou Normalmente Fechada, conforme a reconfiguração. Neste exemplo, os ramos  $L_2$ ,  $L_5$  e  $L_7$  são representados por

linhas pontilhadas, demonstrando ser chaves NA, sendo consideradas com nível 0 (zero).

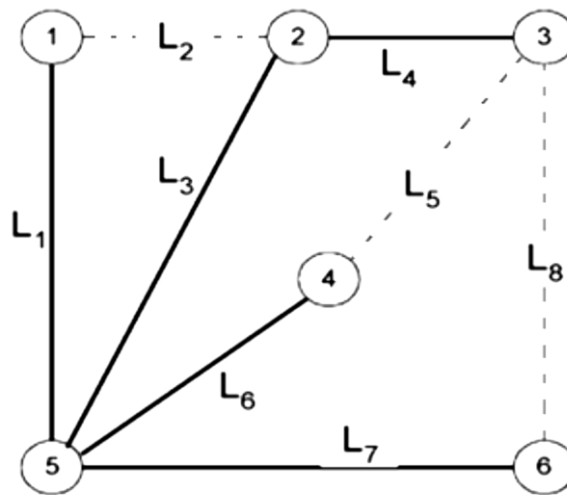


Figura 17. Solução exemplo de uma rede malhada.

FONTE: MENDOZA et al., 2006.

## 6 METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO A PROBLEMAS DE RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Nesta seção, descreve-se a metodologia empregada neste projeto, ou seja, desde os princípios básicos, tais como implementação até aos critérios de parada. A priori, utilizou-se dois sistemas para análise e comparação do processo utilizado. Cada um é caracterizado por sua complexidade e propriedades particulares, porém, o sistema dado como inicial, foi utilizado apenas para observação do método utilizado e dos resultados em relação ao fluxo de potência desenvolvido, a fim de testar quão próximas são dadas as mesmas soluções, conforme seções subsequentes. Os sistemas utilizados, tanto em relação a comparação de resultados quanto o sistema teste de Baran (1989), são encontrados no Apêndice deste trabalho.

O desenvolvimento deste trabalho é separado em 3 etapas principais, as quais são descritas a seguir:

ETAPA 1 – refere-se a análise do problema e desenvolvimento da implementação do algoritmo genético. Nesta, descreve-se os requisitos que são necessários para sua execução aos sistemas de distribuição;

ETAPA 2 – testa-se o algoritmo do fluxo de potência implementado em um sistema exemplo de 14 barras, comparando os dados obtidos com o sugerido por Fioravanti (2014);

ETAPA 3 – aplica-se o algoritmo genético desenvolvido ao sistema proposto, gerando soluções propostas.

### 6.1 ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

O algoritmo genético pode ser considerado como um método utilizado para encontrar soluções de boa qualidade em um problema, consideravelmente, complexo. Como fora dito nas seções anteriores, este é inspirado na seleção natural e reprodução genética para resolução de problemas. Os cromossomos se reproduzem por processos de *crossover*, a qual estas geram novos cromossomos de modo a obter uma solução factível (HAUPT & HAUPT, 2004).



A reconfiguração tem como principal objetivo manter o sistema em estado de pré-falha, quando necessário. O sistema de proteção controla, de modo contínuo, a rede e o fluxo de potência, assim, a metodologia de reconfiguração modifica o sistema de chaves, ou seja, o estado em que estas se encontram, para o sustentar em operação. Quando este está em interrupção, o sistema de proteção deve agir, detectando e localizando a zona em que ocorreu o problema, isolando-o, aumentando a confiabilidade e tornando, praticamente, contínuo o fornecimento de energia elétrica ao consumidor final.

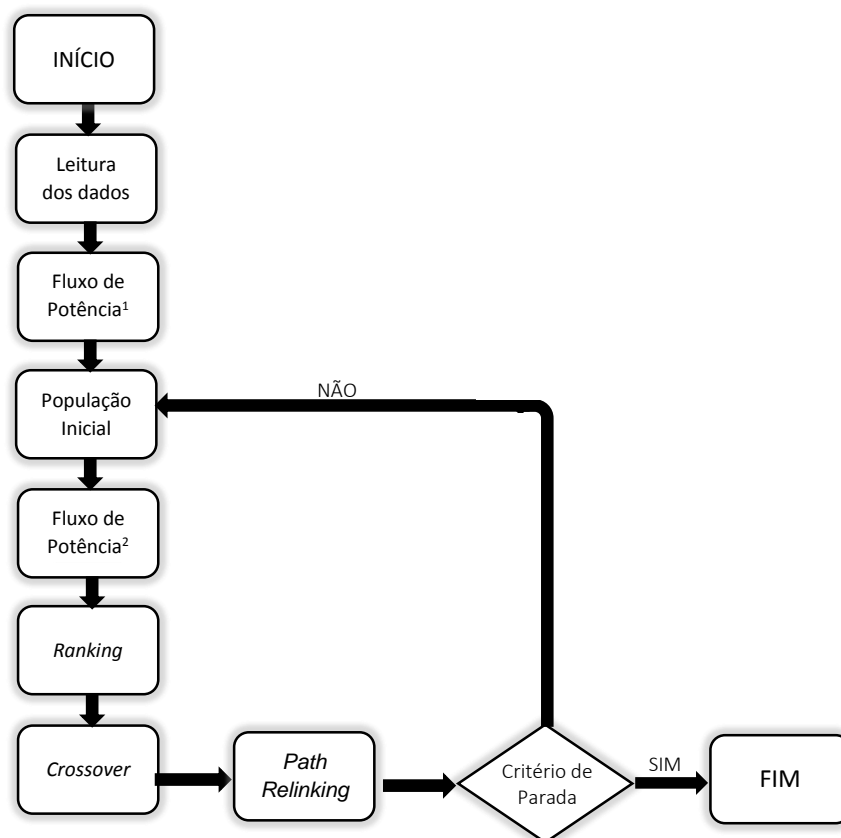
Assim, o algoritmo de reconfiguração de sistemas de distribuição determina, através de método heurístico, uma nova configuração após falhas e interrupções, tendo como base o fluxo de potência e a restrição de radialidade. Caso a suposta solução tenha um valor maior que a do sistema anterior, esta é rejeitada a fim de minimizar as perdas do fornecimento de energia. Na Figura 18, tem-se o fluxograma do algoritmo implementado, no qual a síntese dos processos utilizados para resolução da proposta deste trabalho são:

- Análise do circuito inicial;
- Reconfiguração do sistema;
- Análise das possíveis soluções de reconfiguração do sistema;
- Comparação dos resultados obtidos com o circuito inicial;
- Apresentação da solução final.

Como início do programa, tem-se o carregamento dos dados do sistema. Neste, divide-se em três matrizes principais: matriz de dados, onde consta a potência ativa, potência reativa, a reatância e a impedância dos ramos; matriz de nós, nesta há a representação das possíveis ligações que há no sistema; e por último, matriz de possíveis laços, conforme apresentado na seção anterior. A partir destas, é possível executar toda a parte de implementação do algoritmo genético para manipulação dos resultados, com a finalidade de encontrar uma solução factível.

Para análise do sistema de distribuição, através do equacionamento do fluxo de potência, encontra-se as correntes e tensões em cada ramo e nó, respectivamente. Ao encontra-las, é possível determinar as perdas presentes. Com os resultados obtidos, começa a etapa relacionada à reconfiguração dos sistemas de distribuição. Assim, no fluxograma presente, pode-se observar, de modo simplificado, as fases que constam no algoritmo proposto, no qual este é

dividido entre: início, leitura dos dados, cálculo do fluxo de potência do sistema inicial, representado como Fluxo de Potência<sup>1</sup>, para comparações com os demais resultados obtidos no Fluxo de Potência<sup>2</sup>, soluções subsequentes, e apresentação de soluções através do algoritmo genético.



**Figura 18. Fluxograma simplificado do algoritmo genético para reconfiguração do sistema de distribuição.**

**FONTE: Autoria Própria.**

Através dos parâmetros encontrados nos sistema, inicia-se a geração da população inicial. Para encontra-las, o método utilizado foi aleatório, ou seja, foi dividido em diversas possíveis soluções, nestas, para cada indivíduo, escolheu-se os ramos pertencentes. Para melhor entendimento desta etapa, tem-se a sua representação no Algoritmo 1.  $P_i$  seria a representação do número de indivíduos da população inicial. Assim, faz-se o carregamento dos dados em matrizes auxiliares de modo a não interferir na configuração inicial do sistema, e após este procedimento, a partir da linha 15, faz-se o carregamento da população.

Para que este procedimento seja válido, a variável que recebe a posição aleatória da matriz de laços necessita estar entre o intervalo de colunas pertencentes a este. Obrigatoriamente, o método aleatório tem que utilizar um conjunto de números que possua validade, para que o método seja concretizado. Deste modo, pode-se observar no Algoritmo 1, que das linhas 1 a 14, há carregamento de informações, dados que:  $N_r$ , número de ramos no sistema;  $Dados_1$ , matriz de dados, assim como  $Dados_{inicial}$ ;  $N_b$ , número de barras;  $RamosAtivos_1$ , matriz de representação dos ramos ativos e inativos, assim como  $RamosAtivos$ ;  $NodoWay$  para representação das possíveis ligações de cada nó.

---

**Algoritmo 1** *Análise do Sistema de Distribuição - População Inicial*

---

```

1: Carregar Sistema de Distribuição Inicial
2: for  $j \leftarrow 1,2,3...P_i$  do
3:   for  $i \leftarrow 1,2,3...N_r$  do
4:      $Dados_1 \leftarrow Dados_{inicial}$ 
5:   end for
6: end for
7: for  $j \leftarrow 1,2,3...P_i$  do
8:   for  $i \leftarrow 1,2,3...N_b$  do
9:      $RamosAtivos_1 \leftarrow RamosAtivos$ 
10:   end for
11: end for
12: for  $i \leftarrow 1,2,3...N_r$  do
13:    $NodoWay_1 \leftarrow Nodo_{way}$ 
14: end for
15: for  $i \leftarrow 1,2,3...L_F$  do
16:    $d \leftarrow rand()$ 
17:    $P_i \leftarrow L_F(d)$ 
18: end for

```

---

## Seleção

O algoritmo proposto tem como método de seleção a abordagem por *ranking*. Ao carregar toda a população inicial, estes são ordenados conforme as perdas ativas obtidas com o *backward and forward*. Após este processo, determina-se as 10 melhores cujo objetivo é o operador de cruzamento ser realizado. O procedimento de seleção se repete em todas as iterações necessárias, até que o critério de parada determinado seja atingido.

