

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

The logo of the Universidade Federal da Paraíba is centered in the background. It features three lit torches at the top, a shield with a blue background, white wavy lines, and a yellow fleur-de-lis in the center, and a blue banner at the bottom with the Latin motto 'SAPIENTIA AEDIFICAT' in yellow.

Reconfiguração de Redes de Distribuição
utilizando Algoritmo de Busca Tabu

Luiz Otávio Pinheiro Filho

João Pessoa
Fevereiro - 2022

LUIZ OTÁVIO PINHEIRO FILHO

**Reconfiguração de Redes de Distribuição utilizando
Algoritmo de Busca Tabu**

Exame de Defesa Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito final para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Yuri Percy Molina Rodriguez

João Pessoa - PB

2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P654r Pinheiro Filho, Luiz Otávio.

Reconfiguração de redes de distribuição utilizando algoritmo de Busca Tabu / Luiz Otávio Pinheiro Filho. - João Pessoa, 2022.

79 f.

Orientação: Yuri Percy Molina Rodriguez.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Engenharia elétrica. 2. Algoritmos de otimização. 3. Busca Tabu. 4. Minimização de perdas. 5. Sistemas de distribuição. 6. OpenDSS. I. Rodriguez, Yuri Percy Molina. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621.3:004.421(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

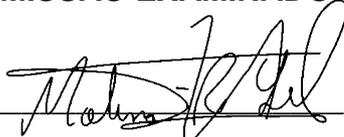
**RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO ALGORITMO
DE BUSCA TABU**

Elaborada por

LUIZ OTÁVIO PINHEIRO FILHO

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

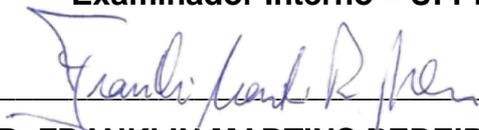
COMISSÃO EXAMINADORA



PROF. DR. YURI PERCY MOLINA RODRIGUEZ
Orientador – UFPB



PROF. DR. HELON DAVID DE MACEDO BRAZ
Examinador Interno – UFPB



PROF. DR. FRANKLIN MARTINS PEREIRA PAMPLONA
Examinador Externo – IFPB

Dedicatória

Este trabalho é dedicado a todas as crianças adultas, que quando pequenas sonharam em se tornar cientistas.

Agradecimentos

Inicialmente agradeço a Deus por sempre estar presente em minha vida, mesmo com todas as minhas dúvidas e questionamentos.

Agradeço ao meu pai, Luiz, e à minha mãe, Célia, por todos os incentivos a sempre estudar e ser uma pessoa melhor. Agradeço à minha irmã, Laís, por, indiretamente, me forçar a aprender melhor de forma que eu possa ensinar o que aprendo. Agradeço a Yasmin Lira, minha namorada, com quem passei os 5 anos de graduação e os 2 de mestrado junto. Sempre com inspiração, apoio e palavras sábias a fornecer.

Agradeço a todos os professores que deixaram sua contribuição e ensinamentos para meu desenvolvimento intelectual. Especialmente aos professores Franklin Pamplona, do IFPB, e ao professor Yuri Molina, meu orientador e amigo que, sempre com seu pensamento simplificado e perspicaz, encontrava soluções quando eu desistia de procurar.

Finalmente, agradeço à UFPB e ao CEAR por oferecer uma pós-graduação de tão alta qualidade.

Por fim, agradeço à Capes pelo apoio financeiro.

*“Eu penso e penso, durante meses e anos, e em 99 vezes a conclusão está errada.
Na centésima vez eu acerto.” (Albert Einstein)*

Resumo

O presente trabalho apresenta um método para reconfiguração de redes de distribuição que alia o algoritmo de Busca Tabu e o conceito de Distância Elétrica ao *software* OpenDSS, que calcula fluxo de potência em sistemas de distribuição. O método proposto possui um sistema de geração de solução inicial com base em Distância Elétrica capaz de obter uma boa solução para o problema com baixíssimo custo computacional, utilizando apenas a configuração da rede para o cálculo. O trabalho proposto apresenta também um método de geração de vizinhança para o algoritmo de Busca Tabu inovador na literatura técnica capaz de fornecer uma trajetória descendente constante em relação às perdas do sistema de distribuição. O algoritmo desenvolvido tem como objetivo a minimização das perdas na rede de distribuição enquanto respeita restrições operacionais tais como radialidade, limites de tensão e corrente, entre outras. Para isso, foi elaborado um programa na linguagem de programação *Python* que integra o OpenDSS ao algoritmo proposto. O algoritmo foi testado em quatro sistemas amplamente utilizados na literatura: 33-Barras, 69-Barras, 94-Barras e 135-Barras; sendo estes dois últimos sistemas reais. Os resultados dos testes foram comparados com resultados de outras técnicas propostas na literatura, provando que o algoritmo proposto atinge os resultados e soluções pretendidas de maneira mais eficaz, mais rapidamente e com maior rendimento em relação a outros métodos.

Palavras-chave: Algoritmos de Otimização, Busca Tabu, Reconfiguração, OpenDSS, Minimização de Perdas, Distância Elétrica

Abstract

This work presents a method for reconfiguration of distribution networks that combines the Tabu Search algorithm and the concept of Electric Distance to the *software* OpenDSS, which calculates power flow in distribution systems. The proposed method has an initial solution generation system based on Electric Distance capable of obtaining a good solution to the problem with very low computational cost, using only the network configuration for the calculation. The proposed work also presents a neighborhood generation method for the Tabu Search algorithm, which is innovative in the technical literature, capable of providing a constant downward trajectory in relation to the losses of the distribution system. The developed algorithm aims to minimize losses in the distribution network while respecting operational restrictions such as radiality, voltage and current limits, among others. For that, a program was created in the programming language *Python* that integrates OpenDSS to the proposed algorithm. The algorithm was tested in four systems widely used in the literature: 33-Bus, 69-Bus, 94-Bus and 135-Bus; the last two being real systems. The test results were compared with results from other techniques proposed in the literature, proving that the proposed algorithm achieves the intended results and solutions more efficiently, faster and with greater performance compared to other methods.

Keywords: Optimization Algorithms, Tabu Search, Reconfiguration, OpenDSS, Loss Minimization, Electrical Distance

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estrutura do OpenDSS	20
Figura 2 – Mínimos local e global na curva de uma função.	33
Figura 3 – Sistema IEEE 5-Bus.	36
Figura 4 – Esquemático básico das frentes de atuação deste trabalho.	37
Figura 5 – Sistema 33-Barras convertido em grafo.	38
Figura 6 – Exemplo de caminhos de busca da solução ótima.	40
Figura 7 – Exemplo do método proposto para geração de vizinhos.	42
Figura 8 – Fluxograma do algoritmo proposto para Reconfiguração de Redes de Distribuição	45
Figura 9 – Fluxograma do algoritmo proposto para geração de solução inicial baseada em Distância Elétrica.	47
Figura 10 – Sistema de 16 barras.	48
Figura 11 – Sistema 33-Barras de Baran e Wu (1989).	54
Figura 12 – Sistema 69-Barras de Savier e Das (2007).	54
Figura 13 – Sistema 94-Barras de Su e Lee (2003).	55
Figura 14 – Sistema 135-Barras de Mantovani, Casari e Romero (2000)	56
Figura 15 – Tensões antes e depois da reconfiguração de acordo com as barras para o sistema 33-Barras.	58
Figura 16 – Tensões antes e depois da reconfiguração de acordo com as barras para o sistema 69-Barras.	60
Figura 17 – Tensões antes e depois da reconfiguração de acordo com as barras para o sistema 94-Barras.	62
Figura 18 – Tensões antes e depois da reconfiguração de acordo com as barras para o sistema 135-Barras.	64

Lista de tabelas

Tabela 1 – Verbos mais utilizados no OpenDSS.	21
Tabela 2 – Parâmetros básicos do elemento <i>Circuit</i>	22
Tabela 3 – Parâmetros básicos do elemento <i>Line</i>	23
Tabela 4 – Parâmetros básicos do elemento <i>Transformer</i>	24
Tabela 5 – Principais modelos de carga no OpenDSS	25
Tabela 6 – Parâmetros básicos do elemento <i>Load</i> no OpenDSS.	25
Tabela 7 – Principais modelos de gerador no OpenDSS.	26
Tabela 8 – Parâmetros básicos do elemento <i>Generator</i>	26
Tabela 9 – Parâmetros básicos do elemento <i>SwtControl</i>	27
Tabela 10 – Matriz de Admitâncias para o sistema IEEE 5-Bus.	36
Tabela 11 – Matriz de Distâncias Elétricas para o sistema IEEE 5-Bus.	36
Tabela 12 – As soluções iniciais geradas pelo algoritmo de Distância Elétrica para os quatro sistemas.	56
Tabela 13 – Resultados para o sistema 33-Barras variando <i>BTMax</i> , <i>T</i> e <i>NNb</i> em 100 ensaios.	57
Tabela 14 – Resultados de diferentes métodos da literatura para o sistema 33-Barras.	58
Tabela 15 – Resultados para o sistema 69-Barras variando <i>BTMax</i> , <i>T</i> e <i>NNb</i> em 100 ensaios.	59
Tabela 16 – Resultados de diferentes métodos da literatura para o sistema 69-Barras.	59
Tabela 17 – Resultados para o sistema 94-Barras variando <i>BTMax</i> , <i>T</i> e <i>NNb</i> em 100 ensaios.	61
Tabela 18 – Resultados de diferentes métodos vistos na literatura para o sistema 94-Barras.	61
Tabela 19 – Resultados para o sistema 135-Barras variando <i>BTMax</i> e <i>NNb</i> em 100 ensaios.	63
Tabela 20 – Resultados de diferentes métodos vistos na literatura para o sistema 135-Barras.	64
Tabela A.1 – Dados de linha do Sistema 5-Barras.	71
Tabela A.2 – Dados de barra do Sistema 5-Barras.	71
Tabela A.3 – Dados do Sistema 16-Barras.	72
Tabela A.4 – Dados do Sistema 33-Barras.	73
Tabela A.5 – Dados do Sistema 69-Barras.	74
Tabela A.6 – Sistema 94-Barras	76
Tabela A.7 – Sistema 135-Barras	78

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	Organização do Trabalho	16
2	ESTADO DA ARTE	17
3	O SOFTWARE OPENDSS	20
3.1	Breve histórico	20
3.2	Estrutura do OpenDSS	20
3.3	Sintaxe da linguagem do OpenDSS	21
3.4	Elementos básicos do OpenDSS	22
3.4.1	Elemento Circuito	22
3.4.2	Elemento Linha de Transmissão	22
3.4.3	Elemento Transformador	23
3.4.4	Elemento Carga	24
3.4.5	Elemento Gerador	25
3.4.6	Elemento Chave	26
3.5	Fluxo de Potência	27
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	30
4.1	O problema de Reconfiguração de Redes de Distribuição	30
4.1.1	Restrições	31
4.2	Busca Tabu Clássico	32
4.2.1	Meta-heurística	32
4.2.2	Conceitos básicos	33
4.3	Conceito de Distância Elétrica	35
5	MÉTODO PROPOSTO	37
5.1	Obtenção das Malhas	37
5.2	A solução inicial baseada em Distância Elétrica	39
5.3	Método de Geração de Vizinhos	41
5.3.1	Método <i>add/subtract</i>	41
5.3.2	Método proposto para geração de vizinhos	41
5.3.3	Atualização da Lista Tabu	43

5.4	Método proposto aplicado ao problema de Reconfiguração	43
6	RESULTADOS	53
6.1	Descrição dos sistemas teste	53
6.2	Testes com Distância Elétrica	56
6.3	Testes com Busca Tabu	57
6.3.1	Resultados para o sistema 33-Barras	57
6.3.2	Resultados para o sistema 69-Barras	58
6.3.3	Resultados para o sistema 94-Barras	60
6.3.4	Resultados para o sistema 135-Barras	62
7	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66
	ANEXOS	70
	ANEXO A – DADOS DOS SISTEMAS TESTE	71
A.1	Sistema 5-Barras	71
A.2	Sistema 16-Barras	71
A.3	Sistema 33-Barras	72
A.4	Sistema 69-Barras	73
A.5	Sistema 94-Barras	75
A.6	Sistema 135-Barras	78

1 Introdução

A sociedade moderna vem dependendo cada vez mais de energia elétrica. A grande maioria dos equipamentos tecnológicos utilizados pela população e pela indústria é atualmente alimentado por energia elétrica. Até mesmo os automóveis movidos a combustão começam a perder espaço para os automóveis elétricos. Desta maneira, a sociedade requer cada vez mais um sistema elétrico eficiente, confiável, contínuo, estável e de baixo custo. Logo, são necessários estudos para atender tais requisitos.

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) consiste em três divisões principais: as centrais geradoras, as linhas de transmissão e os sistemas de distribuição (JR; GRAINGER, 1994). Os sistemas de distribuição são responsáveis por entregar a energia elétrica aos consumidores finais (residenciais, comerciais e industriais). De acordo com Pegado (2019), é nessa etapa que ocorrem as maiores quantidades de perdas de potência. Tais perdas resultam em custos para as empresas distribuidoras, que são repassados para os consumidores.

De acordo com os Procedimentos de Distribuição (PRODIST), elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as perdas no sistema de distribuição podem ser classificadas em perdas técnicas e perdas não técnicas. As perdas técnicas consistem nas perdas referentes ao transporte de energia elétrica no sistema, como perdas por efeito Joule, perdas nos núcleos dos transformadores e perdas dielétricas. As perdas não técnicas são definidas pela diferença entre as perdas totais e as perdas técnicas. Geralmente, são perdas por furto de energia, erros de medição, unidades sem medição, etc. (ANEEL, 2018).

