

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**KALINI LORRANI DE SOUZA
MATHEUS LAGE SANTOS**

**ANÁLISE DE MODELOS MATEMÁTICOS DE RECONFIGURAÇÃO PARA
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

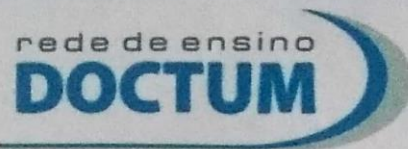
**JOÃO MONLEVADE
2019**

**KALINI LORRANI DE SOUZA
MATHEUS LAGE SANTOS
INSTITUTO ENSINAR BRASIL FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**ANÁLISE DE MODELOS MATEMÁTICOS DE RECONFIGURAÇÃO PARA
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Projeto de Trabalho de
conclusão de curso
apresentado ao Curso de
Engenharia Elétrica da
Faculdade Doctum de João
Monlevade, como requisito para
aprovação na disciplina TCC II,
orientado professora Dra. Thais
de Fátima Araújo Silva.**

**JOÃO MONLEVADE
2019**



INSTITUTO ENSINAR BRASIL

FOLHA DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: ANÁLISE DE MODELOS MATEMÁTICOS DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, elaborado pelo aluno MATHEUS LAGE SANTOS foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceita pelo curso de Engenharia Elétrica da Faculdade DOCTUM – Instituto Ensinar Brasil, como requisito parcial da obtenção do título de

BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA

João Monlevade, 05 de julho 2018

Thais de F. Araújo Siqueira
Prof. Dra. Thais de Fatima Araújo

Hernani Santiago
Prof. Hernani Santiago

Bráulio Francisco Barcelos
Prof. Bráulio Barcelos

AGRADECIMENTOS

Kalini,

Agradeço primeiramente a Deus pela força e coragem para enfrentar os desafios diários.

Agradeço à minha avó, Maria Antonieta por todo encorajamento e motivação nos dias difíceis, mesmo na sua ausência, sempre estará presente em meu coração.

Agradeço a família, em especial minha mãe Joana e meu avó Ageu, pela confiança, apoio e compreensão nas minhas ausências.

Aos amigos que compreenderam minha ausência, a jornada não foi fácil, e estavam sempre na torcida. Aos companheiros de turma que tornaram tudo mais leve.

Matheus,

Agradeço primeiramente a Deus, por toda força e sabedoria que ele me concedeu e por me permitir alcançar mais essa conquista.

Agradeço minha família, por todas as expectativas positivas depositadas em minha pessoa e, em especial a minha Mãe pelas orações prestadas, meu Pai por toda a confiança e motivação.

Agradeço também a minha segunda família, “Os Rodrigues”, por toda compaixão e vibrações positivas perante minhas vitórias. Em especial, minha digníssima esposa Débora pelas palavras de sabedoria, companherismo, amor e bastante compreensão.

Aos amigos que por mim vibram positivamente.

Kalini e Matheus,

Agradecemos aos professores que durante o tempo de graduação nos ajudaram de forma direta e indiretamente pelo nosso crescimento profissional. Em especial, a Dra. Thais de Fátima Araújo Silva, por toda paciência e dedicação a esse trabalho, por aceitar ser orientadora e nos acompanhar nesta caminhada.

A Daniela Rodrigues e a Karine Brandão, pelos momentos de conhecimentos compartilhados para o desenvolvimento de tal estudo.

LISTA DE ABREVIATURAS

AG – Algoritmo Genético

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CENELEC – Comitê Europeu para Padronização Eletrotécnica

DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

GRASP – *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (Procedimentos de Busca Adaptativos Gulosos Randomizados)

IEEE - Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico

PSO - Otimização de enxame de partículas

QEE – Qualidade da Energia Elétrica

RCL – Lista de Candidatos Restritos

TAP – Posição de Ajuste do Transformador

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Geração, transmissão e distribuição.....	13
Figura 2 – Representação de um sistema de distribuição radial	14
Figura 3 – Modelo de um transformador com ajustes de taps	17
Figura 4 – Perdas elétricas de transmissão e distribuição em %.....	21
Figura 5 – Etapas do problema de restauração de redes.....	27
Figura 6 – Representação distribuição	32
Figura 7 – Representação da distribuição durante a falta	33
Figura 8 – Configuração do sistema com uma nova configuração	33
Figura 9 – Fluxograma PSO	37
Figura 10 – Fluxograma fase construtiva.....	45
Figura 11 – Fluxograma fase de melhoria local.....	46
Figura 12 – Fluxograma de um algoritmo GRASP para um problema genérico.....	47

RESUMO

No presente estudo foram analisadas e discutidas modelagens matemáticas mais usuais para o problema de reconfiguração de uma rede de distribuição de energia elétrica. Assim, em relação as exigências do mercado e a evolução do conceito de rede elétrica, este trabalho tem por objetivo apresentar um levantamento bibliográfico sobre modelos matemáticos do problema de reconfiguração de sistema de distribuição de energia elétrica baseado no estado da arte do tema. Dessa forma, propõe-se um modelo de otimização biobjetivo que visa minimizar o número de consumidores afetados por uma falta ou falha e a quantidade de chaveamentos para reestabelecer a rede. Consideram-se como restrições o limite de corrente nos ramos, o limite de tensão nas barras e a manutenção da topologia radial do sistema. Para resolver o problema de otimização proposto sugere-se a utilização do GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (Procedimentos de Busca Adaptativos Gulosos Randomizados)) que se apresenta na literatura como técnica de otimização promissora na solução de problemas de programação inteira e mista.

Palavras-chave: Reconfiguração de sistema de distribuição; Metaheurística GRASP; Modelos matemáticos.

ABSTRACT

In the present study, we analyzed and discussed the most common mathematical models for the reconfiguration problem of an electric power distribution network. Thus, in relation to the requirements of the market and the evolution of the concept of electric grid, this work aims to present a bibliographical survey on mathematical models of the problem of reconfiguration of electric power distribution system based on the state of the art of the theme. Thus, a bio-optimization model is proposed that aims to minimize the number of consumers affected by a fault or failure and the number of switches to reestablish the network. The limit of current in the branches, the voltage limit in the bars and the maintenance of the radial topology of the system are considered as restrictions. In order to solve the proposed optimization problem, it is suggested to use GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), which is presented in the literature as a promising optimization technique for solving integer and mixed programming problems.

Keywords: Reconfiguration in the Distribution System; GRASP Metaheuristics; Mathematical Models.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	13
3.1 Carga	15
3.1.1 <i>Carga de potência constante com a tensão</i>	15
3.1.2 <i>Carga de corrente constante com a tensão</i>	15
3.1.3 <i>Carga de impedância constante com a tensão</i>	16
3.1.4 <i>Cargas constituídas por composição dos modelos anteriores</i>	17
3.2 Transformador	17
3.3 Reguladores de Tensão	19
3.4 Perdas do sistema de distribuição de energia elétrica	20
4 FLUXO DE POTÊNCIA	22
4.1 Métodos tradicionais para cálculo de fluxo de potência	22
4.2 Fluxo de potência em redes radiais	24
5 INTERRUPÇÕES E RESTAURAÇÕES NAS REDES	26
5.1 Interrupções nas redes	26
5.2 Restauração do sistema de distribuição de energia elétrica	26
6 MODELOS MATEMÁTICOS DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	28
7 TÉCNICAS DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	32
7.1 Algoritmo Genético	34
7.2 GRASP (<i>Greedy Randomized Adaptative Search Procedure</i> (Procedimentos de Busca Adaptativos Gulosos Randomizados))	35
7.3 PSO	36
7.4 Colônia de Formigas	38
8 MODELO PROPOSTO DE RECONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	40
8.1 Formulação do problema	40
8.2 Função objetivo e restrições	41

8.2.1 Função objetivo	42
8.2.2 Restrições	42
8.3 Modelo matemático proposto	43
8.4 Algoritmo proposto	44
8.4.1 Fase de pré-processamento da metaheurística GRASP	44
8.4.2 Fase construtiva da metaheurística GRASP	45
8.4.3 Fase de melhoria local da Metaheurística GRASP	46
8.4.4 Algoritmo GRASP para um problema genérico	46
9 CONCLUSÕES	48
9.1 Recomendações para trabalhos futuros	49
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico e a comodidade proporcionada pela energia elétrica fizeram com que a população se tornasse cada vez mais dependente da eletricidade. Desta forma, o mercado se depara com um público exigente no que tange qualidade e confiabilidade da energia elétrica fornecida.

O aumento da demanda de carga para atender o consumo residencial, comercial e industrial exige maior capacidade produtiva das operações nos sistemas elétricos, o que as torna ainda mais complexas devido ao número elevado de interligações nos sistemas de proteção. Assim, todos os três setores do sistema elétrico (geração, transmissão e distribuição) sofrem alterações, mas a distribuição é o setor mais afetado.

Apesar de supervisionado, um sistema elétrico está sujeito a falhas, que podem ser ocasionadas por dispositivos de controle e segurança, na geração, transmissão ou distribuição da energia elétrica, bem como, por efeitos naturais, acidentes ou incidentes. O diagnóstico das falhas é realizado por operadores que recebem indicações de falta no sistema, e o mais rápido possível, devem localizá-la e classificá-la e localizá-la, a fim de reestabelecer a normalidade do circuito. As faltas e as falhas impactam no número de pessoas assistidas na distribuição, no tempo de retorno da realimentação, na logística para solução do problema e, até mesmo, em multas a serem pagas.

Para garantir a qualidade e a continuidade na entrega de energia elétrica, as concessionárias investem em tecnologia e automação das operações, além de investir na otimização do sistema de transmissão e distribuição. Tais procedimentos visam garantir a satisfação de seus consumidores com menor custo e maior eficiência.

Neste contexto, o presente trabalho propõe realizar um levantamento bibliográfico sobre os principais modelos matemáticos de reconfiguração para um sistema de distribuição de energia elétrica, com intuito de apontar um modelo.

De acordo com Almeida et al. (2006), a reconfiguração de sistema de distribuição de energia elétrica fundamenta-se na alteração da topologia da rede através do fechamento e abertura de chaves instaladas em pontos estratégicos, no controle em tempo real das operações a serem realizadas nos sistemas, para gerar uma resposta rápida e segura.

Observa-se que a reconfiguração não pode impedir uma falha, mas pode proporcionar uma maior estabilidade e autonomia para que o sistema seja reestabelecido em menor tempo e com maior precisão, reduzir as perdas de energia, melhorando a margem de segurança no sistema, aumentar a confiabilidade, reduzir gastos com manutenção do sistema e melhorar os índices de QEE (Qualidade da Energia Elétrica), DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), dentre outros.

Neste trabalho também foi indicada uma metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (Procedimentos de Busca Adaptativos Gulosos Randomizados)). Segundo trabalhos como o de Souza (2013), além de ser de fácil programação, esse algoritmo gera resultados promissores na resolução de problemas de programação inteira mista.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo realizar um levantamento bibliográfico dos modelos matemáticos de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, com intuito de propor um modelo matemático.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre as principais características de um sistema de distribuição de energia e sobre o modelo matemático de seus principais componentes;
- Analisar o modelo matemático do processo de reconfiguração de uma rede de energia elétrica, suas principais variáveis e restrições;
- Propor um modelo matemático e a utilização de um algoritmo para solucioná-lo.

3 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Segundo Almeida et al. (2006) é de grande importância que o sistema de distribuição de energia elétrica seja de ampla confiança, ao ponto que uma pequena falha não gere uma reação em cadeia. A necessidade que o sistema seja íntegro é de grande valia.

O sistema de distribuição começa nas usinas geradoras de energia elétrica e, por meio de linhas de transmissão, encaminham a energia gerada até a subestação de distribuição. Nesta subestação o nível de tensão é reduzido e, então, é distribuído para as cargas, conforme demonstrado na Figura 1.

