

Universidade de São Paulo - USP
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

Trabalho de Conclusão de Curso

Análise de perdas técnicas em sistemas de distribuição utilizando Algoritmo
Evolutivo Multiobjetivo

Autor:

Breno Ruy

Orientador:

Prof. Dr. João Bosco A. London Junior

São Carlos

2018

Breno Ruy

Análise de perdas técnicas em um sistema de distribuição utilizando Algoritmo
Evolutivo Multiobjetivo

Orientador: Prof. Dr. João Bosco A. London Junior

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Escola de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase
em Sistemas de Energia e Automação

São Carlos
2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

R837a Ruy, Breno
Análise de perdas técnicas em sistemas de distribuição utilizando Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo / Breno Ruy; orientador João Bosco A. London Junior. São Carlos, 2018.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Algoritmo Evolutivo. 2. Sistema de Distribuição. 3. Multiobjetivo. 4. Perdas Técnicas. 5. Potência Ativa. 6. Otimização. 7. Sistema Real. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Breno Ruy

Título: "Análise de perdas técnicas em sistemas de distribuição utilizando Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 20/11/2018,

com NOTA 7,0 (sete, zero), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Associado João Bosco Augusto London Júnior - Orientador -
SEL/EESC/USP*

*Prof. Dr. Leandro Tolomeu Marques - IFSP - Campus São João da
Boa Vista*

Dra. Marcilyanne Moreira Gois - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

Dedicatória:

A todas as pessoas por quem
guardo carinho e respeito
e de quem levo ensinamentos
por toda a vida.

Agradecimentos

Inicialmente, gostaria de agradecer a toda a minha família, especialmente aos meus pais, a minha irmã e a minha avó paterna. Todos os ensinamentos, todo o carinho, todos os sermões e todos os momentos juntos são verdadeiras relíquias que guardo em minha memória com a mais profunda gratidão, pois foram esses pequenos fragmentos que me tornaram quem eu sou hoje. Tenho muito orgulho por ter vocês e por ter crescido em ambiente tão frutífero pessoalmente.

Em sequência, agradeço a minha companheira de todas as horas: Elisa. Com você, as palavras carinho, companheirismo, paciência e amor tomam significados ainda maiores dos que eu conhecia. Obrigado de coração por estar sempre ao meu lado, por passar de mãos dadas comigo por todos os tipos de momentos, de noites em clarão em crises de ansiedade a deliciosas manhãs tomando café juntos e jogando conversa fora. Amo você, obrigado por trazer à tona o que eu mesmo tenho de melhor e por consertar o que eu ainda deixo a desejar.

Não poderia esquecer de todos meus amigos tanto dentro da universidade como fora dela. Mais especificamente do meu quinteto favorito: Felipe, Thayra, Lucas, Gustavo e Murilo. Meu muitíssimo obrigado a todos vocês pela amizade, pelos momentos incontáveis em que me apoiaram em vocês como uma verdadeira família, por todas as risadas e tempo juntos. Esse ano, completamos seis anos de muitas histórias a serem lembradas. E que venham muitos mais!

Quanto ao ambiente acadêmico, sou grato a todos servidores da Universidade de São Paulo, sem exceção, desde os faxineiros que zelam tanto pelo nosso campus quanto aos vários professores que passaram pela minha vida acadêmica. Em especial, neste trabalho, agradeço ao Prof. Dr. João Bosco London Júnior, pela amizade, pela empatia e por me guiar com maestria no final de minha vida acadêmica. Agradeço ao Dr. Leandro Tolomeu, por me ensinar muito fora da minha grade curricular da engenharia elétrica e me desafiar a aprender cada vez mais. Meu conhecimento acerca de Algoritmos Genéticos, eu devo a você! Por fim, agradeço ao colega mestrando José Paulo Ramos Fernandes pela solicitez, sempre disposto a me ajudar com minhas dúvidas acerca do algoritmo aqui descrito e por me responder sempre prontamente com muita simpatia. Obrigado a todos os senhores.

Por último, sou muito grato a Deus e a todos os seres espirituais que me cercam pelo bem, que mesmo em meus momentos mais oscilantes entre ceticismo e curiosidade, sempre me mostraram amor através de acontecimentos e oportunidades que nem mesmo a matemática mais fina me faria acreditar que foi tudo obra do acaso.

Conteúdo

Resumo	5
Abstract	7
1 Introdução	13
1.1 Revisão Bibliográfica	16
1.2 Objetivo	22
1.3 Organização	23
2 Sistema Elétrico de Potência	24
2.1 Estrutura	24
2.2 Componentes	27
2.2.1 Transformador	28
2.2.2 Regulador de Tensão	28
2.2.3 Chaves Seccionadoras	29
2.2.4 Bancos de Capacitores	30
2.3 Representação dos Sistemas de Distribuição	30
2.3.1 Representação Nó-Profundidade	31
2.4 Modelagem de Cargas	32
2.4.1 Carga de Corrente Constante com Tensão	33
2.4.2 Carga de Potência Constante com Tensão	33
2.4.3 Carga de Impedância Constante com Tensão	34
2.5 Cálculo de Fluxo de Potência	34
2.5.1 Soma de Potências	35
2.5.2 Soma de Correntes	37
2.5.3 Fluxo de Potência em Representação Nó-Profundidade	38
3 Otimização de Perdas Técnicas	40
3.1 Formulação Matemática	45
3.2 Algoritmos Evolutivos	46
3.2.1 Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo	48
4 Estratégia Proposta	51
5 Testes e Resultados	53
5.1 Sistema teste teórico de pequeno porte	53
5.2 Sistema teste real de grande porte	56

6	Conclusões	60
7	Bibliografia	62

Resumo

O nível de desenvolvimento de uma sociedade como um todo é refletido na quantidade de energia consumida, de modo que maiores sistemas de distribuição são necessários para atender a maiores demandas. Os concessionários são responsáveis pelo fornecimento de eletricidade aos consumidores e pela administração de sistemas de distribuição de eletricidade, o que geralmente é caro. Dessa forma, esses mesmos utilitários se beneficiam de soluções que buscam otimizar suas malhas elétricas, geralmente desenvolvidas em torno da reconfiguração da rede.

Para este fim, muitas ferramentas computacionais podem ser utilizadas, com os objetivos finais de atender ao maior número de consumidores, minimizar as perdas técnicas existentes e manter o fornecimento de energia constante. Também é importante que, para atingir esses objetivos, a implementação de uma determinada solução não seja dispendiosa, pois é desejável utilizar os componentes que a rede elétrica já possui em sua reconfiguração.

Dentre as principais técnicas relacionadas à reconfiguração de redes atreladas a baixos custos, destacam-se os Algoritmos Evolutivos. Este tipo de abordagem procura principalmente otimizar problemas de classe *NP hard*, ou seja, com tempo de execução polinomial não determinista, realizando procedimentos com séries de possíveis soluções em baixo tempo de compilação.

Embora o uso de Algoritmos Evolutivos em problemas de reconfiguração de rede seja muitas vezes conflitante com as restrições operacionais da própria rede analisada ou mesmo com limitações à simplificação do sistema, uma estratégia evolutiva para resolver o problema de redução de perdas técnicas em Sistemas de Distribuição. Esta estratégia é baseada na combinação de um algoritmo multiobjetivo em tabelas com a representação em profundidade de nós, uma combinação que tem sido usada na literatura para tratar o problema de restaurar energia em grandes sistemas, uma vez que permite lidar com grandes sistemas sem simplificação.

O algoritmo foi modificado e validado em dois sistemas, um pequeno teórico e um real de grande porte, permitindo reconfigurar as redes para retornar à menor perda de resistência possível para ambos os casos, utilizando apenas para isso a recombinação de estados de desconexão. muda na própria rede.

Palavras-chave: Fluxo de potência, sistemas de distribuição de energia elétrica, algoritmos evolutivos, perda de potência ativa, representação nó-profundidade.

Abstract

The level of development of a society as a whole is reflected in the amount of energy consumed, so that larger distribution systems are required to meet greater demands. Concessionaires are responsible for supplying electricity to consumers and for administering electricity distribution systems, which is generally expensive. In this way, these same utilities benefit from solutions that seek to optimize their electrical meshes, usually developed around the reconfiguration of the network.

For this, many computational tools can be used, the final objectives being: to attend to the largest number of consumers, to minimize the existing technical losses and to maintain the constant power supply. It is also important that, in order to achieve these objectives, the implementation of a given solution is not costly, since it is desirable to use the components that the power grid already has in its reconfiguration.

Among the main techniques related to the reconfiguration of networks linked to low costs, stand out the Evolutionary Algorithms. This type of approach seeks, mainly, the optimization of NP hard class problems, that is, with non-deterministic polynomial execution time, performing procedures with series of possible solutions at low compilation time.

Although the use of Evolutionary Algorithms in network reconfiguration problems is often conflicting with the operational constraints of the analyzed network itself or even with limitations on the simplification of the system, a evolutionary strategy to solve the problem of reduction of technical losses in Distribution Systems. This strategy is based on the combination of a Multiobjective Algorithm in Tables with the Node-Depth Representation, a combination that has been used in the literature to treat the problem of restoring energy in large systems, since it makes it possible to handle large systems without simplification.

The algorithm was modified and validated in two systems, a small theoretician and a real one of large size, allowing to reconfigure the networks in order to return to the lowest possible resistive loss for both cases, only using for this the recombination of states of disconnecting switches in the network itself.

Keywords: Power flow, power distribution systems, evolutionary algorithms, active power loss, node-depth representation.

Lista de Figuras

1	Esquema simplificado de um sistema elétrico de potência (Próprio autor). . . .	24
2	Sistema de distribuição com redes primária e secundária explícitas (Próprio autor).	26
3	Redes primária e secundária em esquema mais detalhado (SIMONE, 2012). . .	26
4	Rede primária com componentes de interesse (PEREIRA, 2014).	27
5	Sistema de distribuição com alimentador (PEREIRA, 2014).	35
6	Sistema representando dois alimentadores em RNP (PEREIRA, 2014).	38
7	Algumas RNPs do sistema da Figura 6 (PEREIRA, 2014).	39
8	Grafo de um sistema de distribuição (SANTOS, 2009).	42
9	Grafo anterior com chave entre nós 17 e 18 aberta (SANTOS, 2009).	43
10	Troca do estado de operação da chave seccionadora entre 5 e 16 de aberta para fechada (SANTOS, 2009).	44
11	Fluxograma para um Algoritmo Evolutivo (Próprio autor).	47
12	Pseudocódigo dos processos do código.	50
13	Caso teste teórico para minimização (KAGAN et al., 1999).	53
14	Diagrama de caixa indicando a geração em que o melhor indivíduo foi encon- trado pelo Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo.	55
15	Sistema elétrico de potência de Londrina em meados do ano 2014.	57
16	Diagrama de caixa indicando a geração em que o melhor indivíduo foi encon- trado pelo Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo.	58

Lista de Tabelas

1	Tabela com sumário dos métodos estudados antes.	21
2	Tabela com características iniciais do sistema elétrico.	54
3	Tabela com melhores indivíduos para minimização de perdas resistivas no sistema Kagan.	54
4	Tabela com características iniciais do sistema elétrico.	57
5	Tabela com melhores indivíduos para minimização de perdas no sistema Londrina.	58

1 Introdução

Operar de maneira eficiente um sistema elétrico de potência significa, seguindo o que é demandado pela Agência Nacional de Energia Elétrica, assegurar o fornecimento contínuo de energia elétrica aos usuários, dentro de padrões de tensão e de corrente. Entre os diversos critérios, destacam-se a continuidade do fornecimento, nível de tensão, oscilações e desequilíbrio de tensão, distorções harmônicas existentes e nível de interferência em sistemas de comunicação. Para tal, é preciso que diversas áreas da engenharia elétrica como qualidade de energia elétrica, proteção de sistemas elétricos de potência, automação, entre outras entrem em sinergia, a fim de fornecer o melhor produto possível ao consumidor.

Diante do aumento da demanda por energia, os Sistemas Elétricos de Potência não somente expandem em escala, mas também aumentam em critério de complexidade, uma vez que contam com aumento expressivo no número de cargas que utilizam eletrônica de potência, potencialmente perturbadoras ao sistema por injetar harmônicos na rede. Soma-se a isso o advento da interligação de centrais de cogeração, chamadas *smart grids*, cada vez mais comuns no contexto atual como opção de geração distribuída. Elas acabam por tornar ainda mais complicado de se definir se uma dada rede elétrica, em certo momento, se comporta como geradora ou consumidora em um determinado instante, agregando complexidade ao sistema quanto ao cálculo do fluxo de potência nele existente.

Tendo essa crescente complexidade em mente, pode-se afirmar que analisar quaisquer problemas existentes nas redes elétricas se apresenta como tarefa complicada. Entre esses diversos problemas, pode-se destacar um dos maiores: perdas ôhmicas. Essas perdas acabam por afetar a eficiência do sistema, além de contribuir com prejuízos econômicos, que, por sua vez, se refletem na maior parte das vezes diretamente nos usuários. Para exemplificar o cenário, com a introdução de inúmeros novos componentes que utilizam eletrônica de potência nas redes, há a injeção de harmônicos nessas mesmas redes, o que contribui para o aumento da potência reativa existente. Existindo grande parcela da potência total como potência reativa, para uma mesma quantidade de potência gerada, menor parcela de potência ativa existe, não abastecendo o total de consumidores. Assim, em outras palavras, para uma mesma quantidade fixa de potência ativa demandada pelos consumidores de um sistema de distribuição se torna necessário gerar mais potência total para se compensar a parcela reativa.

Dessa maneira, pode-se tomar como essencial evitar que existam perdas ôhmicas. Constituiria uma ação mais inteligente e mais econômica para ambos, consumidores e concessionárias, se problemas relacionados a perdas resistivas fossem solucionados, ao invés de se tentar compensar através de maior geração elétrica a existência de potência reativa que não é utilizada.

Por conseguinte, em outras palavras, a melhor utilização das malhas elétricas aumentaria a eficiência total de distribuição do sistema e reduziria custos.

Nesse contexto, diversos métodos e propostas para aumentar a eficiência das malhas elétricas têm surgido nos últimos anos. A maior parte se sustenta em utilizar ferramentas computacionais para resolver problemas como restabelecimento de energia elétrica, minimização de perda de potência ativa, planejamento de novos sistemas, mitigação de faltas por instalação de sistemas de proteção, dentre outros. Computacionalmente, então, algoritmos complexos ligados ao problema de reconfiguração de redes elétricas trabalhadas são desenvolvidos, quase sempre relacionados à solução de uma dada função objetivo de interesse com relação ao sistema. Tendo em conta a quantidade de parâmetros, muitas vezes um alto poder de processamento computacional é requisitado.

Ainda que os requisitos de processamento para se desenvolver, compilar e executar esses algoritmos sejam grandes, muitos métodos têm sido criados e empregados nesse contexto. Esses métodos acabam por se destacar no que se refere à reconfiguração de redes elétricas, se apresentando como solução útil quanto barata, pois não somam custos adicionais, uma vez que costumam utilizar elementos existentes no próprio sistema, como por exemplo chaves seccionadoras, de forma a remanejá-lo para otimização. Os algoritmos que implementam esses métodos costumam ser divididos em dois ramos: os baseados em programação matemática e os baseados em meta-heurística (MARQUES, 2012).

Os métodos baseados em programação matemática determinam soluções ótimas ou quase ótimas. Entretanto, não são comumente associados a tratamento de problemas de energia elétrica, principalmente em reconfiguração de rede, uma vez que não são exatamente adequados em contextos combinatórios, parte principal do teor do problema. Não são também eficientes quando lidando com situações que possuem características não lineares (PEREIRA, 2014), introduzidas no problema de reconfiguração de redes com a utilização da eletrônica de potência, anteriormente comentada, devido à injeção de harmônicos de frequências diferentes na rede. Por fim, a programação matemática não atende, em geral, o objetivo proposto, uma vez que utiliza muitos parâmetros, sendo inviável em sistemas reais e de grande escala.

Por esses defeitos existentes com métodos baseados em programação matemática, os métodos baseados em meta-heurísticas vêm ganhando destaque. Em específico, os Algoritmos Evolutivos, metodologia derivada dessa classe, têm tido crescente importância em situações que exigem grande quantidade de combinações em pouco tempo, ainda que apresentem algumas adversidades, como a produção de configurações que não são interessantes na realidade, como sistemas não radiais ou que apresentam trechos/setores sem fornecimento de energia (SANTOS, 2009).

O desempenho de um Algoritmo Evolutivo está atrelado a certos fatores chaves como: estrutura de dados adotada (necessidade de configuração em grafos), utilização de funções agregação ou fatores de ponderação, operadores genéticos que evitem a criação de configurações não possíveis, dentre outros (SANCHES, 2013). Para melhorar a eficiência dos Algoritmos Evolutivos aplicados em problemas de reconfiguração de redes de distribuição elétrica e também contornar alguns de seus pontos fracos mencionados anteriormente, uma nova estruturação de dados denominada Representação Nó-Profundidade passou a ser utilizada (DELBEM ET AL., 2004). Esse modelo de estrutura de dados possui dois operadores, que permitem a realização de poda ou enxerto nas árvores da floresta de grafo trabalhada, as quais representam os alimentadores de um sistema de distribuição, de forma que cada árvore possa gerar outras novas árvores no sistema. A melhora concedida por esse modelo na eficiência pode ser explicada por um fator principal: os operadores dessa representação produzem apenas configurações factíveis, ou seja, configurações da rede que possibilitam que todos os trechos do sistema estejam energizados e em operação. Dessa maneira, a Representação Nó-Profundidade permite a geração de um maior número de configurações de interesse em um mesmo período de tempo.