Os trabalhos realizados para redução de perdas técnicas e não técnicas são diferentes conceitualmente e na implementação. O combate às perdas não-técnicas partem de fiscalização das concessionárias de energia a fim de descobrir furtos de energia e unidades sem medição, enquanto as medidas para redução das perdas técnicas são mais relacionadas à própria estrutura física do sistema de distribuição. Dentre as diversas maneiras de minimizar perdas técnicas, são comumente utilizadas as seguintes estratégias: recondutoramento, diminuindo assim as perdas por efeito Joule; instalação de banco de capacitores e aumento da tensão da rede, minimizando assim perdas por potência reativa; reconfiguração da rede, diminuindo perdas nas linhas de distribuição da energia elétrica. Dentre as técnicas citadas, a reconfiguração é a técnica de menor investimento financeiro, visto que utiliza a rede já instalada no momento.

Os estudos de Reconfiguração consistem em determinar o estado das chaves (abertas ou fechadas) de seccionamento e interligação do sistema, obtendo uma configuração de rede que minimize as perdas ativas globais. Outros objetivos também podem ser considerados,

como melhoria no perfil de tensão, balanceamento de cargas, redução de sobrecarga nos equipamentos, entre outros. Porém, é interessante comentar que ao minimizar perdas ativas esses objetivos também são atingidos, visto que não são concorrentes entre si.

Além do objetivo principal que é minimizar as perdas ativas do sistema, o problema de Reconfiguração possui restrições às quais devem ser atendidas. Entre as restrições comumente impostas estão a radialidade, limites de tensão nas barras, capacidade de corrente nos ramos e conexão de todas as cargas. A radialidade consiste em garantir que haja somente um único caminho energizado de qualquer barra até sua subestação supridora. A conexão de todas as cargas consiste em garantir que todas as cargas e barras sejam atendidas e energizadas.

O problema de reconfiguração é de natureza combinatória, visto que depende do número de chaves existentes no sistema. Desta maneira, como uma chave pode assumir dois estados, aberta ou fechada, um sistema com n chaves pode ter 2^n soluções candidatas a topologia da rede. Em sistemas de grande porte é praticamente impossível testar essa quantidade de soluções devido ao custo computacional proibitivo. Logo, surge a necessidade do uso de técnicas e ferramentas computacionais que diminuam consideravelmente a quantidade de soluções a serem testadas e encontrem uma possível solução ótima ou próxima de ótima com um custo computacional consideravelmente reduzido e acessível.

De acordo com Mello *et al.* (2014), os métodos empregados na solução do problema de reconfiguração podem ser divididos em métodos baseados em conhecimento e métodos baseados em modelos físicos ou biológicos. Os primeiros subdividem-se em métodos heurísticos, métodos especialistas e métodos matemáticos; dentre os últimos destacam-se algoritmos genéticos, busca tabu, enxame de partículas, entre outras meta-heurísticas.

Dentre esses métodos, as meta-heurísticas tem se destacado na literatura. De acordo com Glover (2003), as meta-heurísticas são métodos de solução que orquestram uma interação entre procedimentos de melhora local (ou busca local) e estratégias de alto nível de forma a criar um procedimento capaz de escapar de ótimos locais e desempenhar uma busca robusta no espaço de busca.

Nesse contexto, o método a ser utilizado neste trabalho baseia-se na meta-heurística Busca Tabu para solucionar o problema de reconfiguração de redes de distribuição, visando a redução de perdas de potência. A meta-heurística citada foi escolhida devido a sua grande presença na literatura, especialmente em problemas de reconfiguração, porém, ainda com muito espaço para mudanças e contribuições. Uma vantagem de Busca Tabu é a liberdade que a meta-heurística entrega ao permitir o desenvolvimento de mecanismos de movimento voltados à aleatoriedade ou ao determinismo, como será visto nos capítulos a seguir.

O algoritmo de Busca Tabu possui alguns conceitos chave como movimento, vizi-

nhança, lista tabu, critérios de aspiração, entre outros. Este trabalho apresenta um novo método de movimento, conseqüentemente de geração de vizinhança; bem como apresenta um método de geração de solução inicial baseado no conceito de Distância Elétrica, haja visto que o algoritmo de Busca Tabu comporta-se consideravelmente melhor partindo de uma boa solução inicial.

O método de reconfiguração proposto foi implementado na linguagem de programação *Python*. O programa desenvolvido integrou o método de otimização proposto e o *software* OpenDSS via interface *Component Object Model (COM)*. O *OpenDSS* possui recursos como fluxo de potência, cálculo de perdas, entre outros relacionados ao sistema de distribuição.

Para estudos de caso, o algoritmo foi testado em quatro sistemas de distribuição comumente utilizados na literatura de forma a comprovar sua eficácia e efetividade. Os resultados obtidos foram comparados com outras técnicas reportadas na literatura.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional capaz de apresentar soluções factíveis para o problema de reconfiguração de redes de distribuição, minimizando as perdas ativas do sistema.

1.1.2 Objetivos específicos

- Propor e testar um método de geração de vizinhança para o algoritmo de Busca Tabu;
- Propor e testar um método de geração de solução inicial por Distância Elétrica;
- Modelar redes de distribuição na linguagem do OpenDSS;
- Desenvolver uma plataforma utilizando a linguagem *Python* capaz de utilizar os recursos de fluxo de potência do *OpenDSS* de forma a apresentar soluções para o problema de reconfiguração;
- Apresentar soluções para o problema de reconfiguração minimizando perdas ativas e atendendo às restrições operacionais impostas pelo sistema de distribuição.

1.2 Organização do Trabalho

Além deste capítulo introdutório, no Capítulo 2 é apresentada uma breve revisão da literatura técnica acerca do tema de reconfiguração de redes de distribuição e da meta-heurística busca tabu.

Um breve histórico do *software* OpenDSS e suas características são apresentados no Capítulo 3. É discorrida sua estrutura básica, bem como as sintaxes dos principais elementos da linguagem e é apresentado o algoritmo empregado no cálculo de fluxo de potência para sistemas de distribuição utilizado pelo OpenDSS.

Uma breve fundamentação teórica é trazida no Capítulo 4, abordando o problema de Reconfiguração de Redes de Distribuição, o algoritmo clássico de Busca Tabu como apresentado por Glover (1989) e o conceito de Distância Elétrica.

A metodologia proposta neste trabalho é apresentada no Capítulo 5, onde o método proposto para a geração da solução inicial com base em distância elétrica e o método de geração de vizinhança são expostos. Por fim, os métodos são aplicados e explicados passo a passo em um sistema básico de 16 barras a fim de facilitar o entendimento da metodologia.

O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos dos testes realizados nos sistemas 33-Barras, 69-Barras, 94-Barras e 135-Barras, bem como uma comparação com os resultados obtidos por outros métodos na literatura.

Por fim, o Capítulo 7 expõe e discute as conclusões sobre o desenvolvimento e sobre os resultados obtidos da construção do método, incluindo algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 Estado da Arte

Este capítulo apresenta os principais trabalhos publicados na literatura técnica sobre o problema de Reconfiguração de Redes de Distribuição. O objetivo é fornecer uma linha do tempo do estado da arte, dando enfoque na resolução do problema utilizando o algoritmo de Busca Tabu.

O pioneiro no estudo de reconfiguração de redes foi Merlin (1975). Ele propôs uma técnica heurística onde, a partir de uma rede malhada obtida após o fechamento de todas as suas chaves, iniciava-se uma abertura sequencial levando em conta o critério de minimização de perdas ativas. Algumas limitações da proposta de Merlin (1975) eram o alto custo computacional para a época e a consideração apenas da componente real da corrente no cálculo de fluxo de potência.

Civanlar *et al.* (1988) propuseram uma técnica onde a configuração inicial era radial em vez de malhada. No método proposto, avaliava-se a mudança nas perdas ativas de energia devido à troca de carga de um alimentador para outro no sistema de distribuição. Este método foi chamado de "Troca de Ramos". Devido ao grande número de configurações candidatas, definiram um critério baseado na tensão terminal das chaves de interligação para restringir a pesquisa somente às configurações que resultam em redução de perdas. Este trabalho inspirou diversos trabalhos posteriores e foi um marco no problema de reconfiguração.

Um ano depois, Shirmohammadi e Hong (1989) propuseram um algoritmo que empregava um fluxo de carga específico para redes fracamente malhadas e uma heurística para abertura de chaves baseada em correntes ótimas.

No mesmo ano, Baran e Wu (1989) aprimoraram o método de troca de ramos formulando dois métodos de cálculo de fluxo de carga específicos das redes radiais, o que resultou na aceleração da busca da solução ótima com diferentes graus de precisão. O algoritmo proposto objetivava redução de perdas e balanceamento de cargas. A partir desse trabalho, o problema de reconfiguração passou a ser reconhecido como um problema de natureza combinatória. Neste trabalho foi apresentado o sistema 33-Barras, muito utilizado para testes na literatura.

Goswami e Basu (1992) propuseram um algoritmo heurístico de fluxo de potência onde o sistema é mantido radial complementando o fechamento de qualquer chave com a abertura de outra. O sistema é adequado para sistemas pequenos mas possui como ponto negativo um esforço computacional enorme para grandes sistemas.

Em 1995, Peponis, Papadopoulos e Hatziargyriou (1995) propuseram um método

para reconfiguração de redes e realocação de cargas. Utilizaram troca de ramos e abertura sequencial. Sugeriram melhorias nas duas técnicas.

A partir dos anos 2000, de acordo com Pegado (2019), observa-se uma predominância no uso de métodos baseados em modelos físicos ou biológicos na solução do problema de reconfiguração, destacando-se o uso de meta-heurísticas.

Dentre as meta-heurísticas, o método de Busca Tabu tem se mostrado eficaz na solução de diversos problemas de otimização, tanto na área de engenharia elétrica quanto nas mais diversas áreas de pesquisa.

Em 2000, Jeon e Kim (2000) apresentaram um algoritmo híbrido utilizando as técnicas de busca tabu e recozimento simulado aplicados a sistemas reais. De acordo com os autores, a técnica de recozimento simulado pode evitar mínimos locais aceitando aumento na função de otimização, mas tal técnica gerou excessivo custo computacional. Enquanto a técnica de busca tabu determinou uma solução por meio de um algoritmo de descida, mas não pôde garantir a propriedade de convergência.

Em 2005, Mishima *et al.* (2005) propuseram um algoritmo utilizando a técnica de Busca Tabu para realizar a reconfiguração em sistemas de distribuição com presença de geradores distribuídos que geram fluxo de potência reverso e variações de tensão.

No mesmo ano, Guimaraes e Castro (2005) propuseram um algoritmo baseado em busca tabu e uma nova caracterização da geração dos vizinhos no algoritmo, utilizando o conceito de Fluxo de Potência Ótimo, evitando assim exploração de um número excessivo de configurações e obtendo, em consequência, redução no custo computacional na execução do algoritmo.

Em 2010, Abdelaziz *et al.* (2010) propuseram um método de busca tabu modificado para realizar a reconfiguração de sistemas. As modificações propostas consistiram em utilizar uma lista tabu de tamanho variável, bem como um novo método de movimento, chamado de multiplicador, com objetivo de diversificar a busca em regiões inexploradas. O método algébrico de Kirchhoff foi utilizado para verificar a radialidade do sistema.

Em 2012, Franco *et al.* (2012) propuseram um algoritmo de busca tabu que teve como particularidades uma nova maneira de geração de vizinhos, uma diferente forma de cálculo da função objetivo e a utilização de critérios heurísticos para reduzir o tamanho da vizinhança. O trabalho teve bons resultados, comparando-se com a literatura à época.

García-Martínez e Espinosa-Juárez (2013) propuseram, em 2013, um algoritmo com objetivo de minimizar índices de afundamento de tensão, utilizando a técnica de Busca Tabu. Foram utilizados sistemas de 57 e 118 barras.

Em 2016, Fang e Zhang (2016) propuseram um algoritmo híbrido utilizando as técnicas de enxame de partículas (PSO) e busca tabu. Os autores introduziram a técnica

de *Network Random Key* (NRK) como estratégia de codificação entre várias estratégias de representação de entroncamentos. A estratégia NRK, de acordo com os autores, evita a geração de soluções impraticáveis durante o processo de busca. O algoritmo foi testado com o sistema de 33 Barras do IEEE.

García-Martínez, Espinosa-Juárez e Pérez-Rojas (2018) propuseram uma metodologia que atende a dois problemas de otimização: localização ótima de monitores de afundamentos de tensão e reconfiguração do sistema objetivando melhorar os índices de afundamento. É proposto um algoritmo utilizando a técnica de busca tabu. Os problemas são analisados quando há presença de geração distribuída no sistema. O algoritmo foi testado com o sistema IEEE-57.

Em 2020, Bagheri, Bagheri e Lorestani (2020) utilizaram o algoritmo de busca tabu para realizar a reconfiguração de sistemas de distribuição levando em consideração a presença de geração distribuída. De acordo com os autores, a má alocação e o superdimensionamento da geração distribuída podem aumentar as perdas e deteriorar o perfil de tensão da rede. Desta maneira, o algoritmo proposto soluciona os problemas de reconfiguração, dimensionamento, localização e operação da geração distribuída considerando custos de abertura e fechamento de chaves, perdas e geração reativa da geração distribuída. O algoritmo foi testado nos sistemas IEEE 33-Barras e IEEE 69-Barras.