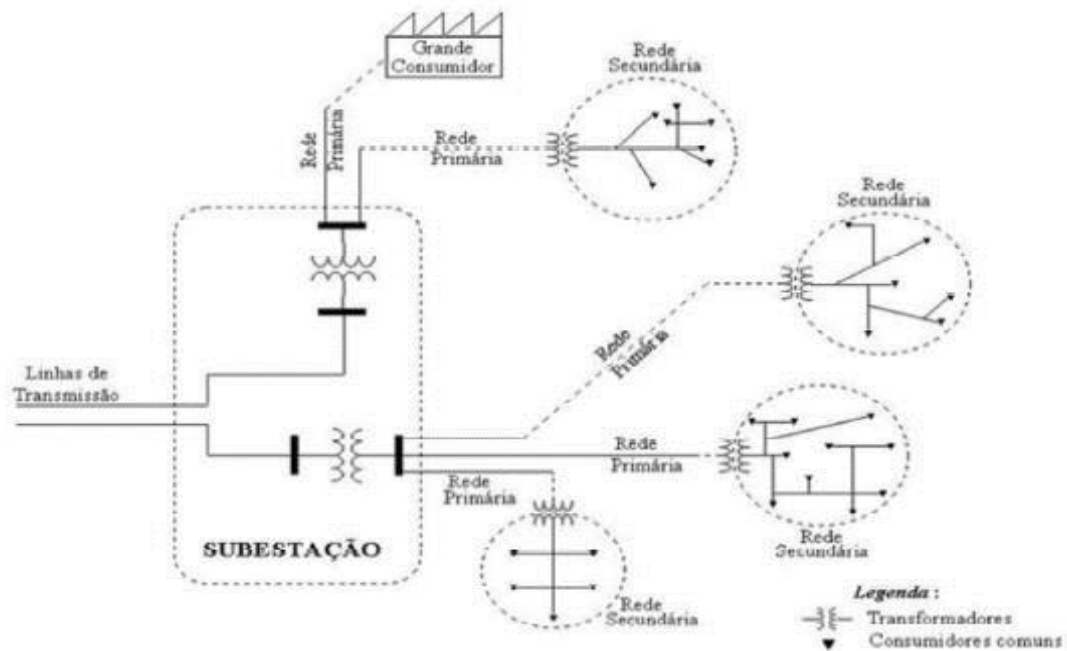
Figura 1 – Geração, transmissão e distribuição



Fonte: Srinivas (2000)

Silva (2016) ressalta que as subestações de distribuição têm objetivo de transportar energia até seus consumidores primários, que possuem uma demanda superior a 2500KW, usualmente recebem a energia em um nível de tensão que varia de 2,3KV a 13,8KV, conforme ilustrado na Figura 2. Tal energia chega até o consumidor final através de redes subterrâneas ou aéreas, através de postes, com uma capacidade de 12MW. Tratam-se como consumidores secundários as residências, comércios e pequenas indústrias, que já recebem a energia da rede, em níveis de tensão prontos para o consumo. Ao longo da rede existem transformadores de distribuição e estações transformadoras que realizam a conversão de tensão primária para secundária, em valor de 127V e 220V, para este consumidor final (SILVA, 2016).

Figura 2 – Representação de um sistema de distribuição radial



Fonte: Marquez (2014)

De acordo com Mantovani, Casari e Romero (2000), o sistema de distribuição de energia elétrica é configurado radialmente para facilitar fatores inerentes à proteção, como: coordenação e atenuação de correntes de curto-circuito, na busca de diminuir custos com equipamentos.

As chaves seccionadoras geralmente estão localizadas em pontos estratégicos e, ao serem abertas ou fechadas, possibilitam a alteração da topologia. Tal alteração visa reduzir as perdas ativas nos alimentadores, melhorar o perfil de tensão para os consumidores, eliminar e/ou isolar faltas para restaurar o fornecimento de energia e aumentar os níveis de confiabilidade. As seccionadoras servem também para o gerenciamento da configuração (reconfiguração), o que proporciona um balanceamento adequado das cargas no sistema, visto que são considerados os aspectos de confiabilidade da proteção e da qualidade de fornecimento de energia aos consumidores (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000).

3.1 Carga

Para Kagan (2010), as cargas de um sistema são classificadas em função de suas características, tais como: localização geográfica; tarifação; tensão de fornecimento; perturbações causadas. Enquanto, a potência da carga varia de acordo com sua natureza, com o módulo e a frequência da tensão de suprimento.

3.1.1 Carga de potência constante com a tensão

Segundo Kagan (2010), para esta condição, indiferente do valor da tensão a potência ativa e reativa não variam. Ou seja, as potências são iguais ao seu valor nominal, independente da tensão de fornecimento.

$$I_L = \left(\frac{S}{V_n}\right)^* = \frac{|S|}{|V_n|} < (\delta - \theta) = |I_L| < \alpha \quad (1)$$

Onde:

δ = Ângulo da tensão de fase;

θ = Ângulo do fator de potência.

A = Ângulo resultante;

IL = Corrente de linha;

S = Potência aparente;

Vn = Tensão nominal.

Portanto a corrente absorvida é inversamente proporcional à tensão.

3.1.2 Carga de corrente constante com a tensão

Conforme Kagan (2010), são aquelas cargas em que o ângulo de rotação de fase entre a tensão e a corrente é invariante. Ou seja, não sofre variação quando o valor da tensão se altera. Como exemplo de carga que apresenta esse comportamento, tem-se a lâmpada fluorescente, vapor de mercúrio, vapor de sódio.

$$I_L = |I_I| < (\delta - \theta) \quad (2)$$

Onde:

δ = Ângulo da tensão de fase;

θ = Ângulo do fator de potência.

I_L = Corrente de linha.

3.1.3 Carga de impedância constante com a tensão

Nesse tipo de carga a impedância é obtida a partir das potências ativas e reativas, absorvida pela carga e se mantém constante. São exemplos destas cargas, os capacitores, torneiras elétricas, chuveiros e equipamentos de aquecimento resistivos (KAGAN, 2010).

$$\frac{1}{Y} = Z = \frac{|V_n|^2}{S^*} = \frac{|V_n|^2}{S} < \theta = |Z| < \theta \quad (3)$$

As correntes de carga são dadas por:

$$I_L = \frac{V_n}{Z} = \frac{|V_n|}{|Z|} < (\delta - \theta) = |I_L| < \alpha \quad (4)$$

Onde:

Z = Impedância.

δ = Ângulo da tensão de fase;

θ = Ângulo do fator de potência.

α = Ângulo resultante;

I_L = Corrente de linha;

S = Potência aparente;

V_n = Tensão nominal.

3.1.4 Cargas constituídas por composição dos modelos anteriores

Atribuído um percentual dos três modelos citados anteriormente, modela-se uma carga. Desta forma, obtém-se a corrente de linha total que será atribuída a carga.

$$I_L = aI_L^P + bI_L^Z + cI_L^I \quad (5)$$

Onde:

$$0 \leq a, b, c \leq 1 \quad a + b + c = 1 \quad (6)$$

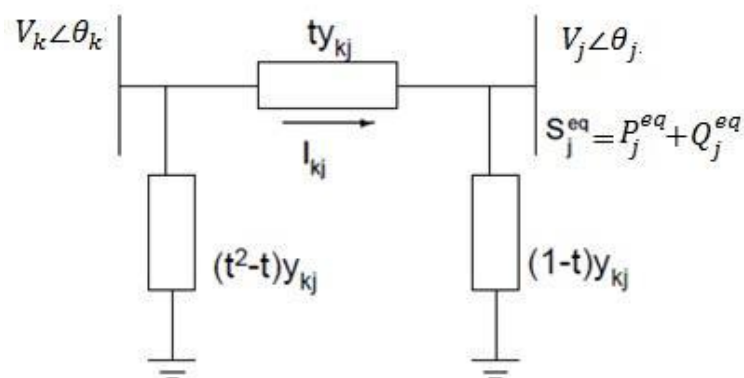
3.2 Transformador

Conforme Dias (2018), os transformadores de distribuição têm como objetivo reduzir o nível de tensão, com o primário no nível de tensão em 13,8KV e o secundário entre 380/220V e 220/127V. No primário do transformador existem proteções sobre corrente e descarga atmosférica, já no secundário não há proteções de saída.

No mercado, as potências especificadas são padronizadas entre 10, 15, 30, 45, 75, 112,5 e 150KV (KAGAN, 2010).

A Figura 03, conforme abaixo, apresenta um modelo de transformador que possui ajuste de taps.

Figura 3 – Modelo de um transformador com ajustes de taps



Fonte: Dias (2018)

Corrente através das barras k e j, tendo um transformador com taps ajustável para controle de tensão.

$$I_{Kj} = y_{Kj}t^2V_k - y_{kj}tV_j = (g_{kj} + jb_{kj})t^2V_k - (g_{kj} + jb_{kj})tV_j \quad (7)$$

$$I_{Kj} = -y_{Kj}tV_j + y_{kj}tV_k = -(g_{kj} + jb_{kj})tV_j + (g_{kj} + jb_{kj})tV_k \quad (8)$$

Onde:

I_{Kj}, I_{jk} = Correntes entre as barras k e j;

y_{kj} = Impedância da linha;

g_{kj}, g_{jk} = Resistência e reatância da linha

t = Variável do TAP;

V_k, V_j = Tensões nas barras j e k;

Parâmetros de descrição da linha através da equação biquadrática, pelos parâmetros A, B, C, e D:

$$A|V_j|^4 + B|V_j|^2 + C = 0 \quad (9)$$

Com a utilização das equações (10), (11), (12) e (13), torna-se possível o cálculo de fase da tensão na barra j e o cálculo da tensão de barra:

$$A = D = |y_{kj}|^2 = g_{kj}^2 + b_{kj}^2 \quad (10)$$

$$B = 2(P_j^{eq} g_{kj} - Q_j^{eq} b_{kj}) - y_{kj}^2 |tV_k|^2 \quad (11)$$

$$C = (P_j^{eq})^2 + (Q_j^{eq})^2 \quad (12)$$

$$\theta_j = \theta_k + \varphi_{kj} + \arctan\left(\frac{Q_j^{eq} - b_{kj}|V_j|^2}{P_j^{eq} - g_{kj}|V_j|^2}\right) \quad (13)$$

Onde:

P_j^{eq}, Q_j^{eq} = Potência ativa e reativa equivalente da barra;

g_{kj}, b_{kj} = Resistência e Reatância da linha;

θ_j, θ_k = Fases das tensões de barra;

O cálculo do fluxo de potência para ambos sentidos pode ser calculado ao utilizar as equações (14), (15) e (16).

$$S_{kj} = V_k I_{kj}^* = P_{kj} + jQ_{kj} \quad (14)$$

$$PL_{kj} = P_{kj} + P_{jk} \quad (15)$$

$$QL_{kj} = Q_{kj} + Q_{jk} \quad (16)$$

Onde:

S_{kj} = Potência aparente;

I_{kj}^* = Conjugado das correntes entre as barras K e j;

P_{kj}, P_{jk} = Potência ativa entre as barras k e j;

Q_{kj}, Q_{jk} = Potência reativa entre as barras k e j;

PL_{kj}, QL_{jk} = Perdas de potência ativa e reativa no transformador;

3.3 Reguladores de Tensão

Reguladores de tensão tem como finalidade controlar os níveis de tensão em um circuito elétrico, a fim de mantê-los dentro dos limites operacionais é denominado o regulador de tensão. Utiliza-se o TAP (*Transformer Adjustment Position*) do enrolamento do transformador, para alteração do controle da tensão no qual se respeita o tempo que a tensão leva para se adequar dentro da faixa definida, segundo Marques (2018).

Conforme a NBR 11809 (1992), ao possuir um enrolamento de excitação o regulador de tensão induz no enrolamento um valor de tensão, ao qual pode ser subtraída ou adicionada automaticamente, de acordo com o valor de tensão ajustado.

3.4 Perdas do sistema de distribuição de energia elétrica

Segundo Figueiredo (2012), conhecer a origem das perdas, os processos que envolvem geração, transmissão e distribuição é fundamental para as concessionárias de energia. Uma vez que as perdas não podem ser evitadas, o que se pode fazer é tentar minimizar seus impactos para um nível aceitável e reduzir o prejuízo para empresa.