Além da vantagem de gerar configurações que atendem todos os pontos da rede elétrica, a Representação Nó-Profundidade possui outro ponto importante: a capacidade de gerar apenas configurações com ordenação das barras do sistema dado tal como Modelo Pai-Filho (KAGAN ET AL., 2005). A ordenação possibilita a execução do cálculo do fluxo de potência mais eficiente e rapidamente (SANTOS ET AL. 2008), pois, por *design*, ela se adequa a problemas em que existem sistemas elétricos radiais, permitindo menor tempo de compilação do código, já que não há a necessidade de se pesquisar novamente em toda a topologia do sistema elétrico pelo posicionamento das mesmas barras previamente utilizadas no cálculo.

O método utilizado para cálculo do fluxo de potência nessa ordenação das barras do sistema, por outro lado, é o de varredura direta/inversa. Esse é um método aplicado em redes radiais que explora a característica unilateral do sentido das subestações para a carga em termos de fluxo de potência, não existindo a abordagem de grandes matrizes nem utilização de sub-rotinas de inversão, o que abaixa significativamente o número de iterações, resultando em menor tempo de processamento (PEREIRA, 2014).

Por fim, tendo o cenário previamente discutido em mente, uma metodologia baseada em Algoritmo Evolutivo com estrutura de dados em Representação Nó-Profundidade foi escolhida para se tratar o problema de reconfiguração de redes elétricas, objetivando-se a otimização da perda de potência ativa no sistema. O algoritmo aqui alterado e utilizado foi um Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo baseado em Tabelas para restabelecimento de faltas, promovendo a reconfiguração de rede com base na Representação Nó-Profundidade e no cálculo de fluxo de

potência por varredura direta/inversa. Esse algoritmo proposto foi modificado de forma a ser aplicado a somente um objetivo: o de minimizar as perdas resistivas do sistema como um todo. O novo algoritmo foi testado e validado diante o problema de otimização, em sistemas teórico e real, sendo o teórico de pequeno porte e o real de grande porte.

Esse e outros Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos utilizam o cálculo do fluxo de potência como função objetivo para avaliar soluções hipotéticas, geradas pelas combinações de chaves dentro do sistema de distribuição, assim obtendo parâmetros importantes como o carregamento da rede, máxima queda de tensão nas barras, potência dissipada entre dois trechos interligados, etc. Fora as grandezas elétricas envolvidas, os mesmos dados são utilizados no contexto do Algoritmo Evolutivo quanto à avaliação de adaptabilidade dos indivíduos, que importa muito em aspectos evolutivos das soluções, para etapas de *crossover*, mutação e seleção dos indivíduos dominantes e que se perpetuam ao longo das gerações do código.

1.1 Revisão Bibliográfica

A literatura produzida para pesquisa de algoritmos para otimização das perdas técnicas é rica e tem sido expandida gradativamente. Nesta subseção, objetiva-se o aprofundamento bem como o ponderamento sobre outros tipos de sistemas inteligentes utilizados nos sistemas elétricos de redes de distribuição com o objetivo de otimização. Esses outros tipos são baseados em lógicas diferentes do Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo utilizado neste trabalho e é exatamente por isso que esse capítulo se faz necessário, para estudar diferentes abordagens para um mesmo objetivo, que é a minimização das perdas de potência ativa, e as respectivas vantagens e desvantagens de cada método apresentado.

Em (FRANCO et al., 2014), o método chamado pelo autor de *Mixed Integer Quadratically Constrained Programming* é utilizado para otimizar sistemas elétricos e, dentre outros objetivos, diminuir as perdas resistivas existentes. É apresentado como sendo indicado para planejamento a longo prazo de sistemas de distribuição. Usando algumas variáveis de interesse, o programa lida com algumas características do próprio sistema, entre elas: construção e reforçamento de subestações e de ramos, bem como o dimensionamento e a localização dos bancos de capacitores presentes. A construção do algoritmo gira em torno de oferecer uma resposta de maneira rápida, assim sendo o tempo de processamento requerido pelo código é pequeno.

Já em (JALALI et al., 2014), uma abordagem parecida com a anterior é aplicada. O algoritmo denominado *Mixed Integer nonlinear Programming* lida com variáveis como planejamento de subestações, configuração dos ramos e a localização e o tamanho de pontos de geração dis-

tribuída. Essa adição de *smartgrids* como variáveis de utilização por esse algoritmo é inovadora e o código, de maneira geral, performa bem.

A otimização por Enxame de Partículas (PSO) é amplamente utilizada quando se tratam de sistemas inteligentes para tarefas consideradas *NP hard*. Em (MISTRY et al., 2014), um *Particle Swarm Optimization* é criado de forma a aliar a expansão de sistemas de distribuição diante *smartgrids*, representadas no trabalho por turbinas eólicas geradoras. O funcionamento do código é um pouco diferente da abordagem de Enxame clássico no ponto em que a noção de peso de inércia é substituída por um fator de constrição. Tomando como variáveis apenas características dos sistemas distribuídos como tamanho e localização, o algoritmo performa bem quanto à minimização da potência perdida ao longo da rede. Ressalta-se que alguns tipos de simplificações foram adotados, como por exemplo o fato das *smartgrids* apenas injetarem na rede potência ativa. O objetivo inicial de comparação do algoritmo modificado com a abordagem clássica de Enxame e também a de colônia de abelhas é satisfeito na medida que o algoritmo prova ser superior.

Ainda no aspecto do uso de Enxames para otimização de redes, o trabalho feito em (GUAN et al., 2015), denominado *Decimal Coded Quantum Particle Swarm Optimization*, permite também a otimização no sentido de minimizar perdas ativas na rede. Há a consideração das relações entre potência ativa nominal, magnitude de tensão nominal e potência reativa de saída dos sistemas de geração distribuída. Assim sendo, o trabalho se diferencia do anterior ao passo que considera o fator de potência não mais unitário quando levando em consideração a contribuição de potência distribuída injetada, onde quatro tipos diferentes de *smartgrids* foram consideradas para tal. Os resultados obtidos em redes IEEE de 33 e de 69 *bus* de redes distribuídas confirmam a superioridade do algoritmo, que se mostra melhor que Algoritmo Genético clássico, um Algoritmo Imperialista Competitivo modificado e outras duas variações do Enxame de Partículas clássico. O grande sucesso, em particular, desse algoritmo desenvolvido se deve à forte capacidade explorativa existente, que leva ao encontro de soluções de grande proximidade da resposta global.

Adicionando o contexto de mutação em um algoritmo de Enxame, (AGHAlgoritmo EvolutivoI et al., 2014) propõe um algoritmo utilizado em expansão de curto prazo para sistemas de distribuição, também considerando a presença de redes distribuídas. Além de minimizar as perdas de potência ativa, o algoritmo ainda avança em aspectos tais quais custo geral, parâmetros de confiabilidade da rede e estabilidade das tensões nodais. O vetor de decisão é formado pelo status das chaves seccionadoras, *switches* e tamanho das *smartgrids* existentes. Os resultados obtidos em um sistema de distribuição com 33 nós confirmam que, quando levada em conta

mutação para o algoritmo de Enxame, tanto o algoritmo clássico de Enxame quanto o Genético são superados.

A criação de uma estratégia evolucionária usando matriz de covariância adaptativa pode ser visualizada em (SADEGHI et al., 2014). O algoritmo propõe a expansão de curto prazo para redes que levam geração distribuída em conta. A localização dessas mesmas unidades geradoras distribuídas é determinada de modo que a potência perdida, confiabilidade do sistema, custo de reconfiguração do sistema e lucro são otimizados. Fora de escopo estrutural, a incerteza da oscilação do preço da eletricidade e da geração das unidades distribuídas também é levada em consideração, em seis tipos diferentes de *smartgrids*. Resultados mostram que o uso da matriz adaptativa performa de maneira melhor que clássicos Enxame e Algoritmo Genético.

Artificial Immune System Optimization Algorithm, desenvolvido em (TAHER et al., 2014), é utilizado em sistemas de distribuição com compensadores síncronos estáticos. A localização e características dos mesmos são levados em conta para minimizar perdas ativas nas fiações e investimento empregado, sendo bi-objetivo. A aplicação em sistemas de distribuição de 33 e 69 barramentos IEEE supera o Algoritmo Genético clássico, o que em outras palavras significa que os anticorpos do algoritmo conseguem convergir para regiões promissoras do domínio de maneira mais eficiente.

Chamado BFOA, o *Bacterial Foraging Optimization Algorithm* modificado em (NAVEEN et al., 2015) tem por único objetivo, tal qual este trabalho, a minimização das perdas ativas de potência através do fechamento e abertura de chaves seccionadores e *switches* presentes no sistema de distribuição. Sendo testado em sistemas com 16, 33 e 69 nós, o algoritmo é comparado a outras três abordagens e os supera em sua mono-objetividade, tendo um equilíbrio muito bem construído entre suas características chamadas *explorative* e *exploitative*, tentando uma situações totalmente diferentes e a outra pequenas diferenciações no que já se tem de solução, o que o diferencia de BFOAs tradicionais da literatura.

O Algoritmo de Busca Gravitacional de (SHUAIB et al., 2015) se baseia na utilização de características de bancos de capacitores para objetivar a minimização das perdas por cobre e custo de investimentos. Variáveis de interesse são localização tamanho dos capacitores. Primeiramente, uma análise sensitiva é realizada para obter a localização dos capacitores presentes na rede, sendo o algoritmo aplicado posteriormente para achar o melhor tamanho para esses mesmos capacitores. Quatro sistemas de distribuição, com 33, 69, 85 e 141 nós provam que o algoritmo desenvolvido performa melhor que muitos outros algoritmos listados. Para o caso do sistema de 33 nós, a lógica em questão foi capaz de reduzir em até 33% as perdas resistivas existentes.

Dentre os vários métodos inteligentes de varredura do domínio da função objetivo, o curioso *Big Bang-Big Crunch* é desenvolvido em (SEDIGHIZADEH et al., 2014), sendo baseado em populações e em teorias da evolução do universo. Como os anteriores, o algoritmo resolve o problema de otimização para sistemas de distribuição com a presença de unidades geradoras distribuídas, sendo variáveis de interesse o fechamento de chaves seccionadoras e o tamanho das unidades geradoras distribuídas. Os resultados são promissores não somente em perdas de potência, mas também em estabilidade da tensão, custo de geração distribuída e até mesmo emissão de gases de efeito estufa. Ressalta-se que a ferramenta de mutação foi inserida no método para maior probabilidade de que os indivíduos da população atinjam aleatoriamente melhores espaços no domínio. Sistemas de 25 e 32 nós foram testados e revelam performance maior quando comparado aos clássicos Algoritmo Genético, Enxame de Partículas, Colméia de Abelhas e Busca Harmônica.

Um algoritmo baseado no aprendizado de alunos e ensinamento de professores chamado *Teaching-Learning Based Optimization*, descrito em (SULTANA et al., 2014), é utilizado para otimizar a instalação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição. O TLBO tenta imitar a relação de aprendizado e de ensinamento vista em uma classe de aula, parecido com um *machine learning*. Nela, a maior vantagem apresentada pelo algoritmo é que ele resolve por si só o problema, sem depender de parâmetros do usuário, como por exemplo o ajuste de um parâmetro de mutação. A simulação em sistemas de 22, 69, 85 e 141 nós indicam que o TLBO performa melhor que a maioria dos clássicos métodos empregados em sistemas inteligentes.

(VENKATESH et al., 2003) desenvolveu uma programação evolutiva baseada em lógica *fuzzy*, que tenta encontrar a configuração mais otimizada para um sistema de distribuição usando chaves seccionadoras e *switches*. Os resultados obtidos para perda de potência ativa e variações de tensão são promissoras, porém não são diretamente comparadas a outros métodos existentes e pesquisados.

Em (RAO et al., 2013), Busca Harmônica é utilizada para sistemas de distribuição, objetivando-se otimização da performance na presença de geração distribuída. O algoritmo tem inspiração no fenômeno de improviso feito por músicos. Os *status* das chaves seccionadoras e das *switches* existentes no sistema são trabalhados no sentido de minimizar a perda por cobre. A versão binária da busca grupal por otimização foi utilizada em sistemas IEEE de 33, 69 e 119 nós e performar melhor que GA, ICA, PSO, BFOA, etc (siglas em inglês).

Um algoritmo modificado de mosca foi aplicado em (ABDELAZIZ et al., 2015). Foi utilizado para minimizar perdas na fiação de cobre com espaço para otimizar a instalação de gera-

dores distribuídos. A aplicação do algoritmo não foi comparada a outros métodos, mas sistemas IEEE de 33 e 37 nós mostram que a performance é promissora.

O comportamento coletivo de animais é observado na estratégia proposta em (KHAN et al., 2015). Através dele, a otimização com base nas melhores localizações para centrais de geração distribuída e também para bancos de capacitores do tipo *shunt* é possível. Dos sistemas testados, todos tipo IEEE com 12, 33 e 69 nós, todos apresentam desempenho melhor em termos de menor potência perdida ao longo do sistema se comparado a um clássico modelo de Enxame de Partículas.

Os estudos anteriormente discutidos pretendem dar uma idéia melhor sobre o que existe e que técnicas para otimização semelhante ao Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo deste trabalho são aplicadas. Algumas observações gerais para os artigos citados devem ser feitas:

- Os critérios adotados por todos os artigos previamente citados são basicamente os adotados neste trabalho, uma vez que a conectividade do sistema como um todo deve ser mantida, a radialidade do sistema precisa ser preservada, as tensões nodais existentes devem respeitar um limite (queda controlada) e as correntes não devem ultrapassar os limites estabelecidos pela própria infraestrutura da rede.
- Nota-se que um ou outro artigo citado é de cerca de 15 anos atrás. Quando o autor foi pesquisado para se encontrar novos estudos da mesma linha, observou-se que a mesma abordagem de resolução de problemas de otimização foi adotada nos trabalhos futuros, apenas com objetivos diferentes, não mais sendo a potência perdida o principal parâmetro a ser observado.
- A maioria dos artigos lida com carga constante em seus barramentos para efeito de simplificação dos cálculos e dos parâmetros utilizados nos algoritmos.
- O planejamento pretendido com as implementações dos sistemas inteligentes propostos visa atender curta e longa duração, principalmente apostando em sistemas existentes no futuro, como é o caso dos estudos que lidam com geração distribuída.
- Este trabalho tem o diferencial de ter usado em um dos testes um sistema real de uma cidade brasileira. Nenhum outro estudo neste capítulo citado conseguiu reproduzir o mesmo feito.
- Vários dos artigos citados são multiobjetivos, sendo a ênfase dada no mesmo objetivo que este trabalho: a minimização das perdas de potência ativa.

A seguir, a Tabela 1 que sumariza todas as vantagens e as desvantagens de cada um dos artigos citados anteriormente é apresentada. A visualização de cada ponto positivo e de cada ponto negativo é interessante, na medida em que se ressalta o porquê de se utilizar Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo neste trabalho.

Tabela 1: Tabela com sumário dos métodos estudados antes.

Método	Vantagens	Desvantagens
Mixed integer quadratically constrained programming	Baixo tempo de processamento.	A confiabilidade, variável essa que é de suma importância, não é considerada nesse trabalho.
Mixed integer nonlinear programming	A otimização da localização da geração distribuída também acarreta numa melhor performance do sistema de distribuição.	Confiabilidade também não foi levada em conta.
Constricted particle swarm optimization	Performa melhor que o PSO tradicional e o também tradicional algoritmo de Colméia de Abelhas.	A incerteza do dimensionamento de cargas não foi considerada.
Quantum particle swarm optimization	Supera vários metaheurísticas mencionados. Utilizou tipos diferentes de geração distribuída.	Toma grande tempo computacional para encontrar soluções perto do ótimo global.
Mutation-incorporated particle swarm optimization	O operador de mutação foi tão bem implementado que garante achados muito próximos do ótimo global.	Não foi testado em sistemas de grande escala.
Covariance matrix adaptation evolutionary strategy	A incerteza da geração distribuída foi inserida no algoritmo. Performa melhor que clássicos GA e PSO.	A melhor localização das unidades de geração distribuída não são bem determinadas.
Artificial immune system	Supera o clássico GA.	Confiabilidade não foi inserida no contexto.
Modified bacterial foraging optimization algorithm	O algoritmo curiosamente consegue evitar mínimos locais.	Incertezas não consideradas, fora que outros objetivos estabelecidos não foram completamente satisfeitos como a minimização da potência ativa perdida.
Gravitational search algorithm	Uso de diferentes tipos e tamanhos de unidades distribuídas de geração. Performa melhor que vários outros métodos semelhantes.	A reconfiguração da rede não foi de fato realizada para obter melhor performance.
Firework optimization algorithm	A reconfiguração inclusive foi feita durante simulações de faltas. Performa melhor que GA.	Custos, emissão de gases poluentes e confiabilidade foram variáveis que foram declaradas no trabalho, mas que não mostraram melhoria nos resultados.
Teaching-learning based optimization	Melhor que outros métodos comparados.	Não utiliza geração distribuída. Alguns parâmetros não foram otimizados. Incertezas desconsideradas.
Fuzzy adaptive evolutionary programming	Utilização da lógica fuzzy de maneira criativa para solucionar problemas de redes de distribuição.	Sistema testado é pequeno e não revela comportamento para sistemas maiores.
Harmony search	Performa melhor que GA e variantes.	Confiabilidade do sistema não levada em conta.
Modified firefly algorithm	Equilíbrio interessante entre lados de exploração e de utilização de respostas já encontradas. Apresenta performance melhor que o mesmo algoritmo clássico	Não houve reconfiguração para melhoria da performance.
Collective animal behaviour	Performa melhor que clássico PSO.	Além de não existir reconfiguração nos resultados, confiabilidade não foi tomada como fator importante.