De acordo com a revisão bibliográfica apresentada, há um avanço nos trabalhos de reconfiguração de redes utilizando a otimização por busca tabu, porém, há ainda espaço para muita exploração de modificações para tal técnica. Nesse contexto, uma nova abordagem é proposta para o algoritmo de busca tabu, trazendo inovações em relação à geração de vizinhos e em relação à geração de uma solução inicial com conceito de Distância Elétrica.

3 O *software* OpenDSS

3.1 Breve histórico

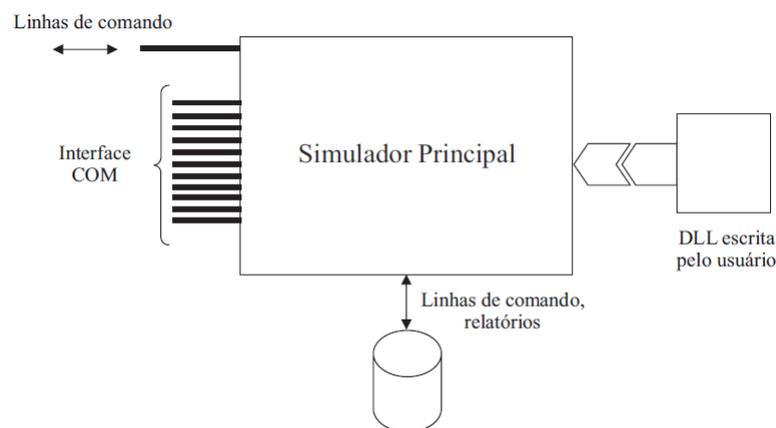
O *software* OpenDSS é uma abrangente ferramenta para simulação de sistemas elétricos. Seu desenvolvimento começou em 1997 na Electrotek Concepts, Inc. por Roger Dugan e Thomas McDemontt. Uma das principais finalidades do *software* naquele momento era a análise de redes com a presença de Geração Distribuída. (DUGAN; MCDERMOTT, 2011)

Em 2004, o então chamado Distribution System Simulator (DSS) foi adquirido pelo Electric Power Research Institute (EPRI) e em 2008 o EPRI o apresentou como um *software* de código aberto e o renomeou para OpenDSS, de forma que ele pudesse ser indefinidamente melhorado de forma a atender as necessidades dos usuários, que estão em constante mudança.

3.2 Estrutura do OpenDSS

O OpenDSS é baseado em linhas de comando. Porém, o programa pode receber dados e instruções de arquivos de texto ou de programas externos, como melhor apresentado na Figura 1. Todas essas fontes de entrada de dados configuram os circuitos.

Figura 1 – Estrutura do OpenDSS



Fonte: (DUGAN, 2012).

O *software* disponibiliza a interface *Component Object Model* (COM) da Microsoft. Tal interface permite que programadores desenvolvam e executem soluções através de programas externos. Desta maneira, o OpenDSS pode ser acionado de forma totalmente independente por programas e linguagens de programação como Python, MATLAB, Microsoft Office, C#, entre outros.

Graças a interface COM é possível desenvolver algoritmos que não seriam possíveis de serem desenvolvidos nas linhas de comando do OpenDSS, como algoritmos de otimização, por exemplo. Desta maneira, o *software* desempenha uma função em que é especialista (como o fluxo de potência) e o programa pela interface COM desempenha as demais funções.

O programa apresenta ainda a possibilidade de realizar simulações sequenciais no tempo, logo, é possível analisar como os sistemas comportam-se durante um determinado intervalo de tempo. Os principais modos de solução do OpenDSS são:

- Fluxo de potência em modo instantâneo, diário, anual, Monte Carlo e Duty-Cycle;
- Análise dinâmica;
- Análise harmônica;
- Análise de curto-circuito;
- Análise de corrente induzida geomagneticamente.

3.3 Sintaxe da linguagem do OpenDSS

No *software* os comandos são definidos por linhas de texto e cada comando é geralmente composto por um verbo e alguns parâmetros, como no exemplo a seguir: (DUGAN, 2012)

```
verbo TipoElemento.Nome Param1=Valor1 Param2=Valor2
```

A Tabela 1 apresenta os verbos mais comuns:

Tabela 1 – Verbos mais utilizados no OpenDSS.

Verbo	Descrição
<i>New</i>	Cria um novo elemento do circuito.
<i>Edit</i>	Edita um elemento já criado.
<i>Set</i>	Define as opções de solução.
<i>Solve</i>	Soluciona o circuito definido.
<i>Show</i>	Apresenta relatórios de resultados em <i>*.txt</i>
<i>Export</i>	Salva relatórios de resultados em <i>*.csv</i>
<i>Plot</i>	Plota resultados do fluxo de potência.

Fonte: (PEGADO, 2019).

Caso nenhum verbo seja citado na linha de texto, o verbo *edit* é utilizado por padrão.

3.4 Elementos básicos do OpenDSS

Nesta seção serão apresentados os elementos básicos de um sistema de distribuição aplicados no *software* OpenDSS, com suas características e parâmetros.

3.4.1 Elemento Circuito

O elemento Circuito (*Circuit* no OpenDSS) recebe o equivalente de Thévenin da rede de transmissão vista pela subestação ou o equivalente de Thévenin da subestação vista por um alimentador.

Todo circuito definido no OpenDSS deve ser inicializado pelo elemento *Circuit*. (RADATZ, 2015). Como já discutido, esse elemento representa um equivalente de Thévenin, portanto, para os cálculos é considerado o componente que possui os dados de fronteira, ou seja, a barra *swing*. A Tabela 2 apresenta os parâmetros do elemento *Circuit*.

Tabela 2 – Parâmetros básicos do elemento *Circuit*

Parâmetro	Descrição
<i>basekV</i>	Tensão de linha nominal (em kV)
<i>bus1</i>	Nome da barra a qual o terminal do elemento é conectado
<i>R1</i>	Resistência de sequência positiva da fonte (em Ω)
<i>X1</i>	Reatância de sequência positiva da fonte (em Ω)
<i>mvasc3</i>	Potência de curto-circuito trifásico (em MVA)
<i>mvasc1</i>	Potência de curto-circuito monofásico (em MVA)
<i>pu</i>	Valor da tensão na barra (em por unidade)

Fonte: (RADATZ, 2015), Adaptado.

A definição de *R1* e *X1* suprime a necessidade da definição de *mvasc1* e *mvasc3* e vice-versa.

A seguir é apresentado um exemplo de definição do elemento *Circuit* na linguagem do OpenDSS, já utilizando os parâmetros supracitados.

```
New Circuit.SubestaçãoA bus1=Barra1 basekv=13.8 pu=1
~mvasc3=2000.0 mvasc1=2000.0
```

O ~ simboliza a continuação da primeira linha de comando na segunda linha. Assim não é necessário inserir todos os parâmetros em apenas uma linha.

3.4.2 Elemento Linha de Transmissão

As linhas de transmissão no OpenDSS utilizam o modelo π , com capacitores *shunt*. Seu comando no *software* é o *Line* e seus parâmetros básicos estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros básicos do elemento *Line*

Parâmetro	Descrição
<i>Bus1</i>	Nome da barra a qual o terminal 1 é conectado
<i>Bus2</i>	Nome da barra a qual o terminal 2 é conectado
<i>phases</i>	Número de fases
<i>baseFreq</i>	Frequência de base das reatâncias (em Hz)
<i>R1</i>	Resistência de sequência positiva por unidade de distância (em Ω)
<i>R0</i>	Resistência de sequência zero por unidade de distância (em Ω)
<i>X1</i>	Reatância de sequência positiva por unidade de distância (em Ω)
<i>X0</i>	Reatância de sequência zero por unidade de distância (em Ω)
<i>C1</i>	Capacitância total de sequência positiva por unidade de distância (em nF)
<i>C0</i>	Capacitância total de sequência zero por unidade de distância (em nF)
<i>Rmatrix</i>	Matriz de resistências da linha por unidade de distância
<i>Xmatrix</i>	Matriz de reatâncias da linha por unidade de distância
<i>units</i>	Unidade de distância utilizada
<i>Normamps</i>	Corrente nominal da linha
<i>length</i>	Comprimento da linha

Fonte: (PEGADO, 2019), Adaptado.

É possível definir e salvar várias características de uma linha por meio do elemento *LineCode*. Dessa forma, em grandes sistemas onde diversas linhas têm a mesma configuração é possível criar um *LineCode* e o utilizar em todas as linhas parecidas.

A seguir é apresentado um exemplo de definição do elemento *Linha* na linguagem do OpenDSS, já utilizando os parâmetros supracitados.

```
New Line.Linha1 phases=3 bus1=Barra1 bus2=Barra2
~basefreq=60 units=km length=1.0 normaps=400.0
~R1=0.015 X1=0.1 R0=10.0 X0=30.5 C1=800.0 C0=270.0
```

3.4.3 Elemento Transformador

Os transformadores são elementos fornecedores de energia que apresentam dois ou mais enrolamentos. Podem ser monofásicos ou multifásicos e, em geral, apresentam dois terminais.

Para caracterizar o transformador é necessário que se defina a quantidade de enrolamentos, número de fases, reatância série e as barras nas quais o transformador está conectado.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros básicos do elemento *Transformer*.

Tabela 4 – Parâmetros básicos do elemento *Transformer*

Parâmetro	Descrição
<i>phases</i>	Número de fases (o <i>default</i> é 3)
<i>Windings</i>	Número de enrolamentos (o <i>default</i> é 2)
<i>XLH</i>	Reatância percentual entre o primário e o secundário
<i>%loadloss</i>	Porcentagem da perda total com base na carga nominal
<i>%noloadloss</i>	Porcentagem da perda em vazio com base na carga nominal
<i>Wdg</i>	Enrolamento que receberá os parâmetros a seguir
<i>bus</i>	Nome da barra a qual o terminal do elemento é conectado
<i>conn</i>	Ligação dos enrolamentos (estrela ou triângulo)
<i>kV</i>	Tensão de linha nominal do terminal (enrolamento) em kV
<i>kVA</i>	Potência nominal do terminal em kVA
<i>tap</i>	Tensão em pu do tap utilizado

Fonte: (RADATZ, 2015), Adaptado.

No exemplo a seguir é modelado um transformador de 10 MVA de potência ligado em delta-estrela aterrada. O primário, conectado na BarraA, tem tensão 13,8 kV e o secundário, conectado na BarraB, tem tensão 380 V. O tap foi ajustado em 1,05, a perda em carga nominal de 0,5%, a perda em vazio de 0,2% e o valor de reatância de curto-circuito de 6%.

```
New Transformer.Trafo xhl=6 % loadloss=0.5 % noloadloss=0.2
~wdg=1 bus=Barra1 conn=delta kV=13.8 kVA=10000 tap=1
~wdg=2 bus=Barra2 conn=wye kV=0.380 kVA=10000 tap=1.05
```

3.4.4 Elemento Carga

Cargas são elementos de conversão de energia. No OpenDSS, o elemento *Load* pode ser definido pelo valor de sua potência ativa nominal em kW, sua potência reativa em kvar e seu fator de potência, podendo ainda ter seu comportamento descrito por uma curva de carga. Porém, não é necessário que os três valores supracitados sejam necessariamente definidos. É possível configurar uma carga com apenas uma combinação deles, da seguinte maneira:

- Potência ativa em kW e fator de potência;
- Potência ativa em kW e potência reativa em kvar;
- Potência aparente em kVA e fator de potência.

O OpenDSS possui ainda diversos modelos de carga, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 – Principais modelos de carga no OpenDSS

Modelo	Descrição
1	Potência ativa e reativa constantes
2	Impedância constante
3	Potência ativa constante e potência reativa quadrática (como um motor)
4	Potência ativa não linear e potência reativa quadrática
5	Corrente constante
6	Potência ativa constante, podendo ser modificada pelo formato de curva de carga, mas potência reativa fixa em seu valor nominal
7	Similar ao modelo 6, mas com a potência reativa variando com o quadrado da tensão
8	Modelo especial ZIP

Fonte: (RADATZ, 2015), Adaptado.

Os parâmetros básicos do elemento *Load* no OpenDSS podem ser conferidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros básicos do elemento *Load* no OpenDSS.

Parâmetro	Descrição
<i>Bus1</i>	Nome da barra a qual a carga está conectada
<i>phases</i>	Número de fases
<i>Conn</i>	Tipo de conexão: estrela (wye) ou triângulo (delta)
<i>Model</i>	Modelo da carga
<i>kV</i>	Tensão nominal
<i>kVA</i>	Potência aparente nominal
<i>kW</i>	Potência ativa nominal
<i>kvar</i>	Potência reativa nominal
<i>pf</i>	Fator de potência
<i>daily</i>	Nome da curva de carga associada à carga

Fonte: (PEGADO, 2019), Adaptado.

No exemplo a seguir uma carga trifásica conectada em triângulo, tensão de 380 V, 20 kW e 16 kvar é configurada no OpenDSS.

```
New Load.Carga phases=3 model=5 bus1=Barra1
~kV=0.380 kW=20 kvar=16 conn=delta
```

3.4.5 Elemento Gerador

O gerador é, assim como a carga, um elemento de conversão de energia. Para caracterizar o elemento *Generator* no OpenDSS é necessário definir sua potência nominal, seu fator de potência, sua tensão e modelo utilizado.

A potência gerada pelo gerador pode ser definida por uma curva de despacho, o que viabiliza a realização do fluxo de potência ao longo de um período de estudo. Assim como as cargas, o gerador no OpenDSS possui diversos modelos, descritos na Tabela 7.

Tabela 7 – Principais modelos de gerador no OpenDSS.