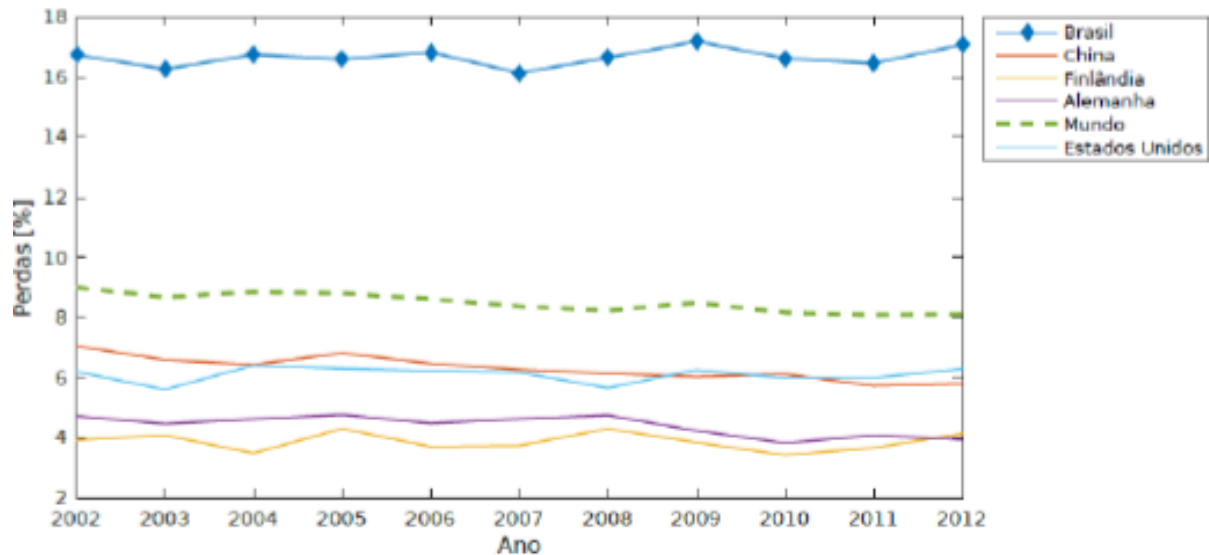
A perda em um sistema de distribuição pode ser obtida através da diferença da energia injetada e a energia fornecida pela distribuidora, composta pelas perdas de origem técnica e não técnica, conforme Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico – PRODIST (ANEEL, 2017).

De acordo com ANEEL (2008), as perdas não técnicas são apuradas pela diferença entre as perdas na distribuição e as perdas técnicas, considerada a distribuição de energia elétrica, tais como furtos de energia, erros de medição, dentre outros. Já perdas técnicas (PT) são perdas de energia inerentes ao processo de geração, transmissão e distribuição de energia e acontecem principalmente por causa do efeito Joule em condutores das linhas de alta tensão e redes de média e baixa tensão, em transformadores de média e baixa tensão, ramais de ligação, medidores, conexões e equipamentos.

Pereira (2014) ressalta que as perdas dos sistemas de distribuição de energia elétrica são apuradas a partir do "Módulo 7 - Cálculo de Perdas na Distribuição" do PRODIST que estabelece a metodologia apropriada, os procedimentos de apuração, os dados topológicos georreferenciados e de medições. Conforme o Prodinst (2018), as perdas de energia nas redes e equipamentos correlacionados ao sistema de distribuição de média e baixa tensão são adquiridas através do método de fluxo de potência, onde elementos não lineares são conceituados como equipotentes de Norton, com a admitância nodal constante e ajuste na porção não linear devido a uma corrente de compensação. Através do fluxo de potência um valor de tensão é encontrado, o qual desconecta todas as cargas do sistema e considera-se os elementos possíveis que estão ligados em série no circuito. Iniciado o ciclo de alterações, obtidas as correntes inseridas através dos ativos conectados junto ao circuito e adicionadas ao vetor de injeção de corrente, soluciona-se assim o problema, de forma a obter novos valores de tensão.

De acordo com Silva (2016), a soma total das perdas no sistema é denominada como indicador de eficiência. A Figura 4 apresenta o desempenho do sistema elétrico de alguns países do mundo.

Figura 4 – Perdas elétricas de transmissão e distribuição em %



Fonte: Silva (2016)

Ao comparar o sistema elétrico brasileiro ao da China, Estados Unidos, Finlândia, Alemanha e a média mundial, observa-se que o Brasil possui um alto nível de perdas. Estados Unidos e China possuem uma extensão territorial, maior que o Brasil, ainda assim possuem um melhor desempenho no setor energético, já a Alemanha e a Finlândia são referência em eficiência, e possuem apenas 4% de perda.

A próxima seção abordará fluxo de potência e os principais métodos de cálculos.

4 FLUXO DE POTÊNCIA

Com base no estudo do fluxo de potência, Kagan (2010) sugere que é possível compreender a topologia de um circuito elétrico, seus componentes e representar a rede elétrica. Desta forma, utiliza-se o fluxo de potência para simular operações em rede, com a finalidade de:

- Calcular as tensões nas barras de rede, o que possibilita a verificação dos níveis de tensão tecnicamente corretos.
- Calcular a corrente e a potência que flui pelos trechos da rede, sem desprezar os limites de carregamentos.
- Calcular as perdas de potência e de energia. Assim, definir a necessidade de novos estudos para obter o melhor desempenho técnico e econômico.
- Determinar os níveis de desequilíbrio de corrente e tensão, para redes assimétricas e desequilibradas.

Os métodos utilizados para desenvolver o estudo do fluxo de potência dependem da simetria da rede, do equilíbrio das cargas, também dependem das características dos ramais, até mesmo de como a concessionária realiza as conexões dos transformadores (KAGAN, 2010).

O fluxo de potência apresenta-se como verdadeiro aliado para determinar perdas dentro do processo de reconfiguração da rede, que será realizado a partir de um modelo matemático desenvolvido. Modelo este que garante a radialidade do sistema.

4.1 Métodos tradicionais para cálculo de fluxo de potência

De acordo com Bicalho e Uburbey (2004), os métodos tradicionais para cálculo de fluxo de potência apresentam características frágeis de convergência quando aplicados a redes de distribuição. O método de Gauss-Seidel indireto é caracterizado por ser insensível às tensões iniciais estimadas e apresenta convergência lenta, muito acentuada em sistemas radiais, o que torna sua utilização menos frequente.

A topologia radial do sistema, segundo Bicalho e Uurbey (2004), faz com que valores da diagonal da matriz Y sejam pequenos. Logo, como o perfil de tensões da próxima iteração é inversamente proporcional a tais valores, são produzidas grandes oscilações, o que a torna lenta a convergência. A confiabilidade do método de Gauss-Seidel direto é maior, posto que dificilmente o método divirja. Embora as tensões de oscilação se apresentem maiores que no método indireto, o processo global converge mais rapidamente.

O método Gauss-Seidel direto é também menos dependente do tamanho do sistema. Posto que a matriz de impedância de nós (matriz Z) é cheia, fornecendo um bom acoplamento matemático entre as tensões de barras. Contudo, esse método apresenta grande desvantagem no que diz respeito ao uso de memória requerida para armazenar a matriz Z e o alto tempo de processamento demandado para obtê-la. Uma possível solução é armazená-la e invertê-la em cada iteração para obter a matriz Z . Isto reduz consideravelmente a quantidade de memória, no entanto, aumenta muito a carga computacional, fazendo com que este método não seja muito utilizado no cálculo de fluxo de potência em sistemas de distribuição (BICALHO; UTURBEY, 2004).

O método de Newton-Raphson completo e versões desacopladas são conhecidos por terem excelentes características de convergência. Contudo, esse método apresenta como principal desvantagem o fato de ser necessário calcular e inverter a matriz Jacobiana a cada iteração do algoritmo, o que representa em média o dobro do tamanho da matriz Y . Como a matriz Jacobiana tem características de esparsidade iguais as da matriz Y é possível utilizar técnicas de inversão que reduziriam o tempo processamento. No entanto, as versões desacopladas fazem uso de uma série de aproximações baseadas em considerações sobre razão X/R , que não são efetivas em sistemas de distribuição. Assim, esse método também não é muito atrativo para o cálculo de fluxo de potência em sistemas de distribuição (BICALHO; UTURBEY, 2004).

4.2 Fluxo de potência em redes radiais

Após fixar a topologia da rede, deve-se obter os dados elétricos referentes a cada elemento do circuito. Os dados de barras são subdivididos em barras:

- Barra de tensão controlada: são as barras que possuem o valor da tensão constante.
- Barra de carga: são as barras que compensam o valor da carga.
- Barra de passagem: são barras que fazem a interconexão com trecho de tensão controlada ou com carga.

Por outro lado, os trechos da rede identificados por barras extremas têm o seu comprimento como característica básica, a seção dos cabos e sua configuração geométrica no poste (KAGAN, 2010).

O cálculo do fluxo de carga em redes elétricas consiste em determinar a magnitude, o ângulo das tensões nas barras, o fluxo de potência nas linhas e as perdas elétricas. Para calcular o fluxo de potência em redes radiais utiliza-se o método das somas de potências MSP e assumi-se que as cargas possuem potência constante.

Antes de iniciar o cálculo, é necessário que as tensões das barras tenham valores iguais à barra de referência (subestação), para então iniciar o processo que consiste em duas etapas, conforme Srinivas (2000). A primeira etapa, chamada inversa, consiste no acúmulo das potências a partir das barras extremas em direção à raiz (subestação). A segunda etapa, a direta, consiste na correção das tensões nas barras, da subestação em direção das barras terminais.

Srinivas (2000) define que os métodos mais eficientes para o fluxo de potência na rede de distribuição radial disponível na literatura especializada estão divididos nas seguintes categorias:

- Métodos de varredura direta e inversa;
- Métodos baseado na matriz impedância nodal implícita.

O método de varredura direta a rede é representada por uma árvore orientada, onde a raiz representa a subestação, o tronco o ramal principal e os ramos são associados aos ramais secundários. É recomendado principalmente para sistemas puramente radiais. O método de varredura reversa fundamenta-se nos extremos e utiliza de uma estimativa inicial das tensões nodais, ao qual, calcula as correntes ou fluxo nas linhas até o nó raiz.

É repetido este processo até que não se variam mais que um valor de tolerância pré-estabelecido. Assim, consiste em duas versões soma de corrente e soma das potências.

Já o de matriz implícita nodal manipula uma definição mais adequada para sistemas malhados. Baseado na formação e fatoração da matriz de admitância nodal como injeções de corrente equivalentes para resolução, o efeito da fonte e das cargas é representado separadamente por superposição (SRINIVAS, 2000).

Conhecido os fluxos de potência, a próxima seção irá discorrer sobre interrupções e o processo de restauração de redes.

5 INTERRUPÇÕES E RESTAURAÇÕES NAS REDES

Neste tópico serão apresentados os principais conceitos de interrupções e restauração. Visto que, antes de analisar a restauração, se faz necessário compreender as interrupções que antecedem este ciclo.

5.1 Interrupções nas redes

Quando os níveis de tensão terminal, em circuitos de consumo, aproximam-se a zero, são interpretados como interrupções. Entretanto, existe uma divergência entre as entidades reguladoras em estabelecer um valor único. Neto (2011) aponta que para o *European Committee for Electrotechnical Standardization* (CENELEC) níveis de tensão menores que 1% do que foi contratado caracteriza-se interrupção. Porém, para a ANEEL (2016), e o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) interrupção é interpretada quando os níveis de tensão nominal chegam abaixo de 10%.

Para Neto (2011), ao serem divididas em relação ao seu tempo de duração, as interrupções no fornecimento são classificadas como curtas ou longas. Quando existe uma falta menor que três minutos são geralmente definidas como momentâneas e/ou temporárias. As interrupções superiores há três minutos são consideradas longas e severas e não são restabelecidas rapidamente.