1.2 Objetivo

Como exposto anteriormente, é essencial encontrar maneiras de se analisar e, mais do que isso, operar a rede de distribuição no âmbito de se solucionar causas de perda de potência que poderiam ser evitadas, pois isso significa mais economia tanto para concessionárias quanto para consumidores. Várias medidas podem ser tomadas para se obter uma maior eficiência energética da rede, tais quais instalação de banco de capacitores para elevação de tensão em certos pontos, utilização de sistemas inteligentes para leitura e interpretação de parâmetros elétricos de rede, automação de componentes para tomada de decisão, dentre muitos outros. Como se pode imaginar, todos esses métodos se baseiam na aquisição de algum componente extra que será adicionado à rede, ou seja, mais dinheiro investido para uma possível solução.

Conclui-se, então, que o cenário ideal seria aquele em que fosse possível utilizar o que o próprio sistema elétrico já possui, sem adotar soluções que computem mais gastos. Isso pode ser feito se utilizando ferramentas computacionais para reconfiguração de redes de distribuição elétrica. Pode-se ainda destaca o fato de que, quando se lida com programação, é simples e direto fazer ou desfazer qualquer alteração no código, o que dá flexibilidade à solução, oportunidade de trabalho cooperativo e acessibilidade, pois qualquer usuário com um pouco de conhecimento em qualquer lugar consegue contribuir ativamente.

Objetiva-se, por esses motivos, a implementação de um método computacional baseado em Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos em Tabelas para tratamento do problema de redução de perdas resistivas em sistemas de distribuição elétrica, utilizando para isso a reconfiguração da rede a partir da combinação de chaves seccionadoras existentes previamente, sendo a estrutura de dados adotada a de Representação Nó-Profundidade e a função objetivo como sendo a função cálculo de fluxo de potência em varredura direta/inversa. Apesar do algoritmo trabalhar com vários objetivos, existem alterações para que ele possa operar com apenas um objetivo: reduzir a totalidade de perdas ativas em uma dada rede elétrica. Isso pode ser feito através da utilização de uma função agregação e de fatores de ponderação, para converter um problema multiobjetivo em um problema mono-objetivo (PEREIRA, 2014). Convém mencionar que a Representação Nó-Profundidade ainda é utilizada e, para respeitar critérios e parâmetros elétricos particulares do próprio sistema que será utilizado, tabelas restritivas são levadas em consideração. Com isso, a motivação constitui em se desenvolver uma ferramenta eficiente e de fácil uso para cálculo do fluxo de potência em sistemas de distribuição genéricos. Há ainda a preocupação de que as simulações computacionais representem fielmente o sistema real e que se obtenham resultados condizentes com o que seria obtido em estado de operação real. Para validação do sistema, a metodologia é validada em sistemas teóricos e real, sendo os resultados posteriormente apresentados neste trabalho.

1.3 Organização

Capítulo 2: abordagem dos principais componentes presentes em um sistema elétrico de potência, bem como sua estrutura e suas características, envolvidas no processo de reconfiguração de redução de perdas técnicas, aspectos referentes ao cálculo do fluxo de potência em sistemas de distribuição, desde a modelagem das cargas do sistema até o detalhamento dos métodos existentes para tal, teoria envolvendo representação em grafos, explicação da RNP e a aplicação dos métodos para modelagem de cargas usando RNP.

Capítulo 3: tratamento do problema de otimização das perdas ativas em uma rede de distribuição elétrica, introdução a Algoritmos Evolutivos, detalhamento dos Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos, matemática existente por trás de tais algoritmos, dentre outros conceitos fundamentais.

Capítulo 4: explicação e detalhamento da abordagem proposta para obter, através do cálculo do fluxo de potência em um sistema de distribuição, a reconfiguração de estado de chaves normalmente abertas e normalmente fechadas, moldando a trajetória em que a potência é distribuída dentro do sistema elétrico, assim procurando através do Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo a melhor configuração possível em termos de menor perda de potência ativa.

Capítulo 5: apresentação e explicação de simulações realizadas com os seguintes sistemas de distribuição:

- Sistema teórico desenvolvido e estudado em (KAGAN, 1999).
- Sistema real da cidade de Londrina, Paraná, em operação em 2014.

No que tange à incorporação da metodologia no código de reconfiguração, serão apresentados alguns dos resultados obtidos.

Capítulo 7: Conclusões acerca do trabalho, dos resultados e do método utilizado, bem como perspectivas futuras para trabalhos que prossigam nessa linha de estudos.

2 Sistema Elétrico de Potência

Tanto o cálculo do fluxo de potência em sistemas de distribuição quanto o objetivo de reconfiguração da rede elétrica são relacionados com as características intrínsecas dos sistemas elétricos de potência.

Dessa maneira, ao se lidar com esse cálculo, existe a necessidade de se estender os estudos para o que essa determinada classe de sistema elétrico contém. Para isso, são necessárias análises que caracterizem o sistema trabalhado, a fim de obter informações relevantes sobre sua estrutura, seu funcionamento, suas limitações e suas condições operacionais.

Os equipamentos que normalmente constituem esses sistemas levam importância no equacionamento do fluxo de potência e, por consequência, no desenvolvimento de uma solução no problema de reconfiguração. Devem, assim, ser considerados dentro da caracterização e da interpretação do sistema a ser trabalhado.

Este capítulo, como elucidado anteriormente, promove detalhamentos das particularidades de um sistema elétrico de potência genérico, com o objetivo de criar visão global de sua complexidade, familiaridade de como se apresenta e o que levar em conta para os cálculos posteriormente feitos.

2.1 Estrutura

Para caracterização mais detalhada, os sistemas elétricos de potência costumam ser divididos em três grandes blocos representativos, são eles: geração, transmissão e distribuição. De maneira simplificada, um esquema pode ser visto na Figura 1. Ele abrange de maneira básica todas as etapas pelas quais passa a energia elétrica que o consumidor utiliza no dia-a-dia.

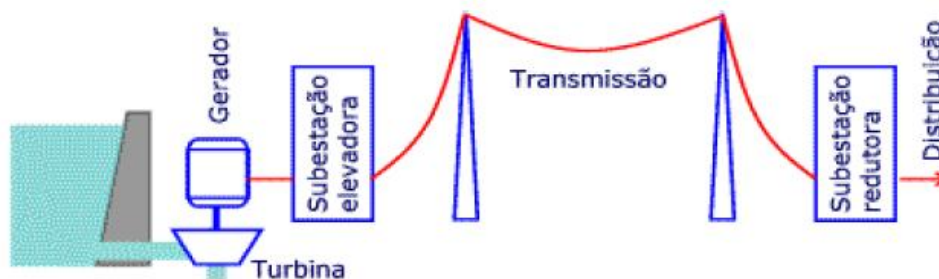


Figura 1: Esquema simplificado de um sistema elétrico de potência (Próprio autor).

Na parte do Gerador, como o nome implica, remete-se às máquinas elétricas responsáveis por converter energia mecânica em energia elétrica. A energia mecânica pode ser proveniente

do vento, da água, da queima de combustíveis, dentre outros meios. Nessa etapa, as tensões elétricas são da ordem de 10 a 30kV e têm frequência 60 Hz, padrão brasileiro.

Como os locais em que os geradores são instalados e operam se localizam, normalmente, longe dos centros de consumo, a energia elétrica necessita passar por longas distâncias até atingir os maiores centros de consumo, que são denotados pelos grandes centros urbanos. Nessa etapa, a existência de linhas de transmissão permite que distâncias sejam cobertas. São elas que compõe o segundo bloco do Sistema Elétrico de Potência. Os níveis de tensão usualmente precisam ser elevados a valores até mesmo acima de 200kV em subestações antes de atingir as linhas de transmissão. Esse aumento por si só da tensão já é uma operação feita para diminuir a perda de potência, uma vez que, segundo a Lei de Ohm, pode-se inferir que um aumento na tensão diminui a quantidade de corrente elétrica que passa pelos condutores dos fios. Menor corrente passando, o efeito Joule também é menor e menos energia elétrica é perdida nos cabos como energia térmica indesejada.

Seguindo pelo desenho da Figura 1, após as linhas de transmissão, atinge-se subestações abaixadoras, mais próximas dos centros urbanos. A tensão é, então, abaixada para 13,8kV normalmente, que se configura como sendo o nível de tensão de redes de distribuição primária. Ela opera em média tensão até o patamar de 34,5kV e é constituída por linhas aéreas em configuração radial, não fechando ciclos. Aqui, alguns consumidores já são atendidos, constituem grandes indústrias e similares, que necessitam alta tensão em seus terminais.

Ainda tendo em mente a rede de distribuição primária, é importante apontar que existe a possibilidade nesse nível de transferir blocos de carga de um circuito (alimentador) para outro, por meio da operação de chaves seccionadoras que já estão presentes na rede. É também na rede primária que se encontram os componentes de proteção, como disjuntores, relés, etc, e controle dos níveis de tensão das concessionárias de energia, como bancos de capacitores e reguladores. Assim sendo, é nítido que o domínio deste subsistema do conjunto do sistema elétrico de potência é de grande importância e de grande complexidade, pois leva em conta muitos aspectos e equipamentos particulares.

Os consumidores residenciais ou consumidores finais são atendidos posteriormente, uma vez que a tensão seja novamente diminuída, dessa vez para níveis nominais de 127 ou 220 V, o que constitui a chamada rede secundária de distribuição. Ela recebe energia elétrica da rede primária por meio de transformadores de distribuição, que possuem o papel de adequar a tensão de fornecimento e também isolar eletricamente a rede secundária da rede primária. Convém mencionar que, no caso desse sistema, não existem chaves para remanejamento de carga nem

existem equipamentos capazes de controlar a tensão, sendo exclusividade da rede primária a capacidade de alterar a configuração do circuito em questão.

A Figura 2 evidencia de maneira simplificada as redes primária e secundária contidas em um sistema de distribuição, que por sua vez está contido em um sistema elétrico de potência muito maior. A Figura 3 ilustra as mesmas redes, porém de maneira esquemática da malha elétrica, evidenciando os transformadores, redes em forma radial, barramentos, etc.

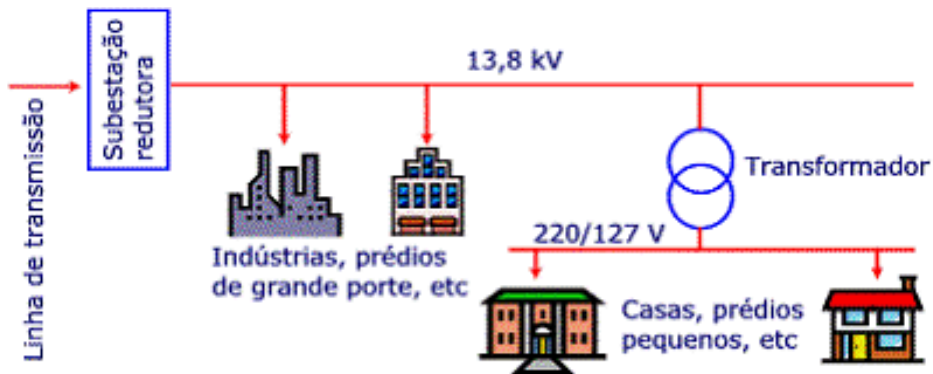


Figura 2: Sistema de distribuição com redes primária e secundária explícitas (Próprio autor).

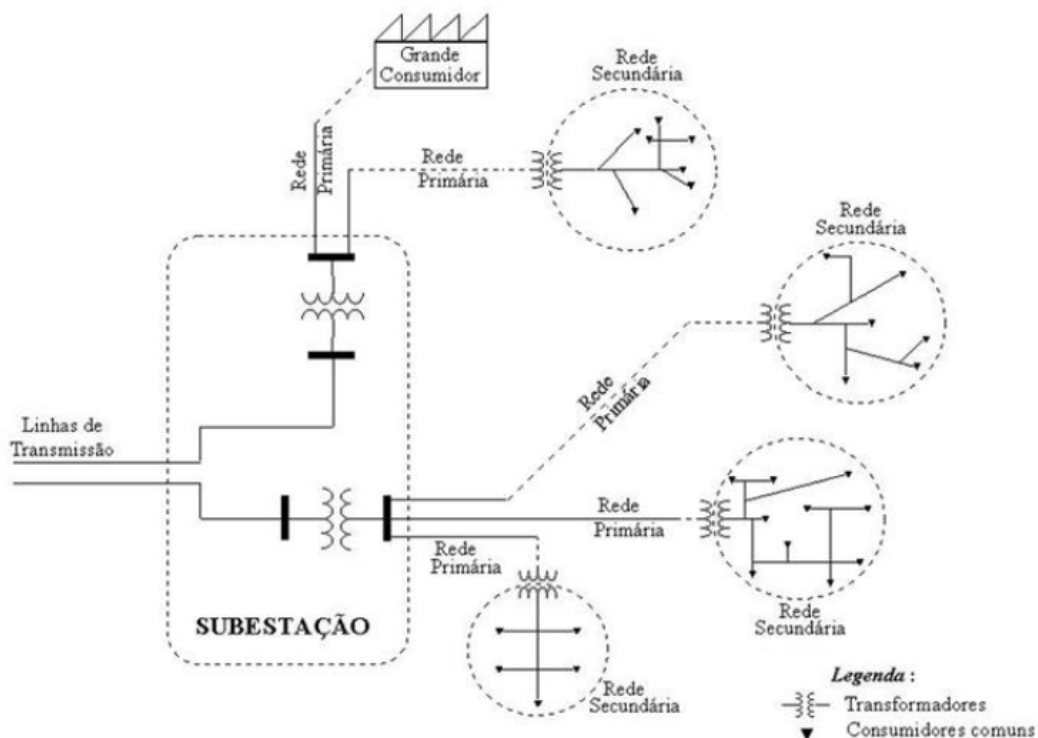


Figura 3: Redes primária e secundária em esquema mais detalhado (SIMONE, 2012).

Uma vez que existem diversos consumidores ligados à rede, é conveniente usar transformadores para reunir todos, objetivando-se obter uma representação mais simplificada do sistema que está sendo utilizado no trabalho. Assim, neste trabalho, apenas redes de distribuição primária serão utilizadas, levando-se em conta linhas dos circuitos alimentadores, bancos de capacitores, reguladores de tensão, chaves seccionadoras normalmente abertas e normalmente fechadas e os transformadores de distribuição, que representarão as cargas do sistema. A Figura 4 representa o tipo de esquema radial do sistema elétrico que será utilizado neste trabalho para a aplicação da reconfiguração de rede.

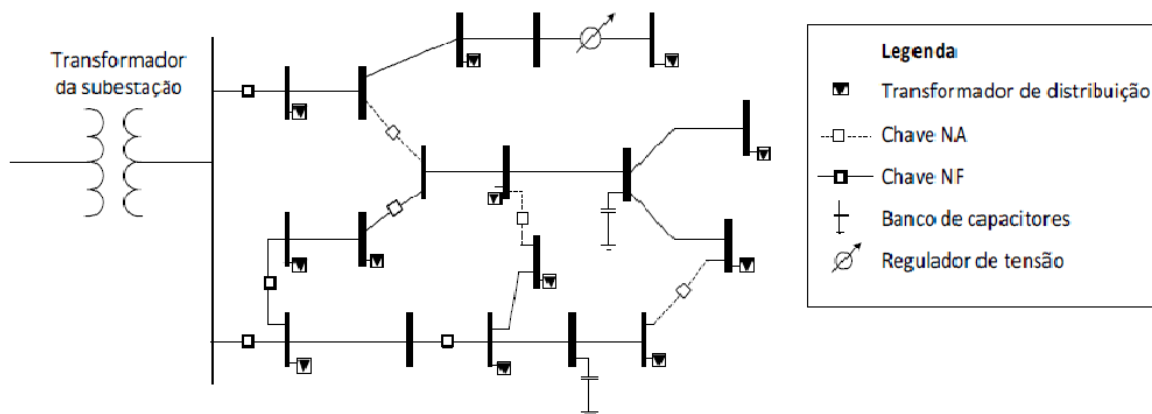


Figura 4: Rede primária com componentes de interesse (PEREIRA, 2014).

2.2 Componentes

Retomando a Figura 4, tendo como objetivo no atual cenário o cálculo do fluxo de potência, os principais componentes a serem levados em conta já estão devidamente identificados na ilustração. São eles: linhas existentes nos condutores, transformadores de distribuição, reguladores de tensão, bancos de capacitores e chaves seccionadoras, essa última sendo importante no aspecto de mapear quais trechos radiais existirão para que se possa ocorrer varredura da função fluxo de potência.