Após a geração da população inicial, calcula-se o fluxo de potência de cada indivíduo, os ordenando conforme as perdas obtidas em cada suposta reconfiguração. Para encontrar soluções factíveis, verifica-se se os resultados foram satisfatoriamente melhores do que a suposta solução inicial. Caso esta condição seja atendida, ordena-se em método *ranking* os valores obtidos, selecionando os cinco melhores pares de indivíduos da população para iniciar o método de cruzamento (*crossover*), o qual é representado no Algoritmo 2.

---

### Algoritmo 2 *Análise do Sistema de Distribuição - Crossover (Geração de Filhos)*

---

```

1: while Condição ≠ 0 do
2:    $d \leftarrow \text{rand}()$ 
3:   if  $d > 0 \ \& \ d \leq x$ 
4:      $F_{P_i} \leftarrow P_i$ 
5:      $F_{P_i}(d) \leftarrow P_i'(d)$ 
6:     Condição ← 0
7:   end if
8: end while
9: for  $i \leftarrow 1, 2, 3 \dots L_F$  do
10:   $Dados_1(d) \leftarrow 0$ 
11: end for

```

---

No Algoritmo anteriormente apresentado, tem-se o carregamentos dos supostos melhores indivíduos gerados em modo aleatório. Após esta etapa,

inicia-se a geração de filhos, com o objetivo de encontrar uma melhor solução para a reconfiguração do sistema de distribuição. O cruzamento acontece de modo também aleatório, escolhendo-se em qual parte haverá o *crossover*.

## Cruzamento

Com o objetivo de melhorar e maximizar o processo de combinação de características entre os diversos indivíduos, optou-se pelo cruzamento que altera durante cada iteração do código implementado. Após processo de seleção, elege-se pares de cromossomos, definindo-se um ponto de corte para cruzamento, a posição varia conforme a iteração.

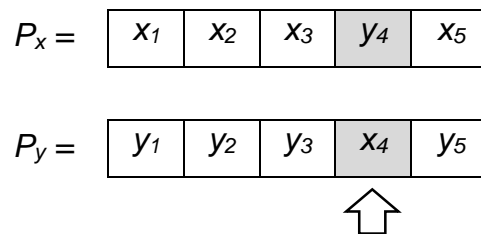


Figura 19. Método de cruzamento.

FONTE: Autoria Própria.

Conforme descrito no Algoritmo 2 e apresentado na Figura 19, o cruzamento ocorre selecionando a posição em que o ocorrerá. Ao ser identificada tal posição, há a troca de material genético entre os dois indivíduos selecionados, gerando mais dois indivíduos correspondentes a essa troca de material genético. Ao término do *crossover*, calcula-se novamente o fluxo de potência para cada nova suposta solução encontrada, ordena-se todas as soluções em relação às perdas ativas de cada uma, juntamente com a população inicial. Ao finalizar esta etapa, escolhe-se o melhor indivíduo e inicia-se a fase do *path relinking*, conforme Algoritmo 3.

---

**Algoritmo 3** *Path Relinking – Religamento de caminhos*


---

```

1: Carregar todas Soluções Geradas.
2: best ← Melhor solução;
3: for  $i \leftarrow 1, 2, 3 \dots LF$  do
4:   for  $j \leftarrow 1, 2, 3 \dots N_b$  do
5:     SoluçãoRelig ← Chave LF alterada;
6:   end for
7: end for
8: Fluxo de Potência para cada solução;
9: for  $i \leftarrow 1, 2, 3 \dots \text{Número de Soluções}$  do
10:  Se SoluçãoRelig < best então
11:    best ← SoluçãoRelig;
12:  end if
13: end for

```

---

Com a ordenação das possíveis soluções obtidas através do Algoritmo Genético, por método *ranking*, seleciona-se a melhor solução. Ao identifica-la, determina-se uma possível solução guia para o *path relinking*. Considera-se a demais como futuras candidatas a melhor solução a ser encontrada. Permutando entre posições, substitui-se uma a uma, ou seja, a cada posição, substitui-se todas as mesmas posições, pela chave encontrada na Solução *best*. Após substituição, identifica-se se há nova solução guia encontrada, ou seja, com perda ativa no sistema de distribuição menor que a utilizada como referência. Caso haja, substitui-se a anterior pela nova melhor solução, inicia-se o processo novamente, caso não seja encontrado, continua-se avançando para a próxima posição. A fase de *path relinking* só é finalizada quando todas as soluções convergirem para um mesmo valor.

Ao encontrar a melhor solução, compara-se esta encontrada, denominada como *SoluçãoRelig*, em relação à melhor encontrada pelo algoritmo genético. Ao ser analisada, verifica-se se a solução de religamento é melhor que a solução do AG, caso seja, esta é substituída e inicia-se uma nova iteração.

O critério de parada foi determinado com base nos testes que são apresentados na seção posterior. Caso os parâmetros sejam satisfatórios, ou seja, as perdas sejam menores que a do sistema inicialmente apresentado, há a reconfiguração do sistema de distribuição.

## 6.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO COM 14 BARRAS

Como início, testou-se, conforme Fioravanti (2014), um sistema de distribuição composto por 14 barras, 13 barras de carga, 1 subestação e 16 circuitos, apresentado, anteriormente, na Figura 15. Para análise, na Figura 20, configura-se o sistema malhado, para identificação dos laços fundamentais formados.

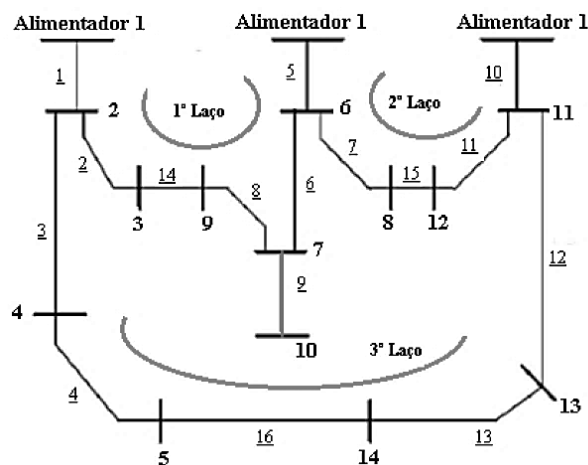


Figura 20. Sistema de distribuição com 14 barras.

FONTE: FIORAVANTI, 2014.

Desta forma, conforme os passos descritos nas seções anteriores, identifica-se, através dos *loops*, os conjuntos de ramos separando-os em vetores, denominados:  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  e  $F$ , respectivamente.

$$L_1 = \{1, 2, 14, 8, 6, 5\}$$

$$L_2 = \{7, 15, 11, 10\}$$

$$L_3 = \{3, 4, 16, 13, 12\}$$

$$F = \{9\}$$

Analisando o sistema como um todo, subentende-se que o número de laços fundamentais é igual ao número de ramos que são desligados. Assim, uma proposta inicial, ou seja, a população inicial deste problema é simplificado com a composição de  $P_i$ , o qual assume o formato conforme modelo esquemático apresentado em formato vetorial.

$$P_i = \{L_1, L_2, L_3\}$$

Cada parte constituinte deste vetor é ocupada por um ramo que será desconectado, pertencente a cada um dos laços encontrados. Exemplificando, será utilizado um ramo referente ao conjunto  $L_1$  na primeira posição do vetor  $P_i$ , na segunda posição preenche-se por um ramo de  $L_2$  e na terceira parte, por um elemento de  $L_3$ .

Após esta definição, gera-se com os laços fundamentais e a codificação do vetor com as soluções propostas, a população inicial, de maneira aleatória. Esta tem que estar junto ao critério para cada posição de solução, correspondendo aos laços fundamentais permutados. Determinando-se a  $P_i$ , obtém-se os seguintes parâmetros:

$$P_1 = \{14, 07, 13\}$$

$$P_2 = \{01, 11, 04\}$$

$$P_3 = \{02, 11, 16\}$$

$$P_4 = \{14, 10, 12\}$$

$$P_5 = \{06, 15, 16\}$$

Conforme Fioravante (2014), os indivíduos das populações  $P_1$  e  $P_3$ , foram selecionados para análise comparativa dos resultados. Após cálculo, chegou-se as respectivas funções objetivo relacionadas as perdas do sistema. Para a população inicial  $P_1$ , encontrou-se o valor de  $F_{P1}$  e para  $P_3$ , de  $F_{P3}$ .

$$F_{P1} = 508,03 \text{ kW}$$

$$F_{P3} = 704,11 \text{ kW}$$



Com as respectivas soluções iniciais escolhidas, determina-se o ponto de recombinação entre estas, de modo a gerar novos filhos em busca de uma solução factível. Assim, o autor realiza a permutação na posição de número três, no qual o *Filho<sub>1</sub>* recebe o valor de  $P_3$  neste determinado ponto, como *Filho<sub>2</sub>* recebe de  $P_1$ . Com essas mudanças, os filhos gerados possuem os seguintes ramos:

$$\text{Filho}_1 = \{14, 07, 16\}$$

$$\text{Filho}_2 = \{02, 11, 13\}$$

As respectivas soluções da função objetivo, determinante para a solução final, tem-se que:

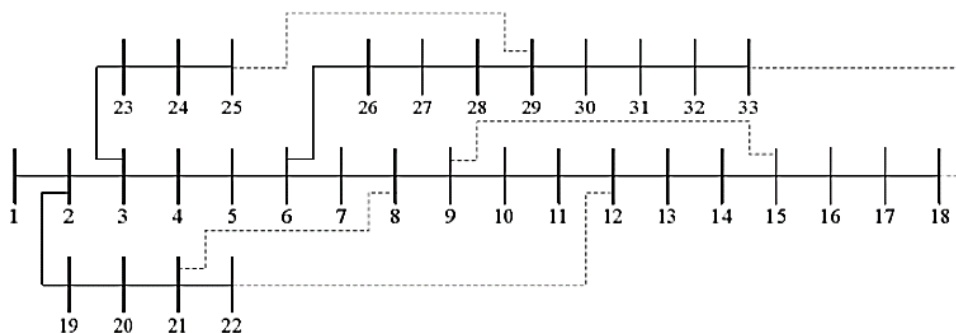
$$F_{F1} = 483,85 \text{ kW}$$

$$F_{F3} = 728,51 \text{ kW}$$

Resulta-se como melhor dos indivíduos, o *Filho<sub>1</sub>*. Deste modo, a partir da análise do sistema desenvolvido por Fioravante (2014) e comparação dos cálculos feitos pelo autor quanto para observação do fluxo de potência implementado, os quais foram correspondentes. Aplica-se o algoritmo genético e *path relinking* para análise do sistema sugerido para resolução do problema, conforme seção seguinte, Etapa 3.