Segundo Bollen (2000), as falhas para atuação no sistema de proteção podem ocorrer por sobrecarga, variações na frequência do sistema, disparos acidentais decorrentes de avarias, má qualidade ou desgaste natural em partes mecânicas ou elétricas e por ações por parte do sistema.

5.2 Restauração do sistema de distribuição de energia elétrica

Segundo Neto (2011), na restauração do sistema de distribuição de energia elétrica, ao ocorrer uma falha, o primeiro a atuar é o dispositivo de proteção, o que interrompe o abastecimento de energia elétrica regional, acarreta falta no sistema em um processo de isolamento após a identificação, conforme demonstrado na Figura 5. Nessa primeira etapa, o gasto de tempo envolvido é menor do que as etapas seguintes. Para que sejam executadas as etapas de localização, isolamento

e reestabelecimento do sistema são necessário mais tempo em função da complexidade das decisões envolvidas em cada uma.

Figura 5 – Etapas do problema de restauração de redes



Fonte: Neto (2011)

De acordo com Miliorini (2013), é essencial o uso de dispositivo de proteção nas linhas de distribuição. Esses dispositivos são capazes de detectar curto-circuito e ruptura de cabos, de modo a evitar que se torne um ambiente perigoso para o sistema elétrico e para as pessoas.

Para Neto (2011), a instalação de equipamentos de proteção deve ser realizada por toda extensão do sistema de distribuição, no intuito de garantir a segurança do próprio circuito e de usuários, caso aconteça alguma falha ou outro problema na rede. Tais dispositivos são também utilizados para manobras e para garantir que o problema seja isolado e não seja replicado no sistema, o que pode desencadear um desligamento de maiores proporções.

As grandezas elétricas no sistema de distribuição são monitoradas por disjuntores e religadores que protegem a rede e detecta picos de corrente ou ausência de tensão. Ligar ou desligar um circuito elétrico através de contatos elétricos internos é a sua principal função. Ao serem detectados surtos na rede, os dispositivos são acionados porque são programados dentro de uma lógica que estabelece uma margem de segurança para o circuito. Diferenciado apenas pelo tamanho, mas com o mesmo princípio de funcionamento, os religadores são menores e geralmente instalados ao longo da rede de distribuição (NETO, 2011).

Dessa forma, adotar tais medidas é de suma importância para que a busca por novas tecnologias aperfeiçoe os serviços operacionais, reduza o tempo de reestabelecimento em certos casos de desligamentos, melhore a segurança dos envolvidos, minimizar falhas humanas e proporcionar ganhos nos indicadores estabelecidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), conforme Neto (2011).

A próxima seção demonstrará modelos matemáticos de reconfiguração de sistemas de distribuição que visam minimizar o tempo de interrupções.

6 MODELOS MATEMÁTICOS DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

A ANNEL (2019) exige das concessionárias um nível de continuidade na rede, a fim de diminuir o tempo das interrupções. Esses estudos buscam desenvolver métodos que visam minimizar as consequências nas paradas indesejadas, denominadas como falta. A formulação do problema de reconfiguração, é modelada com um problema de otimização, objetiva diminuir o número de consumidores afetados com a falta, para assim reestabelecer a carga, pode-se considerar também minimizar o número de chaveamentos durante a operação de reestabelecimento junto à minimização das perdas, entre outros objetivos.

Segundo Ferreira (2017), a função objetivo visa minimizar o problema de reconfiguração de rede de distribuição de energia elétrica, busca diminuir a quantidade de perdas técnicas na rede, representa um problema de programação não linear inteira mista, devido ao modelo apresentar variáveis inteiras e contínuas e restrições não lineares. Ao representar o estado das chaves do sistema, as variáveis inteiras, correspondem as variáveis binárias, que quando representam o valor um condiz que a chave está fechada, e quando representa o valor zero a chave está aberta. Já as variáveis contínuas são particulares as variáveis de estado e de controle, as tensões nas barras e as defasagens angulares, as restrições não lineares são a representação da multiplicação das variáveis em potência.

A função objetivo nessas condições corresponderá ao cálculo das perdas técnicas, que é proporcional a corrente nos trechos e as tensões nodais. Portanto, ao utilizar essa modelagem de problema, busca-se desenvolver uma metodologia que contemple as incertezas sobre as cargas nas barras, na busca de resultados próximos do ocorrido nas operações diárias (FERREIRA, 2017). Ao levar em consideração esse tipo de abordagem, alcançou-se a obtenção da topologia radial, conexa e viável tecnicamente para os cenários analisados. O estudo aponta para flexibilização e utilização das ferramentas computacionais e comerciais para representar incertezas. Apesar de o número elevado de intervenções ainda ser um ponto negativo nesse caso, cria-se uma janela de oportunidades e questões para tratar esse tipo de modelo, considera-se também que é possível tratar problemas desta e de outras naturezas.

Já o trabalho de Amasifen, Romero e Mantovani (2005), apresenta um problema de reconfiguração que tem como objetivo a minimização da perda, o que proporciona um modelo matemático de otimização não linear, com variáveis inteiras e contínuas. O problema de reconfiguração de redes de distribuição leva em consideração as restrições de fluxo de carga; radialidade; níveis de tensão; confiabilidade do sistema; balanço de carga entre os alimentadores e o fluxo de potência ativa máxima. Por propor um modelo não linear com restrições de radialidade do sistema, torna-se complexo representar algebricamente esse cenário. Embora a alta complexibilidade devido às restrições, o modelo manifestou-se eficiente e adequado para solucionar o problema, por encontrar em tempo hábil uma configuração de boa qualidade.

No estudo desenvolvido por Sanches et al. (2014), considera-se múltiplos objetivos e restrições, através de uma modelagem não linear inteiro mista, na qual a função objetivo trata o problema de reestabelecimento, busca o ajuste do nível de tensão com um número mínimo de chaveamentos e diminuição das perdas técnicas. Assim, maximiza o atendimento a demanda. Neste caso, o problema de otimização envolve as restrições de se manter a estrutura radial da rede.

Na abordagem apresentada por Dias (2018), as perdas não foram alvo da otimização, uma vez que esta retornará a sua configuração padrão após a parada para manutenção. A função objetivo considera o reestabelecimento da carga em um menor intervalo de tempo, com um menor número de chaveamentos, assim como grande parte dos trabalhos que tratam desse assunto. Leva em consideração suas restrições como o nível de fluxo nos condutores, os níveis da magnitude de tensão em regime permanente, devem estar dentro das faixas aceitáveis pelos órgãos reguladores e mantém a configuração da rede radial.

A proposta de reestabelecimento, demonstrada por Souza (2018) nas interrupções permanentes, é formulada por dois critérios de otimização, um relaciona à minimização dos chaveamentos e outro a maximização de cargas atendidas. De acordo com as características dos sistemas elétricos, devem ser introduzidos os critérios especiais. Os critérios de otimização tratados nessa formulação são hierarquizados, pois se entende que um dos critérios é de maior importância. Assim, a entrega da carga máxima é tratada como prioridade nessa proposta. Portanto, esses critérios são formulados para atenderem condições especiais como cargas prioritárias em hospital, shopping e outros. Considera-se que

os modelos matemáticos propostos, obtiveram soluções satisfatórias em tempo considerado adequado.

Ferreira (2010) ressalta que a função objetivo da reconfiguração, considera a minimização no número de consumidores não atendidos, as perdas sofridas pelos condutores, os números de chave de manobras manual e os chaveamentos por telecomando. A solução a ser implementada deve manter o sistema em condições seguras de operação, com proteção e o controle ativo. Deve-se considerar que a topologia radial do sistema seja conservada, desta forma, as manobras de chaveamento, sejam elas manuais ou por telecomando, devem garantir que o sistema não sofra alterações em sua topologia padrão. O método se mostrou eficiente na solução do problema, com tempo de execução baixo o suficiente para viabilizar o processo de otimização, demonstrou ser bastante robusto obteve-se a solução em no máximo três iterações.

Nas redes inteligentes, Heck et al. (2015) aponta que as chaves de manobras ou seccionamento telecomandados considera a automação nas redes de distribuição de energia. Esses equipamentos inteligentes permitem maior agilidade na obtenção de informações do sistema, possibilita seu controle remotamente pelos centros de operação. Desta forma, diminui o número de consumidores afetados pela falta de energia e o tempo gasto no reestabelecimento da rede, o que o torna tecnicamente viável a implementação de redes de acessos nas subestações de distribuição de energia elétrica. Viabiliza a utilização de redes sem fio ou cabos ópticos ethernet, essenciais em equipamentos que podem ser reparametrizados, assim minimiza o número de consumidores afetados com a falta e o tempo gasto no reestabelecimento da rede, o que torna viável a implementação da rede.

Na proposta apresentada por Neto (2011), ao incluir a minimização das perdas no objetivo do problema, perde-se o conceito essencial do problema de restauração. Mesmo que seja uma visão dos autores pioneiros no estudo de restauração, uma vez que essa condição é temporária, já que a rede voltará a sua radialidade padrão, após a manutenção. Sempre que possível deve ser considerado o tempo de reestabelecimento do sistema, que na maioria das vezes é caracterizado por meio de manobras no chaveamento do sistema. O trabalho apresentado por Neto (2011), trouxe como função objetivo a minimização do número de consumidores fora de serviço e minimizar o número de chaveamentos na restauração da rede, considera-se como restrições o nível máximo de fluxo nos equipamentos e/ou condutores deve

ser mantido, onde o nível máximo de fluxo de potência nos transformadores da subestação deverá ser mantido abaixo do seu limite operacional. Obtém-se assim a configuração do sistema de distribuição após a restauração, para que seja mantida em um formato radial, de forma a proporcionar um baixo tempo computacional em sua execução e boa qualidade obtida nos resultados.

Para Neto (2011), a restauração consiste na minimização do número de consumidores fora de serviço, por um menor intervalo de tempo. Em contrapartida, Toune et al. (2002) observa que não há um modelo consolidado, apesar da literatura ao longo dos anos ter experimentado modelos matemáticos. Mun et al. (2001) salienta que, ao tratar um problema com multiobjetivos, pode-se considerar a utilização da técnica de ponderação de pesos, onde se agrega todos os objetivos em uma só técnica. Considera-se a técnica de ponderação de pesos, os índices avaliados devem ser corretamente calibrados, pois interferem nos resultados.

De acordo com as referências estudadas, é possível verificar que os modelos variam com a melhoria a ser realizada na rede, de acordo com a topologia, as perdas, o número de chaveamento, para modelar matematicamente o sistema, os modelos obtiveram resultados satisfatórios, apesar de alguns considerarem um tempo relativamente alto no reestabelecimento.

A partir dos modelos matemáticos de reconfiguração de um sistema de distribuição, a seção seguinte irá demonstrar as técnicas utilizadas para solução do problema de restauração.

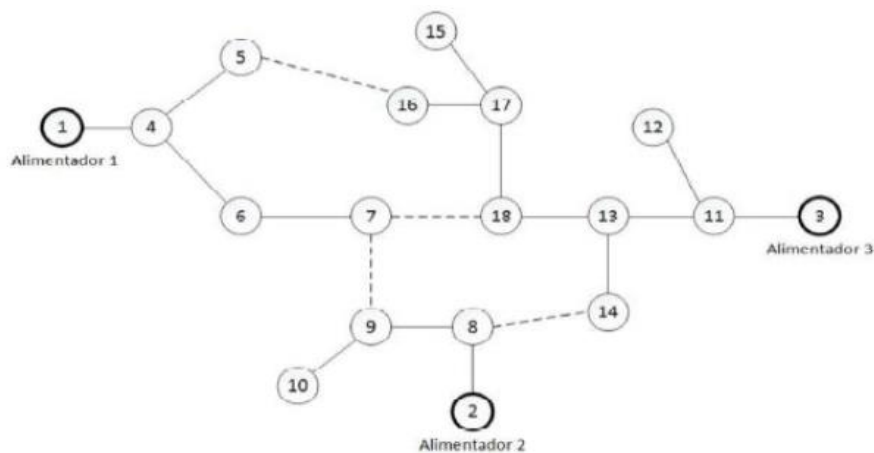
7 TÉCNICAS DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

O fornecimento de energia elétrica de forma contínua e dentro dos padrões de qualidade é a premissa básica do sistema de distribuição. Porém, inevitavelmente, ocorrem interrupções nesse fornecimento que podem ser causadas por ocorrência de faltas no sistema ou até mesmo por uma operação de manutenção na rede (HENRIQUE, 2014).