As linhas elétricas constituídas pelos condutores, normalmente feitos de cobre, permitem o transporte da energia elétrica das subestações até os consumidores finais. Outros componentes não menos importantes das linhas podem ser enumerados também, tais quais postes, cruzetas, isoladores, cabeamentos de terra, etc. Entretanto, todos podem ser substituídos nos cálculos posteriores como adição de impedância em certos trechos dos condutores. Convém ressaltar que a impedância, no quesito perda de potência ativa, é o principal parâmetro que se deve ter em mãos ao calcular o fluxo de potência que percorre a linha. Os outros componentes ilustrados devem ser melhor explorados e são detalhados a seguir:

2.2.1 Transformador

O transformador é um dispositivo que tem por função transmitir energia elétrica ou potência elétrica de um circuito a outro, induzindo tensões e correntes ou, até mesmo, modificando valores de impedâncias elétricas de um circuito elétrico "vistos" por um de seus terminais. Funcionam pela indução de corrente, seguindo os princípios do eletromagnetismo (Lei de Faraday e Lei de Lenz), que provam ser possível criar corrente elétrica em um condutor, estando esse submetido a um campo magnético variável. Pela necessidade dessa variação de fluxo magnético que transformadores só funcionam em corrente alternada.

Sem entrar em muitos aspectos técnicos e fórmulas específicas do funcionamento de transformadores, é importante resumir que nos sistemas de distribuição existe enorme quantidade de transformadores em pontos diferentes das redes. Como explicado anteriormente, as tensões são aumentadas em subestações no sentido geração para linhas de transmissão, abaixadas em subestações no sentido linhas para circuito primário do sistema de distribuição, abaixadas novamente para chegar ao circuito secundário do sistema de distribuição e assim continuando. Todo esse percurso e mudanças nos níveis de tensão só é possível graças à utilização de transformadores.

Costumam ser alocados conforme demanda de carga de dada área e são projetados de acordo com a potência a serem operados (variam de 15 kVA até 1 MVA), com o tipo de rede (aérea ou subterrânea), necessidade de isolamento eletromagnético do meio, dentre outras características.

2.2.2 Regulador de Tensão

Tendo em mente a explicação anterior, pode-se afirmar que um regulador de tensão nada mais é que um transformador. A sua classe diferenciada se deve ao modo que é projetado: deve possuir recursos de alterar tensões para mais ou para menos, não tendo uma saída em seu terminal secundário fixa.

Basicamente, seu funcionamento se resume a: quando a tensão for inferior a um valor estipulado, a saída de corrente de excitação será energizada e quando a tensão for maior que o valor estipulado a saída de corrente de excitação será desenergizada. Uma das técnicas para esse controle da tensão de maneira eletrônica dos reguladores de tensão é chamada *Pulse Width Modulation*, que por meio de uma onda quadrada torna possível o controle da potência em uma carga.

2.2.3 Chaves Seccionadoras

Como o nome sugere, são equipamentos capazes de permitir ou não a transferência de carga entre alimentadores em um sistema, o que implica na possibilidade de alterar a configuração da rede elétrica, permitindo, por exemplo, remanejar de maneira simplificada o sistema de distribuição primário. São capazes de realizar tal função, atualmente, de forma facilitada, pois a tecnologia permite que sejam controladas à distância, abrindo e fechando contatos elétricos diretamente. Costumam ainda ser empregadas em proteção dos sistemas elétricos de potência e em outras esferas, exercendo função complementar a outras operações.

Existem em diversos tipos e podem ser classificadas conforme a lista a seguir:

- **Chave-faca:** Utilizada normalmente em disjuntores para possibilitar manobra dos sistemas de distribuição. Conduzem grande corrente elétrica devido a sua espessura. Em operação de abertura ou de fechamento, costumam causar arcos elétricos caso não haja proteção complementar.
- **Chave-fusível:** Fica próxima a transformadores, de modo que esse tipo de chave possui um elo fusível que, quando fechado, conecta os terminais da mesma. Atua, em grande parte como o nome sugere, como um sistema de proteção, uma vez que uma eventual sobrecorrente queimaria o elo e esse possibilitaria salvar os equipamentos interligados, evitando danos maiores. Convém ressaltar que a junção entre terminais antes conectados só será recuperada quando um novo fusível for conectado fisicamente.
- **Religador automático:** semelhança com o tipo anterior, porém sem fusíveis. Costuma ter um sensor de sobrecorrente e um sistema automático de detecção decide se o circuito deve ser aberto para se proteger ou não. Após uma rápida fração de tempo, se o dispositivo de detecção interpreta a sobrecorrente como danosa, ele envia um comando que fecharia o circuito. Mesmo que a falta seja persistente, o dispositivo pode atuar mais algumas vezes. Sendo permanente, apenas o religamento manual resolverá.
- **Disjuntores:** clássico dispositivo das redes elétricas, devem interromper circuitos que pe-rem tanto em anormalidade (comando enviado por relé) quanto normalidade (comando manual). Existem em variados modelos: elétrico, mecânico, eletromecânico, etc, e costumam ser robustos.

Neste trabalho, pode se dizer que se tem como protagonistas as chaves seccionadoras, uma vez que elas serão o foco da reconfiguração dos sistemas de distribuição, o que permite que, para cada combinação de estado aberto/fechado de cada uma das chaves presentes em um dado

sistema elétrico, exista uma configuração desse mesmo sistema associada, a qual poderá fornecer valores de tensão em nós ou trechos, estimativas de corrente, profundidade das ramificações elétricas, as regiões abastecidas com energia (e as que ficam despenduradas do sistema) e o total de perda de potência ativa estimado, informação essa última valiosa para ponderar se o código posteriormente explicado deve continuar rodando ou se o sistema ótimo (que atende às expectativas da função objetivo) já foi encontrado.

2.2.4 Bancos de Capacitores

Os bancos de capacitores são instalados em certos pontos com o objetivo de elevar a tensão em pontos do sistema elétrico, o que também contribui com o aumento do fator de potência e, dessa maneira, a eficiência da transmissão de energia. Fornecendo potência reativa ao sistema, os bancos de capacitores tornam a exigência por potência aparente demandada pela subestação menor, o que diretamente impacta na diminuição de corrente que circula pelos condutores e, conseqüentemente, menor perda de potência ativa por efeito Joule (novamente, melhora o fator de potência).

2.3 Representação dos Sistemas de Distribuição

As Figuras 8, 9 e 10 ilustram um sistema em questão. Entretanto, como representar o entendimento da configuração em linguagem computacional? Para proceder com a resolução de problemas envolvendo as redes elétricas, o primeiro passo é justamente desenvolver uma abordagem de representação, para que se tenha sucesso em transmitir o mapeamento do sistema de distribuição ao computador e que se tire dele sistemas que possam ser interpretados com a mesma facilidade.

Para isso, o sistema de representação por grafos é o mais recomendado. Seguindo a explicação de (PEREIRA, 2014), um dado grafo G é constituído de um conjunto finito de pontos, os quais recebem a denominação de nós ($N(G)$), interligados por linhas chamadas arestas ($E(G)$). Assim, um grafo é representado por um par (N,E) . Definições sobre grafos são como se seguem:

- Ordem: Número de nós presentes em um grafo
- Tamanho: Quantidade de arestas que um grafo possui
- Grau: Número de arestas incidentes em um determinado nó
- Caminho: Sequência de arestas distintas entre si
- Ciclo: Quando os nós inicial e final de um caminho forem o mesmo

- Cadeia: Caso em que todos os nós de um caminho foram distintos
- Par Conexo: Dois nós de um mesmo grafo que possuam caminho entre si
- Grafo Conexo: Grafo em que todos os pares de nós são conexos
- Grafo Acíclico: Grafo sem ciclos
- Árvore: Grafo acíclico e conexo
- Floresta: Grafo formado por conjunto de árvores
- Floresta Conexa: Floresta que contém apenas uma árvore
- Nó Raiz: Nó tomado como referência
- Nós Terminais: Com exceção do nó raiz, nós que possuem grau
- Profundidade: Quantidade de arestas existentes entre nó raiz e um outro nó

Fazendo junção da teoria vista anteriormente e a ilustração de sistemas de distribuição, pode-se representar claramente uma rede elétrica por grafos: nós representam setores, arestas representam chaves seccionadoras e nó raiz representa um alimentador. O alimentador em si pode ser considerado árvores do grafo e o conjunto de alimentadores uma floresta. Para melhor ilustração de um grafo, pode-se visualizar a Figura 8 anterior, sendo os alimentadores os destacados e os outros nós as cargas.

2.3.1 Representação Nó-Profundidade

Em (DELBEM et al, 2004), propõe-se a representação nó-profundidade, que se trata de representar árvores de grafo procurando auxiliar a resolução do problema específico de reconfiguração de redes em sistemas de distribuição. Ela se baseia no conceito de caminho e de profundidade um nó em uma dada árvore e é tida como uma lista contendo nós da árvore e suas profundidades com relação ao nó raiz. Assim, a lista é feita de pares (n_x, p_x) , respectivamente o nó da árvore e a profundidade desse mesmo nó. Computacionalmente, se representa essa lista através de uma matriz $2 \times n$, sendo n o número total de nós da árvore.

Segundo (MANSOUR, 2009), a ordem dos pares na lista é importante. Assim, um algoritmo de busca em profundidade é necessário para armazenar um nó nessa lista. Tomando novamente a Figura 8, a representação nó-profundidade (RNP) desse sistema seria dada por:

- Alimentador 1 = [1,0; 4,1; 5,2; 7,3; 8,4; 9,5; 11,4; 6,2; 10,3]

- Alimentador 2 = [2,0; 17,1; 15,2; 13,3; 19,3]
- Alimentador 3 = [3,0; 21,1; 16,2; 14,3; 12,4; 18,1; 20,2]

O conjunto dado pela representação anterior das três árvores forma a floretas conceitual de grafo. Sendo assim, a estrutura de floresta pode ser implementada se utilizando uma lista de ponteiros, em que cada um deles indica a RNP de uma dada árvore (MANSOUR, 2009).

Uma vez que a representação foi consolidada, a necessidade de manipular os grafos representados surgiu. Para isso, dois operadores denominados *Preserve Ancestor Operator* (PAO) e *Change Ancestor Operator* (CAO) foram criados. São úteis ao serem aplicados em uma floresta F , de um grafo G , produzindo uma nova floresta F' , sem perder informações do antecessor. O que ocorre é que há a transferência de uma parte da árvore de uma floresta para outra árvore nos dois operadores. Enquanto no operador PAO a raiz podada é também a raiz que será implantada, no operador CAO a raiz implantada é um nó diferente do nó raiz da subárvore cortada.

Conclui-se que os dois operadores promovem a poda e o enxerto de subárvores em outras árvores. Operações essas que produzem novas RNPs de florestas modificadas e que serão essenciais na formulação de novos indivíduos durante a iteração do código, como será visto e melhor explicado posteriormente.

2.4 Modelagem de Cargas

As cargas são importantes nos sistemas elétricos de potência, pois através delas é possível determinar as tensões nodais da rede elétrica. Antes de serem utilizadas no cálculo do fluxo de potência, porém, devem ser modeladas, de tal forma que sua representação matemática tenha conexão com seu comportamento físico. Isso serve para dar maior fidedignidade aos resultados e também que a precisão do código melhore.

Quando em regime permanente, cada componente do sistema é distinto e possui equivalência matemática diferente. Por exemplo, capacitores em regime permanente se comportam como circuitos abertos, enquanto que indutores se comportam idealmente como um curto-circuitos. Em outras palavras, a potência ativa absorvida por uma determinada carga depende da magnitude e da frequência da tensão elétrica aplicada a ela. Tomando como fato que variações de frequência são mínimas em sistemas elétricos de potência, considera-se no código frequência constante.

Os modelos a seguir se referem às representações das cargas em função da tensão aplicada em seus terminais. São melhor detalhados a seguir, considerando-se condições de sistema equilibrado e carga monofásica.

2.4.1 Carga de Corrente Constante com Tensão

Cargas que apresentam magnitude do valor de corrente invariante com a tensão aplicada em seus terminais, dentre elas fornos a arco, lâmpadas de descarga, entre outros. São representadas pelas seguintes equações ilustradas a seguir.

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_N &= \frac{S_N^*}{\dot{V}_N^*} = \frac{S_N}{V_N} \angle (\theta - \varphi) = I_N \angle (\theta - \varphi) \\
 \dot{I}_{Nx} &= \frac{S_N}{V_N} \angle \theta_x - \varphi = I_N \angle (\theta_x - \varphi) \\
 S_x &= \dot{V}_x \cdot \dot{I}_{Nx}^* = V_x \angle \theta_x \cdot I_N \angle -(\theta_x - \varphi) \\
 S_x &= V_x \cdot I_N \angle \varphi
 \end{aligned} \tag{1}$$

Sendo as variáveis as seguintes:

- I_n : Corrente elétrica absorvida pela carga
- V_n : Tensão de alimentação da carga
- S_n : Potência aparente consumida pela carga
- V_x : Tensão diferente da nominal aplicada sobre a carga

Assim, segundo as equações em (1), a potência absorvida pela carga varia linearmente com a magnitude da tensão aplicada.

2.4.2 Carga de Potência Constante com Tensão

Seguindo a linha de pensamento das cargas anteriores, as cargas de potência constante com a tensão aplicada nos terminais costumam absorver potências ativa e reativa, contidas no total S_n , de forma invariante, isto é, suas potências são sempre nominais qualquer que seja o valor de tensão existente. As equações que descrevem o comportamento desse tipo de carga são dadas em (2).

$$\begin{aligned}
 S_N &= S_N \angle \varphi = P_N + jQ_N \\
 \dot{I}_y &= \frac{S_N^*}{\dot{V}_y^*} = \frac{S_N \angle -\varphi}{V_y \angle -\theta_y} = \frac{S_N}{V_N} \angle (\theta_y - \varphi)
 \end{aligned} \tag{2}$$

Sendo V_y , tal qual V_x em (1), uma tensão de fornecimento diferente da nominal, pode-se notar que a corrente absorvida por esse tipo de carga é inversamente proporcional à tensão.

2.4.3 Carga de Impedância Constante com Tensão

Cargas com característica de manter a impedância constante com variação de tensão em seus terminais. Esse modelo de carga costuma abranger as cargas puramente resistivas como chuveiros, aquecedores, etc.

Novamente, sendo o índice n referente aos valores nominais e k o índice referente a valores diferentes dos nominais, tem-se que (3) ilustra as equações que regem o comportamento desse grupo de cargas.

$$\begin{aligned} Z_N &= \frac{\dot{V}_N^2}{S_N} = \frac{V_N^2 \angle(2 \cdot \theta)}{S_N \angle \varphi} = \frac{V_N^2}{S_N} \angle \delta = R + jX \\ S_k &= \dot{V}_k \cdot \dot{I}_k^* = \dot{V}_k \cdot \frac{\dot{V}_k^*}{Z_k^*} = \frac{V_k^2}{\left(\frac{V_N}{S_N}\right)} = \left(\frac{V_k}{V_N}\right)^2 \cdot S_N \end{aligned} \quad (3)$$

Quanto a esse modelo, percebe-se que a potência varia com o quadrado da tensão aplicada, permanecendo constante a impedância da carga.

2.5 Cálculo de Fluxo de Potência

Antes mesmo de se analisar a formulação do problema apontado por este trabalho, é necessária revisão dos métodos para cálculos de fluxo de potência ou fluxo de carga, uma vez que esse ele estabelece objetivos e restrições quanto à implementação de uma nova configuração no sistema. A partir do fluxo de potência, obtêm-se condições de operação de um sistema elétrico, além de suas características elétricas como tensões complexa nas barras, fluxos de potências ativa e reativa nas linhas e nos transformadores. Para realizar tal cálculo, assume-se que a topologia da rede trabalhada, a potência total instalada e a demanda total requerida pelos consumidores daquele sistema em específico são conhecidas previamente.

Métodos comumente vistos na literatura como Netwon-Raphson, Desacoplado Rápido e suas respectivas versões modificadas são geralmente inadequados no cálculo de fluxo de potência para sistemas de distribuição, uma vez que necessitam de fatoração de matrizes que podem ser prejudicadas por algumas características do sistemas, como impedâncias baixas em alguns trechos, cargas distribuídas, etc. Por motivos como esse, outros métodos para fluxo de potência em sistemas de distribuição radiais foram desenvolvidos.

Entre os vários métodos específicos para sistemas de distribuição radiais, o que se destaca é o de varredura direta/inversa. Destacam-se alguns aspectos desse processo iterativo: simples de implementação, não dependência de matrizes grandes (não existe fatoração), robustez, dentre outros aspectos. Constitui um método no qual duas etapas de varredura ocorrem, sendo elas:

- Varredura *Backward*: A varredura inversa calcula as correntes ou as potências de todos os trechos da rede elétrica, partindo das extremidades em que os alimentadores estão e seguindo até as subestações da topologia.
- Varredura *Forward*: A varredura direta começa se assumindo que as tensões das barras são as tensões nominais que se esperam ser. Prossegue-se com o cálculo das tensões nodais usando as correntes/potências calculadas na varredura inversa, o valor da tensão das subestações e os valores de impedância das linhas de distribuição.