### 6.3 APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO E *PATH RELINKING* A UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO COM 33 BARRAS

O sistema utilizado para obtenção de soluções através do algoritmo genético proposto, têm como características 33 barras, sendo 32 barras com carga, 1 subestação e 37 circuitos. A tensão base utilizada para cálculos é de 12,66 kV, sendo que as condições de carga totais são iguais a 3715 kW e 2315 kVAr (GUIMARÃES, 2005). Na Figura 21, tem-se o sistema referenciado.



**Figura 21. Sistema de Distribuição de 33 barras.**

**FONTE: GUIMARÃES, 2005.**

Em sua representação, a barra determinada como número 1, é considerada a subestação. As linhas pontilhadas são as chaves representadas para o sistema inicial como NA, já as demais estão em estado NF. Como início da resolução, calculou-se o fluxo de potência com o sistema de distribuição sem reconfiguração, ou seja, conforme Figura 21. Deste modo, na Tabela 1, pode-se observar os resultados das tensões obtidas em cada barra.

**Tabela 1 - Tensões obtidas no sistema de 33 barras.**

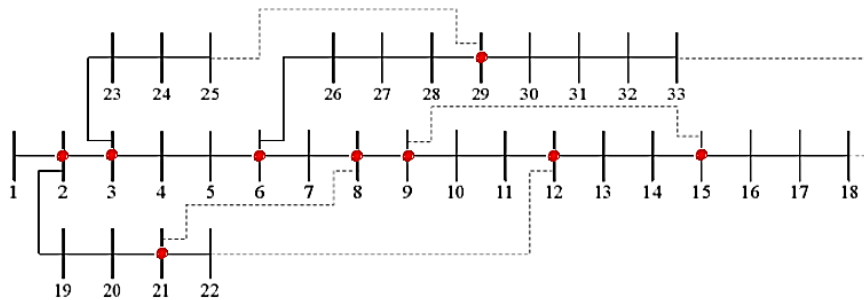
BARRA	TENSÃO [PU]	BARRA	TENSÃO [PU]	BARRA	TENSÃO [PU]	BARRA	TENSÃO [PU]
1	0,997063	9	0,927066	17	0,909811	25	0,873512
2	0,983083	10	0,926198	18	0,903534	26	0,870391
3	0,975507	11	0,924686	19	0,899403	27	0,857185
4	0,967952	12	0,918391	20	0,898542	28	0,847546
5	0,949158	13	0,915776	21	0,897739	29	0,842923
6	0,944073	14	0,914235	22	0,886701	30	0,838155
7	0,939254	15	0,912816	23	0,879210	31	0,837073
8	0,932939	16	0,910439	24	0,875455	32	0,836734

**FONTE: Autoria Própria.**

Após análise do sistema de distribuição inicial, buscou-se soluções através do uso do algoritmo genético para encontrar as melhores reconfigurações, ou seja, soluções factíveis. Para restringir o problema, conforme mencionado em seções anteriores, os critérios de parada utilizados foram quanto às restrições do próprio circuito, a radialidade, além das potências. Deste modo, as soluções foram obtidas conforme os passos seguintes.

Para gerar-se a população inicial conforme a resolução proposta, tem-se o exemplo de uma das soluções dadas pelo algoritmo genético. Ao analisar o

sistema da Figura 21, pode-se notar que os possíveis nós com filhos são os ramos: 2, 3, 6, 8, 9, 12, 15, 21 e 29. Na Figura 22, tem-se a representação do mesmo sistema, porém em relação aos nós com possíveis ramificações caso as chaves estivessem em estado Normalmente Fechadas.



**Figura 22. Representação dos nós com possíveis ramificações.**

**FONTE: GUIMARÃES, 2005.**

Após análise dos possíveis nós, identificou-se quais são os nós com chaves Normalmente Abertas, ou seja, sem dois ramos no mesmo barramento. Assim, ao fechar todo o sistema, formou-se um total de 5 laços, conforme a Equação 29. Ou seja, este ficou subdividido em cinco regiões diferenciadas, tendo como número de posições a serem representadas em cada solução encontrada para a reconfiguração.

O número de indivíduos na população inicial foi determinado em relação a três parâmetros distintos para identificação da melhor combinação com cada tipo de implementação desenvolvido para este problema. Como análise inicial, escolheu-se o número de indivíduos como sendo: 50, 100 e 200. Este número foi determinado com base no número de barras do problema, ou seja, com relação às possíveis combinações que este possibilita. Assim, os resultados analisados podem ser divididos em etapas, as quais se diferenciam pelo critério de parada e método utilizado para a obtenção da solução final.

Para cada quantia de população inicial descrita anteriormente, aplicou-se o algoritmo proposto em diferentes proporções para análise dos resultados obtidos. Primeiramente, ao implementar o algoritmo genético sem o *path relinking*, aplicou-se números de indivíduos de 50, 100 e 200 para a população inicial, utilizou-se o método *ranking* para seleção dos 10 melhores. Ao analisar-se cada indivíduo ordenado, houve a troca de material genético, gerando 10

filhos, ou seja, juntando-se a população inicial, num total de 60, 110 e 210 indivíduos. Dentre esta totalidade, seleciona-se os 5 melhores e substitui-se entre os 5 piores na população inicial, tornando-se os novos indivíduos na próxima iteração.

Como segunda parte, comparou-se os resultados obtidos com o uso do AG com o Religamento de Caminhos implementado, de modo a observar a sua eficiência em relação ao sistema de distribuição proposto. Para melhor análise do problema a ser solucionado, juntamente com a melhora em relação ao algoritmo genético, modificou-se os critérios de parada para identificação das perdas ativas, além do tempo computacional envolvido. Para critério de parada, selecionou-se para 500 iterações, caso obtenha solução satisfatória, 2000 iterações e parar apenas após 15 iterações sem modificar a solução *best*, para análise do número de iterações que são, relativamente, suficientes para o problema.

Na Tabela 2, tem-se os resultados obtidos para o primeiro tipo de algoritmo desenvolvido. Este tem como caracterização a não utilização do método de Religamento de Caminhos. Para testes, analisou-se diferentes critérios de parada e diferentes indivíduos na população inicial, como descritos anteriormente. Para o sistema abordado, tem-se que cada valor de solução encontrado e tempo computacional, encontrou-se uma média de 15 diferentes valores obtidos, ou seja, tem-se a média destes, tanto do tempo computacional quando das perdas ativas, para análise de sua eficiência.

**Tabela 2 - Resultados obtidos com AG para sistema de 33 barras.**

CRITÉRIO DE PARADA	POPULAÇÃO INICIAL	SOLUÇÃO	TEMPO COMPUTACIONAL
500 ITERAÇÕES	50	143,40 [kW]	0204,50 [s]
	100	141,24 [kW]	0281,71 [s]
	200	140,90 [kW]	0308,77 [s]
2000 ITERAÇÕES	50	142,74 [kW]	0553,46 [s]
	100	140,37 [kW]	0862,10 [s]
	200	139,86 [kW]	1215,81 [s]
15 SOL. CONSECUTIVAS	50	140,97 [kW]	0683,70 [s]
	100	140,03 [kW]	0932,85 [s]
	200	139,74 [kW]	1089,63 [s]

**FONTE:** Autoria Própria.

Em comparação aos resultados obtidos na Tabela 2, encontra-se na Tabela 3, as soluções com o algoritmo genético e o método *path relinking*. Em relação à eficiência do tempo computacional, notou-se que com o uso do religamento de caminhos, para iterações fixas, 500 e 2000, houve um aumento significativo, devido ao aumento de procedimentos envolvidos para encontrar uma solução factível. Porém, quando se analisa o tempo gasto em relação ao número de iterações que se necessita para encontrar a solução factível, tem-se que com o religamento de caminhos, o resultado satisfatório é obtido com a exigência de um esforço computacional maior, porém com mais precisão que os demais meios, mesmo em relação ao número menor de indivíduos presentes na população inicial.

**Tabela 3 - Resultados obtidos com AG e path relinking para sistema de 33 barras.**

CRITÉRIO DE PARADA	POPULAÇÃO INICIAL	SOLUÇÃO	TEMPO COMPUTACIONAL
500 ITERAÇÕES	50	140,29 [kW]	0628,59 [s]
	100	140,12 [kW]	0934,46 [s]
	200	139,97 [kW]	1358,71 [s]
2000 ITERAÇÕES	50	140,13 [kW]	1157,04 [s]
	100	139,87 [kW]	1564,43 [s]
	200	139,61 [kW]	2179,23 [s]
15 SOL. CONSECUTIVAS	50	139,93 [kW]	0935,43 [s]
	100	139,61 [kW]	1247,50 [s]
	200	139,61 [kW]	1189,36 [s]

**FONTE: Autoria Própria.**

As simulações foram implementadas em linguagem de programação C e realizadas em um processador Intel® Core™ i3-2350M, de 2.30GHz, 4GB de memória e sistema operacional de 64 *bits*. Para os testes computacionais, foram comparados os resultados obtidos por Guimarães (2005), Tabela 4.