Ainda citando Henrique (2014), o sentido do fluxo de potência é único nos alimentadores e a energia percorre um único caminho para chegar aos consumidores. Tudo isto, devido à estrutura radial do sistema de distribuição. Assim, possibilita que, com o seccionamento de uma das chaves, todo o circuito a frente seja desligado. Neste momento uma reconfiguração do sistema entra em análise para minimizar o impacto causado aos consumidores, de maneira rápida e confiável para o reestabelecimento do sistema.

A nível de exemplo, o circuito demonstrado na Figura 6, possui três alimentadores interligados em linhas contínuas, chaves normalmente fechadas e em linhas tracejas chaves normalmente abertas.

Figura 6 – Representação distribuição

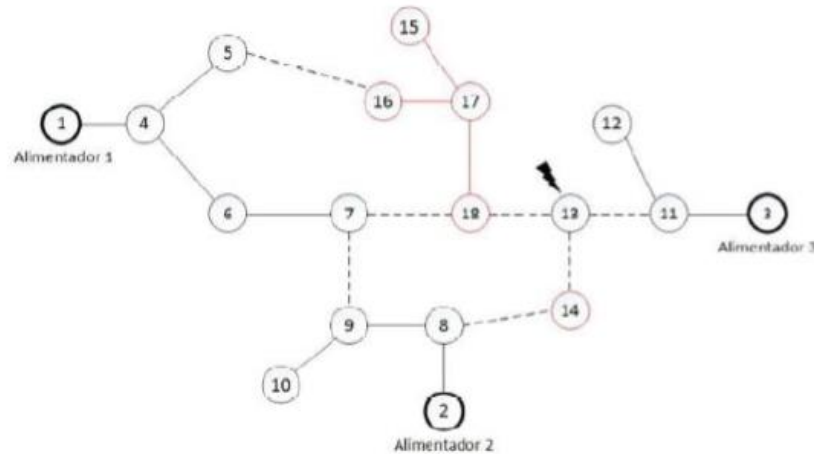


Fonte: Henrique (2014)

Após um dado momento o setor de área 13 apresenta uma falta e para resolver o problema deve-se seccionar o circuito a montante e jusante, o que mantém os setores de 14, 15, 16, 17 e 18 fora da rede, ao qual eles não possuem correlação junto à falta.

A Figura 7 apresenta a representação da distribuição assim que dada a falta.

Figura 7 – Representação da distribuição durante a falta

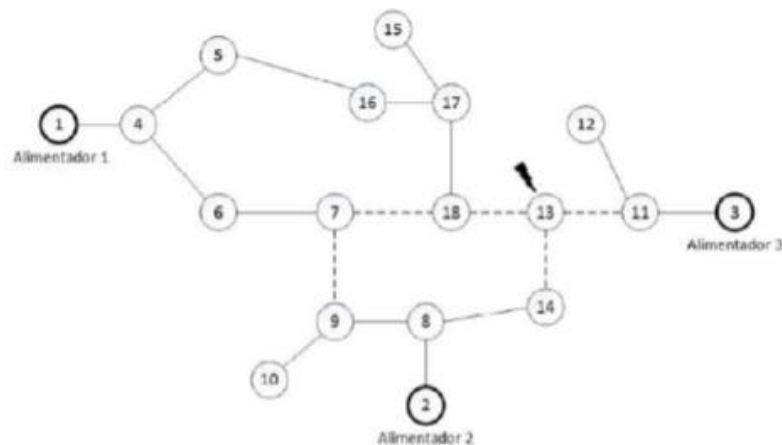


Fonte: Henrique (2014)

A condição apresentada na Figura 7 configura o problema através do uso da reconfiguração do sistema de distribuição. Determinam-se o reestabelecimento da alimentação para os pontos 14, 15, 16, 17 e 18 através de uma nova configuração da rede de distribuição, constituído em curto espaço de tempo, de forma a manter a qualidade e confiabilidade da minimização da falta. Assim, uma nova configuração é atualizada onde se tem a conexão entre o ponto 14 junto ao ponto 08, ao ter sua alimentação proveniente do alimentador dois e uma conexão entre o ponto 05 junto ao 16, restabelece a alimentação junto ao ponto 15, 17 e 18.

Já a Figura 8 demonstra como se daria o reestabelecimento a partir da utilização de um sistema com uma nova configuração.

Figura 8 – Configuração do sistema com uma nova configuração



Fonte: Henrique (2014)

Entretanto, para que o reestabelecimento de energia seja considerado realizado com sucesso é necessário atender as seguintes condições, segundo Henrique (2014):

- Estrutura radial deve se manter após o reestabelecimento;
- Cada alimentador não deve exceder a capacidade limite da subestação;
- O valor de corrente mantenha-se nos limites nominais das chaves;
- Não seja ultrapassado o limite de queda de tensão.

O pensamento humano torna-se comutado pela inteligência artificial, para soluções de problemas específicos. Ao aplicar a inteligência artificial nas soluções dos problemas de reestabelecimento de redes elétricas, as análises dos complexos tornam-se flexíveis aos sistemas implementados atualmente (BORGES, 2012).

7.1 Algoritmo Genético

Os algoritmos genéticos são considerados métodos eficazes nas soluções dos problemas de sistemas elétricos complexos, devido as suas capacidades de buscar soluções globais ótimas para problemas de grande escala com otimização combinatória (BORGES, 2012).

Na proposta de Manjunath e Mohan (2007) é apresentada uma alteração no AG, busca-se uma resposta de forma rápida e com a mesma precisão para o reestabelecimento da rede de distribuição de energia. A seleção do cromossomo (os caracteres são codificados de uma maneira que o AG possa realizar a manipulação) é baseada na função objetivo do problema, assim, diminuirá o número de iterações, já que foi baseado em condições testadas anteriormente para o mesmo problema. A função objetivo busca reestabelecer a quantidade de carga sujeito a restrições de tensão, sobrecargas e transformadores, consumidores prioritários e radialidade do sistema. Tornando difícil a avaliação da qualidade do método, pois seus testes foram realizados em um pequeno número de barras.

Já o estudo de Júnior, Braga e Haffner (2018) visa uma redução das perdas na rede e no transformador. Utiliza-se uma rede trifásica, que possui nove nós e é de baixa tensão, usa-se o algoritmo genético como método de otimização, sua função objetiva considera a minimização das perdas anualmente. Em busca de

reproduzir possíveis soluções de boa qualidade foi desenvolvido pelo trabalho definição de padrões de conexão e padrões de fase. Verifica-se assim que o método desenvolvido se trata de uma abordagem eficiente para o estudo de minimização de perdas, através do balanceamento de cargas, o que o torna útil para problemas similares. Ao observar a simulação foi possível concluir que ao elevar o número populacional os parâmetros encontrados aperfeiçoaram a solução obtida pelo método de AG Proposto.

O estudo desenvolvido por Silva e Filho (2018) para definir os parâmetros do relé de um alimentador de forma otimizada e com respeito aos critérios de coordenação, foi utilizado o algoritmo genético. O algoritmo desenvolvido nesse trabalho considera a função multimodal e com espaço de busca contínuo, utiliza os valores da curva de cada relé do circuito e tem como função objetivo minimizar o tempo de operação dos relés. Os autores utilizaram um alimentador real do sistema de distribuição de 13,8kV, no teste da metodologia do processo.

7.2 GRASP

A metaheurística GRASP baseia-se em conceitos existentes na ciência de otimização do sistema de distribuição elétrico. Essa metaheurística utiliza de princípios construtivos, busca local adaptativa e aleatória e se aplica em problemas complexos (SOUZA, 2013).

A metaheurística GRASP é uma junção dos heurísticos construtivos e da busca entre vizinhanças, ao ser dividida entre a fase construtiva e de melhoria local. A fase construtiva é responsável por buscar e adicionar componentes de soluções em cada passo, em cada um se escolhe uma componente de qualidade que é indicado por um indicador de sensibilidade. Na outra fase a de melhoria local, utiliza-se um algoritmo de busca, que visa encontrar na vizinhança uma melhor solução para determinado problema. Almeja sempre diminuir o espaço de busca, o GRASP ainda conta com uma fase de pré-processamento, nessa fase é verificado se o componente participa da solução do problema ou pode ser descartado, assim é possível fixar variáveis inteiras ou binárias antes de iniciar o processo de construção. O algoritmo tem como critério de parada os números de iterações executados, que é definido pelo usuário, desta forma, o algoritmo testa todas as soluções encontradas nas fases construtivas e de melhoria local e então apresenta como resolução do

problema a melhor solução encontrada em todas as iterações. Portanto, a metodologia proposta no GRASP é confiável, eficiente e segura. Obteve-se um desempenho satisfatório aos testes que foram submetidos, apesar de possuir um tempo relativamente elevado para realizar o processamento (SOUZA, 2013).

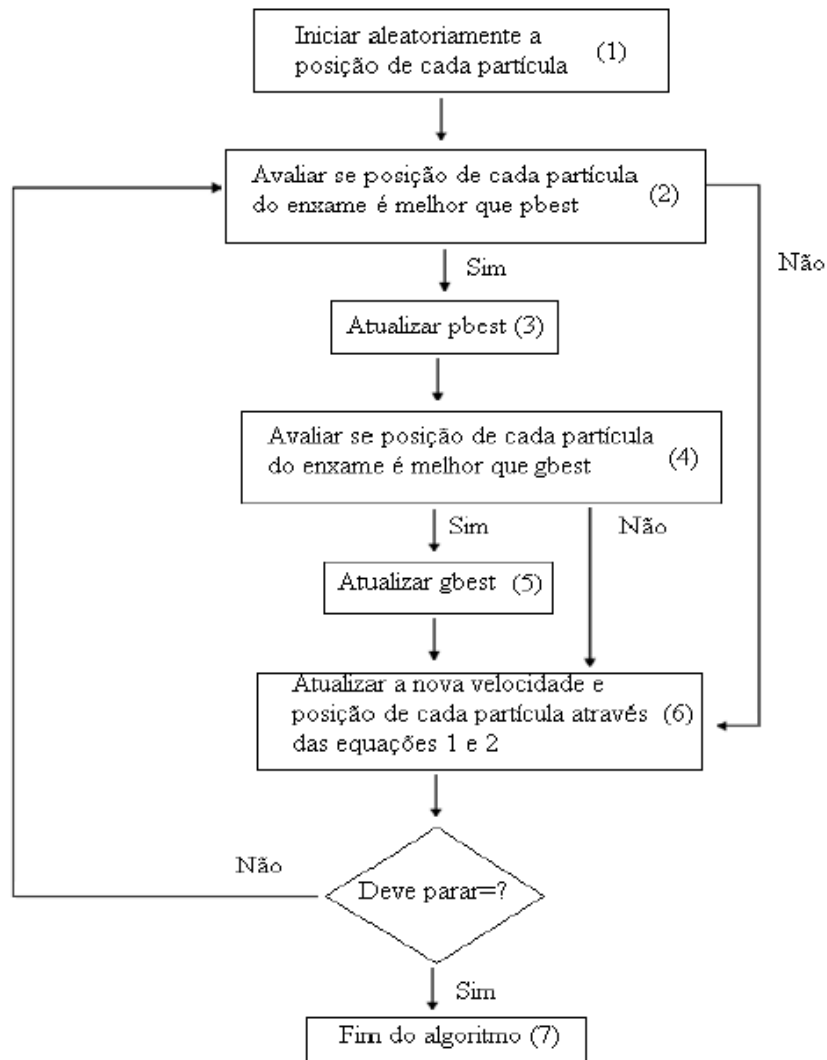
Já no problema tratado por Lavorato e Souza (2012), que tem como objetivo diminuir perdas ativas no sistema de distribuição de energia, foi utilizado na fase construtiva uma generalização do algoritmo heurístico construtivo. Desta forma, se faz necessário solucionar um problema de programação não linear em todas as iterações. Em cada uma delas, insere-se um circuito escolhido aleatoriamente de uma lista pré-selecionada para solucionar o problema. Adicionado ao modelo, uma variável que identifica os circuitos já fechados e após o processo de construção proporciona uma possível solução para o problema. Já na fase de melhoria local, o objetivo é buscar uma melhor configuração dentro da vizinhança nas soluções que foram obtidas na fase anterior. O algoritmo testado apresenta soluções possíveis para problemas de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. Realizadas as comparações entre os resultados obtidos com os já existentes na literatura, foi possível verificar a eficiência da metodologia proposta que diz respeito à qualidade dos resultados obtidos.