Modelo	Descrição
1	Potência constante
2	Impedância constante
3	Modelo de gerador como barra PV
4	Potência ativa constante, podendo seguir uma curva de despacho e potência reativa fixa
5	Potência ativa constante e reatância com valor fixo. P segue a curva de despacho e Q calculada para o valor da reatância fixada
6	Modelo definido pelo usuário
7	P constante limitado pela corrente

Os parâmetros básicos do elemento gerador no OpenDSS podem ser conferidos na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros básicos do elemento *Generator*.

Parâmetro	Descrição
<i>Bus1</i>	Nome da barra a qual o gerador está conectado
<i>phases</i>	Número de fases
<i>Conn</i>	Tipo de conexão: estrela (wye) ou triângulo (delta)
<i>Model</i>	Modelo do gerador
<i>kV</i>	Tensão nominal
<i>kW</i>	Potência ativa nominal
<i>kvar</i>	Potência reativa nominal
<i>pf</i>	Fator de potência
<i>maxkvar</i>	Valor máximo de potência reativa em kvar (modelo 3)
<i>minkvar</i>	Valor mínimo de potência reativa em kvar (modelo 3)

Fonte: (PEGADO, 2019), Adaptado.

No exemplo a seguir é configurado no OpenDSS um gerador de tensão 13,8 kV com potência 100 MW, modelo 3 e potência reativa variável entre 1 e 50 Mvar.

```
New Generator.Gerador bus1=Barra1 kV=13.8 kW=10000 model=3
~maxkvar=50000 minkvar=1000
```

3.4.6 Elemento Chave

Uma chave num sistema elétrico de potência apresenta dois estados de operação: aberto ou fechado. Nos sistemas de distribuição podem apresentar-se como chaves de seccionamento ou chaves fusível.

No OpenDSS uma chave pode ser representada e ter seu estado alterado das seguintes maneiras:

- Criando uma linha curta de impedância desprezível;
- A partir do parâmetro *Switch* do elemento *Line*;
- A partir do elemento *SwtControl*.

O modelo a ser explorado e explicado a seguir é o *SwtControl*. Neste modelo é possível definir o tempo de operação, o estado normal de operação, o elemento de circuito em que a chave irá operar etc. A Tabela 9 apresenta os principais parâmetros do elemento em questão.

Tabela 9 – Parâmetros básicos do elemento *SwtControl*.

Parâmetro	Descrição
<i>Action</i>	Realiza a comutação da chave após o tempo de atraso especificado
<i>Delay</i>	Tempo de atraso para atuação da chave
<i>Normal</i>	Estado normal da chave: aberta ou fechada
<i>SwitchedObj</i>	Elemento de circuito onde a chave atuará
<i>SwitchedTerm</i>	Número do terminal do interruptor do elemento controlado

No exemplo a seguir é configurada uma chave normalmente fechada por meio do modelo *SwtControl* que atuará sobre o elemento *Line.Linha1*.

```
New SwtControl.Chave1 SwitchedObj=Line.Linha1
```

Logo após, é possível editar o parâmetro *Action* para que a chave seja então aberta:

```
Edit SwtControl.Chave1 Action=open
```

3.5 Fluxo de Potência

Estudos de fluxo de potência são de grande importância no planejamento de sistemas de potência, bem como na determinação da melhor operação nos sistemas existentes. As principais informações obtidas de um fluxo de potência são a magnitude e o ângulo da tensão das barras e as potências ativa e reativa das linhas de um determinado sistema de potência em estudo (JR; GRAINGER, 1994).

Na literatura são encontrados diversos métodos para o cálculo do fluxo de potência. Dentre eles, destacam-se os métodos de Gauss-Seidel, Newton-Raphson, desacoplado rápido etc. (PEGADO, 2019).

O OpenDSS utiliza dois métodos para o cálculo de fluxo de potência. O primeiro, a ser detalhado a seguir, é o método normal (utilizado por padrão), que tem a vantagem de ser mais rápido computacionalmente, porém é menos robusto que o segundo, chamado de método de Newton. Este último não deve ser confundido com o método de Newton-Raphson (FREITAS, 2015).

O método normal supracitado é o método de injeção de correntes (MIC), a ser melhor detalhado a seguir. Esse método baseia-se na decomposição da matriz de admitâncias nodais (PEGADO, 2019). O MIC utiliza como base a Equação 3.1 (FREITAS, 2020).

$$\dot{I} = \bar{Y} \times \dot{V} \quad (3.1)$$

Onde:

- \dot{I} : vetor de correntes injetadas;
- \bar{Y} : matriz de admitância nodal do sistema;
- \dot{V} : vetor de tensões nodais.

Inicialmente, o método MIC monta a matriz admitância nodal de cada elemento, chamada de matriz primitiva (Y_{prim}), a partir das contribuições da corrente e tensões nodais. Após a obtenção das matrizes primitivas, o programa construirá a matriz para todo o sistema. (PEGADO, 2019)

O método MIC segue os seguintes passos, de acordo com Freitas (2020):

- **Passo 1: Estimativa inicial**

A estimativa inicial consiste em calcular o vetor de tensões nodais considerando as correntes de compensação das fontes de tensões e de correntes no vetor de correntes injetadas.

- **Passo 2: Cálculo do vetor de correntes injetadas \dot{I}**

O OpenDSS calcula a corrente de compensação para cada elemento. Assim, todas as correntes de compensação na rede são organizadas no vetor de correntes injetadas.

- **Passo 3: Solução para um novo vetor de tensões nodais \dot{V}**

Com o vetor de correntes injetadas, uma nova solução $\dot{I} = \bar{Y}\dot{V}$ é calculada.

- **Passo 4: Teste de convergência**

Agora, é verificado se o algoritmo convergiu ou não, de acordo com o valor máximo de erro que o OpenDSS admite. Caso afirmativo, o processo segue para o Passo 5. Caso negativo, o processo segue para o Passo 6.

O critério de convergência no OpenDSS é dado pela Equação 3.2:

$$erro_i^{(k)} = \begin{cases} \frac{\|\dot{V}_i^{(k)} - |\dot{V}_i^{(k-1)}|\|}{V_{base_i}}, & \text{se a barra a qual o nó } i \text{ pertence possui } V_{base} \\ \frac{\|\dot{V}_i^{(k)} - |\dot{V}_i^{(k-1)}|\|}{|\dot{V}_i^{(k)}|}, & \text{senão} \end{cases} \quad (3.2)$$

Onde:

- V_{base} : tensão de base definida pelo usuário;
- $|\dot{V}_i^{(k)}|$: tensão em Volts do nó i na iteração k ;
- $|\dot{V}_i^{(k+1)}|$: tensão em Volts do nó i na iteração $k + 1$.

Por padrão, o algoritmo de solução do fluxo de potência do OpenDSS converge quando $erro_i < 0,0001 \forall i$.

- **Passo 5: Fluxo de potência resolvido**

O algoritmo resolveu o fluxo de potência.

- **Passo 6: Comparação $k \geq k_{max}$**

Se o resultado da comparação for afirmativo, o processo é abortado no Passo 7. Caso negativo, incrementa-se o k e volta ao Passo 2.

- **Passo 7: Processo abortado**

O algoritmo não resolveu o fluxo de potência em k_{max} .

O método descrito acima é o método de injeção de correntes, o MIC. O OpenDSS, como já discutido, também possibilita a utilização do método de Newton que é uma variação do MIC onde as matrizes são atualizadas a cada iteração (PEGADO, 2019).

4 Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta o problema de Reconfiguração de redes de distribuição, com sua função de otimização e restrições, bem como apresenta o algoritmo clássico de Busca Tabu, como proposto por Glover (1989). Por fim, é apresentado o conceito de Distância Elétrica.

4.1 O problema de Reconfiguração de Redes de Distribuição

Com o atual cenário de competitividade no setor de energia elétrica, as empresas cada vez mais buscam maneiras de maximizar a rentabilidade, atendendo ainda aos critérios de qualidade de serviço e fornecimento estabelecidos pelo órgão regulador.

Desta maneira, uma das medidas que as empresas distribuidoras de energia podem tomar é realizar estudos para aumentar a eficiência do sistema de distribuição, como redução de perdas, melhoria no perfil de tensão, balanceamento de carga, entre outros.

Uma das maneiras de mais baixo custo de reduzir as perdas no sistema de distribuição, pois já utiliza a estrutura existente, é a de reconfiguração do sistema. A reconfiguração do sistema de distribuição consiste em determinar o estado das chaves (fechada/aberta) de seccionamento e interligação, visando obter uma configuração de topologia que melhor atenda a uma determinada função objetivo, sem violar as restrições operacionais impostas ao sistema, como nível de tensão, valores de corrente, entre outros (BRAZ, 2010).

A função objetivo mais utilizada nos trabalhos de reconfiguração é a minimização das perdas ativas nas linhas do sistema. Objetivos como melhoria do perfil de tensão e rebalanceamento entre alimentadores também são comuns. Porém, por não serem objetivos conflitantes, é comum perseguir apenas um deles mas obter melhora consequentemente nos outros também.

Sendo assim, o objetivo principal da reconfiguração proposta neste trabalho é obter uma configuração para o sistema que minimize as perdas nas linhas e atenda às restrições operacionais: limites inferior e superior de tensão; limite de corrente nas linhas; ilhamento de cargas e radialidade do sistema. Logo, a função objetivo adotada será:

$$f(s) = \sum_{l=1}^{N_l} r_l \cdot i_l^2 \quad (4.1)$$

Onde:

- s é a solução atual para o sistema;

- N_l é o número total de linhas;
- r_l é a resistência da linha l ;
- i_l é a corrente fluindo na linha l .

O cálculo de fluxo de potência para obtenção do valor de perdas, tensões e correntes é realizado pelo *software* OpenDSS, explicado no Capítulo 3.

4.1.1 Restrições

Como já supracitado, o problema de reconfiguração possui algumas restrições a serem atendidas. A primeira a ser discutida é a tensão das barras. A tensão nos barramentos deve situar-se dentro dos limites operacionais impostos pela agência reguladora, conforme a Equação 4.2.

$$E_{min} \leq |E_k| \leq E_{max} \quad (4.2)$$

Onde:

- E_k é a tensão na barra k ;
- E_{min} e E_{max} são os limites mínimo e máximo de tensão permitidos.

Todas as barras do sistema estão sujeitas ao teste acima, logo, o valor de k varia para todas as barras presentes no sistema. Os valores dos limites operacionais impostos pela agência reguladora atestam a qualidade do fornecimento de energia aos consumidores. No Brasil, de acordo com o Módulo 8 do Prodist, da ANEEL, os limites devem ser $E_{min} = 0,95$ pu e $E_{max} = 1,05$ pu da tensão nominal de operação do sistema (ANEEL, 2010).

A segunda restrição a ser considerada é a corrente máxima permitida para as linhas componentes do sistema de distribuição. Um sistema de distribuição real possui diversos tipos de cabos, havendo assim um limite de corrente máxima que pode fluir por determinado cabo. Um valor de corrente acima do limite suportado incorrerá em aquecimento do condutor, aumentando assim as perdas por efeito Joule e diminuindo sua vida útil, bem como colocando em risco diversos outros componentes, como emendas, isoladores, chaves, entre outros. Desta maneira, a Equação 4.3 descreve tal restrição.

$$|i_l| \leq i_l^{max} \quad (4.3)$$

Onde:

- i_l é a corrente da linha l ;
- i_l^{max} é a corrente máxima permitida na linha l .

A terceira restrição a ser comentada é a necessidade de radialidade do sistema. Um sistema radial é um sistema onde todas as cargas recebem fluxo de potência de apenas uma direção. Sistemas de distribuição operam de forma radial por duas principais razões: facilidade de coordenação e proteção; e para reduzir corrente de curto-circuito do sistema (LAVORATO *et al.*, 2011).

Desta maneira, de acordo com Lavorato *et al.* (2011), são duas as condições impostas para que um sistema de distribuição seja radial:

- **Condição 1** - A solução deve ter $A = n_b - n_{bs}$ ramos energizados;
- **Condição 2** - A solução deve estar conectada.

Onde n_b é o número de barras do sistema e n_{bs} é o número de barras de subestações ligadas ao sistema. A Condição 2 impõe que a solução deve estar inteiramente conectada, ou seja, todas as cargas sendo atendidas e conectadas ao sistema.

4.2 Busca Tabu Clássico

O algoritmo de Busca Tabu Clássico proposto por Fred Glover em 1989 tem como pilares a geração de vizinhos, a lista tabu e os critérios de aspiração; conceitos que serão apresentados a seguir, mas, antes, o conceito de meta-heurística será discutido.

4.2.1 Meta-heurística

Inicialmente, é interessante discutir o conceito de heurísticas. São critérios, métodos ou princípios para decidir qual entre vários caminhos alternativos de ação para um problema promete ser o mais eficaz para atingir algum objetivo. As heurísticas atendem a dois requisitos: a necessidade de simplificar tais critérios de ação e, ao mesmo tempo, o desejo de vê-los distinguir corretamente entre boas e más escolhas (PEARL, 1984).

Já as meta-heurísticas são técnicas usadas em problemas de maximização ou minimização. São estratégias comumente utilizadas para resolver problemas difíceis pois oferecem melhores soluções e geralmente com um tempo de processamento menor do que por outras técnicas. Utilizam uma combinação de escolhas aleatórias e conhecimento do problema para se guiarem e realizar a busca no espaço de busca, o que evita paradas em ótimos locais (GOMES, 2009).

4.2.2 Conceitos básicos

De forma simplificada, o algoritmo de Busca Tabu é uma técnica iterativa que explora um conjunto de soluções S de um problema, fazendo movimentos de uma solução s para outra solução s' pertencente à vizinhança $N(s)$, esta última que é a vizinhança de s gerada a partir de um mecanismo de movimento (GOMES, 2009).