**Tabela 4 - Resultados obtidos com AG e path relinking para sistema de 33 barras.**

CONFIGURAÇÃO	PERDAS ATIVAS (KW)
METODOLOGIA PROPOSTA COM O ALGORITMO GENÉTICO E <i>PATH RELINKING</i>	139,61
(GUIMARÃES, 2005)	139,55

**FONTE: Autoria Própria.**

Este trabalho baseia-se no princípio de que os sistemas de distribuição possuem chaves que podem ser manobradas, possibilitando a reconfiguração em associação com a redução de perdas de potência ativa. Observa-se na Tabela 4, portanto, que os resultados obtidos são compatíveis com a literatura, mostrando-se eficazes os algoritmos propostos. Com a presença apenas do algoritmo genético, ou seja, sem o uso do *path relinking*, nota-se níveis encontrados de perdas de potência ativa um pouco maiores, porém, aceitáveis. Com o uso conjunto do religamento de caminhos, tem-se que as perdas ativas para as soluções encontradas são equivalentes às propostas por Guimarães (2005).

Para o funcionamento do algoritmo de forma eficiente, foi necessário o desenvolvimento de operadores genéticos, tais como de cruzamento, além do *path relinking*. O algoritmo genético, para a geração da população inicial, foi implementado de forma a gerar indivíduos que sejam factíveis em relação à topologia radial do sistema, ou seja, respeitando os critérios de regência do sistema de distribuição de energia elétrica. Apresentando, assim, soluções relativamente satisfatórias quanto à sua reconfiguração.

## 7 CONCLUSÃO

A Reconfiguração de Sistemas de Distribuição é um procedimento de execução de manobras em dispositivos chaveáveis. Os alimentadores com topologia em árvore, ou seja, radial, que integram os dispositivos e equipamentos, são os mais comuns, visto que o investimento requerido para a construção dos mesmos é menor do que o necessário em outras topologias. Além da economia em sua estrutura, esta topologia reduz a complexidade do sistema de proteção, porém, as cargas se tornam mais vulneráveis à desenergização, justamente, pela pouca alternativa em sua conexão. A radialidade torna-se, portanto, uma condição de extrema importância para a factibilidade da solução a ser encontrada (BARBOSA, 2012).

Com o aumento exponencial do sistema, a dificuldade em determinar quais procedimentos são mais adequados para a recuperação de uma área com interrupção do fornecimento de energia elétrica ou correção de uma sobrecarga, por exemplo, torna-se cada vez maior. Deste modo, uma ferramenta computacional auxilia na tomada de decisões, evitando operações errôneas, que podem levar a uma condição com potencial dano.

O presente trabalho busca contribuir para o auxílio da reconfiguração em sistemas de distribuição. Para melhor apresentação de seu desenvolvimento, têm-se os tópicos listados em sequência.

- Estudo de reconfigurações em sistemas de distribuição;
- Formulação matemática para uma topologia radial e condições específicas para o problema;
- Tratamento das soluções através da implementação do *Path Relinking*;
- Análise da reconfiguração em relação à proposta inicial;
- Implementação do algoritmo.

Considerado como um problema de programação não linear inteiro misto, a reconfiguração de alimentadores tem como caracterização dois tipos de restrições: físicas e operacionais. Físicas estão relacionadas aos limites do circuito, tal como fluxo de potência aparente; restrições operacionais seriam seu modo essencialmente radial, conforme foi descrito no equacionamento formulado neste trabalho. O uso de chaves de manobra, portanto, torna-se

indispensável para a formulação deste problema e aplicação deste tema proposto.

O AG é um dos métodos em computação evolutiva que constituem uma classe de algoritmos de busca e otimização que são inspirados na teoria da evolução natural da espécie. Este mantém uma população de soluções potenciais, aplicam processos de seleção que se baseiam na adaptação de um indivíduo e empregam operadores genéticos. Seu processo de busca é de modo multidirecional, ou seja, através da manutenção de soluções candidatas, há a troca de informações. A cada iteração, soluções consideradas factíveis se reproduzem, enquanto soluções não factíveis são eliminadas. Com a implementação do religamento de caminhos, tem-se a intensificação da busca em regiões nos quais soluções de qualidade foram encontradas. Deste modo, essa técnica consiste em explorar trajetos que conectam soluções de alta qualidade, começando por uma solução inicial (solução guia), gerando através dessa, demais soluções.

A aplicabilidade do Algoritmo Genético possibilita a análise de redes reais sem a necessidade de simplificações ou aproximações, permitindo, portanto, a obtenção de soluções otimizadas em tempos de execução para problemas que exigem planejamento de uma expansão para operação. As variáveis do AG possibilitam que os resultados sejam melhorados em um menor tempo de execução, os quais são compatíveis com redes de distribuição.

Pode se concluir, por fim, que o algoritmo implementado auxilia nos processos de tomada de decisão em diferentes tarefas quando há necessidade da reconfiguração do sistema. A minimização de perdas é indispensável devido ao carregamento de condutores, contribuindo, assim, para a melhora da segurança. Como análise e contribuição dos resultados, tem-se que o método implementado para a busca de soluções factíveis em relação ao método tradicional, com inclusão do *Path Relinking* e o método tradicional do AG, respectivamente, demonstra ser mais eficaz em relação à convergência dos resultados. A melhoria é observada quando se compara o número de indivíduos necessários para encontro de uma solução factível.



## REFERÊNCIAS

ABRADEE. **Furto e Fraude de Energia**. Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica, 2007. Disponível em: <<http://www.abradee.org.br/>>. Acesso em: 10 Outubro 2014.

ANTILA, Erkki, HEINE, Pirjo, LEHTONEN, Matti. **Economic Analysis of Implementing Novel Power Distribution Automation**. In: *CIGRE/IEEE PES Int. Symposium on Quality and Security of Electric Power Delivery Systems*. Montréal - Canadá, p. 121-126, 2003.

BARAN, M. E.; WU, Felix. F. **Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 2, p. 1401-1407, 1989.

BARBOSA, Carlos H. N. R. **Reconfiguração e Restauração Ótima de Sistemas de Distribuição Primária de Energia Elétrica**. Tese de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, 2012.

BARRETO, Gustavo A., 2010, **Estudo de Viabilidade de Um Sistema de Monitoramento de Baixo Custo para os Sistemas de Distribuição Reticulados Subterrâneos**. Tese de Mestrado em Engenharia Elétrica - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

BENNETT, Adam P., SHAPIRO Jonathan. **Genetic Algorithm Dynamics in a Two-Well Potential**. In *Foundations of Genetic Algorithms 4 ed*. San Francisco, CA, 101-116, 1997.

BENTO, Fabio Ricardo O. **Uma Metodologia para Reconfiguração de Redes Inteligentes**. Dissertação de Pós-Graduação em Energia - Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo, 2013.

BORGES, Marlon. **Reconfiguração de Alimentadores em Sistemas de Distribuição Usando a Metaheurística GRASP**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2011.

BRANDINI, Antonio C. **Análise Crítica de Algoritmos de Fluxo de Carga Usados em Sistemas de Distribuição Radial**. 71 f. Dissertação de Mestrado

em Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2000.

BROADWATER, R. P., SHAALAN, H. E., OKA, A., LEE, R. E. ***Distribution System Reliability and Restoration Analysis***. *Electric Power Systems Research*, v. 29, n. 3, 1994, p. 203-211.

CABEZAS, Ana M. G. **Novas Formulações para o Problema de Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica/A.M.** ed. rev. São Paulo, 2007.

CARVALHO, Gustavo C. G. **Otimização de Seções Caixa de Concreto Armado e Protendido pelo Método dos Algoritmos Genéticos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

CUNHA, Livia. **Radiografia - Poder de Manobra**. Revista O Setor Elétrico, 50 ed. 2010.

DUARTE, Daniel Perez. **Automação como Recurso de Planejamento de Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

FERREIRA, Flavio Arthur L. **Metodologia para Reconfiguração de Redes de Distribuição Trifásicas Assimétricas e Não Balanceadas com Geração Distribuída**. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Pontifícia Universidade Católica. Rio Grande do Sul, 2010.

FIORAVANTI, Celso. **Reconfiguração de Alimentadores em Sistemas de Distribuição Usando uma Metaheurística e Espaço de Busca Reduzido**. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista Julio Mesquita Filho. São Paulo, 2014.

GARCIA, Douglas. DUZZI, Francisco Elio. **Aspectos de Sistemas de Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Disponível em: <[http://www.osetoelettrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed73\\_fasc\\_distribuicao\\_cap1.pdf](http://www.osetoelettrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed73_fasc_distribuicao_cap1.pdf)>. Acesso em: 13 jan 2015.

GAUCHE, Edward. **Minimização de Perdas Elétricas em Sistemas de Distribuição através de Reconfiguração de Redes**. Dissertação de Pós-

Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 1994.

GLOVER, F., LAGUNA, M., & Martí. **Scatter search and path relinking: Advances and Applications**. 2013.

GUIMARÃES, Marcos A. N. **Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos de busca tabu**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

HAUPT, R. L. & HAUPT, S. E. **PRACTICAL GENETIC ALGORITHMS**. 2ª ed. Hoboken: New Jersey, 2004.

KAGAN, Nelson. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2º edição - São Paulo: Blucher, 2010.p. 1-20.

KOZA, J. R. **Genetic Programming: On The Programming of Computers by Means of Natural Selection**. ISBN 0262111705. MIT Press, 1992.

LAVORATO, M., FRANCO, J. F., RIDER, M. J. and ROMERO, R. **Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems**. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012.

LEAO, Ruth. **Distribuição de Energia Elétrica**. Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Ceará. Ceará, 2001.

LEAO, Ruth. **GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Ceará. Ceará, 2009.

LEHTONEN, M., MATSINEN, A., ANTILA, E., KURU, J., VUORENPAA, P., MATINLASSI, E. and PETTISSALO, S. **Automatic Fault Management in Distribution Networks**. *Proc of the 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED*, vol. 3, 2001.

MENDOZA, J.; LÓPEZ, R.; MORALES, D.; LÓPEZ, E.; DESSANTE, P.; MORAGA, R. **Minimal Loss Reconfiguration Using Genetic Algorithms With Restricted Population and Addressed Operators: Real Application**. *IEEE Transactions on PowerSystems*, v. 21, n. 2, p. 948-954, May 2006.