7.3 PSO

O método denominado Otimização por Exame de Partículas ou *Particle Swarm Optimization* (PSO), refere-se ao algoritmo de otimização baseado no comportamento social de um bando de pássaros, observado como base a iteração ao longo do voo e a busca por alimentos, esses quesitos são observados e modelados como mecanismo de otimização. O termo partícula representa os pássaros e cada possibilidade de solução para solucionar o problema. Os pássaros sobrevoam uma determinada região com uma velocidade, o que representa o espaço de busca com as possíveis soluções. Encontrar uma solução de boa qualidade para o problema proposto, significa encontrar alimento e local seguro para os pássaros. Em busca de aproximar as partículas de uma solução de boa qualidade e evitar que se percam pelo espaço de busca e que nunca alcance seu objetivo, a função objetivo que avalia as partículas informa quão boa é sua posição (SOUBE, 2015).

Oliveira (2012) afirma que após percorrerem o percurso e o espaço de busca, seguindo as posições encontradas pela partícula e pelo bando a procura do alvo (objetivo), essas posições seguidas pelas partículas são classificadas com: a melhor posição encontrada até o momento pela partícula denominada *pbest*, e a melhor posição encontrada pelo bando ao considerar todas as partículas, pode ser chamada de *gbest*. Ao final da execução, apresenta-se a melhor ou as melhores soluções encontradas como solução de acordo com a função objetivo. A Figura 9 ilustra um fluxograma de funcionamento do algoritmo PSO.

Figura 9 – Fluxograma PSO



Fonte: Soube (2015)

Ao considerar as etapas do fluxograma do algoritmo PSO, separadamente tem-se então:

- A posição e velocidade de cada partícula da população são geradas aleatoriamente no espaço de buscas (1)
- Compara-se o valor obtido da partícula com o *pbest* (2). Encontrado o valor melhor, é necessário atualizar o *pbest* com um novo valor (3).
- Compara-se o valor obtido da partícula com o *gbest* (4). Encontrado o valor melhor, é necessário atualizar o *gbest* com um novo valor (5).
- Altera-se o valor da velocidade e a posição da partícula (6).
- Caso não satisfaça o critério de parada, é necessário que se reinicie o processo no passo (2) e se repita todos os passos, ao satisfazer o critério de parada encerra-se o algoritmo (7).

7.4 Colônia de Formigas

O método de otimização colônia de formigas, é um algoritmo computacional que imita o comportamento natural dos insetos que depositam feromônios pelo caminho como forma de demarcar o melhor trajeto a ser seguido pelos outros membros da colônia. Com o avanço das pesquisas esse comportamento foi utilizado para resolver problemas de otimização complexos e discretos (PEREIRA, 2010).

Ao utilizar o método de colônia de formiga, Lu et al. (2010) propôs uma metodologia de reestabelecimento. A função objetivo visa à maximização da carga de acordo com a prioridade do consumidor e busca minimizar o número de chaveamentos manual e telecomandados, que são necessários para suprir a falta enquanto se realiza a manutenção na rede. O sistema capaz de restabelecer toda carga, considera-se também na função objetivo a minimização das perdas. Como restrições foram consideradas condições operativas da rede, como corrente nos trechos, tensão nas barras e operação radial. Essa metodologia foi testada em sistemas tradicionais de 16, 33 e 69 barras. Contudo, não é possível avaliar a real capacidade do método nessa aplicação, pois foi aplicado apenas em contingências simples.

Já no trabalho apresentado por Dias (2018), foi realizada a técnica da ponte binária para analisar o comportamento das formigas. No início, quando ainda não há feromônios pela trilha, as formigas escolhem aleatoriamente o caminho a ser percorrido, com o passar do tempo um trecho terá mais feromônios, assim atrairá um maior número de formigas, até que unifiquem uma trilha e optam pela que possui uma distância menor. O método tratado possui atualização de feromônios, local e global. A atualização do feromônio local realiza a abertura/fechamento das chaves, determina a posição da chave, já quando a formiga encontra uma solução é efetuada a atualização global. Ao aplicar o algoritmo colônia de formigas no problema de restauração é construída uma lista com as chaves de manobras que foram consideradas no processo de otimização. Inicialmente, se considerar todas as chaves fechadas, o rastro do feromônio é igual à zero. Sequentemente, ao abrir aleatoriamente as chaves e tornar sua topologia radial, começa então a surgir o rastro do feromônio (vetor feromônio). Ao iniciar o processo de otimização, considera-se que o processo se finaliza quando todas as formigas encontram o mesmo caminho, ou seja, o processo se encerra quando é alcançado o número máximo de iterações pré-definidos. A função objetivo busca minimizar o número de consumidores fora de serviço e a minimização do número de chaveamento para reestabelecer a rede. Ao testar o método, observou-se que foi reduzida as perdas elétricas e a minimização no número de chaveamento, considerou-se as restrições propostas, assim obteve soluções de boa qualidade.

Apresentadas as principais técnicas de solução, a próxima seção irá apresentar o modelo proposto de reconfiguração de um sistema de distribuição.

8 MODELO PROPOSTO DE RECONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Por questão de segurança os sistemas de distribuição são configurados radialmente, além de facilitar a coordenação e atenuação de curto-circuito entre outros, assim facilitam fatores inerentes à proteção e o custo com dispositivos de segurança. Os sistemas de distribuição de energia elétrica apresentam possibilidade de se alterar a topologia através de manobras em seus equipamentos de proteção, que são instalados em locais estratégicos. A reconfiguração da rede é realizada de modo a reduzir as perdas de energia nos alimentadores, manter a radialidade do sistema, melhorar o nível de tensão, aumentar os níveis de confiabilidade e restaurar o fornecimento quando necessário (BERNARDON, 2007).

A topologia elétrica de um sistema pode ser usada como uma ferramenta de planejamento e controle em tempo real para o sistema, o que permite assim respostas rápidas e possibilita realizar controle em tempo real. Já no planejamento o objetivo a ser tratado é a operação configuração das redes em regime normal, para então operar da melhor forma.

8.1 Formulação do problema

De acordo com Bernardon (2007), o problema de reconfiguração de rede consiste em buscar uma estratégia ótima de operação, cuja solução entregue uma melhor configuração dentre as possíveis. A solução eficiente para o problema proposto implica em atender a função objetivo definida anteriormente e respeita as restrições impostas. A reconfiguração de rede consiste em um problema de busca exaustiva, análise das inúmeras alternativas das configurações possíveis. No intuito de solucionar os inúmeros problemas propõe-se algoritmos heurísticos e metaheurísticos, que empregam métodos eficientes de otimização e tomada de decisões. Com o alcance dos resultados esperados, é possível solucionar problemas de configuração como minimizar as perdas na rede, melhorar os níveis de tensão entregue pelas concessionárias a fim de aumentar o nível de confiabilidade. Algumas metodologias também buscam eliminar as configurações menos promissoras. As restrições e os critérios de otimização, devem ser definidos de acordo com a característica do problema.

8.2 Função objetivo e restrições

Segundo Bernardon (2007), em relação aos anseios da empresa ou do planejador, pode haver múltiplos objetivos na busca da solução para o problema de configuração, com diferentes graus de importância, como exemplo, considera-se como atributo de otimização principal a minimização das perdas de energia, e sucessivamente melhora-se a tensão entregue aos consumidores. É importante definir inicialmente as características que devem ser consideradas como função objetivo e restrições.

A função objetivo pode ser de vários tipos, com vários objetivos, com o importante objetivo de aumentar a confiabilidade dos sistemas que está relacionada diretamente com os indicadores de continuidade DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). Considerada a mais tradicional para reconfiguração das redes em regime normal de operação, a redução das perdas de potência elétrica, minimização do número de consumidores afetados pela falta, minimização do número do chaveamento, entre outros (BERNARDON, 2007).

Bernardon (2007), define as restrições como critérios a serem considerados que garantem a segurança e confiabilidade do sistema, leva em conta os níveis máximos e mínimos de tensão, os níveis de sobrecargas nos elementos, também merecem atenção, já que não são desejáveis no regime normal de operação, mas até certo nível pode ocorrer, entre outros.

Em relação aos trabalhos já estudados e os ganhos a serem apresentados pela reconfiguração, não será considerada na função objetiva a redução das perdas, ao considerar que após a manutenção das redes o sistema reestabelecerá sua topologia padrão. Definiu-se como função objetivo e restrições, a serem utilizadas pelo modelo de reconfiguração proposto, as seguintes ponderações:

8.2.1 Função objetivo

As perdas não serão consideradas, por considerar que o sistema voltará a sua topologia padrão após a intervenção.

Minimização do número de consumidores fora de serviço.

$$\sum_{l=1}^{nsec} C_l \times \bar{X}_l \quad (17)$$

Onde:

C_l = Número de consumidores presentes no ramo;

\bar{X}_l = Variável de estado, onde $\bar{X}_l = 0$ caso o ramo estiver energizado e $\bar{X}_l = 1$ desenergizado;

Minimização do número de chaveamentos para restauração da rede.

$$\sum_{i=1}^{ns} |\overline{SW}_i - \overline{SW}_i^0| \quad (18)$$

Onde:

\overline{SW}_i e \overline{SW}_i^0 = Estado atual e inicial do chaveamento

8.2.2 Restrições

- Limite de corrente nos ramos.

Com o objetivo de proteger os cabos e alimentadores contra correntes excessivas, deve-se considerar sua classificação como:

$$I_j^t \leq I_j^{MAX} \quad (19)$$

Onde:

I_j^{MAX} = Corrente máxima do equipamento ou condutor da rede;

I_j^t = Fluxo de corrente que percorre o dispositivo durante o período t após a restauração;

- Limite de tensão nas barras.

Com o objetivo de proteger os cabos e alimentadores contra tensões excessivas, deve-se considerar sua classificação como:

$$V^{MIN} \leq V_k^t \leq V^{MAX} \quad (20)$$

Onde:

V_{min} e V_{max} = Tensões mínimas e máximas de distribuição

V_k^t = Nível de tensão em ponto da rede durante o período após a restauração

- Manter a configuração da rede sempre radial.

Para Dias (2018), uma das restrições mais importantes na reconfiguração do sistema de distribuição é manter a rede sempre radial, pois ajudam na proteção da rede.

8.3 Modelo matemático proposto

O modelo proposto para restauração de redes de distribuição de energia elétrica é um problema biobjetivo, formulado da seguinte forma:

$$\min \left(\sum_{l=1}^{nsec} C_l \times \bar{X}_l + \sum_{i=1}^{ns} |\overline{SW}_i - \overline{SW}_i^0| \right) \quad (21)$$

Considerou-se as seguintes restrições:

$$I_j^t \leq I_j^{MAX} \quad j = 1, 2, \dots, nr$$

$$V^{MIN} \leq V_k^t \leq V^{MAX} \quad k = 1, 2, \dots, nb$$

Onde:

$nsec$ = Número de seções presentes no sistema;

C_l = Número de consumidores presentes no ramo;

X_l = Variável de estado da seção;

ns = Número de chaves presentes no sistema;

\overline{SW}_l = Variável de estado da chave;

\overline{SW}_l^0 = Variável de estado inicial da chave;

n_r = Número de ramos presentes no sistema;

nb = Número de barras presentes no sistema;

8.4 Algoritmo proposto

Com base nos estudos realizados e com o objetivo de buscar uma solução para o problema de reconfiguração da rede de distribuição de energia elétrica torna-se interessante a apresentação das simulações realizadas e soluções obtidas. Devido à complexibilidade do trabalho e o tempo estabelecido, não foi possível a implementação do algoritmo para execução da simulação do método proposto.