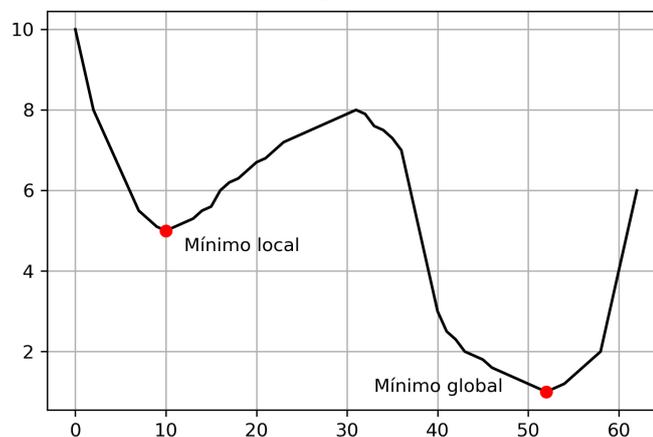
Os movimentos acima mencionados são realizados com o objetivo de atingir uma solução considerada boa (ótima ou quase ótima), levando em consideração alguma função $f(s)$ a ser minimizada ou maximizada (GLOVER; TAILLARD, 1993).

Porém, com o que foi dito até agora, caracteriza-se um algoritmo de método descendente, que muitas vezes não chega ao ótimo (máximo ou mínimo) global de um problema. Confira a seguir um pseudocódigo de tal método:

- 1 - Escolher $s \in S$ para iniciar o processo
- 2 - Encontrar $s' \in N(s)$ tal que $f(s') < f(s)$
- 3 - Se todas as soluções encontradas na vizinhança não diminuam $f(s)$, então s é um ótimo local e o método termina
- 4 - Caso contrário, atribua s' como nova solução inicial e volte ao passo 2.

A solução final s obtida pelo método acima é chamada de ótimo local porque é a melhor de todas as soluções nessa vizinhança. Há, então, nesse método, a grande desvantagem de que na maioria dos casos a solução encontrada não é o ótimo global e desta maneira a função $f(s)$ não terá sido minimizada para todo $s \in S$. A Figura 2 traz a curva de uma função qualquer onde estão destacados os pontos de mínimo local e mínimo global. Como dito, é possível que a execução de um algoritmo de minimização atinja o mínimo local mas não atinja o mínimo global por não aceitar uma piora na função de *fitness*.

Figura 2 – Mínimos local e global na curva de uma função.



Fonte: Autor.

Para contornar esse problema, um procedimento deve ser capaz de aceitar um movimento de s para s' mesmo se $f(s') > f(s)$ (para maximização, o sinal é invertido). Porém, quando uma solução s' pior que s puder ser aceita, há o risco do processo entrar em ciclagem e ficar indo e voltando à mesma solução de ótimo local. Por isso, a técnica de Busca Tabu evita esse risco ao incorporar uma estrutura de memória que proíbe ou penaliza movimentos que poderiam voltar a uma solução visitada recentemente. Essa noção de proibir certos movimentos torna-os tabu. Desta maneira, surge a ideia da lista tabu, onde são salvos os movimentos recentemente utilizados para evitar que novas soluções os utilizem e o algoritmo entre em um *loop* interminável.

O algoritmo necessita de critérios de parada de forma a entregar a melhor solução que encontrou. Existem inúmeros critérios de parada em uso pelas diversas aplicações disponíveis atualmente. As mais significativas estão descritas a seguir:

- Quando uma solução ótima é encontrada;
- Quando k (número de iterações) é maior que o número máximo de iterações permitido;
- Quando o número de iterações executadas desde que o melhor s já encontrado mudou pela última vez é maior que o número máximo de iterações especificado;
- Quando o valor da melhor solução encontrada chega a um limite inferior conhecido.

E, finalmente, um dos conceitos chave do algoritmo de Busca Tabu são os Critérios de Aspiração. Embora a Lista Tabu tenha o importante papel de evitar que o algoritmo entre em processo de ciclagem, ela pode ser sobreposta caso seja encontrada uma solução que tenha movimentos na lista tabu porém seja melhor que qualquer outra já encontrada pelo algoritmo. Em outras palavras, caso surja algum vizinho com algum movimento tabu que seja o melhor já encontrado, ainda assim ele será escolhido como nova solução atual devido aos Critérios de Aspiração.

Em resumo, o algoritmo de Busca Tabu pode ser descrito como segue: comece com uma certa solução inicial e verifique se ela atende às restrições impostas. Para essa solução, o algoritmo gera um conjunto de vizinhos usando sua técnica de movimento; é verificado então se esses vizinhos atendem às restrições. Se o melhor vizinho (em relação à função de avaliação $f(s)$) não estiver na Lista Tabu ou se atende aos Critérios de Aspiração, esse vizinho será a nova solução atual. Caso o melhor vizinho esteja na Lista Tabu mas não atenda aos Critérios de Aspiração, o teste é reiniciado para o segundo melhor vizinho e assim por diante. Com a nova solução atual escolhida, atualize a Lista Tabu com os novos movimentos da solução atual. Note que a Lista Tabu tem um tamanho pré-determinado T , ou seja, conforme a lista recebe novos movimentos, os mais antigos são retirados. É realizado então um teste para verificar se a solução atual é a melhor já encontrada no

algoritmo; em caso afirmativo, essa solução é salva como s^* bem como o número da iteração; em caso negativo, o algoritmo continua e uma nova iteração começa. O algoritmo para após um número predeterminado de iterações acontecer sem melhora em s^* . A seguir é mostrado o pseudocódigo do algoritmo de Busca Tabu:

Algorithm 1 Algoritmo de Busca Tabu

```

 $s \leftarrow s_0$  ▷  $s_0$  é a solução inicial e  $s$  a solução atual
 $s^* \leftarrow s$  ▷  $s^*$  é a melhor solução obtida até então
 $Iter \leftarrow 0$  ▷  $Iter$  é o contador de iterações
 $MelhorIter \leftarrow 0$  ▷ Iteração da melhor solução encontrada até então
 $T \leftarrow \emptyset$  ▷ Lista Tabu
 $BTMax \leftarrow X_{BTMax}$  ▷  $BTMax$  é o número máximo de iterações sem melhora em  $s^*$ 
while  $((Iter - MelhorIter) \leq BTMax)$  do
   $Iter \leftarrow Iter + 1$ 
   $s' \leftarrow s \oplus m$  ▷  $s'$  é o melhor elemento da vizinhança tal que o movimento  $m$  não seja tabu ( $m \notin T$ ) ou  $s'$  atenda à condição de aspiração ( $f(s') < A(f(s))$ )
   $s \leftarrow s'$  ▷ Atualiza a solução atual
   $T \leftarrow m$  ▷ Atualiza a Lista Tabu com o movimento adotado pela solução atual
  if  $f(s) < f(s^*)$  then ▷ Se o fitness da solução atual é melhor já encontrado
     $s^* \leftarrow s$ 
     $MelhorIter \leftarrow Iter$ 
  end if
end while

```

É interessante comentar que para um problema de maximização, o sinal é invertido. Por buscar-se uma função de otimização $f(s)$ cada vez maior, no pseudocódigo atualiza-se s^* dentro da estrutura condicional *if...then* com a condição $f(s) > f(s^*)$.

4.3 Conceito de Distância Elétrica

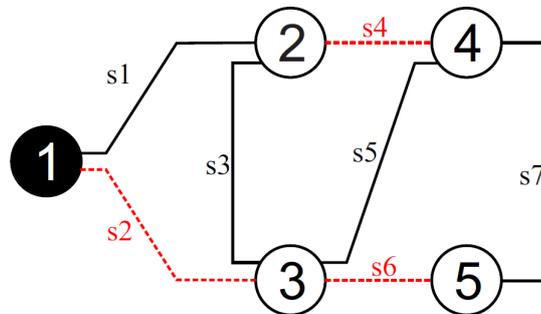
De forma a entender a estrutura de redes de energia a partir da perspectiva de redes complexas, é necessário estudar não apenas a topologia das redes, mas também suas estruturas elétricas. Desta maneira, para compreender a estrutura elétrica de uma rede de energia, é necessária uma medida de conectividade elétrica. Uma medida disponível da conectividade elétrica para sistemas elétricos é a Distância Elétrica, onde sua matriz é representada pelo valor absoluto da inversa da matriz admitância do sistema, como descrito na Equação 4.4 (HINES *et al.*, 2010).

$$D = |Y_{BUS}^{-1}| \quad (4.4)$$

Onde Y_{BUS} é a matriz de admitância nodal do sistema e D é a matriz de distância elétrica. Os componentes d_{ij} da matriz D representam a medida de distância elétrica entre as barras i e j . Cada linha e coluna da matriz D representam as barras do sistema elétrico.

Para uma melhor visualização de um exemplo de matriz de distância elétrica, a Tabela 11 é uma matriz de distância elétrica e foi calculada a partir do sistema IEEE 5-Bus, exposto na Figura 3, cuja matriz de admitância está disponível na Tabela 10 e os demais dados estão disponíveis no Apêndice A.

Figura 3 – Sistema IEEE 5-Bus.



Fonte: Pegado (2019).

Tabela 10 – Matriz de Admitâncias para o sistema IEEE 5-Bus.

	b1	b2	b3	b4	b5
b1	(147.90-156.84j)	(-121.21+60.60j)	(0.0+0.0j)	(0.0+0.0j)	(0.0+0.0j)
b2	(-121.21+60.60j)	(2429.75-1599.92j)	(-2307.69+1538.46j)	(0.0+0.0j)	(0.0+0.0j)
b3	(0.0+0.0j)	(-2307.69+1538.46j)	(3307.90-2538.56j)	(-1000.00+1000.00j)	(0.0+0.0j)
b4	(0.0+0.0j)	(0.0+0.0j)	(-1000.00+1000.00j)	(1252.20-1114.68j)	(-251.14+114.15j)
b5	(0.0+0.0j)	(0.0+0.0j)	(0.0+0.0j)	(-251.14+114.15j)	(251.63-114.40)

Tabela 11 – Matriz de Distâncias Elétricas para o sistema IEEE 5-Bus.

	b1	b2	b3	b4	b5
b1	0.009779	0.009736	0.009738	0.009730	0.009725
b2	0.009736	0.010786	0.010568	0.010590	0.010568
b3	0.009738	0.010568	0.010618	0.010601	0.010601
b4	0.009730	0.010590	0.010601	0.011104	0.010817
b5	0.009725	0.010568	0.010601	0.010816	0.011928

Logo, sabe-se que o sistema apresentado possui, com suas chaves de interligação fechadas, três malhas. Sendo uma malha composta pelas chaves $s1$, que conecta as barras 1 e 2; $s2$, que conecta as barras 1 e 3; e $s3$, que conecta as barras 2 e 3, as distâncias elétricas componentes dessa malha seriam $d_{1,2} = 0,009736$ para a chave $s1$, $d_{1,3} = 0,009738$ para a chave $s2$ e $d_{2,3} = 0,010568$ para a chave $s3$.

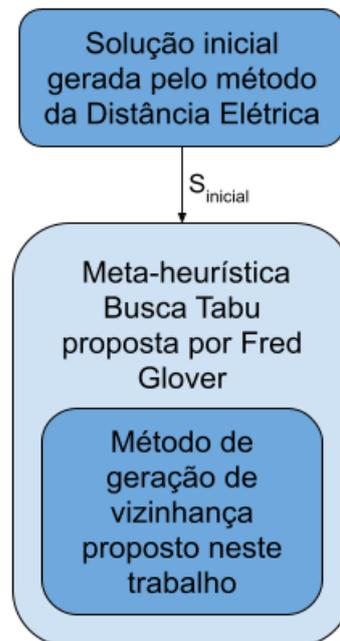
É interessante comentar que a matriz admitância Y_{BUS} foi obtida a partir do *software* OpenDSS. A potência de curto-circuito utilizada foi de 100 MVA. Isso influencia diretamente o elemento $Y(1,1)$ da matriz Y_{BUS} , que é a barra de subestação do sistema, logo, onde está conectada a impedância de Thevenin de entrada do sistema. Essa influência reverbera por todos os elementos de D , visto que D é obtida a partir da inversa da matriz admitância do sistema.

5 Método Proposto

Neste capítulo serão explicados os métodos de obtenção das malhas do sistema de distribuição, obtenção da solução inicial pela Distância Elétrica e o método de geração de vizinhança para o algoritmo de Busca Tabu. Por fim, o método proposto será explicado passo a passo e aplicado em um sistema de 16 barras para melhor entendimento.

É interessante comentar que este trabalho atua sob duas frentes complementares uma à outra a fim de realizar a reconfiguração das redes de distribuição. A primeira frente consiste na geração de solução inicial por Distância Elétrica, que é um método que cria uma solução mais próxima à solução ótima para o sistema, o que facilita e torna mais eficaz o trabalho do algoritmo de Busca Tabu. A segunda frente deste trabalho consiste no algoritmo de Busca Tabu, que utiliza uma nova metodologia de geração de vizinhança proposta. O algoritmo de Busca Tabu recebe a solução inicial gerada pelo método da Distância Elétrica e parte dessa solução com objetivo de encontrar a solução ótima. A Figura 4 traz um esquemático básico das frentes de atuação deste trabalho, que serão melhor explicadas no decorrer deste Capítulo.

Figura 4 – Esquemático básico das frentes de atuação deste trabalho.



Fonte: Autor.