MONTOVANI, José R. S., CASARI, Fernando, ROMERO, Rubén A., **Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais Utilizando o Critério de Queda de Tensão**. SBA Controle e Automação, Vol. 11, No. 3, pág. 150 - 159, Dezembro de 2000.

PARAJARA, Caroline N. **Grasp Duplamente Reativa com *Path Relinking* para o Problema Generalizado de  $p$ -Medianas Aplicado à Formação de *Clusters* em Logística de Localização**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Estadual do Norte Fluminense. Rio de Janeiro, 2013.

PEREIRA, Fernando S. **Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônias de formigas**. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica - Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

SANTOS, Felipe M. F. **Qualidade de Energia - Comparação das Normas IEC 61000-3-2 e IEEE519**. Departamento de Engenharia Elétrica. Escola Politécnica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p.51, 2007.

SCHMITD, H. P., IDA N., KAGAN, N., GUARALDO, J. C., ***Fast Reconfiguration of Distribution Systems Considering Loss Minimization***. *IEEE Transaction on Power System*, Vol. 20, Issue 3, pp. 1311 - 1319, August 2005.

SOUZA, Fabiano A. de. **Detecção de Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Usando Dispositivos Programáveis**. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

VIZCAÍNO, José. F., ASSIS, Laura S., LYRA, Christiano, CAVELLUCCI, Celso. **Abordagem Multiobjetivo para Alocação de Chaves em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica**. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional – XLV SBPO. 2011.

## APÊNDICE A - Estrutura do Sistema de Distribuição

- Sistemas de Distribuição;
- Componentes de uma Subestação de Distribuição;
- Topologia.

### Sistemas de Distribuição

O sistema de distribuição de energia elétrica é parte do sistema situado entre a transmissão e a entrada de energia dos consumidores. Assim, o sistema de distribuição pode ser dividido em componentes, tais como: Sistema de distribuição primário (alimentadores de distribuição); Transformadores de distribuição; Sistema de distribuição secundário; Ramais de ligação (LEAO, 2001). Na Figura A1, pode-se observar cada parte.

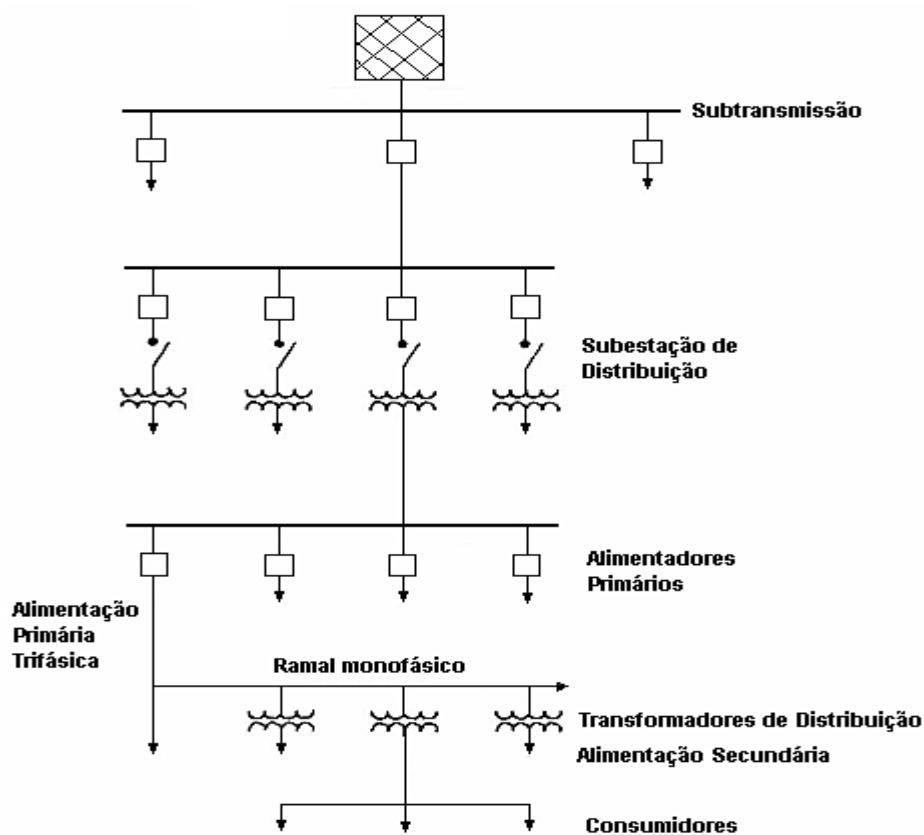


Figura A1. Diagrama unifilar do sistema de distribuição.

FONTE: LEÃO, 2001.

O sistema de subtransmissão é parte deste sistema como um todo, no qual pertence parte do Sistema de Transmissão e parte do Sistema de Distribuição. As topologias mais utilizadas são: Radial, Radial com Recurso, Anel (*loop*) e Reticulado que constam nas Figuras: A2, A3, A4 e A5, respectivamente (LEAO, 2001).

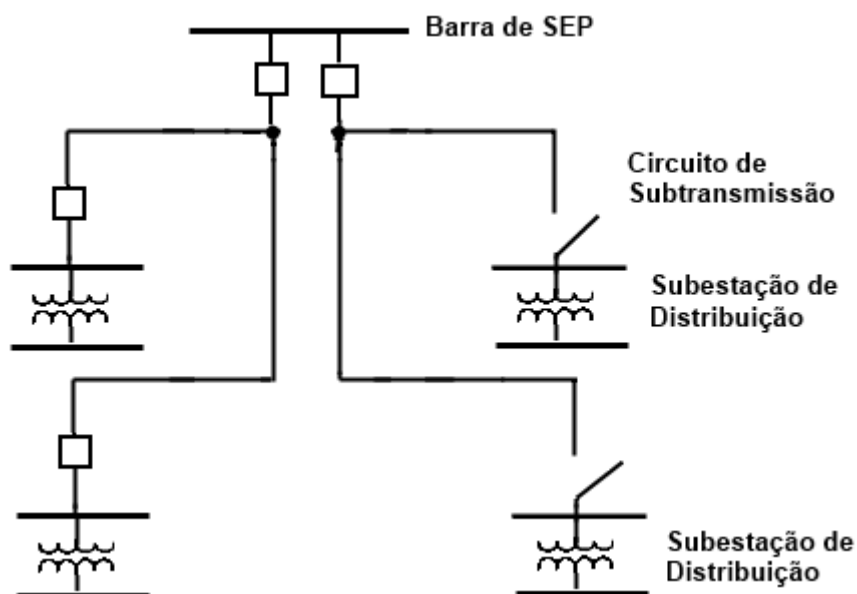


Figura A2. Diagrama unifilar de um sistema radial.

FONTE: LEÃO, 2001.

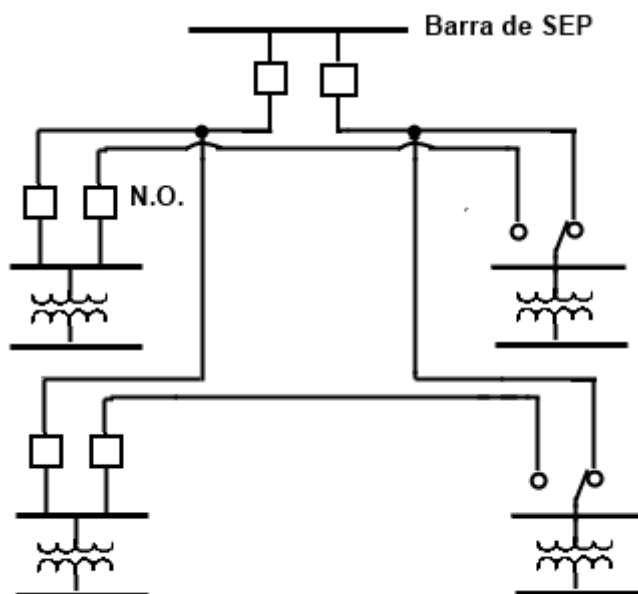


Figura A3. Diagrama unifilar de um sistema radial com recurso.

FONTE: LEÃO, 2001.

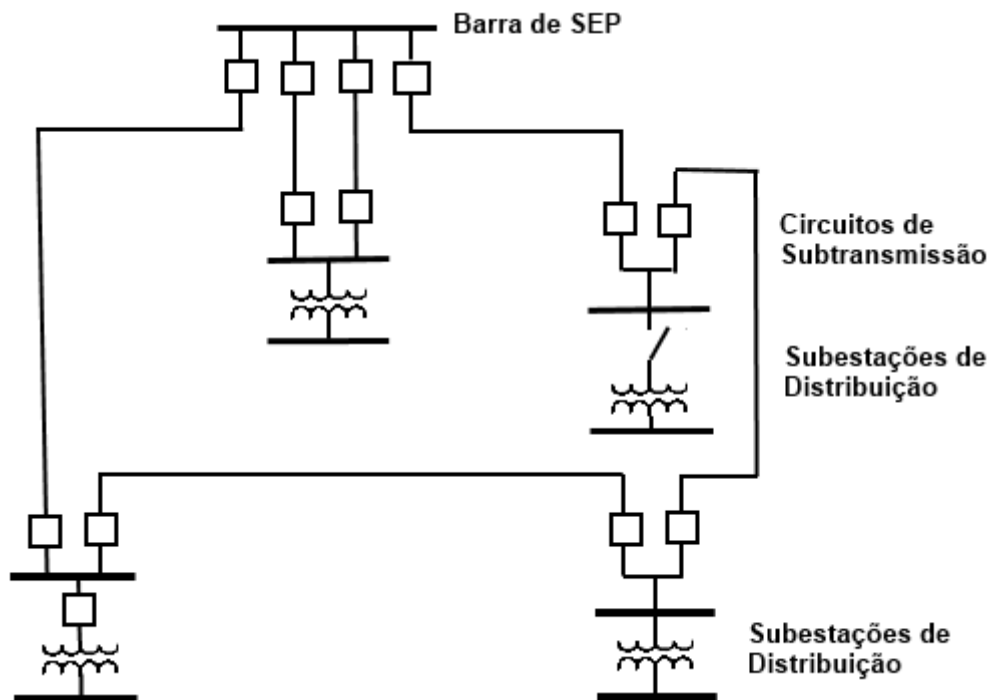


Figura A4. Diagrama unifilar de um sistema em anel.