A partir das análises dos algoritmos apresentados nesse estudo, o método determinado como o mais adequado a ser implementado foi o GRASP. Esse algoritmo constituído de três fases, o pré-processamento, a fase inicial e as outras duas fases principais são: fase construtiva e fase de melhoria local.

8.4.1 Fase de pré-processamento da metaheurística GRASP

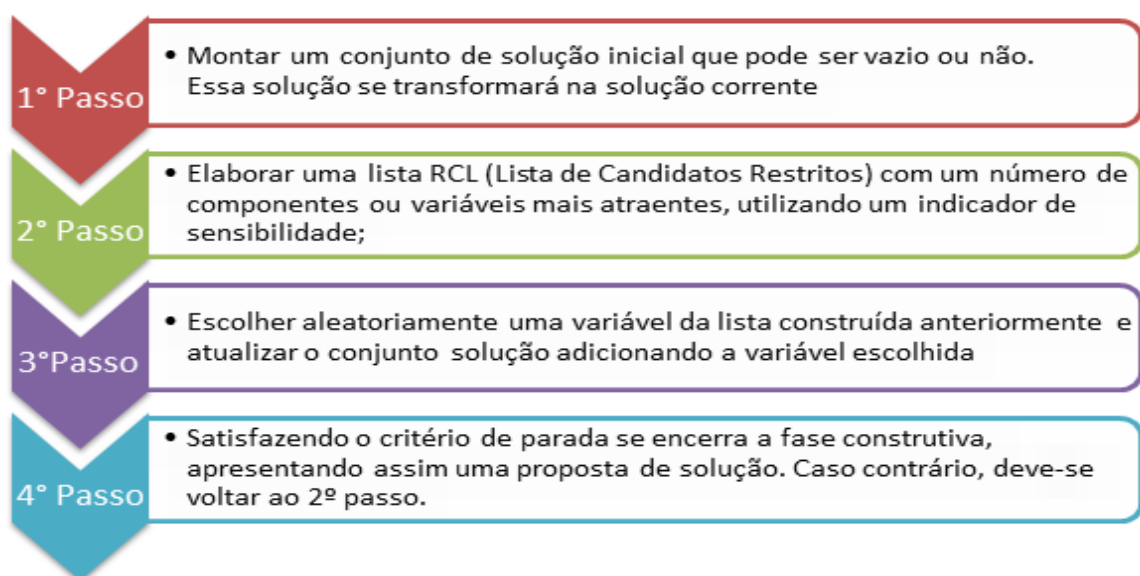
Nessa fase o objetivo foi identificar subestruturas e componentes do problema, de forma a possibilitar o início do processo de forma eficiente e diminuir o espaço de busca pela solução.

A fase de pré-processamento teve como ideia central diminuir o espaço de busca, de forma mais clara, nessa fase se descarta componentes do problema ou que se busca solução, essa estratégia é comum e muito utilizada em métodos de otimização clássica. Existem várias estratégias de pré-processamento que permitem fixar variáveis antes de dar início ao processo de construção, como: combinar as restrições nos programas e simplesmente realizar a identificação que podem ser descartadas ou incorporadas no processo de construção (ROMERO; LAVORATO, 2012).

8.4.2 Fase construtiva da metaheurística GRASP

A fase construtiva, de acordo com Romero e Lavorato (2012), se baseia em algoritmo heurístico construtivo (AHC), responsável pela solução do problema com boa qualidade, ao adicionar um componente de solução em cada passo. Em cada passo do algoritmo se escolhe o melhor componente indicado pelo indicador de sensibilidade. Utiliza componentes que possuem características aleatórias e adaptáveis, controla os parâmetros comparativos de melhor qualidade para fazer parte da solução, composta a fase construtiva em quatro passos conforme Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma fase construtiva



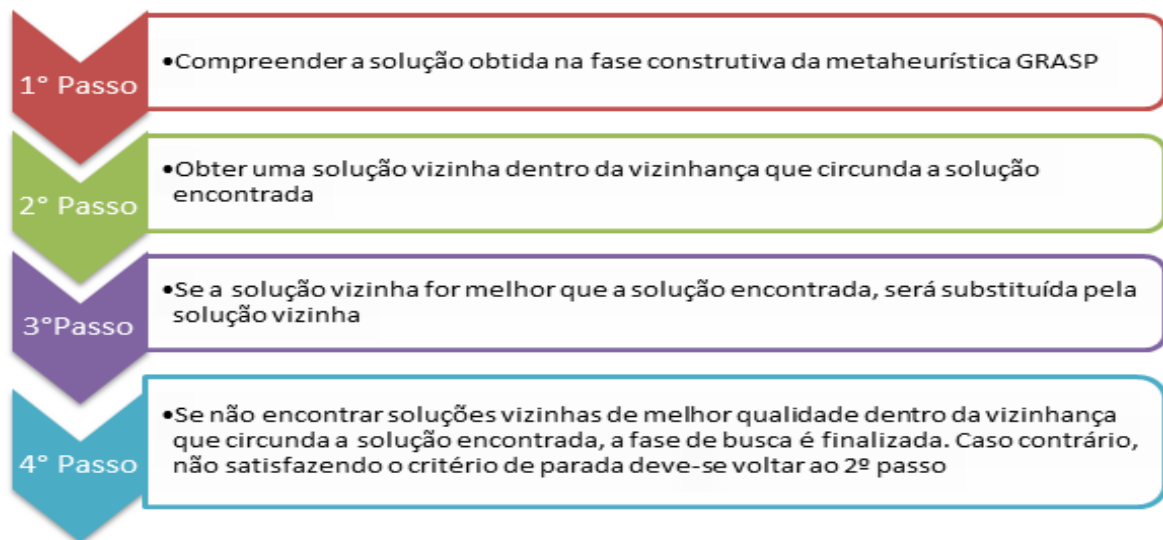
Fonte: adaptado de Romero e Lavorato (2012)

Dessa forma, se faz o desenvolvimento da parte construtiva do algoritmo.

8.4.3 Fase de melhoria local da Metaheurística GRASP

Já na fase de busca local, conforme Romero e Lavorato (2012), utiliza-se um algoritmo que tem como objetivo identificar na vizinhança da solução fornecida na fase construtiva, uma solução de boa qualidade e técnicas eficientes para o problema proposto. Portanto, se faz necessário ter uma adequada estrutura na vizinhança. A fase de melhoria local é composta de quatro passos, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma fase de melhoria local

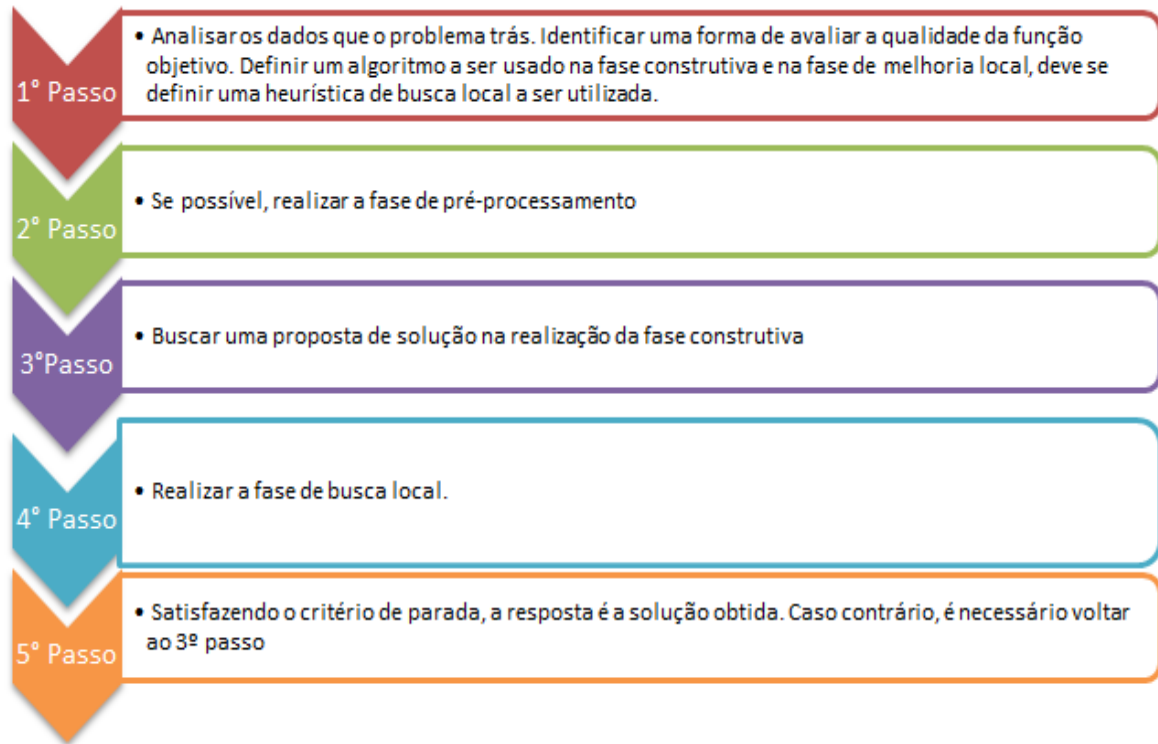


Fonte: adaptado de Romero e Lavorato (2012)

8.4.4 Algoritmo GRASP para um problema genérico

Como tratado em todos os modelos de algoritmos, Romero e Lavorato (2012) definem que nesta fase se busca uma melhor solução para o problema proposto, desta forma o GRASP trata o problema em cinco passos, apresentada pela Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma de um algoritmo GRASP para um problema genérico



Fonte: adaptado de Romero e Lavorato (2012)

9 CONCLUSÕES

As concessionárias de energia elétrica têm se preocupado com a melhoria do fornecimento e com a qualidade da energia elétrica. Assim, o conceito de rede elétrica sofre transformações com o passar dos anos, esse novo conceito define que essa nova rede deve se comportar de maneira inteligente, ou seja, realiza manobras de formas automatizadas com alta confiabilidade, incorpora recursos de automação e comunicação.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi apresentar uma metodologia para realização da reconfiguração das redes em sistemas de distribuição de energia elétrica. Algumas redes de distribuição possuem a capacidade de realizar modificações, de abrir e fechar os circuitos, o que possibilita melhorias na rede. A reconfiguração consiste em buscar uma solução de boa qualidade para o problema e respeita as restrições operacionais da rede.

Com base e análise nos trabalhos estudados, a função objetivo consiste na melhoria a ser proposta para determinado problema. Cada problema trata uma função objetivo, apresenta mais de uma possibilidade de consideração, entre elas a minimização do número de consumidores afetados com a falta, a minimização no tempo de interrupções, o nível de tensão fornecido, os chaveamentos realizados para normalizar o circuito, tanto de comando manual e telecomandados, as perdas elétricas, dentre outros. Considera-se sempre sua formulação ao trabalhar com um processo de otimização dentre as restrições da rede, a fim de garantir operações em condições seguras.

A partir de estudos relacionados com problemas de reconfiguração de sistema de distribuição de energia elétrica, conclui-se que a metaheurística GRASP aplicada pode resultar em um desempenho satisfatório, com soluções de boa qualidade, e por isso, considerou-se a metodologia proposta como eficiente, confiável, segura e robusta na busca por soluções de problemas de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

9.1 Recomendações para trabalhos futuros

O presente trabalho engloba os aspectos teóricos da reconfiguração de um sistema de distribuição de energia elétrica, em virtude do tempo de elaboração do presente trabalho, não foi possível simular e testar a ideia proposta. Com isto, propõe-se os seguintes estudos a serem realizados no futuro:

- Englobar na função objetivo os índices de indicadores de continuidade DEC e FEC;

Os indicadores de continuidade são exigências da ANNEL para qualidade de serviço prestado pelas concessionárias, assim, seria de grande valia para as concessionárias uma reconfiguração de rede que garantisse essa margem exigida.