5.1 Obtenção das Malhas

Um sistema de distribuição com todas as suas chaves de interligação fechadas forma um número de malhas correspondente à quantidade de chaves de interligação que estavam

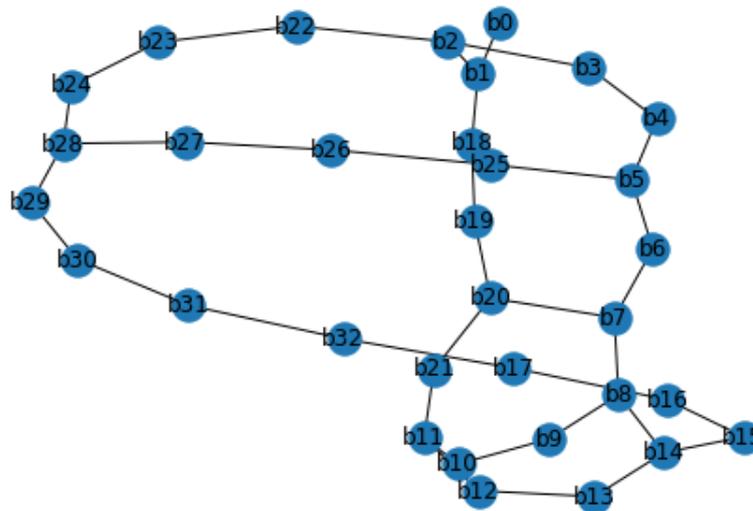
abertas. A obtenção do conjunto das chaves componentes de cada malha não é uma tarefa simples se feita manualmente, visto que há sistemas com dezenas ou até centenas de chaves em cada malha.

Desta maneira, faz-se necessário, um método de obter tais malhas de maneira automatizada, para que o método proposto neste trabalho obtenha as malhas do sistema de distribuição automaticamente e confiavelmente. Para tanto, é necessário converter o sistema de distribuição em um grafo.

Um grafo é um par (V, A) em que V é um conjunto arbitrário e A é um subconjunto de V . Os elementos de V são chamados de vértices e os de A são chamados de arestas. Uma aresta vw incide em v e em w e v e w são as pontas da aresta, ou seja, tais vértices são vizinhos ou adjacentes (FEOFILOFF; KOHAYAKAWA; WAKABAYASHI, 2011).

Logo, convertendo um sistema de distribuição para um grafo, cada barra de um sistema de distribuição será representada por um vértice e cada linha por uma aresta, bem como cada malha chama-se ciclo em um grafo. O sistema 33-Barras de Baran e Wu (1989) está representado em forma de grafo na Figura 5.

Figura 5 – Sistema 33-Barras convertido em grafo.



Fonte: Autor.

Neste trabalho, foi utilizado o algoritmo *Minimum Cycle Basis*, de Kavitha *et al.* (2008), disponível na biblioteca *NetworkX* para Python e capaz de identificar malhas em um grafo. Os dados e metodologia utilizados em tal algoritmo estão disponíveis em (KAVITHA *et al.*, 2008). Neste algoritmo, insere-se um grafo contendo todas as ligações entre os vértices e, como resultado, o algoritmo entrega todos os ciclos compostos de vértices do grafo. No caso do sistema de distribuição, seriam todas as barras componentes de cada malha. Por fim, é realizada então uma conversão para que, a partir das barras componentes das malhas, sejam obtidas as linhas e chaves correspondentes às ligações entre tais barras.

5.2 A solução inicial baseada em Distância Elétrica

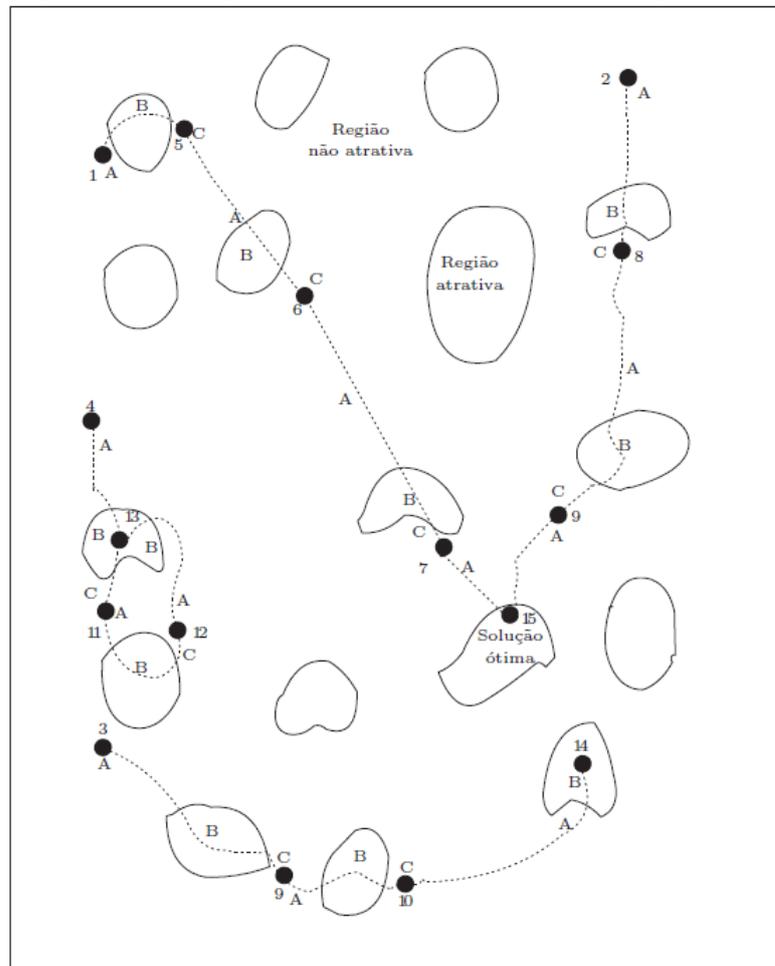
A escolha da configuração inicial é de grande importância para um bom desempenho do algoritmo de Busca Tabu. A técnica de Busca Tabu, ao contrário de outros algoritmos aleatórios, como Recozimento Simulado e Algoritmos Genéticos, não dá ênfase à aleatoriedade, de forma que uma solução inicial mais próxima da solução ótima aproximaria a busca da solução e reduziria o tempo de busca, bem como aumentaria a chance de acerto. Em resumo, uma configuração inicial de qualidade pode levar o algoritmo a atingir a solução ótima mais rapidamente.

Para ilustrar, pode-se utilizar os caminhos disponíveis na Figura 6, percorridos por algum algoritmo. Quatro caminhos diferentes são mostrados na figura: os caminhos 1-5-6-7-15 e 2-8-9-15 levam o algoritmo à solução ótima; o caminho 3-9-10-14 atinge um ótimo local e o caminho 4-11-12-13 entra em ciclagem. Repare que uma diferença fundamental entre todos os caminhos é o ponto de partida distinto. Desta maneira, um algoritmo de Busca Tabu pode encontrar um ótimo global, um ótimo local ou entrar em ciclagem, mesmo com a presença de uma lista tabu. Uma boa configuração de parâmetros para execução do algoritmo, bem como uma solução inicial de qualidade são essenciais para seu sucesso.

É proposto então um método de geração de solução inicial utilizando-se o cálculo da matriz de Distância Elétrica. Partindo da configuração com as chaves de interligação abertas, fecha-se uma das chaves. Uma malha é formada e então o fluxo de potência é calculado, assim como a matriz de distância elétrica D . Então nesta malha o ramo com a maior distância elétrica (de acordo com a matriz D) entre suas barras tem sua chave aberta. O fluxo de potência é calculado novamente e a radialidade do sistema é testada. Se o circuito voltar a ser radial e tiver melhora no *fitness*, essa chave é salva e agora faz parte da solução; caso quaisquer das condições não sejam atendidas, escolhe-se a próxima chave (em relação à distância elétrica) até que ambas as condições sejam atendidas. Então o algoritmo reinicia agora para uma nova chave de interligação, já utilizando a nova chave obtida da malha anterior como parte da solução, fechando uma outra malha e escolhendo o ramo de maior distância elétrica e assim por diante até que todas as chaves de interligação sejam substituídas. A solução obtida é relaxada das restrições de tensão e corrente, mas é obrigatoriamente radial.

O algoritmo de geração de solução inicial proposto neste trabalho é consideravelmente parecido com o algoritmo *Abertura Sequencial* proposto por Merlin (1975). As diferenças ficam por conta de o algoritmo proposto partir de uma solução já radial, enquanto o *Abertura Sequencial* parte de uma rede malhada. Uma outra diferença, é claro, é sobre a escolha da chave que será aberta naquela malha; o algoritmo proposto escolhe a chave que apresentar maior distância elétrica entre suas barras, enquanto o algoritmo de Merlin escolhe a chave com menor corrente em fluxo.

Figura 6 – Exemplo de caminhos de busca da solução ótima.



Fonte: (GUIMARÃES, 2005)

A distância elétrica, sendo uma medida de sensibilidade sobre as mudanças de tensão e corrente para cada par de barras, como visto na Seção 4.3, é um indicativo das perdas que podem estar incorrendo naquele ramo do sistema. Desta maneira, abrir a chave com maior distância elétrica pode significar abrir a chave com maior ou um dos maiores valores de perdas naquela malha.

Entretanto, é interessante comentar que *nem sempre* abrir a chave com maior valor de perdas pode ser interessante ao sistema, haja visto que, sendo as perdas diretamente proporcionais ao quadrado da corrente, um ramo por onde passe muita corrente (consequentemente, muitas perdas ativas) pode ser um tronco principal do sistema de distribuição e, portanto, não deva ser aberto. Por essa razão, para cada escolha de chave realizada no algoritmo proposto, a melhoria na função de *fitness* é testada de forma a garantir que não foi aberto um tronco principal do sistema.

5.3 Método de Geração de Vizinhos

Como já explicado, o algoritmo de Busca Tabu gera uma vizinhança a partir da solução atual s e explora essa vizinhança para obter a melhor nova solução atual. Porém, os vizinhos não são gerados aleatoriamente. Os vizinhos são gerados a partir de um mecanismo chamado *movimento*. O movimento é uma maneira de, a partir de uma solução atual, obter outra solução parecida (por isso a ideia de serem vizinhos).

Logo, para que uma vizinhança seja gerada, é necessário ter algum mecanismo de movimento. Chiang e Jean-Jumeau (1990) propuseram e diversos autores, como Abdelaziz *et al.* (2010), Guimaraes e Castro (2005) e Jeon e Kim (2000) usaram um mecanismo chamado *add/subtract* para gerar vizinhos e conseqüentemente uma vizinhança. Este método será explicado abaixo. na Subseção 5.3.1 e logo após, na Subseção 5.3.2, será explicado o método proposto por este trabalho.

5.3.1 Método *add/subtract*

Inicialmente, é interessante definir Ω_{tie} , Ω_{sec} e Ω_{loop} . Ω_{tie} é o conjunto de chaves de interligação; Ω_{sec} é o conjunto de chaves de seccionamento e Ω_{loop} é o conjunto de chaves que estão em uma malha em determinado momento. Os três conjuntos não são estáticos, logo, podem variar durante a execução do algoritmo.

1. Escolha aleatoriamente uma chave t do conjunto de chaves Ω_{tie} ; então feche-a. Essa chave então será removida do conjunto Ω_{tie} e adicionada ao conjunto Ω_{sec} . Isso criará uma malha no sistema, e as chaves seccionadoras da malha estão no conjunto Ω_{loop} ;
2. Aleatoriamente escolha uma chave s do conjunto Ω_{loop} ; então abra-a. Essa operação irá restaurar a condição de radialidade do sistema. A chave s é então removida do conjunto Ω_{sec} e adicionada ao conjunto Ω_{tie} .

5.3.2 Método proposto para geração de vizinhos

Como visto na Seção 4.1.1, M é o número de chaves que devem estar abertas para que o sistema seja radial (embora esta não seja a única condição).

No método proposto, há M conjuntos de chaves, chamados de Ω_X onde cada conjunto guarda todas as chaves pertencentes a cada malha da rede (considerando todas as chaves fechadas). Chaves pertencentes a mais de um malha são aleatoriamente inseridas em apenas uma malha a cada iteração do algoritmo. Desta maneira, cada conjunto de chaves Ω_X possui todas as chaves de interconexão e de interligação daquela determinada malha X . Nestes conjuntos as chaves referentes a cada ramo do sistema são organizadas de acordo com suas posições geográficas, ou seja, ramos que são vizinhos fisicamente serão vizinhos também no conjunto Ω_X .

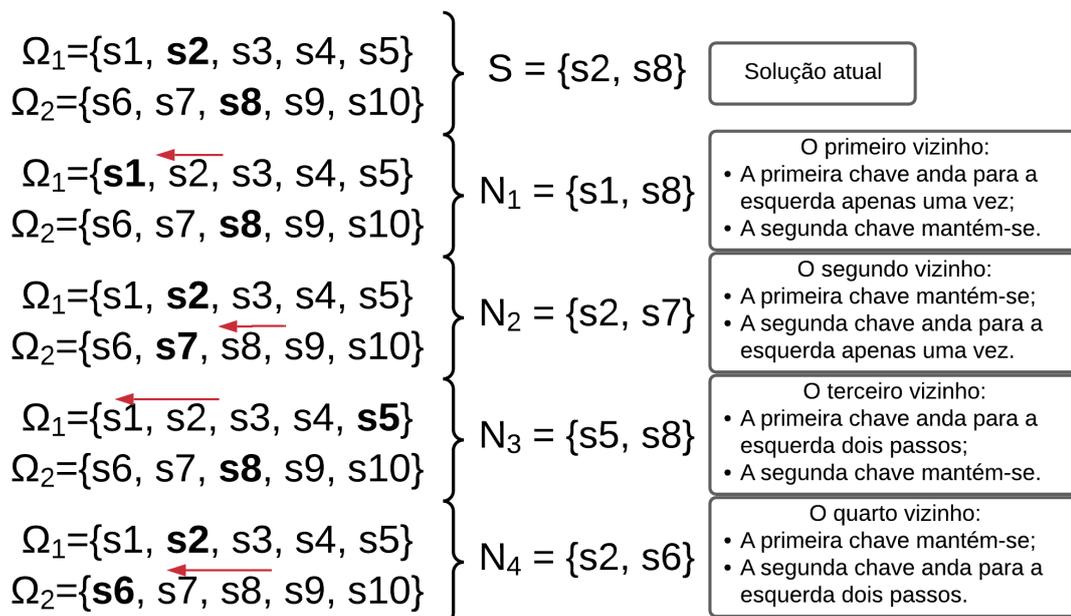
Logo, partindo de uma solução atual qualquer s , é buscada a posição da primeira chave de s no conjunto de chaves Ω_1 . Então, aleatoriamente, o algoritmo escolherá se a chave a se abrir será a próxima chave ou a chave anterior (direita ou esquerda, em relação à posição da chave em Ω_1). Com esta nova chave escolhida, as outras chaves de s não são modificadas, apenas copiadas para o primeiro vizinho formado.