O processo acima de varreduras alternadas é repetido até que um critério de convergência estipulado pelo programador seja atingido, podendo o mesmo ser um número de iterações ou uma precisão de casas decimais fixas para as respostas. Dois dos métodos de varredura direta/inversa mais utilizados na literatura são abordados a seguir e são explanados de maneira simplificada.

2.5.1 Soma de Potências

Partindo-se do princípio que a potência deve se conservar dos alimentadores à carga, mesmo que existam perdas técnicas, representadas pelas impedâncias, este é o método mais utilizado e mais intuitivo para cálculo do fluxo de potência, sendo utilizado em sistemas radiais ou com poucas malhas. Considerando a Figura 5, a explicação do método e as equações utilizadas são a seguir apresentadas.

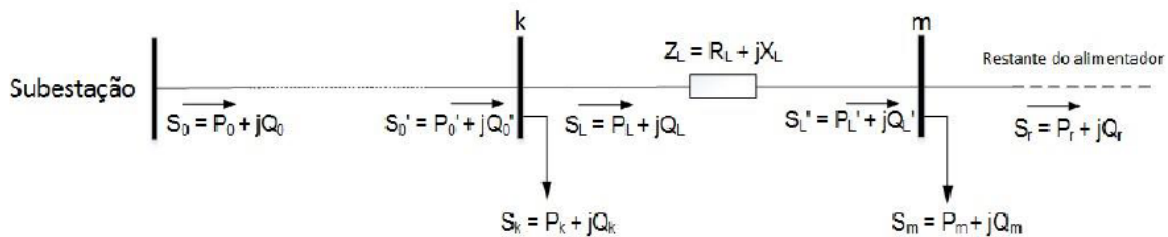


Figura 5: Sistema de distribuição com alimentador (PEREIRA, 2014).

A primeira etapa (varredura inversa) remete basicamente à resolução das potências dos trechos l , em que a potência ativa e a potência reativa são dadas pelas equações em (4), sendo:

- Z_l : Impedância do trecho de linha l , composta pelas partes real R_l (resistência) e imaginária X_l (reatância).

- S_l : Potência aparente que sai da barra k no ramo l, composta pelas partes real P_l (potência ativa) e imaginária Q_l (potência reativa).
- S_l' : Potência aparente que chega na barra m no ramo l, composta pelas partes real P_l' (potência ativa) e imaginária Q_l' (potência reativa).
- V_m : Tensão na barra m.

$$\begin{aligned} P_L &= P_L' + R_L \cdot \left(\frac{(P_L')^2 + (Q_L')^2}{V_m^2} \right) \\ Q_L &= Q_L' + X_L \cdot \left(\frac{(P_L')^2 + (Q_L')^2}{V_m^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Posteriormente a varredura inversa finalizar, as potências aparentes em todos os trechos do sistema serão conhecidas. Prossegue-se, então, para a varredura direta.

Inicialmente, a tensão da barra k é considerada como não tendo componente imaginária, isto é, tendo ângulo fasorial nulo. Assim, usando as expressões de (5) e conhecendo as potências ativa e reativa calculadas anteriormente, é possível encontrar o valor de V_k .

$$\begin{aligned} V_m &= \sqrt{V_k^2 - 2 \cdot (P_L \cdot R_L + Q_L \cdot X_L) + \frac{(P_L \cdot R_L)^2 + (Q_L \cdot X_L)^2 + (Q_L \cdot R_L)^2 + (P_L \cdot X_L)^2}{V_k^2}} \\ \theta_m &= -\tan^{-1} \left(\frac{Q_L \cdot R_L - P_L \cdot X_L}{V_k^2 - P_L \cdot R_L - Q_L \cdot X_L} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Após o valor da tensão na barra k ser calculado, o método é iterado até o critério de convergência ser atingido. Resumidamente, os passos anteriormente descritos podem ser resumizados no seguinte:

1. Atribuição de tensão da subestação a todas barras existentes no sistema.
2. Cálculo do fluxo de potência em todos os trechos do sistema, iniciando a varredura inversa na barra da subestação e indo até as barras de extremidade.
3. Varredura direta calcula tensões de todas as barras do sistemas, usando para isso as potências calculadas anteriormente. O processo se inicia na subestação novamente e é executado até que as tensões das barras das extremidades sejam conhecidas.
4. O processo se repete e atualiza a diferença entre tensão da iteração atual e da iteração anterior. Normalmente, aqui se define um critério de convergência, sendo em precisão ou em número de iterações, como comentado anteriormente.

2.5.2 Soma de Correntes

Semelhante ao que foi visto anteriormente, o método de soma de correntes é apropriada para sistemas radiais ou fracamente malhados. As etapas *forward* e *backward* são semelhantes ao já instituído, entretanto, um ponto importante é estabelecido: Todas tensões nodais da rede são fasores iguais às tensões da subestação.

Dessa maneira, as correntes de carga em cada barra i são calculadas pela equação mostrada em (6), onde k se refere à iteração do código, sendo I , V e S definidos como anteriormente corrente, tensão e potência aparente, respectivamente. Y se refere à soma dos elementos *shunt* do sistema.

$$i_i^{(k)} = \left(\frac{S_i}{V_i^{(k-1)}} \right)^* - Y_i^{sh} V_i^{(k-1)}, i = 1, 2, \dots, t \quad (6)$$

Parte-se, então, dos extremos da rede e se termina na barra da subestação. Calculando cada corrente que circula nos trechos conectando barras dianteiras com barras traseiras. Essa etapa configura a fase *backward* do modelo.

Em seguida, na fase de *forward*, parte-se do nó da subestação e se termina nos nós das extremidades, calculando a tensão em que cada barra que se passa do sistema, conectada a uma barra que seja antecessora. Para tal, a aplicação da lei de Ohm para grandezas fasoriais (possuindo-se impedância dos trechos e valores de corrente anteriormente calculados) resolve os valores de tensões que se objetiva possuir.

Por último, o critério de convergência do algoritmo é questionado. Uma vez que seja satisfeito, a iteração pausa e os resultados podem então ser utilizados, conhecendo-se todas as tensões e as correntes nas barras e nós do determinado sistema.

Por fim, possuindo os dois métodos de aproximação para cálculo do fluxo de potência, preza-se que aquele que possua maior afinidade com precisão e que reflita melhor o trabalho com cargas de correntes não constantes seja o utilizado. Assim, aqui se institui que, mesmo que o tempo de execução seja maior, utiliza-se o algoritmo mais preciso, uma vez que tempo de execução não é o foco nem mesmo é um dos pontos mais críticos deste trabalho.

2.5.3 Fluxo de Potência em Representação Nó-Profundidade

Sistemas reais, como o mostrado posteriormente referente à cidade de Londrina, podem conter milhares de barras e de linhas. Para simplificar a representação desses mesmos sistemas, métodos variados podem ser utilizados, sendo aqui o enfoque no já explicado anteriormente: Representação Nó-Profundidade.

Entretanto, a concentração de cargas de um setor num único ponto do alimentador, como é de se esperar, afeta a confiabilidade de que o sistema representado realmente condiz ao sistema real, uma vez que as soluções computacionalmente obtidas não representam em sua totalidade o que seria capturado para a realidade.

Para isso, a utilização de duas Representações Nó-Profundidade ao invés de uma é indicada, uma vez que a eficiência aumenta, como é visto em (SANTOS, 2009). Uma delas para os alimentadores e outra para os setores de carga, não existindo simplificações que possam afastar o modelo proposto do sistema real.

A Representação Nó-Profundidade referente aos alimentados é construída da mesma forma explicada para os setores de carga, sendo suas árvores matrizes denominadas $B_{s,r}$. O índice r se refere ao setor pai, enquanto o índice s ao setor ao qual a energia chega, ou seja, o setor em análise. É importante lembrar que um setor pode ser representado por diferentes árvores, o que depende do sentido de alimentação, influenciando no nó raiz.

A Figura 6 exemplifica a representação, como visto em (PEREIRA, 2014). Os pontos são as barras de carga ou conexões entre trechos adjacentes. As linhas contínuas, como anteriormente promulgado, são as chaves seccionadoras em estado aberto ou fechado. As subestações são dadas pelos retângulos.

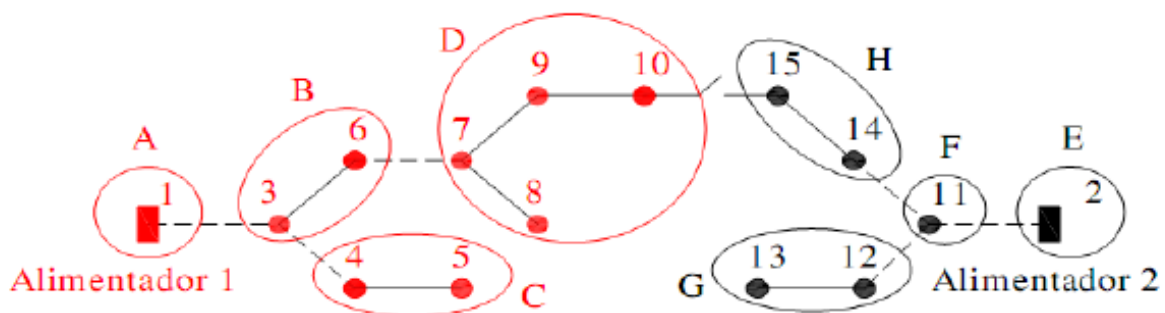


Figura 6: Sistema representando dois alimentadores em RNP (PEREIRA, 2014).

Em (SANTOS, 2009), quando se utiliza a Representação Nó-Profundidade de um dado setor no cálculo de fluxo de potência, deve-se acrescentar um nó adjacente ao nó raiz da árvore do setor. Esse nó adicional é pertencente ao setor anterior ao setor em questão e é por meio dele que a energia é transferida. Esse procedimento é aplicado pois garante que as barras permaneçam ordenadas segundo a relação Pai-Filho (KAGAN et al, 2005), em que o ordenamento se dá no sentido do fluxo de potência, com o pai à montante e os filhos à jusante sempre. A Figura 7 exemplifica alguns exemplos retirados do sistema da Figura 6, como mostrado (PEREIRA, 2014).

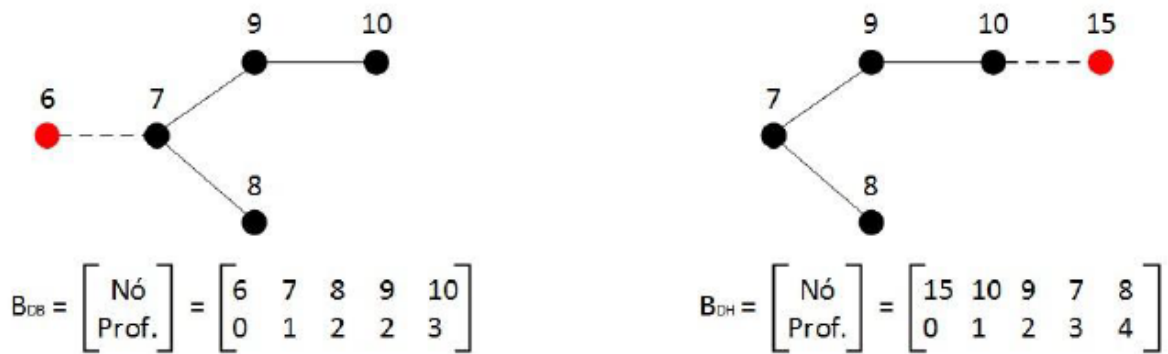


Figura 7: Algumas RNPs do sistema da Figura 6 (PEREIRA, 2014).

3 Otimização de Perdas Técnicas

Partindo do pressuposto que os sistemas de distribuição de energia elétrica, tanto primários quanto secundários, têm por objetivo o abastecimento de energia elétrica aos consumidores finais, continuamente e dentro de padrões de qualidade de níveis de tensão e de corrente, perdas de potência ativa podem gerar gastos excedentes quando se admitidas do ponto de vista das concessionárias. Entretanto, isso também significa impacto direto nos consumidores, uma vez que essas mesmas concessionárias, tendo que gerar mais para atender uma demanda fixa acabam por repassar os custos da operação extra em seus clientes.

Muitas vezes, essas mesmas perdas poderiam ser diminuídas, mas muitas das soluções para tornar mais eficiente um sistema elétrico remetem à instalação de novos e mais sofisticados equipamentos (chaves modernas, bancos de capacitores mais potentes, transformadores com maior eficiência na transformação, etc). Assim, para as concessionárias, investir em novos aparelhos para melhorar a eficiência de seu sistema muitas vezes não compensa, uma vez que o custo-benefício de tais mudanças só seriam percebidos muito tempo após, quando os equipamentos tivessem sido pagos quanto à economia proporcionada pela eficiência. Equipamentos como esses podem beirar a milhões de reais, então é de se supor que se levem meses ou até anos para que o prejuízo seja liquidado. Sem contar que, na maioria das vezes, o prejuízo seria repassado aos consumidores, que, custeando uma energia não eficiente em sua distribuição, ainda arcariam com custos a mais para poder tornar mais eficiente essa mesma rede elétrica. Tendo esse cenário em mente e de forma resumida, muitas concessionárias não tendem a trabalhar na efficientização de suas redes quando isso requer instalação de novos componentes a não ser que estritamente necessário.

Assim, a reconfiguração da rede por meio de ferramentas computacionais foi de fato revolucionária. Ela constitui uma ótima solução para aumentar a eficiência de uma rede elétrica e é ainda melhor por utilizar somente componentes que já estão naquela rede, sem inferir gastos extras. Dessa maneira, as concessionárias podem utilizar isso para aumentar a eficiência de suas redes, usando o poder computacional e a estrutura do sistema elétrico que já possuem, acarretando em um maior *overall* fator de potência, economizando na geração, uma vez que menos potência aparente será necessária para abastecer uma mesma demanda de potência ativa e transferindo economia de gastos diretamente para o consumidor, o maior beneficiado dessa medida.

Tomando a vista por um lado mais sistêmico, uma vez que a estrutura dos sistemas de distribuição é radial, o sentido do fluxo de potência é único e unidirecional nos alimentadores, o que impacta na facilidade de projetar o sistema. Essa convenção tem se tornado difícil

de se utilizar em plenitude com o advento da geração distribuída, em que certos trechos da rede passam a injetar potência na rede ao invés de consumi-la. Realmente, isso torna a projeção do sistema ainda mais complexa, sendo necessário que múltiplas análises ao longo do dia de um mesmo sistema sejam feitas, para tornar possível calcular uma média ou mesmo se conhecer melhor o comportamento da rede em vários momentos. Para isso, o poder computacional também aumentaria, o que era denotado por uma compilação do código passaria a significar compilações quase que por minuto.

Ainda que seja uma realidade cada vez mais proeminente, neste trabalho são desconsideradas as redes que possuem geração distribuída, para facilitar os cálculos, o método computacional de resolução, as considerações, etc. Assim sendo, considera-se aqui que o fluxo de potência é unidirecional ao longo do dia em um sistema radial qualquer analisado.

Prosseguindo, depois de tecer as considerações anteriores, se uma dada chave é aberta, todos os setores à jusante serão faltosos e o abastecimento de energia cessará. Se essa mesma chave se encontra fechada, os mesmos setores serão abastecidos normalmente. Assim, uma das premissas da reconfiguração do sistema elétrico com base na abertura e no fechamento de chaves existentes é que, independente da combinação, todos os setores sejam alimentados e que em nenhum dos casos algum trecho em perfeito estado de funcionamento fique fora de serviço. Nesse sentido, é necessário do código elaborado que seja respeitada a seguinte premissa: nenhuma dos sistemas de distribuição originados pela reconfiguração da rede dada pela combinação de abertura e de fechamento de chaves seccionais existentes deve possuir setores ou mesmo trechos fora de serviço. Em outras palavras, todos os sistemas obtidos pela ferramenta computacional devem ser factíveis e não devem alterar o fornecimento de energia para qualquer parte.

Por conseguinte, é necessário que o programa que realize a reconfiguração da rede satisfaça as condições prefixadas de maneira confiável, para que todas as cargas que eventualmente surgirem como possível solução para a função objetivo de menor potência ativa perdida sejam reconectadas ao sistema elétrico novamente ainda na iteração do código.

Para ilustrar melhor os problemas relacionados ao programa e como podem surgir configurações que não são interessantes à concessionária, a Figura 8 representa um sistema estruturado por 3 alimentadores que começam nos nós 1, 2 e 3. Os nós adjacentes representam as barras de carga, que podem ser, por exemplo, consumidores variados. As linhas retas são chaves normalmente fechadas e as linhas serrilhadas são chaves normalmente abertas.