FONTE: LEÃO, 2001.

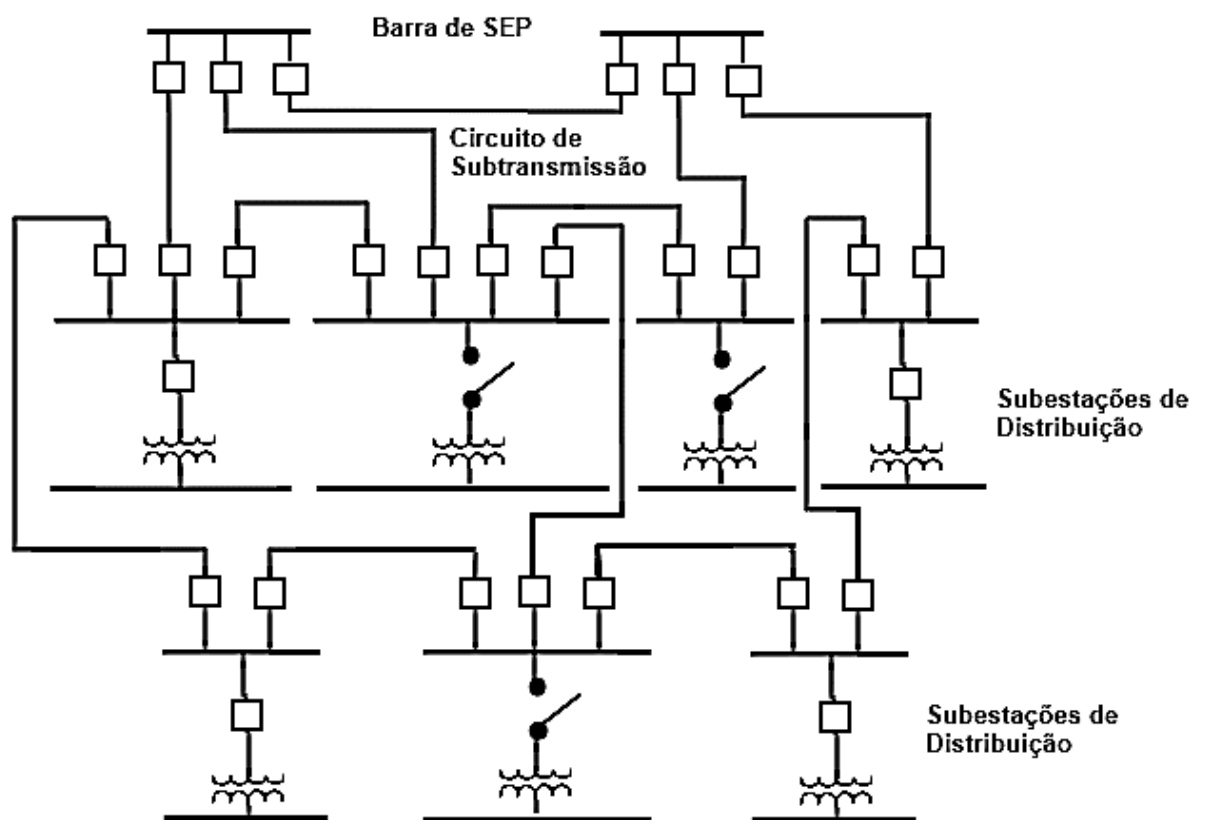


Figura A5. Diagrama unifilar de um sistema reticulado.

FONTE: LEÃO, 2001.

Definida como conjunto de instalações elétricas em média ou alta tensão, as subestações são pontos de convergência, entrada e saída de linhas de transmissão ou distribuição, e estas podem ser classificadas referente a sua função, quanto ao nível de tensão, ao tipo de instalação e a forma de operação (LEAO, 2001).

#### **a) Função**

Subestação de Manobra - disponibiliza manobrar partes do sistema, inserindo ou retirando serviços em um mesmo nível de tensão (LEAO, 2001);

Subestação de Transformação – podem ser de dois tipos: elevadora e abaixadora. Elevadoras são localizadas nas saídas de usinas geradoras, elevando a tensão para níveis de transmissão e subtransmissão. Abaixadoras são localizadas em regiões periféricas das cidades, diminuindo níveis de tensão (LEAO, 2001);

Subestação de Distribuição – estas diminuem os níveis de tensão para distribuição primária (LEAO, 2001);

Subestações de Regulação de Tensão – regula-se a tensão através de equipamentos de compensação, tais como reatores, capacitores, dentre outros (LEAO, 2001);

Subestações Conversoras – estão associadas a sistemas de transmissão em corrente contínua (LEAO, 2001).

#### **b) Nível de Tensão**

Subestação de Alta Tensão – tensão nominal abaixo de 230 kV (LEAO, 2001);

Subestação de Extra Alta Tensão – tensão nominal acima de 230 kV (LEAO, 2001).

#### **c) Instalação**

Subestações Desabrigadas – construídas a céu aberto (LEAO, 2001);

Subestações Abrigadas – construídas em local interior (LEAO, 2001);

Subestações Blindadas – construída em locais abrigados com equipamentos completamente protegidos e isolados (LEAO, 2001).



#### **d) Operação**

Subestação com Operador – necessita-se de operador com alto nível de conhecimento e utiliza-se computadores para supervisão e operação local (LEAO, 2001);

Subestação Semi-automática – possui computadores locais ou intertravamentos eletro-mecânico (LEAO, 2001);

Subestação Automatizada – supervisionada a distância por meio de computadores e controladores (LEAO, 2001).

### **Componentes de uma Subestação de Distribuição**

Uma subestação de distribuição é constituída por diversos equipamentos, tais como: barramentos, linhas e alimentadores, equipamentos de manobra e disjunção (disjuntores e chaves seccionadoras), equipamentos de transformação (transformadores de potência, transformadores de instrumentos – de potencial, TP, de corrente, TC, e de serviço), equipamentos de proteção e equipamentos de compensação. Este conjunto de elementos, com funções específicas, permite a composição da subestação em módulos; usualmente, na subestação de distribuição, denomina-se: entrada de linha (EDL), saída de linha (SDL), barramentos de alta (B-AT) e média (B-MT) tensão, transformação (TF, banco de capacitor/regulação (BC) e saída do alimentador (AL) (SOUZA, 2008). Todos os equipamentos citados são indispensáveis para o funcionamento do sistema de distribuição, porém alguns conceitos são indispensáveis para seu melhor entendimento.

### **Topologia**

De acordo com a demanda de energia elétrica nas unidades consumidoras e viabilidade no fornecimento de eletricidade, as distribuidoras de energia utilizam diferentes topologias de rede (BARRETO, 2010). Os barramentos são condutores que servem como centros comuns de coleta e redistribuição de corrente. Sendo caracterizado pelos arranjos, ou seja, pela forma como se conectam entre si nas linhas, tem-se:

**1. Barramento Simples** – possui único disjuntor manobrando um único circuito. Assim, todos os circuitos são conectados a uma mesma barra. Uma desvantagem em relação a este tipo de configuração seria uma menor confiabilidade. Caso ocorra uma falha no barramento, este provoca interrupção completa na subestação. Na Figura A6, pode-se observar este tipo de conexão (LEAO, 2001).

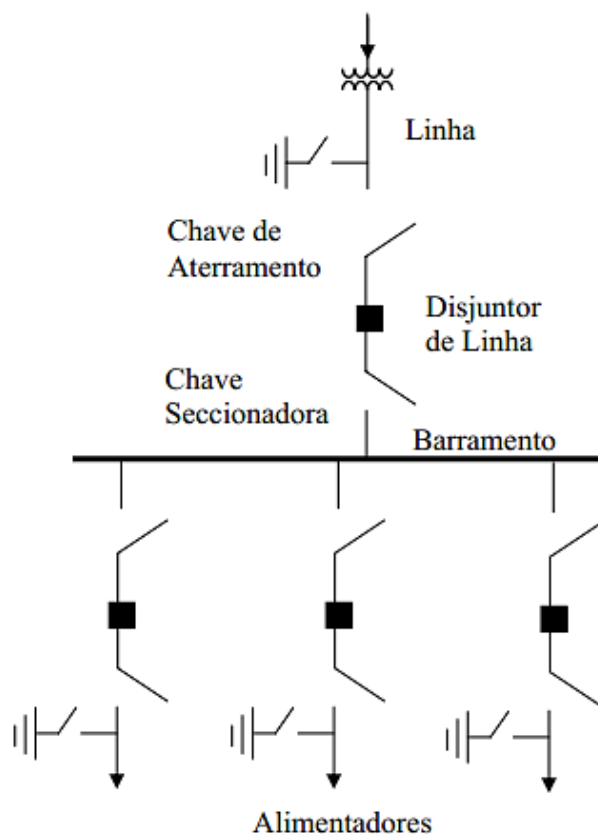


Figura A6. Arranjo com Barramento Simples.

FONTE: LEO, 2001.

Com caracterização por ser mais simples, econômico, porém menos seguro devido a alteração da confiabilidade, este possui vantagens e desvantagens.

#### Vantagens

- Instalações simples;
- Manobras simples, ou seja, normalmente apenas desliga-se e liga-se circuitos alimentadores;
- Custo reduzido.

### Desvantagens

- Menor confiabilidade em relação aos demais barramentos;
- Caso ocorra uma falha ou manutenção, desliga-se toda a subestação;
- Ampliação do barramento não pode ser realizada sem desenergizar toda a subestação;
- Manutenção do disjuntor de alimentadores interrompe totalmente o fornecimento de energia aos demais consumidores (LEAO, 2001).

**2. Duplo Barramento Simples** – este tipo de barramento é indicado para instalações consumidoras com cargas essenciais e não prioritárias. Assim, é indicado para instalações consumidoras que requerem alta confiabilidade. O duplo barramento simples aceita desligamentos rotineiros para cargas não essenciais, porém são mais utilizados em locais com consumidores como: hospitais, hotéis, indústrias, dentre outros. Na Figura A7, tem-se um exemplo deste tipo de barramento (LEAO, 2001).