- Simulação da modelagem proposta;

O trabalho baseia-se apenas em teorias estudadas, para analisar a eficiência do método proposto, é necessário que se realize simulações. No entanto, não foi possível realizar essa análise, devido à complexibilidade exigida pelo assunto disposto e a escassez de tempo hábil para realizar tal averiguação.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. A.; LEAL, F.; PINHO, A. F.; FAGUNDES, L. D. Gestão de conhecimento em análise de falhas: mapeamento de falhas através de sistema de informação. Universidade Federal de Itajubá. Produção, v. 16, n. 1, p. 171-188, jan./abr. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/prod/v16n1/a14v16n1.pdf>. Acesso em 01 de junho de 2019.

AMASIFEN, J. C. C.; ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. S. Algoritmos evolutivos dedicados à reconfiguração de redes radiais de distribuição sob demandas fixas e variáveis. Estudo dos operadores genéticos e parâmetros de controle. Revista Controle e Automação. Vol. 16, 3. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ca/v16n3/a04v16n3.pdf>. Acesso em 01 de junho de 2019.

ANEEL. PRODIST – Módulo 7. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA [Online] 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/modulo-7>. Acesso em 20 de fevereiro de 2019.

ANEEL. PRODIST – Módulo 8. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA [Online] 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em 10 de fevereiro de 2019.

ANEEL. Procedimentos de distribuição. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA [Online] 2008. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo7_Revisao_4-2_.pdf. Acesso em 20 de março de 2019.

ANEEL. Qualidade do serviço. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA [Online] 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/qualidade-do-servico2>. Acesso em 16 março 2019.

ANEEL. Boletim energia. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA [Online] 2011. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689. Acesso em 20 de março de 2019.

BERNARDON, D.P. Novos métodos para reconfiguração das redes de distribuição a partir de algoritmos de tomadas de decisão multicriteriais. Repositório Digital da UFSM. 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/3651>. Acesso em 20 de junho de 2019.

BICALHO, H. F.; UTURBEY, W. Estudo e implementação de algoritmos de fluxo de potência para redes de distribuição. Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Elétrica. Belo Horizonte, 2004. Disponível em: https://www.academia.edu/24769064/Estudo_e_implementa%C3%A7%C3%A3o_de_algoritmos_de_fluxo_de_pot%C3%Aancia_para_redes_de_distribui%C3%A7%C3%A3o. Acesso em 1 de junho de 2019.

BOLLEN, M. H. J. *Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions*. New York: IEEE, 2000. Disponível em: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/33363757/89625688-Understanding-Power-Quality-Problems.pdf?response-contentdisposition=inline%3B%20filename%3DUnderstanding_Power_Quality_Problems_Vol.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20190606%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20190606T083128Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=8761c4edbbbed7ce98f26afc86f69ee4f024b2497a3224a32d6ca54a91518fba9. Acesso em 1 de junho de 2019.

BORGES, T. T.; GARCIA, P. A. N.; CARNEIRO, S. JR.; PEREIRA, J. L.R. Reestabelecimento de sistemas de distribuição utilizando fluxo de potência ótimo. Revista Controle e Automação. Vol. 23, n. 6, 2012. Disponível em: <http://hermes.cpd.ufjf.br:8080/jspui/bitstream/ufjf/8179/1/Reestabelecimento%20de%20sistemas%20de%20distribui%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em 1 de junho de 2019.

CELESC. 313.0081 – Relés trifásicos para reguladores de tensão. Disponível em: <http://www.celesc.com.br/portal/images/arquivos/normas-tecnicas/especificacoes-tecnicas/e3130081.pdf>. Acesso em 18 de junho de 2019.

DIAS, B. M. Restauração de redes de distribuição de energia elétrica considerando geradores distribuídos. Universidade Federal de Ouro Preto – Departamento de Engenharia Elétrica. João Monlevade, 2018. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1337/6/MONOGRAFIA_Restaura%C3%A7%C3%A3o_RedesDistribui%C3%A7%C3%A3o.pdf. Acesso em 1 de junho de 2019.

FERREIRA, F. A. L. Metodologia para reconfiguração de redes de distribuição trifásicas assimétricas e não balanceadas com geração distribuída. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010. Disponível em: <http://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/3027/1/423821.pdf>. Acesso em 1 de junho de 2019.

FERREIRA, S. C. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição através de técnica de decomposição e otimização robusta. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2017. Disponível em: <http://repositorio.ufjf.br:8080/xmlui/bitstream/handle/ufjf/6454/saulocustodiodeaquinoferreira.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 1 de junho de 2019.

FIGUEIREDO, G. A. D. Caracterização das perdas na rede de distribuição de média tensão. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2012. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/65740/1/000151451.pdf>. Acesso em 1 de junho de 2019.

GUIMARÃES, M. A. N. Sistema de bibliotecas da Unicamp – SBU. *Repositório da Produção Científica e Intelectual da Unicamp*. [Online] 2005. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/261716>. Acesso em 20 de março de 2019.

HECK, G.; MARCHESI, B.; MELO, P. F.; JUNIOR, O. Avaliação de sistemas de comunicação para a implementação de redes de engenharia em subestações de distribuição. VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Giancarlo_Heck/publication/281635813_Avaliacao_de_Sistemas_de_Comunicacao_para_a_Implementacao_de_Redes_de_Engenharia_em_Subestacoes_de_Distribuicao/links/55f1835908ae199d47c270ba/Avaliacao-de-Sistemas-de-Comunicacao-para-a-Implementacao-de-Redes-de-Engenharia-em-Subestacoes-de-Distribuicao.pdf. Acesso em 1 de junho de 2019.

HENRIQUE, D. Fluxo de potência de varredura direta/inversa para o problema de reconfiguração de redes em sistemas de distribuição. Universidade de São Carlos - Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação. São Carlos, 2014. p.95.

JUNIOR, J. D. A; BRAGA, E.C; HAFFNER, S. *Load balacing in a low-voltage distribution network by genetic algorithm*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Niterói, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8395545>. Acesso em 18 de junho de 2019.

KAGAN, N. Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica. 2. ed. São Paulo: Edigar Blucher LTDA, 2010.

LAVORATO, M.; SOUZA, S.S.F. GRASP Especializado Aplicado ao Problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição. 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262729908_GRASP_Especializado_Aplicado_ao_Problema_de_Reconfiguracao_de_Sistemas_de_Distribuicao. Acesso em 18 de junho de 2019.

LU, Z.; TAO, L.; XIALING, X.; YUE B. *On service restoration considering frequency property of distributed generation. In: China International Conference on Electricity Distribution*, pp.1-6, JiangSu NanJing, China, Sep/2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/251993081_On_service_restoration_considering_frequency_property_of_distributed_generation. Acesso em 18 de junho de 2019.

MANJUNATH, K., MOHAN, M. R. *A new hybrid multi-objective restoration technique for electric power distribution systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 29, 2007. pp. 51-64. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061506001098>. Acesso em 18 de junho de 2019.

MANTOVANI, J. R. S.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. *SBA Controle e Automação*. Set./dez. 2000. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/66242/2-s2.0-0034262373.pdf?sequence=1>. Acesso em 1 de junho de 2019.

MARQUES, R.C. Estratégia de reconfiguração de redes de distribuição com recursos distribuídos via algoritmos genéticos. 2018. Disponível em: <http://dspace.unipampa.edu.br:8080/handle/rii/3686>. Acesso em 18 de junho de 2019.

MARQUEZ, R. A. C. Reestabelecimento de energia em sistemas de distribuição de energia elétrica com priorização de chaves automáticas. Universidade de São Carlos - Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação. São Carlos, 2014. p.120.

MILIORINI, M. Religamento automatizado em rede de distribuição de energia elétrica. 13º Congresso Nacional de Iniciação Científica. Faculdade Anhaguera de Campinas, 2013. Disponível em: <http://conic-semesp.org.br/anais/files/2013/trabalho-1000015920.pdf>. Acesso em 1 de junho de 2019.

MUN, K. J. Desenvolvimento de sistema de restauração em tempo real para sistema de automação e distribuição. IEEE [Online] 2019. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=931930>. Acesso em 20 de março de 2019.

MUN, K. J.; PARK, J. H.; KIM, H. S.; SEO, J. I. *Development of real-time-service restoration system for distribution automation system*. 2001. p. 1514-1519. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=931930>. Acesso em 16 março 2019.

NETO, W. P. M. Restauração automática de redes de distribuição de energia de grande porte com geração distribuída. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira, 2011. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/87147/mathiasneto_wp_me_ilha.pdf?sequence=1. Acesso em 1 de junho de 2019.

OLIVEIRA, L.M. Reconfiguração de sistema de distribuição de energia elétrica para minimização de perdas ativas totais via otimização por exame de partículas (PSO). Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos. São Carlos, 2012. Disponível em: http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-12042013-154747/publico/Oliveira_Luciana_Macedo.pdf. Acesso em 20 de junho de 2019.

PEREIRA, F. S. Reconfiguração ótima de sistema de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônias de formigas. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2010. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-28042010-151514/pt-br.php>. Acesso em 18 de junho de 2019.

PEREIRA, E. C. Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica para minimização de perdas técnicas. Universidade Federal de Minas Gerais – Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1002M.PDF>. Acesso em 1 de junho de 2019.

ROMERO, R. A.; LAVORATO, M. Metaheurísticas em sistemas elétricos de potência: introdução ao estudo e aplicações. 2012 Disponível em: http://www.swge.inf.br/anais/sbse2012/pdfs/Minicursos/Minicurso_2_Metaheurísticas_Ruben_Marina.pdf. Acesso em 21 de junho de 19

SANCHES, D. S; LONDON, J.B. A. JR.; DELBEM, A. C. B.; PRADO, R. S.; GUIMARÃES, F.G.; NETO, O. M.; LIMA, T. W. *Multiobjective evolutionary algorithm with a discrete differential mutation operator developed for service restoration in distribution systems*. 2014, vol. 62. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061514002798>. Acesso em 1 de junho de 2019.

SILVA, D. M. K. Fluxo de potência para sistemas de distribuição considerando redução de barras. Universidade Estadual de Londrina – Departamento de Engenharia Elétrica, Londrina 2016. Disponível em: <http://www.uel.br/ctu/deel/TCC/TCC2015-DavidMaykonKrepskySilva.pdf>. Acesso em 1 de junho de 2019.

SILVA, M. A. A; FILHO, M. C. P. *Optimization of the relay parametrization in radial distribution systems using genetic algorithm*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Niterói, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8395763/>. Acesso em 18 de junho de 2019.

SOUBE, P. E. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica para redução de perdas ativas através de algoritmo genético. Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos. São Carlos, 2015. Disponível em: http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-18042016-124729/publico/Sobue_Paulo_Eduardo-tcc.pdf. Acesso em 20 de junho de 2019.

SOUZA, E. S. Novas modelagens matemáticas para otimização do problema de restauração em sistemas de distribuição elétrica radiais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira, 2018. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/153237/souza_es_dr_ilha.pdf?sequence=3. Acesso em 1 de junho de 2019.

SOUZA, S. S. F. Algoritmo GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radial. Repositório Institucional UNESP – Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Ilha Solteira, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/87160>. Acesso em 18 de junho de 2019.

SRINIVAS, M. S. *Distribution load flows: a brief review. Proceedings of the 2000. IEEE PES Summer Meeting.* 2000. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/850058>. Acesso em 1 de junho de 2019.

TOUNE, S.; FUDO, H.; GENJI, T.; FUKUYAMA, Y.; NAKANISHI, Y. *Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems. IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 17, n. 1, p. 173-181, jan. 2002. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/974205>. Acesso em 1 de junho de 2019.