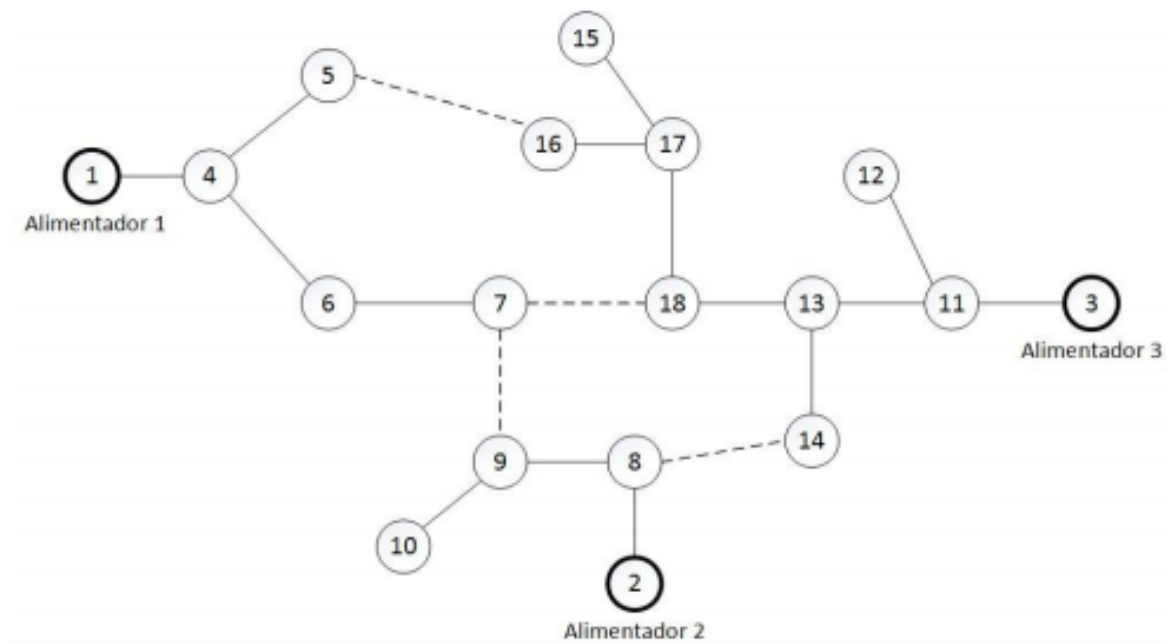


Figura 8: Grafo de um sistema de distribuição (SANTOS, 2009).

Suponha que uma das configurações geradas pelo algoritmo utilizado neste trabalho produza uma combinação de chaves normalmente abertas e normalmente fechadas muito parecida com o sistema da Figura 8, entretanto com uma pequena diferença: a chave entre os nós 17 e 18 agora está aberta. Nota-se pela Figura 9, claramente, que os setores dados por 15, 16 e 17 ficariam fora de serviço. A estrutura da nova rede criada pelo código é factível, porém não interessa para a concessionária, não tendo utilidade de se manter ela nas iterações do código.

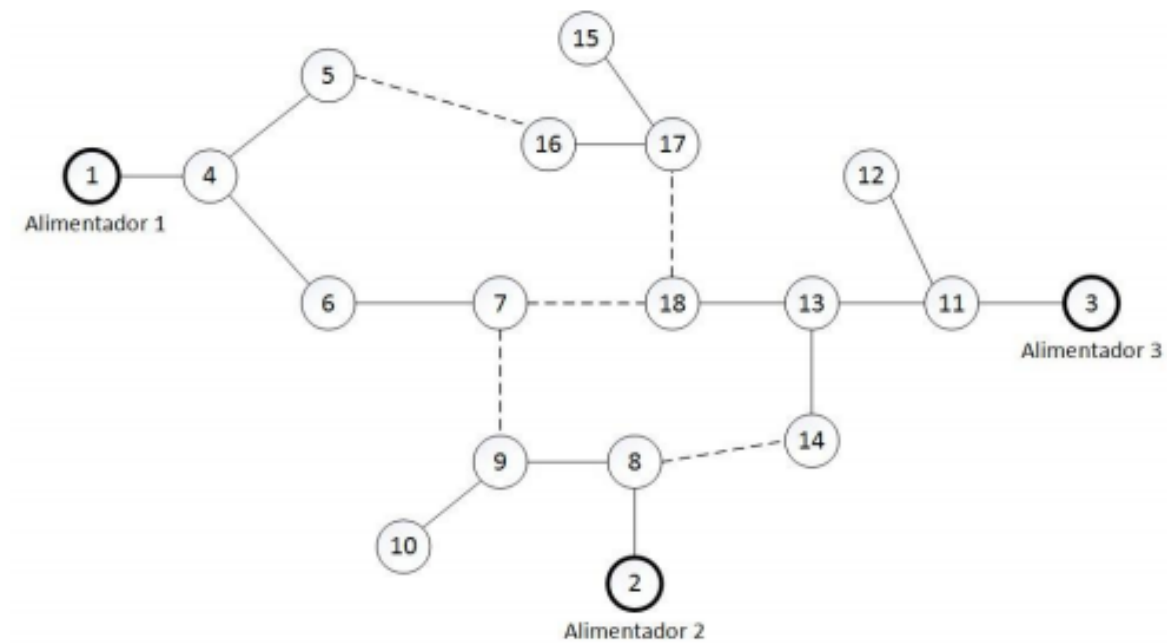


Figura 9: Grafo anterior com chave entre nós 17 e 18 aberta (SANTOS, 2009).

Suponha, dessa vez, que a mesma configuração da Figura 9 seja adotada com outra pequena mudança: a chave entre os setores 5 e 16 agora possui estado fechado ao invés de normalmente aberto. A Figura 10 mostra que os setores 15, 16 e 17 novamente teriam distribuição de energia e, assim, o código gerou uma reconfiguração da rede totalmente utilizável e factível, contemplando as restrições anteriormente impostas.

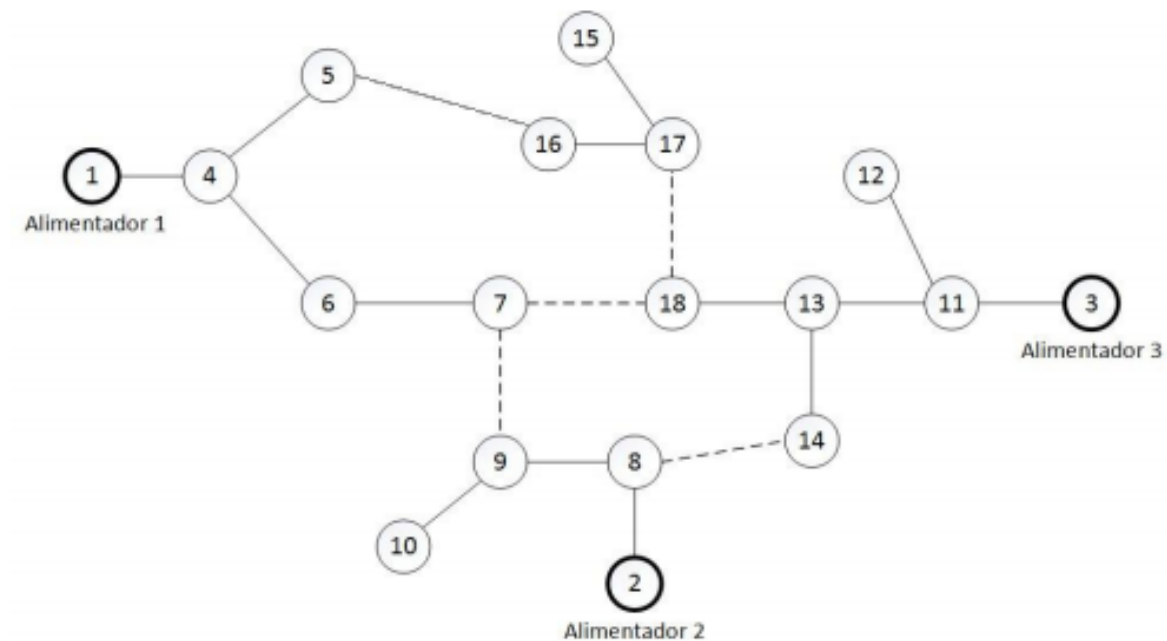


Figura 10: Troca do estado de operação da chave seccionadora entre 5 e 16 de aberta para fechada (SANTOS, 2009).

O próximo passo relacionado ao novo sistema da Figura 10 seria o cálculo do fluxo de potência nele e tomada de parâmetros de interesse, em especial a quantidade total de potência ativa perdida em seus trechos. Questionamentos acerca de sua eficiência se comparado a outros sistemas factíveis e utilizáveis gerados serão feitos e esses serão posteriormente melhor analisados quando discutidos as particularidades do Algoritmo Evolutivo.

Concluindo a linha de raciocínio, o código deve gerar apenas configurações factíveis, utilizáveis e respeitando as limitações do sistema (número de setores, alimentadores, sentido do fluxo de potência, etc). De uma maneira mais simples, é elucidado por (SANTOS, 2009) que uma solução para o problema de reconfiguração é factível se atender às seguintes restrições:

- A estrutura radial deve permanecer na nova configuração
- O montante de carga para cada alimentador do sistema não pode exceder a capacidade da subestação
- A corrente em cada trecho não deve superar o limite dos condutores e chaves
- A queda de tensão em qualquer barra do sistema de distribuição não pode exceder um limite permissível

No caso de um setor fora de serviço, o código deve encontrar outra maneira da energia chegar a ele por outro caminho ou simplesmente descartar a combinação resultante. Porém, essa não é uma solução elegante ou inteligente, uma vez que existem muitas combinações produzem reconfigurações que não atendem ao padrão, sem falar que configurações deletadas se repetiriam, mais poder de processamento seria necessário, mais tempo de compilação, mais iterações para convergência, dentre outros problemas.

Um maior desenvolvimento do código e de como ele contorna as restrições e atinge as metas expostas anteriormente será feito posteriormente. Por enquanto, apenas se elucida a qual ponto se quer chegar e que resultados almejam-se obter.

3.1 Formulação Matemática

Tendo em mente todas as restrições que o código deverá ter e todos os objetivos que se almejam alcançar, pode-se estabelecer como em (PEREIRA, 2014) as seguintes premissas para início da formulação matemática:

$$\begin{aligned}
 & \textit{Minimizar } \gamma(G) \\
 & \textit{sujeito a:} \\
 & A(G)x(G) = c(G) \\
 & A(G)Y_x(G)A(G)^t v(G) = c(G) \\
 & X(G) \leq 1 \\
 & B(G) \leq 1 \\
 & V(G) \leq 1 \\
 & G \text{ ser uma floresta,}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Definindo as seguintes variáveis como sendo:

- G: representa uma configuração radial do SD,
- Y(G): total de perdas ativas em G;
- A(G): matriz incidência arestas-nós de G;
- x(G): vetor com os fluxos de correntes complexas nas linhas em G
- c(G): vetor contendo as correntes complexas nas barras de carga, de passagem e da subestações
- A(G): matriz admitância diagonal da rede, em G;
- v(G): vetor de tensões complexas nodais em G;

- $X(G)$: máximo carregamento da rede em G
- $B(G)$: máximo carregamento de subestação em G
- $V(G)$: máxima queda de tensão em G

Se utilizada a Representação Nó-Profundidade, criada para manipular florestas de grafos para garantir que modificações realizadas produzam outras florestas de grafos, as premissas apresentadas em (7) podem ser imensamente simplificadas, uma vez que a Representação Nó-Profundidade garante configurações factíveis, grafos acíclicos e conexos. Somado a isso, não é necessário utilizar algoritmos de busca para executar a varredura do fluxo de potência, já que os nós de cada árvore são ordenados segundo nó raiz e profundidade. Isso garante menor tempo de iteração do código e menor poder de processamento requerido (algoritmos de busca costumam exigir alta performance de processamento).

Conclusivamente, a solução para o problema de reconfiguração em busca da mínima perda de potência ativa do sistema infere que, para as fórmulas dadas, as respostas devem também ser as mínimas o possível. Reformulando o exposto em (7), tem-se (8), esquema simplificado e que valida que o uso da RNP na teoria de grafos diminui a complexidade do problema a ser analisado.

3.2 Algoritmos Evolutivos

Os chamados Algoritmos Evolutivos representam uma classe de algoritmo que se baseiam no conceito evolutivo do Darwinismo, em que a aptidão de indivíduos os seleciona para viver mais, procriar e, assim, manter seus genes e suas características perpetuados ao longo de gerações por meio de descendentes. A programação evolutiva trabalha com conjuntos de indivíduos chamados populações. Cada indivíduo representa uma solução particular para uma dada função objetivo, a qual se pretende obter a resposta mais otimizada, muitas vezes representada pelo mínimo global dentre de um domínio de interesse.

Os problemas costumam possuir funções objetivo multimodais, não diferenciáveis e não determinísticas, de difícil resolução ou resposta exata. Assim, computacionalmente rigorosas, essas funções comumente são classificadas como problemas neperianos de difícil resolução, em que o número de iterações necessárias é exponencial, o que demanda longo tempo de processamento. Para resolver tais problemas, combinações de valores de parâmetros de interesse são testados e as respostas das funções objetivo comparadas. Entretanto, lidar puramente com a aleatoriedade de combinações não garante uma convergência bem definida.

Nessa questão, os Algoritmo Evolutivos proporcionam um norte, uma vez que, semelhantemente à natureza, as melhores resposta se perpetuam, geram combinações semelhantes com uma pequena diferença, de forma a explorar melhor a região em que o ótimo global pode estar contido. Assim, a adequação das soluções deve aumentar gradativamente com o passar de gerações dos indivíduos, melhorando a resposta média da população a cada iteração.

A execução do programa normalmente cessa depois de estabelecido algum critério de parada, o qual pode ser um número de gerações definidas ou uma precisão, quando conhecida a resposta ótima. Consequentemente, quanto mais iterações e gerações um dado código passar por, melhor será a resposta dada pelos seus indivíduos e melhor respondida será a função objetivo inicial. Isso pode acontecer mais ou menos rapidamente de acordo com fatores do próprio código, como mecanismos de *crossover* (cruzamento de dois indivíduos com combinação de informações para geração de novos indivíduos) e mutação (chance de se aleatorizar algum parâmetro de um indivíduo de uma nova geração), e nível de dificuldade da função requerida. O fluxograma da idéia de funcionamento de um Algoritmo Evolutivo é visualizado na Figura 11, quando se conhece a resposta final a qual se deseja obter.

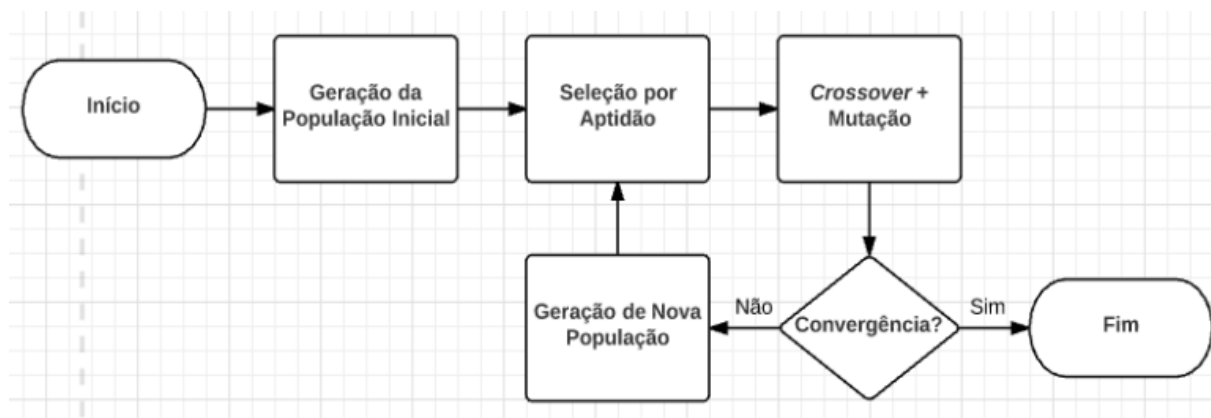


Figura 11: Fluxograma para um Algoritmo Evolutivo (Próprio autor).

Em (SANTOS et al., 2009), algumas vantagens da utilização de Algoritmo Evolutivos são expostas quando comparados a outras técnicas de otimização, sendo elas:

- Aptos a resolver ampla quantidade de problemas não lineares, descontínuos, discretos, multivariáveis, de combinação em grande escala
- Trabalham em paralelo com conjuntos de soluções
- Não exigem conhecimento prévio de características do problema

- As iterações são guiadas pelo nível de aptidão dos indivíduos de uma população, ou seja, pela resposta existente em uma dada geração para a função objetivo que se deseja solucionar
- Sua estrutura possui certa independência do tipo de problema que se deseja solucionar (uma mesma estrutura é adequada para múltiplas funções objetivos)
- Ótima capacidade de resolver problemas com ótimos locais (porém podem ser utilizados para resolver ótimos globais).
- Fácil hibridização (acoplamento) com outras técnicas e/ou aplicações

Apesar de muitas vezes obter respostas convenientes e sólidas para problemas complexos, deve-se destacar que nem sempre um Algoritmo Evolutivo consegue encontrar o ótimo global, por vários motivos, como o número de gerações não ser suficiente para convergência, a população convergir para ótimos locais (não sendo os mecanismos implementados de *crossover* e de mutação suficientes para movê-la daquelas regiões), o domínio de resolução da função objetivo não ter abrangência ao mínimo global, dentre outros.

3.2.1 Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo

A utilização de tabelas nos Algoritmo Evolutivos visa lidar com grandes sistemas de distribuição, com milhares de barras e de chaves seccionadoras, bem como quase inacabáveis combinações entre elas. O Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabela, assim sendo, nada mais é que conceitos de multiobjetividade e uso de tabelas em Algoritmo Evolutivos. Como exposto anterior, justamente por esses tipos de algoritmos terem flexibilidade quanto à hibridização é que podem ser acoplados conceitos diferentes conforme necessidade.

O Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabela lida com subpopulações paralelas armazenadas em tabelas, nas quais os melhores indivíduos de cada uma delas e as restrições/particularidades do problema são mantidos em respectivas subpopulações. Em outras palavras, respeitando os critérios estabelecidos anteriormente, o Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabela contém nas subpopulações os indivíduos com perdas de potência ativa minimizadas, que são estritamente relacionados a outra características como menor queda de tensão nos trechos, etc. Normalmente, a função agrega todos esses fatores em uma expressão que pode ser vista em (SANTOS et al., 2010) e a seguir:

$$f(F) = \phi(F) + w_1C(F) + w_2B(F) + w_3U(F)$$

Sendo $C(F)$, $B(F)$ e $U(F)$ as funções já mostradas anteriormente e o $\phi(F)$ o total de perdas ativas da configuração F , em kW. Os pesos multiplicadores denotados pelos w são relativos a condições das funções anteriormente citadas. O mesmo código foi utilizado em (PEREIRA, 2014) para resolução de reconfiguração de redes de distribuição elétrica face a faltas ocorridas no mesmo sistema. Ele é aqui reaproveitado, sendo algumas alterações quanto funcionamento, objetivo e tabelas tendo sido feitas. Assim, detalhes maiores com relação às outras variáveis podem ser pesquisados posteriormente, foca-se aqui na minimização da perda de potência ativa, no contexto da equação vista anteriormente.

O Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabela começa com reconfiguração elementar da malha elétrica. Aqui são removidos das tabelas os indivíduos que apresentem setores fora de serviço. O operador CAO, anteriormente explicado, é utilizado até que a população inicial esteja completa e todos os indivíduos sejam factíveis e atendam às exigências. Após, a iteração tem início. O passo a passo é descrito como se segue:

1. É determinado qual operador se utilizará (PAO ou CAO) para geração de um novo indivíduo. A escolha é baseada num sistema de probabilidade dinâmica, na qual, para a primeira iteração, é de 0,5 para cada. Conforme um indivíduo gerado com CAO ou PAO for inserido em uma ou mais tabelas, aquele mesmo operador terá sua probabilidade aumentada. Em outras palavras, quanto melhor for o indivíduo, mais indivíduos do mesmo ancestral seriam retirados, favorecendo o operador PAO. Caso vários indivíduos saiam de um mesmo ancestral, porém poucos entrarem em tabelas, conclui-se que aquele ancestral não possui uma boa resposta à função objetivo, o que favorece o operador CAO. Assim, a probabilidade dinâmica é constantemente atualizada.
2. Selecionam-se aleatoriamente indivíduos de subpopulações aleatórias para *crossover*. O operador previamente determinado é aplicado sobre os indivíduos e novos indivíduos são gerados (um filho para cada pai).
3. Os passos acima são repetidos até que um número máximo de gerações predefinido seja atingido.
4. Avaliam-se os indivíduos através do cálculo de fluxo de potência (varredura direta/inversa, explicado posteriormente). No algoritmo original, as cargas são representadas por modelo de corrente constante e as impedâncias das linhas constantes. Convém ressaltar que a varredura só é realizada nos alimentadores que sofreram alterações ao decorrer de gerações.
5. Novos indivíduos são incluído na subpopulações, sejam melhores (possuam menor perda de potência ativa total do sistema) que os pior indivíduos dessas mesmas subpopulações.

Se isso não ocorrer, os indivíduos simplesmente são descartados.

O pseudocódigo para o descrito acima é mostrado na Figura 12, como em (PEREIRA, 2014).

Inicie o contador de gerações ($g \leftarrow 0$)
Restabeleça o sistema com setores em falta, gerando a floresta inicial F_0
Gere as subpopulações P_i a partir de F_0
Avalie todos os indivíduos da população inicial
Teste o critério de parada ($G_{\text{máx}}$)
Enquanto o critério de parada não for satisfeito **faça**
 Selecione aleatoriamente uma subpopulação (P_i)
 Selecione aleatoriamente um indivíduo I_S de P_i
 Determine qual operador aplicar (CAO ou PAO)
 Aplique o operador escolhido para gerar um novo indivíduo I_R de I_S
 Avalie o novo indivíduo I_R
 Selecione os sobreviventes da nova geração
 Incremente o contador de gerações ($g \leftarrow g + 1$)

Figura 12: Pseudocódigo dos processos do código.

4 Estratégia Proposta

A estratégia de usar o que já existe no sistema em estudo é mostrada como uma possibilidade viável e muito boa. Em outras palavras, a estrutura do sistema como um todo permanece a mesma, já que os novos elementos não precisam ser adicionados ao sistema elétrico. Sem mudanças, estudos de impacto e certas burocracias que provavelmente demoram a ser concluídas não são obrigatórios, colocando a solução proposta em produção muito rapidamente, sem custos adicionais e com retorno quase imediato em termos de economia.

Assim, a reconfiguração das redes de distribuição elétrica mostra-se muito conveniente, como discutido anteriormente, para aliviar os problemas de perda de energia. Existem várias maneiras de trabalhar para alcançar o objetivo, e os algoritmos evolutivos foram escolhidos pelas razões mencionadas acima e a favor e contra os aspectos, em comparação com outros tipos de soluções inteligentes. Os Algoritmos Evolutivos usam conjuntos de soluções candidatas para um determinado problema. Gradualmente, conjuntos de soluções são avaliados, varrendo o espaço da solução do domínio e aproximando mais ou menos rapidamente os pontos de resposta ótima (global ou local).

Neste artigo propomos a solução do problema baseado no processo de reconfiguração, através de um algoritmo evolucionário multiobjetivo em tabelas, utilizando o esquema de representação de profundidade de nós, conforme descrito em (DELBEM et al., 2017). Deve-se notar que a combinação já foi utilizada anteriormente em (Marques et al., 2017) para mitigar os danos relacionados à escassez permanente de eletricidade, devido a acidentes. O código foi assim modificado para que pudesse atender à mono-objetividade de minimizar as perdas de energia ativa existentes.

O Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabela trabalha em paralelo com várias subpopulações, as quais são armazenadas em tabelas, utilizando para isso a manobra de chaves seccionais existentes no próprio sistema. As melhores soluções, isto é, indivíduos (combinações de configurações de sistemas de distribuição) com a melhor resposta à função objetivo (respeitando as restrições estabelecidas do próprio problema) são salvas em suas respectivas tabelas. O que acontece é a possibilidade de procurar soluções ótimas máximas ou mínimas.

Estratégias para selecionar subconjuntos de soluções classificadas por mais de um objetivo são incorporadas ao código, o que dá origem a novas tabelas. Os critérios de dominância são então usados para estabelecer relações e compromissos entre as respostas extremas à função objetivo, que permite obter conjuntos de soluções não dominadas. Conceitos como dominância de tabelas são de pouco valor para o funcionamento do código, uma vez que eles não têm

impacto na escolha de indivíduos, dominância, pluralidade de soluções, porque é um algoritmo inicialmente planejado para multiobjetividade, mas neste caso com apenas um aspecto, etc., sendo assim desconsiderado.

Diversos estudos mostram também que a combinação entre o Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo na Tabela e a Representação Nó-Profundidade, no contexto de reconfiguração de redes de distribuição elétrica, dão origem a melhores mapeamentos de espaços de busca, o que favorece o uso de tabelas de subpopulações e também soluções de qualidade. Para mono-objetividade, no entanto, essas tabelas não são interessantes, uma vez que estratégias para selecionar subconjuntos de soluções com classificação de destino não são necessárias, e é de interesse apenas obter valores extremos (soluções ótimas extremas).

O Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo, embora atenda a um único objetivo, possui certas tabelas de subpopulação associadas às restrições operacionais do sistema trabalhado. Em outras palavras, certas tabelas que, ao longo do processo evolutivo que ocorre no programa, armazenarão todas as configurações radiais que foram obtidas. Essas configurações, baseadas nas combinações de chaves de comutação, conforme descrito nos capítulos anteriores, são os indivíduos do algoritmo considerados soluções possíveis. Estes candidatos para a solução ótima devem ter valores mínimos de: Carga de rede ($X(G)$), carga da subestação ($B(G)$), queda de tensão ($V(G)$) e valores de função agregados normalizados mais baixos definidos como apresentado em (9):

$$f_a(G) = \frac{\gamma(G)}{\gamma(G^i)} + k_X \frac{X(G)}{X(G^i)} + k_B \frac{B(G)}{B(G^i)} + k_V \frac{V(G)}{V(G^i)} \quad (9)$$

Sendo assim, a configuração inicial do sistema e as constantes de ponderação k_X para o carregamento da rede, k_B para o carregamento da subestação e k_V para a queda de tensão.

Considerando que a representação de profundidade de nós é usada para armazenar e manipular gráficos que

Os resultados das simulações computacionais do algoritmo, considerando um sistema de teste teórico e um sistema de grande porte real são ilustrados, analisados e comparados a seguir. Resultados apresentados na literatura são também considerados para confirmar os resultados obtidos pelos algoritmos propostos.

5 Testes e Resultados

5.1 Sistema teste teórico de pequeno porte

O sistema de distribuição de pequeno porte já foi utilizado em outros trabalhos, (KAGAN et al., 1999) e (DELBEM et al., 2002), e possui 3 subestações, 86 barras, 96 ligações e 28 chaves, sendo 15 chaves normalmente fechadas e 13 chaves normalmente abertas (estado inicial sem alteração). O sistema original de estudo pode ser visualizado como em (KAGAN et al., 1999) na Figura 13.

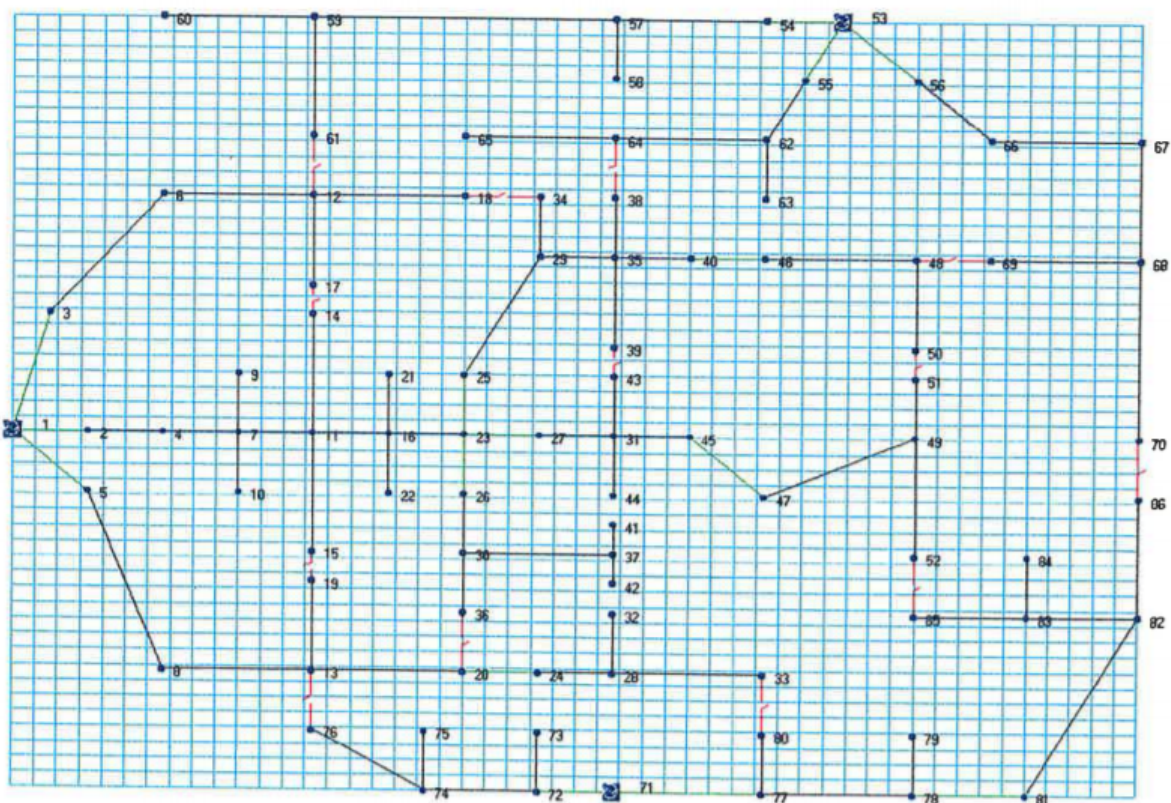


Figura 13: Caso teste teórico para minimização (KAGAN et al., 1999).

A Tabela 2 apresenta as características elétricas da configuração base desse sistema teórico, que será considerada como a configuração inicial para aplicação do Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo proposto, isto é, o indivíduo inicial. Destaca-se que os dados da Tabela 1 não são os mesmos apresentados em (KAGAN et al., 1999), pois no sistema foi considerado fator de potência de 0,92 para todas as cargas e não fator de potência unitário como utilizado originalmente no trabalho. Isso se deve ao fato de poder verificar o comportamento do algoritmo na presença de fluxo de potência reativo, tentando se aproximar mais da realidade.

Tabela 2: Tabela com características iniciais do sistema elétrico.

Características Elétricas	Valores
Soma das perdas resistivas em kW	421,74
Máxima queda de tensão em porcentagem	2,79
Máximo carregamento da rede em porcentagem	75,17
Máximo carregamento da subestação em porcentagem	66,99

Para fazer uma análise estatística, o Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo foi executados 50 vezes, com diferentes sementes para o gerador de números aleatórios. Em seguida, armazenam-se essas 50 soluções finais obtidas pelos algoritmos (melhores indivíduos armazenados na Tabela P6 do Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo após a execução). Com base nessas soluções, na Tabela 4 são apresentados os valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para o problema de minimização da perda de potência ativa.

Tabela 3: Tabela com melhores indivíduos para minimização de perdas resistivas no sistema Kagan.

Redução de perdas de potência ativa em kW	
Média	372,82
Pior indivíduo	372,82
Melhor indivíduo	372,82
Desvio padrão	0,00

Como se pode constatar, pela simples manipulação das chaves seccionadoras existentes no sistema teórico, pode-se melhorar em cerca de 11,6% o total em perdas de potência ativa existente no sistema. Ter uma taxa alta de otimização em tão pouco tempo sem absolutamente nenhum custo de operação reafirma o fato de algoritmos evolutivos serem uma das melhores opções quanto à otimização de sistemas nos quais há exigência de calcular muitas combinações/estados do sistema. A Figura em 14 representa o diagrama de caixas para o caso em questão.

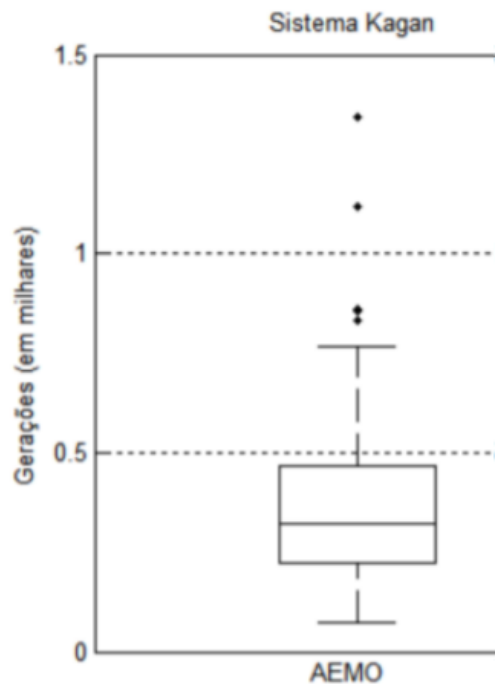


Figura 14: Diagrama de caixa indicando a geração em que o melhor indivíduo foi encontrado pelo Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo.

Para entender o diagrama de caixa, é preciso fazer algumas observações sobre o que ele representa. O diagrama de caixa costuma exibir o resumo de cinco números de um conjunto de dados, composto pelo mínimo, primeiro quartil, mediana, terceiro quartil, e máximo. Em um diagrama de caixa, desenha-se uma caixa do primeiro quartil ao terceiro quartil. Uma reta vertical passa pela caixa na mediana. As arestas saem de cada quartil para o mínimo ou para o máximo. Assim sendo, pode-se dizer que a grande maioria das vezes que o código foi compilado, os números apresentados para resposta da minimização de perdas técnicas foi obtido com menos de 500 gerações no total. Em outras palavras, na maior parte das vezes, em menos de 500 gerações foi possível encontrar o melhor resultado.

O número máximo de gerações utilizado para o sistema de pequeno porte foi de trinta mil, porém a maioria das configurações apresentadas como resposta foi encontrada com menos de mil gerações. Em outras palavras, após cerca de mil gerações, o melhor indivíduo já foi encontrado e a solução no domínio continua sendo replicada geração após geração nos indivíduos restantes. Há ainda a necessidade de se observar que, mesmo que a resposta atingida se trate de um mínimo local, ela ainda é aceitável, uma vez que o objetivo do algoritmo é otimizar um sistema já existente, o que não significa necessariamente achar a melhor resposta ou mínimo global para aquele mesmo sistema.