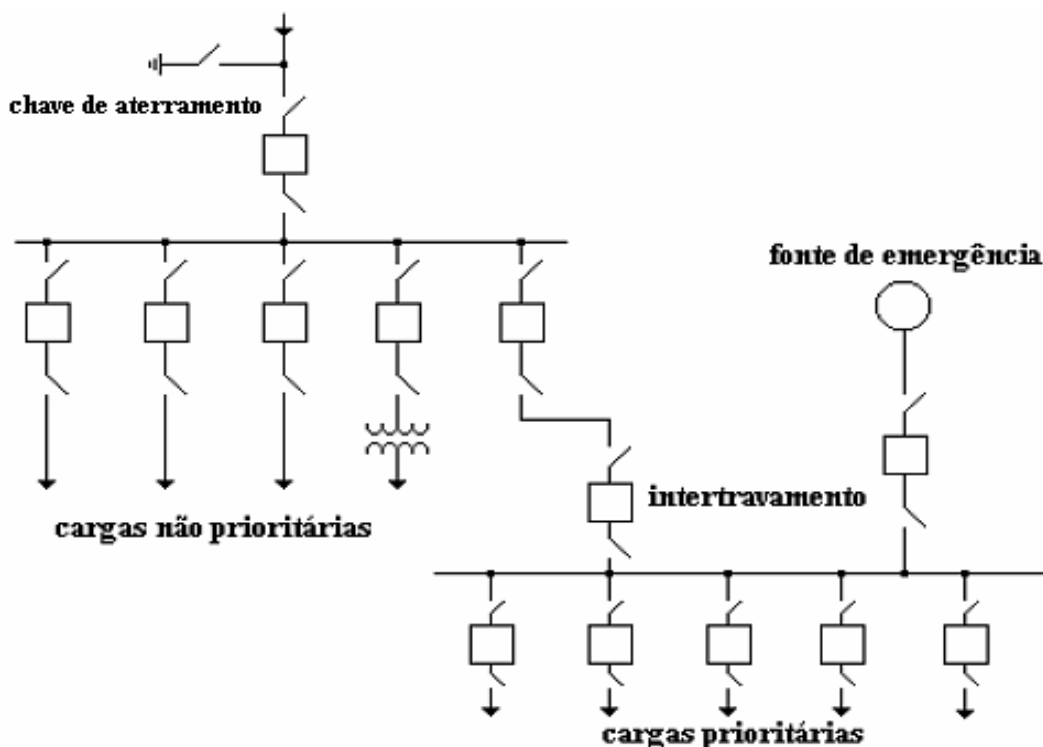


Figura A7. Duplo barramento simples.

FONTE: LEÃO, 2001.

### Vantagens

- Maior flexibilidade de conexão de circuitos com outra barra;
- Não há restrição quanto ao desligamento total caso necessite retirar um disjuntor para manutenção;
- Fácil recomposição;

### Desvantagem

- Possui um custo mais elevado em relação ao barramento simples;
- Caso haja falha no disjuntor de linha ou no barramento, implica-se na perda de cargas não prioritárias devido a presença de disjuntor de intertravamento (LEAO, 2001).

**3. Barramento Simples Seccionado** – consiste em seccionar o barramento para evitar que uma falha interfira no funcionamento geral, de forma a isolar apenas o elemento com falha da subestação. Na Figura A8, observa-se um exemplo esquemático de um barramento simples seccionado. Devido a presença de disjuntor na barra, há uma maior flexibilidade para manobras caso seja necessário uma manutenção, por exemplo (LEAO, 2001).

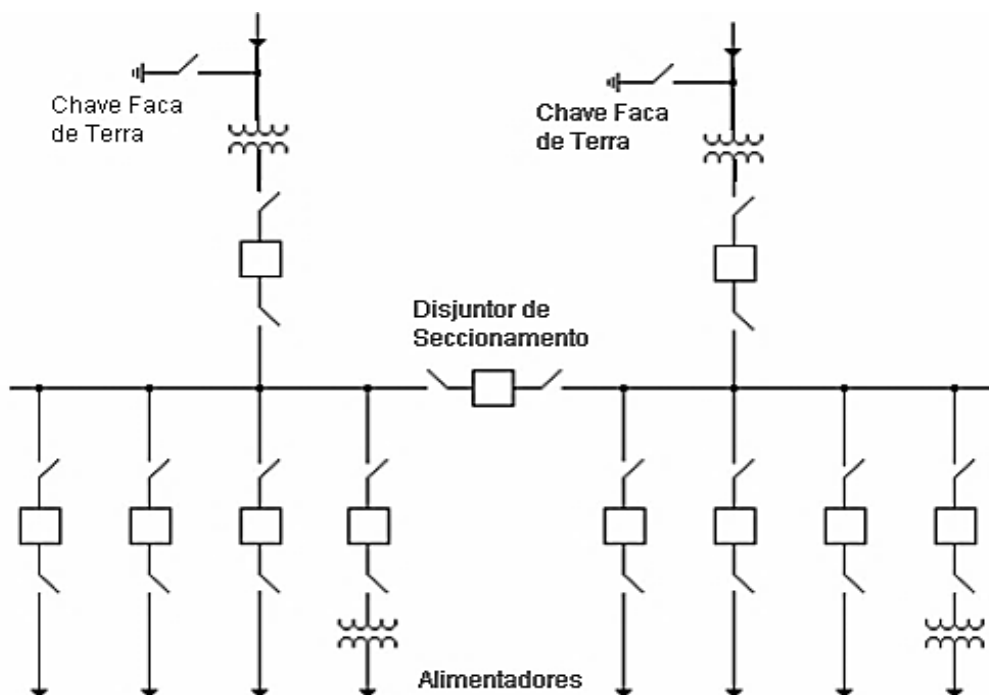


Figura A8. Barramento simples com disjuntor de interligação.

FONTE: LEÃO, 2001.

### Vantagens

- Maior confiabilidade no sistema referente ao fornecimento de energia;
- Maior facilidade na execução de serviços de manutenção;
- Caso ocorra uma falha na barra, desliga-se somente os consumidores ligados a seção afetada.

### Desvantagens

- Caso seja necessário uma manutenção, o disjuntor deixa fora de serviço a linha correspondente;
- Sistema é considerado relativamente complexo (LEAO, 2001).

**4. Barramento Principal e de Transferência** – o barramento principal de uma subestação é conectado a um barramento auxiliar através de um disjuntor de transferência. Sua finalidade é garantir a proteção de um determinado trecho quando o equipamento de disjunção principal é retirado de serviço. Na Figura A9, tem-se um exemplo esquemático deste tipo de barramento (LEAO, 2001).

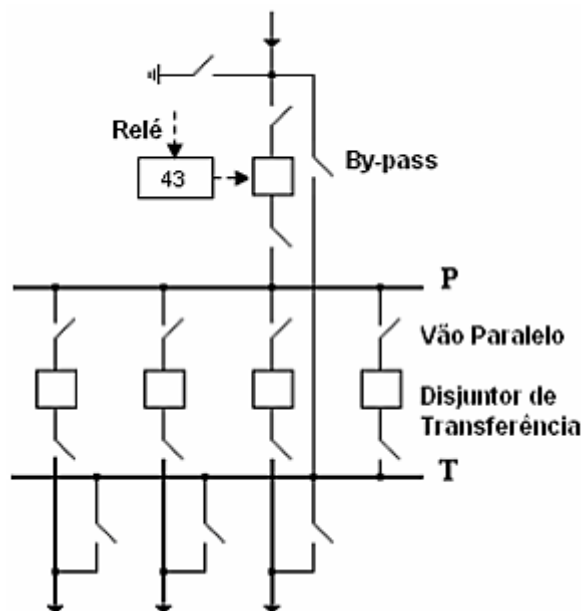


Figura A9. Barra principal e de transferência.

FONTE: LEÃO, 2001.

Quando o circuito está em condições normais de funcionamento, a linha de entrada supre a barra principal através do disjuntor principal juntamente com

as chaves seccionadoras. Neste caso, há uma chave associada ao disjuntor de entrada da linha que se encontra Normalmente Aberta (NA). Em situações adversas, ou seja, emergenciais, no qual o disjuntor principal é retirado de serviço, a entrada de linha é conectada a barra auxiliar através do fechamento da chave seccionadora e do disjuntor de transferência (LEAO, 2001).

### Vantagens

- Maior confiabilidade no sistema devido aos disjuntores poderem ser retirados para serviço;

### Desvantagens

- Requer disjuntor extra para se conectar a outra barra;
- Caso ocorra uma falta no barramento principal, resulta-se em desligamento da subestação;
- Sistema mais complexos devido as manobras.

**5. Barramento Duplo com Disjuntor** – possui instalações de grande porte. Sua manutenção é realizada sem a perda dos circuitos de linha de saída, ou seja, cada linha pode ser conectada a qualquer barra. Na Figura A10, pode-se notar um exemplo deste tipo de barramento (LEAO, 2001).

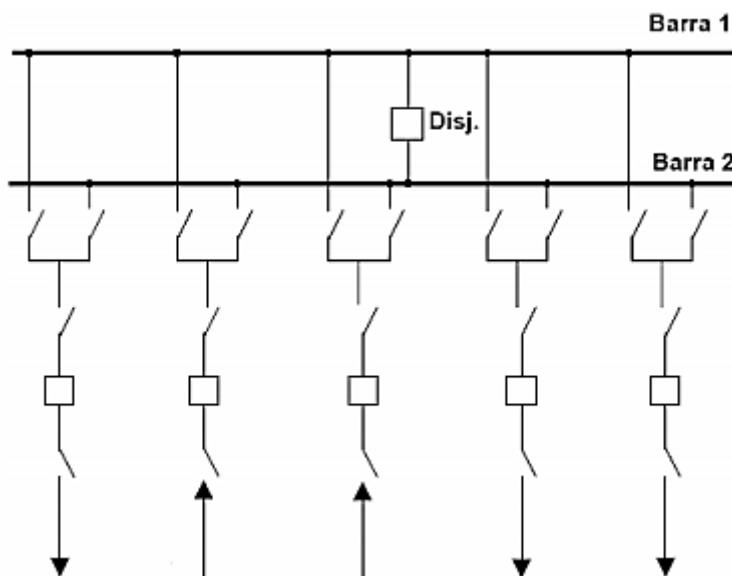


Figura A10. Barramento duplo com disjuntor.