Para o segundo vizinho, o processo é idêntico. A primeira chave de s mantém-se, e o processo é realizado para a segunda chave com o conjunto Ω_2 . Novamente o resto das chaves é copiado de s e o segundo vizinho é formado. O algoritmo continua até que sejam formados M vizinhos. Ou seja, um vizinho foi gerado de cada chave de s . Todos os vizinhos gerados são obrigatoriamente radiais, ou seja, atendem à restrição de radialidade, porém são relaxados das restrições de tensão e corrente.

Porém, há uma maneira de gerar mais do que M chaves para cada conjunto: repare que o método explicado anteriormente apenas escolhia a chave imediatamente à esquerda ou à direita da chave de s em questão no conjunto Ω_X . É possível configurar para que o algoritmo movimente-se mais do que uma posição para a direita ou à esquerda, apenas ajustando a variável NNb (*Number of Neighbors* - Número de Vizinhos).

Para ilustrar com um exemplo, considere um sistema de $M = 2$ malhas, onde $\Omega_1 = s1, s2, s3, s4, s5$ e $\Omega_2 = s6, s7, s8, s9, s10$. Considere a solução atual $s = s2, s8$. Se ajustarmos o algoritmo para $NNb = 4$ e se, aleatoriamente, o algoritmo escolher o movimento para a esquerda, os vizinhos serão $N_1 = s1, s8$, $N_2 = s2, s7$, $N_3 = s5, s8$ e $N_4 = s2, s6$. O procedimento pode ser melhor entendido a partir da Figura 7, onde é mostrado o procedimento de criação dos vizinhos para este exemplo.

Figura 7 – Exemplo do método proposto para geração de vizinhos.



Fonte: Autor.

Em resumo, foi possível gerar 4 vizinhos para um sistema de apenas 2 dimensões. O algoritmo de busca tabu poderá então escolher o vizinho que possui melhor *fitness*.

5.3.3 Atualização da Lista Tabu

Antes de demonstrar o passo a passo do método proposto, é interessante comentar como é atualizada a Lista Tabu. Como explicado na Seção 4.2, a Lista Tabu é uma lista onde são salvos os movimentos das soluções adotadas anteriormente à solução atual. Para o caso do problema de reconfiguração explorado neste trabalho, a Lista Tabu será preenchida pela chave diferente da nova solução em relação à chave da solução atual. Basta lembrar que o método de geração de vizinhos proposto neste trabalho, explicado na Subseção 5.3.2, preconiza a alteração de apenas uma chave por vizinho, em relação à solução atual. O exemplo da Figura 6 pode ser utilizado para ilustrar. Sendo a solução atual $s = s2, s8$ e supondo que o vizinho $N_1 = s1, s8$ seja adotado como nova solução inicial, a chave que irá para a Lista Tabu e será, portanto, proibida nas próximas T iterações é $s1$, haja visto que é a chave que não estava presente no então s . Desta maneira, a Lista Tabu será, até o momento, $LT = s1$.

Como também visto na Seção 4.2, a Lista Tabu pode ter o tamanho que o usuário desejar, portanto, pode salvar as chaves das últimas T iterações. Continuando com o exemplo da Figura 6, caso $T = 2$ e o próximo vizinho a ser adotado como solução atual seja $N_3 = s5, s8$, a Lista Tabu será $LT = s2, s5$. Para as iterações vindouras, a Lista Tabu continuará sendo atualizada, retirando-se o elemento mais antigo e inserindo-se o mais novo, de forma que as chaves nela presentes refiram-se sempre às T últimas iterações.

5.4 Método proposto aplicado ao problema de Reconfiguração

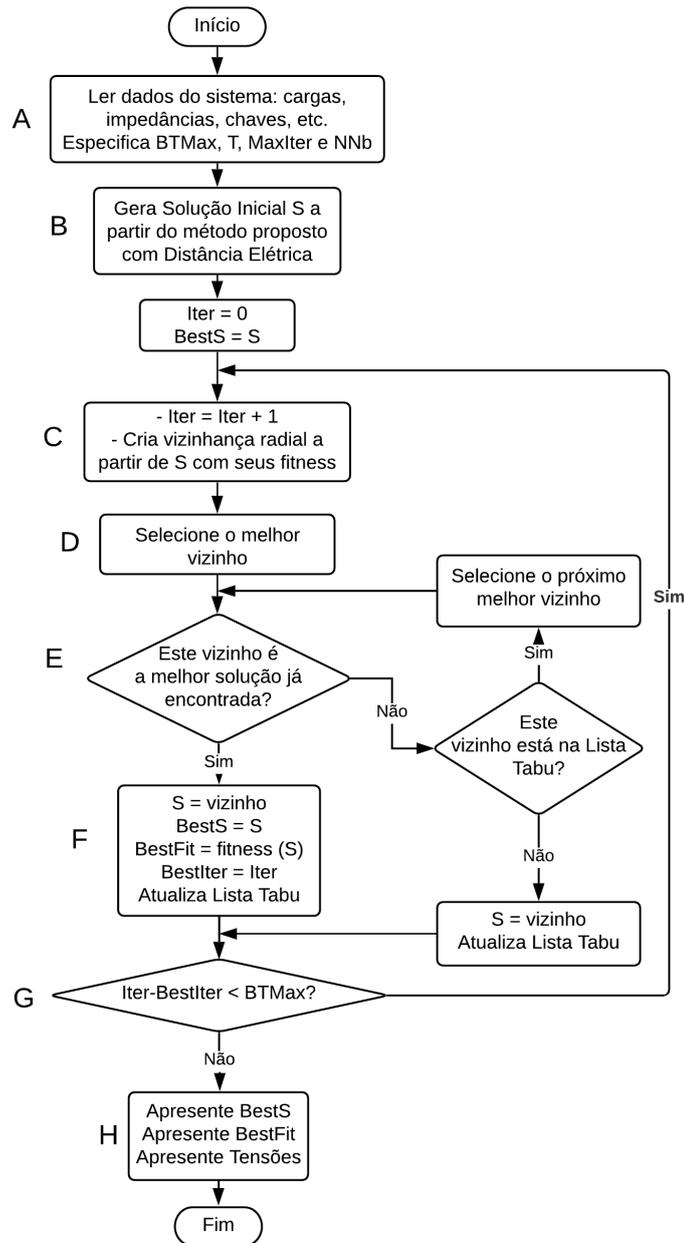
A seleção da configuração ótima para o problema de reconfiguração é feita utilizando o método Busca Tabu com a geração de vizinhos e de solução inicial propostos nesse trabalho. Para aplicação do método, são seguidos os seguintes passos:

- A Neste passo são adicionadas todas as características da rede de distribuição em questão. Linhas, chaves, cargas, alimentadores, malhas obtidas pelo método da Seção 5.1 etc. São definidos os valores de $BTMax$ (variável que especifica quantas iterações sem melhora o algoritmo irá executar), T (tamanho da Lista Tabu), $MaxIter$ (número máximo de iterações) e NNb (número de vizinhos a serem gerados);
- B É gerada a solução inicial a partir do algoritmo visto na Seção 5.2, com base na Distância Elétrica, e então torna-se solução atual s ;
- C O *loop* de iteração começa. $Iter = Iter + 1$; A vizinhança é gerada a partir da solução atual s , bem como os valores de perdas para cada vizinho;

- D A vizinhança é organizada em ordem crescente de acordo com a função de perdas. O melhor vizinho é selecionado;
- E Processo de escolha da nova solução atual s : se o melhor vizinho é a melhor solução já encontrada, este será o novo s (critérios de aspiração); se não, o melhor vizinho será testado para certificar-se de que nenhuma de suas chaves está na Lista Tabu. Se não estiver, esta é a nova solução atual s ; se pelo menos uma das chaves estiver na Lista Tabu, o teste recomeçará para o segundo melhor vizinho e assim por diante até que um novo s seja escolhido;
- F Se o novo s for a melhor solução já encontrada pela execução do algoritmo, essa configuração é salva como $BestS$, as perdas salvas como $BestFit$ e o número da iteração $Iter$ é salvo como $BestIter$;
- G O critério de parada é verificado: se $(Iter - BTMax)$ for maior que $BTMax$, ou se $Iter$ alcançou o valor de $MaxIter$, o algoritmo encerra sua execução. Caso negativo, vá para o Passo C.
- H Os resultados são exibidos: a melhor configuração encontrada, suas perdas, e as tensões máxima e mínima.

O fluxograma completo do algoritmo está melhor explicado na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma do algoritmo proposto para Reconfiguração de Redes de Distribuição



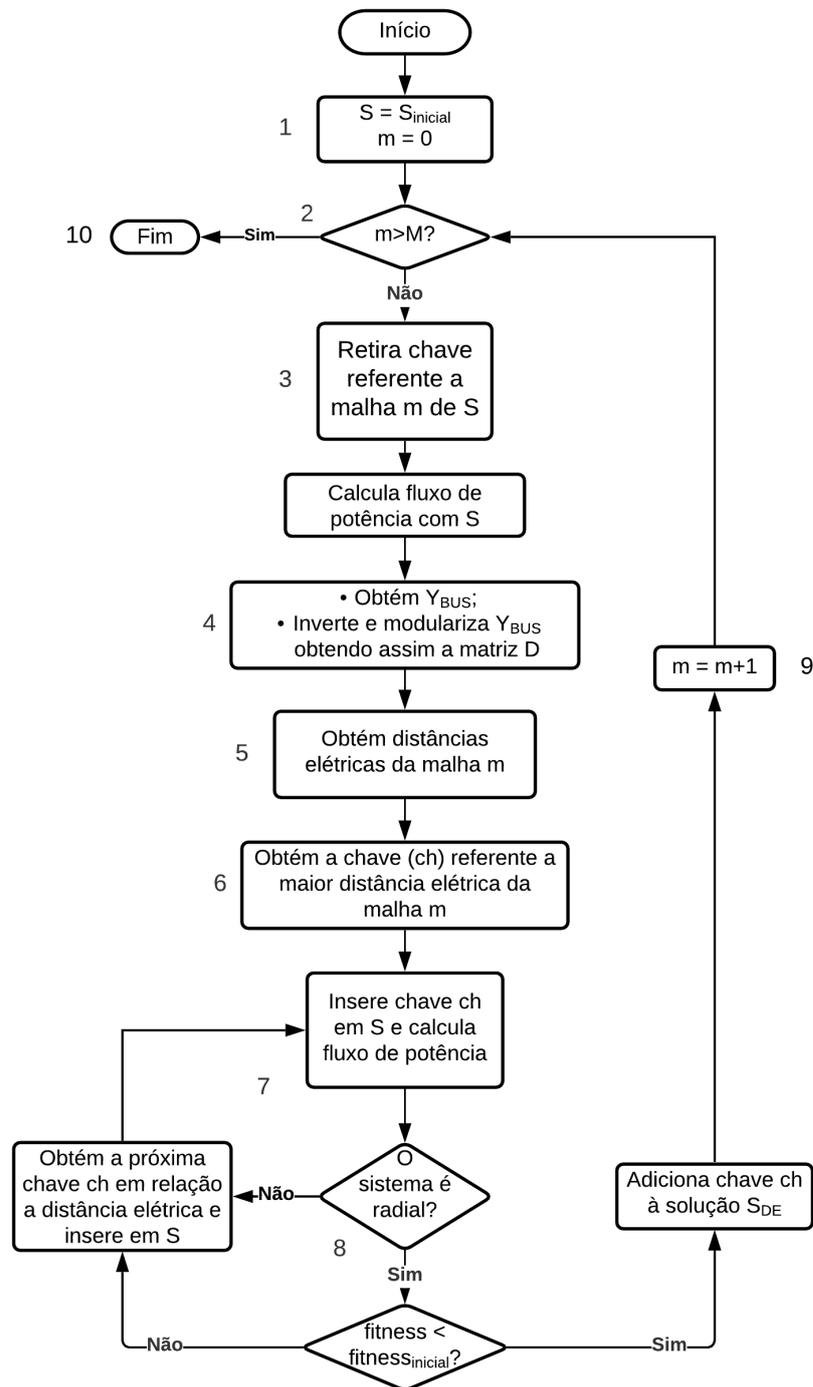
É importante também descrever em detalhe o desenvolvimento do passo B, que é a geração da solução inicial por Distância Elétrica. Para aplicação do método proposto são seguidos os seguintes passos:

1. O algoritmo de obtenção de solução inicial por Distância Elétrica inicia-se definindo $s = s_{inicial}$ e $fitness_{inicial}$, onde $s_{inicial}$ é a solução padrão com as chaves de interligação abertas e as chaves de seccionamento fechadas e $fitness_{inicial}$ é o valor da função $fitness$ para $s_{inicial}$;
2. O algoritmo testará se o contador m já atingiu o número de malhas do sistema de

- distribuição; em caso afirmativo, vá para o passo 10; em caso negativo, continue no passo 3;
3. Retira chave referente a malha m da solução s e calcula o fluxo de potência;
 4. Obtém Y_{BUS} , inverte e modulariza Y_{BUS} para obter assim a matriz de distância elétrica D ;
 5. Obtém, pela matriz D , as distâncias elétricas dos ramos da malha m ;
 6. Obtém a chave ch referente a maior distância elétrica da malha m ;
 7. Insere a chave ch em s e calcula o fluxo de potência;
 8. Faz o teste para avaliar a radialidade da solução s ; caso a solução não seja radial, seleciona a próxima chave de acordo com a distância elétrica e refaz o teste até que encontre-se uma chave que torne a solução s radial; assim que encontrada a chave que torne a solução radial, testa o $fitness$ e compara com $fitness_{inicial}$; caso não haja melhora no fitness, seleciona a próxima chave em relação à distância elétrica, refaz o teste de radialidade e assim por diante; caso haja melhora no fitness, adiciona a chave ch à solução S_{DE} ;
 9. Incrementa o contador m . $m = m + 1$; volta ao passo 2 para avaliação de quantas malhas o algoritmo já percorreu;
 10. O algoritmo entrega como solução S_{DE} .