5.2 Sistema teste real de grande porte

O sistema de distribuição da cidade de Londrina, no estado do Paraná, estava em operação no ano de 2014, possuindo naquele período 21.642 barras, 151 chaves automáticas, 3.429 chaves manuais, 7 subestações, 68 alimentadores e mais de 231 mil consumidores.

No início, o algoritmo, como antes explicado, era focado em realizar manobra nas chaves seccionadoras para contornar problemas de falta permanente. Assim sendo, o principal objetivo, uma vez sendo desenvolvido no âmbito da rotina de engenheiro na COPEL, era utilizar esse mesmo algoritmo para evitar a interrupção do fornecimento de energia para certas áreas, sendo a otimização que o algoritmo oferece a chave para remanejar a própria malha elétrica e minimizar a área afetada pelo sinistro.

Assim sendo, o algoritmo aqui utilizado recebeu diversas modificações e foi utilizado por vários graduandos, mestrandos e doutorandos. Até a concepção dessa tese de conclusão de curso, a grande modificação feita no âmbito de função objetivo foi a de adequar a multiobjetividade para monoobjetividade centrada em diminuição de perda de potência. Ainda que a função objetivo seja a mesma (função fluxo de potência em varredura inversa/direta), a utilização de tabelas teve de ser modificada, uma vez que o conceito de multiobjetividade, de certa maneira, iria dificultar mais ainda a procura pelo ótimo global da função, uma vez que o código atrelaria a perda de potência ativa a outras características, podendo então refletir ótimos locais.

Finalmente, depois que o algoritmo foi alterado de forma a se adequar ao objetivo deste trabalho e ao objetivo de um artigo publicado no 22º Congresso Brasileiro de Automática intitulado "ESTRATÉGIAS EVOLUTIVAS PARA REDUÇÃO DE PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE GRANDE PORTE", José Paulo Ramos Fernandes, Augusto Cesar dos Santos, Dr. Leandro Tolomeu Marques, Breno Ruy e Prof. Dr. João Bosco Augusto London Junior se reuniram para trabalhar em conjunto e assim testar o algoritmo para ambos os sistemas apresentados neste trabalho. No caso da outra versão apresentada no artigo publicado, seu principal objetivo é a maior variação percentual (diminuição) de perda de potência ativa do sistema inicial para o final. O sistema elétrico simplificado de Londrina, de acordo com o site da COPEL, pode ser visualizado na Figura 15. Convém falar que cada cor do gráfico remete a um alimentador.

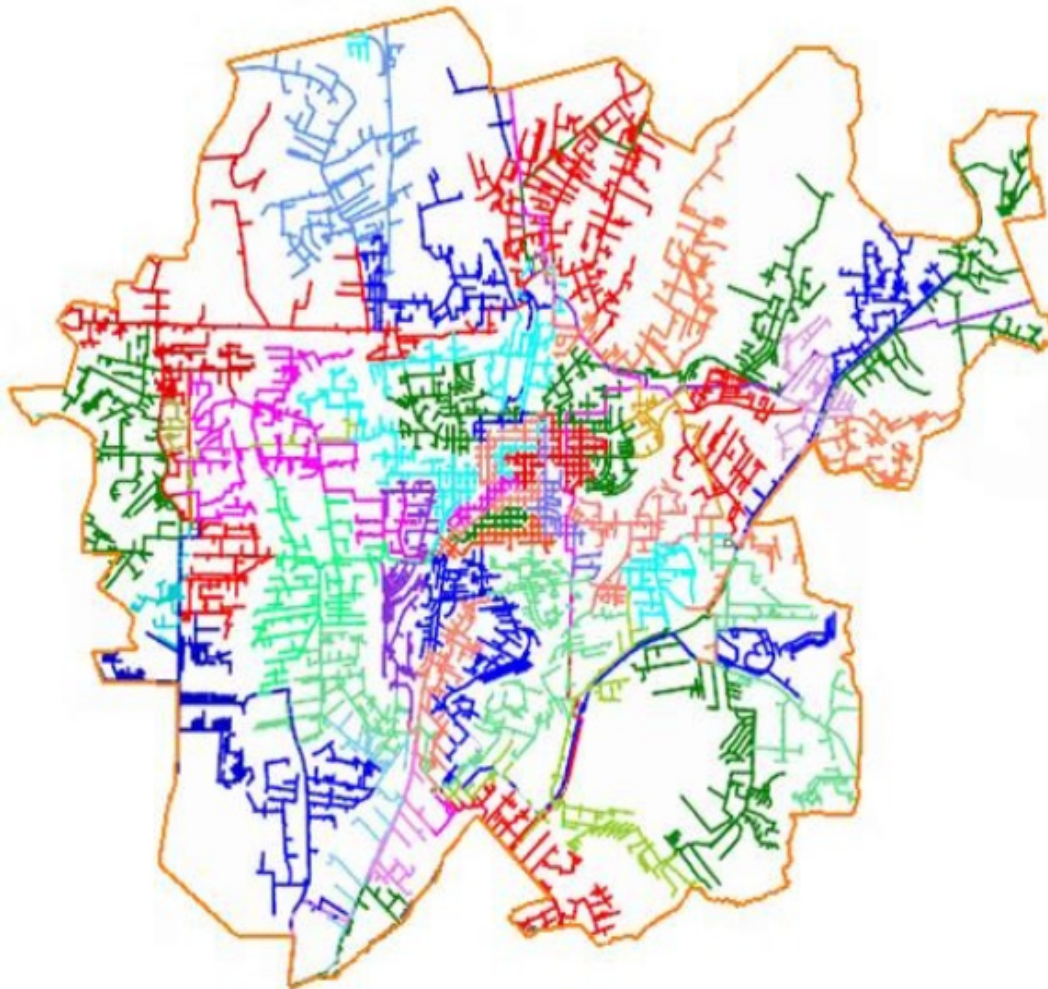


Figura 15: Sistema elétrico de potência de Londrina em meados do ano 2014.

A Tabela 4, por sua vez, representa as características elétricas originais desse mesmo sistema testado, antes de se aplicar o algoritmo de otimização. Em outras palavras, a quantidade de perda de potência ativa que pode ser calculada através do fluxo de potência em varredura direta/reversa. Os dados encontrados foram arredondados para duas casas decimais para maior conveniência.

Tabela 4: Tabela com características iniciais do sistema elétrico.

Características Elétricas	Valores
Soma das perdas resistivas em kW	3252,89
Máxima queda de tensão em porcentagem	6,42
Máximo carregamento da rede em porcentagem	81,95
Máximo carregamento da subestação em porcentagem	90,11

Uma vez que o sistema foi adequado aos padrões de entrada do Algoritmo Evolutivo Multi-objetivo, ele pode ser testado para a mono objetividade de minimização de perda de potência ativa. Após cerca de 50 execuções realizadas, cada uma delas tendo 75 mil gerações de diferentes indivíduos, pode-se notar o melhor desempenho na Tabela 5, sendo a representação escolhida, dentre todas as gerações, a que possui menor potência perdida entre seus indivíduos, que assegura que ou melhor indivíduo representa o ótimo global ou representa o melhor ótimo local dentre todos os indivíduos de todas as gerações em todas as execuções do código.

Tabela 5: Tabela com melhores indivíduos para minimização de perdas no sistema Londrina.

Redução de perdas de potência ativa em kW	
Média	2913,91
Pior indivíduo	2958,98
Melhor indivíduo	2885,99
Desvio padrão	19,96

Novamente, a título de melhor visualização dos resultados obtidos, apresenta-se o diagrama de caixa para o sistema em questão, que pode ser visualizado na Figura 16.

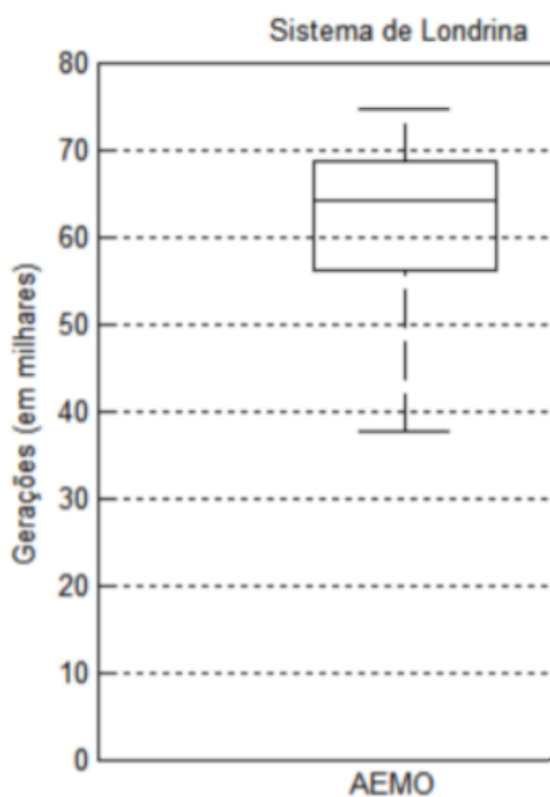


Figura 16: Diagrama de caixa indicando a geração em que o melhor indivíduo foi encontrado pelo Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo.

Novamente, nesse caso pode-se ver que a grande maioria das vezes, o código se perpetuou entre 55 e 70 mil gerações, obtendo a melhor resposta após tal condição de parada.

6 Conclusões

Inicialmente, como planejado, o objetivo deste trabalho foi analisar as configurações existentes em um sistema específico de distribuição de energia elétrica. usando Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo, a fim de encontrar a configuração que resulta no valor mínimo para a função objetiva do fluxo de energia ou mínimo global. Em outras palavras, obtenha a combinação de chaves normalmente abertas e normalmente fechadas que refletem no sistema como menor perda total de energia através da programação evolutiva. O código foi alterado e pode ser testado em dois sistemas, em vez de apenas um, como inicialmente proposto.

Baseado na combinação de um Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo com a Representação em Profundidade de Nó, a estratégia evolutiva para solução do problema de redução de perdas técnicas em sistemas de distribuição foi proposto, desenvolvido e apresentado neste trabalho. O algoritmo desenvolvido foi submetido a várias simulações Informática. Para isso, dois sistemas, um de tamanho pequeno, usado no literatura, e outro real, grande, consistindo de no sistema de distribuição outorgado pela COPEL, e está operando na cidade de Londrina, Paraná, no ano de 2014.

Os resultados obtidos pelo algoritmo, para o sistema de teste pequeno teórico, mostraram ser adequado quando comparado com os resultados encontrado em (KAGAN et al., 1999), o que prova que o código se aproxima do resultado ótimo global estudado pelo autor. O resultado, no entanto, não foi o mesmo, pois os casos estudados neste estudo levam em consideração um fator de potência equivalente a 0,92, limite estabelecido pela ANEEL como mínimo para estabelecimento pelas concessionárias de energia elétrica e valor mais próximo da realidade. O sistema estudado no trabalho original, no entanto, considera o fator de potência unitária em todos os sistemas apresentados, incluindo o utilizado neste trabalho.

Os resultados obtidos, finalmente, mostraram que o Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo, baseado na estratégia de minimização de funções objetivo apresentado de forma direta, isto é, (KAGAN et al., 1999) no sistema teórico, foi posteriormente aplicado ao sistema real da cidade de Londrina para estudo e análise em um sistema maior e real. O algoritmo ainda mostrou maior consistência em número de gerações necessárias, encontrando especialmente melhores resultados para o grande sistema de distribuição real, tendo um número maior de execução de código que terminou em respostas iguais, reafirmando que o ótimo geral para tal caso pode ter sido obtido. Por essa pode ser concluído, com base nos resultados obtidos obtidos, que pressupõem a minimização de perdas resistivas, como objetivo principal do problema, é uma estratégia eficiente no modelo de algoritmo originalmente preparado para resposta rápida a reclamações e má conduta permanente.

Todos os resultados aqui apresentados foram utilizados em uma publicação juntamente com os resultados para os mesmos sistemas em uma versão modificada deste algoritmo com o objetivo de maior redução percentual. O trabalho foi intitulado "ESTRATÉGIAS EVOLUTIVAS PARA REDUÇÃO DE PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE GRANDE PORTE", o trabalho foi aprovado e apresentado nos anais do Congresso Brasileiro de Automação 2018, com os seguintes autores: José Paulo Ramos Fernandes, Augusto Cesar dos Santos, Leandro Tolomeu Marques, Breno Ruy e João Bosco Augusto London Junior.

Desta forma, os objetivos propostos no plano de trabalho foram alcançados com sucesso, o que apontou a minimização da perda de potência ativa, também o uso de Algoritmos Evolutivos, o estudo de outras metodologias, os modelos elétricos do sistema computacional multiobjetivo. teoria e aspectos teóricos e práticos relacionados perdas na potência ativa e o cálculo do fluxo de potência.

Para auxiliar na preparação deste trabalho, como apontado várias vezes durante o trabalho, utilizou a base de código do Dr. Leandro Tolomeu, que abordou principalmente a restauração de sistemas elétricos usando Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo. Em um trabalho futuro, ainda há um campo cheio de possibilidades envolvendo o código, já que é flexível para reduzir as perdas ôhmicas iniciais, minimizando a perda de energia ativa, restaurando energia, minimizando a área isolada para falhas e assim por diante. Finalmente, é muito útil explorar a capacidade do Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo para solução de problemas de otimização que podem ser estudados.

7 Bibliografia

- TICONA, Waldo G. C.; DELBEM, Alexandre C. B.; Algoritmos Evolutivos para Otimização multiobjetivo, 2015.
- CAMILLO, Marcos H. M.; FANUCCHI, Rodrigo Z.; ROMERO, Marcel E. V.; LIMA, Telam W.; SOARES, Anderson S., DELBEM, Alexandre C. B.; MARQUES, Leandro T.; MACIEL, Carlos D.; LONDON JR, João B. A.; Combining exhaustive search and multi-objective evolutionary algorithm for service restoration in largescale distribution systems, 2015
- CAMILLO, Marcos H. M.; Metodos para Tratamento de Diversas Etapas do Processo de Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição, 2017
- PEREIRA, Douglas H.; Fluxo de Potência de Varredura Direta/Inversa para o Problema de Reconfiguração de Redes em Sistemas de Distribuição, 2014
- POSSAGNOLO, Leonardo H. F. M.; Reconfiguração de Sistemas de Distribuição operando em vários Níveis de Demanda através de uma Meta-Heurística de Busca em Vizinhança Variável, 2015
- MARQUES, Leandro T.; DELBEM, Alexandre C. B.; LONDON JR, João B. A.; Service Restoration with Prioritization of Customers and Switches and Determination of Switching Sequence, 2016
- GABRIEL, Paulo H. R.; DELBEM, Alexandre C. B.; Fundamentos de Algoritmos Evolutivos
- LACERDA, Estefane G. M.; CARVALHO; Andre C. P. L. F.; Introdução aos Algoritmos Genéticos
- SALVADOR, O.; Introdução a Algoritmos Genéticos
- TOMASSINI, M.; A Survey of Genetic Algorithms
- FRANCO, J. F.; RIDER M. J.; ROMERO R.; A mixed-integer quadratically-constrained programming model for the distribution system expansion planning, 2014
- MISTRY K. D.; ROY R.; Enhancement of loading capacity of distribution system through distributed generator placement considering techno-economic benefits with load growth, 2014
- GUAN W.; TAN Y.; ZHANG H.; SONG J.; Distribution system feeder reconfiguration considering different model of DG sources, 2015

- AGHAlgorithmo EvolutivoI J.; MUTTAQI K. M.; AZIZIVAHED A.; GITIZADEH M.; Distribution expansion planning considering reliability and security of energy using modified PSO (particle swarm optimization) algorithm, 2014
- SADEGHI M.; KALANTAR M.; Multi types DG expansion dynamic planning in distribution system under stochastic conditions using covariance matrix adaptation evolutionary strategy and Monte-Carlo simulation, 2014
- TAHER S. A.; AFSARI S. A.; Optimal location and sizing of DSTATCOM in distribution systems by immune algorithm, 2014
- NAVEEN S.; SATHISH K. K.; RAJALAKSHMI K.; Distribution system reconfiguration for loss minimization using modified bacterial foraging optimization algorithm, 2015
- SHUAIB Y. M.; KALAVATHI M. S.; RAJAN C. C. A.; Optimal capacitor placement in radial distribution system using gravitational search algorithm, 2015
- MOHAMED I. A.; KOWSALYA M.; A new power system reconfiguration scheme for power loss minimization and voltage profile enhancement using fireworks algorithm, 2014
- MOHAMED I. A.; KOWSALYA M.; KOTHARI D. P.; A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution networks, 2014
- SULTANA S.; ROY P. K.; Optimal capacitor placement in radial distribution systems using teaching learning based optimization, 2014
- VENKATESH B.; RANJAN R.; Optimal radial distribution system reconfiguration using fuzzy adaptation of evolutionary programming, 2003
- RAO R.; RAVINDRA K.; SATISH K.; NARASIMHAM S.; Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation, 2013
- ABDELAZIZ A. Y.; HEGAZY Y. G.; EL-KHATTAM W.; OTHMAN M. M.; Optimal planning of distributed generators in distribution networks using modified firefly method, 2015
- KHAN N. A.; GHOSHAL S. P.; GHOSH S.; Optimal allocation of distributed generation and shunt capacitors for the reduction of total voltage deviation and total line loss in radial distribution systems using binary collective animal behavior optimization algorithm, 2015