FONTE: LEÃO, 2001.

### Vantagens

- Permite flexibilidade para barras em operação;
- Qualquer barra pode ser isolada para manutenção;
- Há uma maior facilidade de transferência dos circuitos de uma barra para outra (LEAO, 2001).

### Desvantagens

- Necessita de um disjuntor extra de transferência entre barras;
- Requer quatro chaves por circuito (LEAO, 2001).

**6. Barramento Duplo com Disjuntor Duplo** – cada um dos circuitos é protegido por dois disjuntores. Assim, caso necessite operações, o sistema não será afetado. Na Figura A11, pode-se notar este tipo de barramento. Este tipo de modelo possui alta confiabilidade, porém requer alto custo. A subestação é suprida por linhas de subtransmissão que a alimenta através de transformadores com disjuntor de alta tensão (LEAO, 2001).

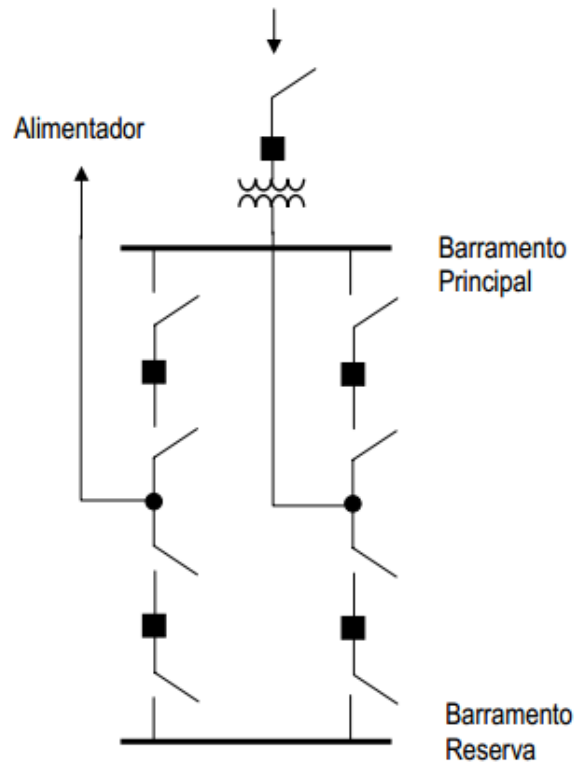


Figura A11. Barramento duplo com dupla proteção.

FONTE: LEÃO, 2001.

### Vantagens

- Muito mais flexível em relação aos demais sistemas;
- Possui maior confiabilidade (LEAO, 2001).

### Desvantagens

- Alto custo (LEAO, 2001).

**7. Barramento com Disjuntor e Meio** – utilizada em muitos países, este tipo de barramento possui três disjuntores em série interligando uma barra dupla, ou seja, a cada dois circuitos ligam-se de um lado e outro do disjuntor central de um determinado grupo. Neste caso, se ocorrer uma falha em uma das barras, a interrupção não provocará desligamento de equipamentos, apenas retirará de operação a barra com problema. Na Figura A12, pode-se verificar esta configuração (LEAO, 2001).

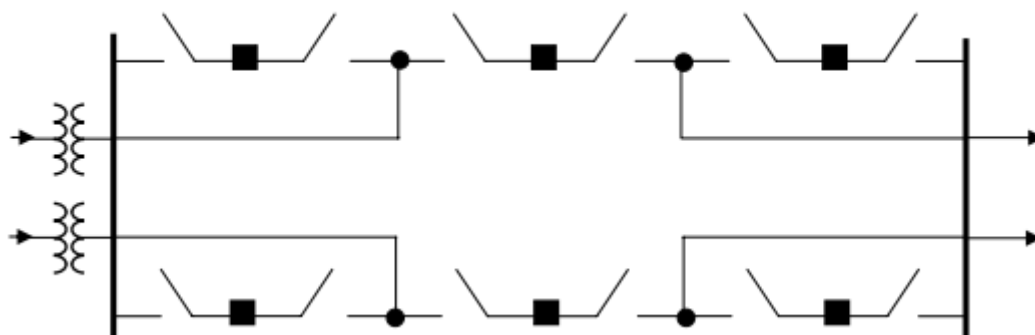


Figura A12. Barramento com disjuntor e meio.

FONTE: LEÃO, 2001.

### Vantagens

- Maior flexibilidade em manobras;
- Recomposição rápida;
- Caso ocorra uma falha, os demais circuitos não são retirados de serviço (LEAO, 2001).

### Desvantagens

- Há um número elevado de operações envolvidas quando há necessidade de chaveamento e religamento de equipamentos (LEAO, 2001).



**8. Barramento em Anel** – este tipo de barramento, através de dispositivos de manobra, forma um circuito fechado. O custo é relativamente baixo em comparação com os demais e sua confiabilidade é maior, mesmo seu modelo esquemático sendo considerado mais complexo. Cada equipamento é alimentado por dois disjuntores separadamente. Caso ocorra alguma falha, somente o segmento que consta a interrupção é isolado. Porém, uma grande desvantagem é que caso um disjuntor seja desligado por algum fim, o anel será aberto e os demais disjuntores devem ser projetados para transportar a carga. Na Figura A13, tem-se um exemplo esquemático do barramento em anel (LEAO, 2001).

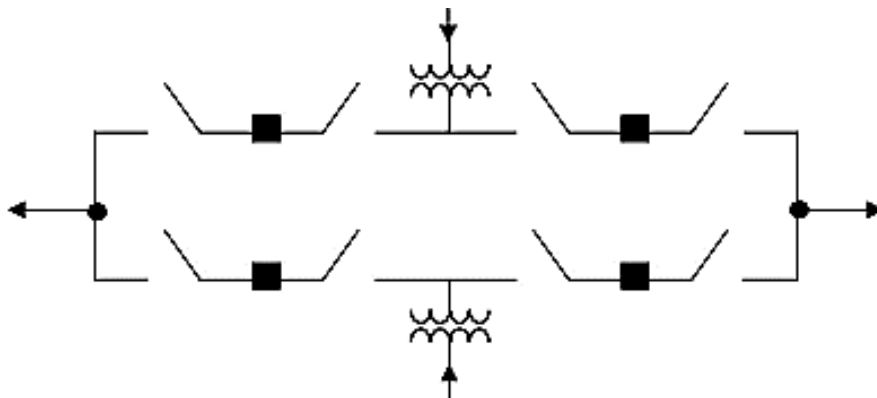


Figura A13. Barramento em anel.

FONTE: LEÃO, 2001.

#### Vantagens

- Maior flexibilidade em relação aos demais barramentos;
- Necessita de apenas um disjuntor por circuito;
- Maior confiabilidade (LEAO, 2001).

#### Desvantagens

- Religamento automático e circuito de proteção mais complexo (LEAO, 2001).

Constituindo cada sistema, conforme mencionado anteriormente, há equipamentos de manobra que são indispensáveis para caso ocorra uma falha, por exemplo. Denominados como componentes do sistema elétrico de potência, estes possuem a função de estabelecer a união entre diversos circuitos, separá-

los ou seccioná-los de acordo com as exigências de serviço, além de protegerem todos os componentes elétricos contra sobrecargas, correntes de curto-circuito e contatos a terra. E dentre estes equipamentos de manobra, tem-se as chaves seccionadoras (SOUZA, 2008).

Chaves são dispositivos mecânicos de manobra as quais na posição normalmente aberta (NA) isolam e na posição normalmente fechada (NF) mantêm a continuidade do circuito elétrico nas determinadas condições (SOUZA, 2008).

## APÊNDICE B – Dados dos Sistemas de Distribuição

### B1 – Dados do Sistema de 14 Barras

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (PU)	Reatância do Ramo (PU)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
1	14	13	0,075	0,1	0,0	0,0
2	13	12	0,08	0,11	2000,0	1600,0
3	13	11	0,09	0,18	3000,0	400,0
4	11	10	0,04	0,04	2000,0	-400,0
5	14	9	0,11	0,11	1500,0	1200,0
6	9	8	0,08	0,11	4000,0	2700,0
7	9	7	0,11	0,11	5000,0	1800,0
8	8	6	0,11	0,11	1000,0	900,0
9	8	5	0,08	0,11	600,0	-500,0
10	14	4	0,11	0,11	4500,0	-1700,0
11	4	3	0,09	0,12	1000,0	900,0
12	4	2	0,08	0,11	1000,2	-1100,0
13	2	1	0,04	0,04	1000,0	900,0
14	12	6	0,04	0,04	2100,0	-800,0
15	7	3	0,04	0,04		
16	10	1	0,09	0,12		

## B2 – Dados do Sistema de 33 Barras

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo ( $\Omega$ )	Reatância do Ramo ( $\Omega$ )	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
1	1	2	0,0922	0,047	0	0
2	2	3	0,493	0,2511	100	60
3	3	4	0,366	0,1864	90	40
4	4	5	0,3811	0,1941	120	80
5	5	6	0,819	0,707	60	30
6	6	7	0,1872	0,6188	60	20
7	7	8	0,7114	0,2351	200	100
8	8	9	1,03	0,74	200	100
9	9	10	1,044	0,74	60	20
10	10	11	0,1966	0,065	60	20
11	11	12	0,3744	0,1238	45	30
12	12	13	1,468	1,155	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	60	35
14	14	15	0,591	0,526	120	80
15	15	16	0,7463	0,545	60	10
16	16	17	1,289	1,721	60	20
17	17	18	0,732	0,574	60	20
18	2	19	0,164	0,1565	90	40
19	19	20	15,042	13,554	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	0,898	0,7091	90	50
24	24	25	0,896	0,7011	420	200
25	6	26	0,203	0,1034	420	200
26	26	27	0,2842	0,1447	60	25
27	27	28	1,059	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	0,963	200	600
31	31	32	0,3105	0,3619	150	70
32	32	33	0,341	0,5302	210	100
33	8	21	2	2	60	40
34	9	15	2	2		
35	12	22	2	2		
36	18	33	0,5	0,5		
37	25	29	0,5	0,5		