O fluxograma completo do algoritmo de solução inicial por distância elétrica está disposto na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma do algoritmo proposto para geração de solução inicial baseada em Distância Elétrica.



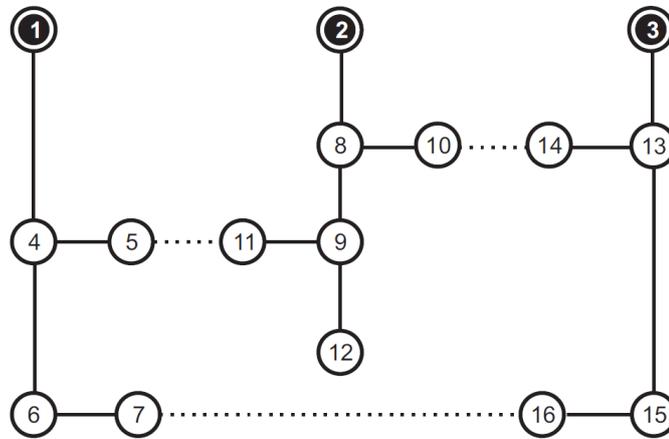
Fonte: Autor (2021).

Para exemplificar a aplicação dos algoritmos propostos, considere o sistema didático de 16 barras exibido na Figura 10 proposto por Civanlar *et al.* (1988). O sistema de 16 barras possui três subestações, 13 chaves de seccionamento e 3 chaves de interligação. O sistema soma 3 malhas ao fecharem-se as chaves de interligação. As perdas apresentadas

pelos sistema antes da reconfiguração somam 513,94 kW. A tensão de base adotada pelo sistema é de 23 kV e a potência de base adotada é de 100 MVA. A tensão das subestações é de 1,0 pu. Os dados de impedância das linhas e das cargas estão dispostos no Apêndice A.

- Chaves de seccionamento: $[s_{1-4}, s_{4-5}, s_{4-6}, s_{6-7}, s_{2-8}, s_{8-9}, s_{9-11}, s_{9-12}, s_{8-10}, s_{3-13}, s_{13-14}, s_{13-15}, s_{15-16}]$;
- Chaves de interligação: $[s_{5-11}, s_{10-14}, s_{7-16}]$.

Figura 10 – Sistema de 16 barras.



Fonte: (FONTAN *et al.*, 2008).

A seguir serão apresentados a inicialização de dados no sistema, a elaboração da solução inicial por Distância Elétrica e 4 iterações no algoritmo de Busca Tabu. Considere que a solução inicial padrão será formada pelas chaves de interligação, ou seja, $s_{inicial} = [s_{5-11}, s_{10-14}, s_{7-16}]$.

1. Inicialização dos dados

- Definição dos parâmetros: $BTMax = 2$; $T = 2$, $NNb = 6$; $MaxIter = 2000$;
- Obtenção das chaves em cada malha pelo método visto na Seção 5.1:

$$- \Omega_1 = [s_{1-4}, s_{2-8}, s_{8-9}, s_{4-5}, s_{5-11}, s_{9-11}];$$

$$- \Omega_2 = [s_{3-13}, s_{2-8}, s_{8-10}, s_{10-14}, s_{13-14}];$$

$$- \Omega_3 = [s_{4-5}, s_{5-11}, s_{9-11}, s_{8-9}, s_{8-10}, s_{10-14}, s_{13-14}, s_{13-15}, s_{15-16}, s_{7-16}, s_{6-7}, s_{4-6}].$$

2. Geração da solução inicial por Distância Elétrica

- Iteração para a malha 1, com $s = [s_{5-11}, s_{10-14}, s_{7-16}]$:
 - Obtenção da matriz Y_{bus} ; Inversão de Y_{bus} ; Modularização de Y_{bus} obtendo-se assim a matriz D ;
 - Distâncias elétricas entre elementos da malha 1: $[2.4805 \cdot 10^{-5}, 2.4681 \cdot 10^{-5}, 0.4989, 0.4300, 0.7981, 0.6276]$
 - Logo, como o maior valor de distância elétrica para a malha 1 é de 0.7981 a chave escolhida para ser aberta seria s_{5-11} . Porém, como não houve melhora na função *fitness*, é escolhida a segunda maior distância elétrica, 0.6276, e a chave escolhida para ser aberta será s_{9-11} . A próxima iteração será com $s = [s_{9-11}, s_{10-14}, s_{7-16}]$.
 - Iteração para a malha 2, com $s = [s_{9-11}, s_{10-14}, s_{7-16}]$:
 - Obtenção da matriz Y_{bus} ; Inversão de Y_{bus} ; Modularização de Y_{bus} obtendo-se assim a matriz D ;
 - Distâncias elétricas entre elementos da malha 2: $[2.4858 \cdot 10^{-5}, 2.4695 \cdot 10^{-5}, 0.4349, 0.7402, 0.4462]$
 - Logo, como o maior valor de distância elétrica da malha 2 é de 0.7402 e não houve melhora no *fitness* em relação à solução original, a próxima chave com maior distância elétrica é escolhida, que seria s_{13-14} , porém, novamente não houve melhora no *fitness* e a terceira chave é escolhida, desta vez s_{8-10} , com distância elétrica de 0.4349, entregando melhora no *fitness*. Logo a próxima iteração será com $s = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{7-16}]$
 - Iteração para a malha 3, com $s = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{7-16}]$:
 - Obtenção da matriz Y_{bus} ; Inversão de Y_{bus} ; Modularização de Y_{bus} obtendo-se assim a matriz D ;
 - Distâncias elétricas entre elementos da malha 3: $[0.5613, 1.2771, 2.4182 \cdot 10^{-5}, 0.8021, 2.4387 \cdot 10^{-5}, 1.4608, 0.6733, 0.5455, 0.9229, 0.7890, 0.9670, 0.4134]$
 - Logo, o maior valor de distância elétrica para a malha 3 é de 1.4608. A chave a ser aberta seria s_{10-14} , porém o algoritmo deixaria de ser radial. O mesmo acontece com a próxima chave s_{5-11} . Finalmente, na terceira chave testada, s_{6-7} a radialidade é restaurada e há melhora no *fitness*.
3. A solução inicial obtida pelo método da distância elétrica é, então, $s = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{6-7}]$. Houve uma redução de 6,25% em relação à solução inicial padrão.
4. $BestS = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{6-7}]$ e $BestFit = 481.82$;
5. Iteração 1 do Busca Tabu:
- $s = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{6-7}]$

- Geração de vizinhos com seus respectivos *fitness*:
 - Direção sorteada: esquerda;
 - Vizinho 1 : $[s_{5-11}, s_{8-10}, s_{6-7}]$ Fit: 499.70 kW
 - Vizinho 2 : $[s_{9-11}, s_{2-8}, s_{6-7}]$ Fit: 1278.86 kW
 - Vizinho 3 : $[s_{9-11}, s_{8-10}, s_{7-16}]$ Fit: 468.42 kW
 - Vizinho 4 : $[s_{4-5}, s_{8-10}, s_{6-7}]$ Fit: 665.88 kW
 - Vizinho 5 : $[s_{9-11}, s_{3-13}, s_{6-7}]$ Fit: 885.68 kW
 - Vizinho 6 : $[s_{9-11}, s_{8-10}, s_{15-16}]$ Fit: 495.15 kW
- O Vizinho 3 é a melhor solução da iteração e foi escolhido por aspiração, logo $s = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{7-16}]$
- Como a atual solução é a melhor já encontrada, logo, $BestS = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{7-16}]$, $BestFit = 468.42$ e $BestIter = 1$;
- Atualização da Lista Tabu: $LT = [s_{7-16}]$.
- Teste de parada: $(Iter - BestIter) > BTMax \Rightarrow (1 - 1) < 2$. Logo, o algoritmo continua.

6. Iteração 2 do Busca Tabu:

- $s = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{7-16}]$
- Geração de vizinhos com seus respectivos fitness:
 - Direção sorteada: esquerda;
 - Vizinho 1 : $[s_{5-11}, s_{8-10}, s_{7-16}]$ Fit: 485.69 kW
 - Vizinho 2 : $[s_{9-11}, s_{2-8}, s_{7-16}]$ Fit: 1210.98 kW
 - Vizinho 3 : $[s_{9-11}, s_{8-10}, s_{15-16}]$ Fit: 495.05 kW
 - Vizinho 4 : $[s_{4-5}, s_{8-10}, s_{7-16}]$ Fit: 643.76 kW
 - Vizinho 5 : $[s_{9-11}, s_{3-13}, s_{7-16}]$ Fit: 754.98 kW
 - Vizinho 6 : $[s_{9-11}, s_{8-10}, s_{13-15}]$ Fit: 528.03 kW
- Como não há qualquer vizinho que atenda aos critérios de aspiração e o Vizinho 1 possui chave na Lista Tabu, o vizinho selecionado será o 3, logo, $s = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{15-16}]$
- Atualização da Lista Tabu: $LT = [s_{7-16}, s_{15-16}]$
- Teste de parada: $(Iter - BestIter) > BTMax \Rightarrow (2 - 1) < 2$. Logo, o algoritmo continua.

7. Iteração 3 do Busca Tabu:

- $s = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{15-16}]$

- Geração de vizinhos com seus respectivos fitness:
 - Direção sorteada: direita;
 - Vizinho 1 : $[s_{1-4}, s_{8-10}, s_{15-16}]$ Fit: 1438.43 kW
 - Vizinho 2 : $[s_{9-11}, s_{10-14}, s_{15-16}]$ Fit: 526.08 kW
 - Vizinho 3 : $[s_{9-11}, s_{8-10}, s_{7-16}]$ Fit: 468.34 kW
 - Vizinho 4 : $[s_{2-8}, s_{8-10}, s_{15-16}]$ Fit: 1180.72 kW
 - Vizinho 5 : $[s_{9-11}, s_{13-14}, s_{15-16}]$ Fit: 551.33 kW
 - Vizinho 6: $[s_{9-11}, s_{8-10}, s_{6-7}]$ Fit: 481.83
- O vizinho 3 é idêntico à melhor solução já encontrada e solução atual, $BestS$, e possui chave na lista tabu, logo, não poderá ser escolhido. O vizinho escolhido é o 6, logo, $s = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{6-7}]$.
- Como a solução atual não é melhor que a melhor já encontrada, os valores de $BestS$, $BestFit$ e $BestIter$ mantêm-se os mesmos.
- Atualização da Lista Tabu: $LT = [s_{15-16}, s_{6-7}]$
- Teste de parada: $(Iter - BestIter) > BTMax \Rightarrow (3 - 1) = 2$. Logo, o algoritmo continua.

8. Iteração 4 do Busca Tabu:

- $s = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{6-7}]$
- Geração de vizinhos com seus respectivos fitness:
 - Direção sorteada: direita;
 - Vizinho 1 : $[s_{1-4}, s_{8-10}, s_{6-7}]$ Fit: 1052.17 kW
 - Vizinho 2 : $[s_{9-11}, s_{10-14}, s_{6-7}]$ Fit: 503.24 kW
 - Vizinho 3 : $[s_{9-11}, s_{8-10}, s_{4-6}]$ Fit: 534.14 kW
 - Vizinho 4 : $[s_{2-8}, s_{8-10}, s_{6-7}]$ Fit: 1088.83 kW
 - Vizinho 5 : $[s_{9-11}, s_{13-14}, s_{6-7}]$ Fit: 521.38 kW
 - Foram gerados apenas 5 vizinhos pois 1 vizinho gerado não atendia à restrição de radialidade.
- Como não há qualquer vizinho que atenda aos critérios de aspiração e o Vizinho 2 possui chave na Lista Tabu, o vizinho selecionado será o 3, logo, $s = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{4-6}]$.
- Como a solução atual não é igual ou melhor que a melhor já encontrada, mantêm-se $BestS = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{7-16}]$, $BestFit = 468.34$ e $BestIter = 3$
- Atualização da Lista Tabu: $LT = [s_{6-7}, s_{4-6}]$
- Teste de parada: $(Iter - BestIter) > BTMax \Rightarrow (4 - 1) > 2$. Logo, o algoritmo encerra sua execução.

9. Melhor configuração encontrada: $BestS = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{7-16}]$, com fitness $BestFit = 468.34$ kW.

A solução $s = [s_{9-11}, s_{8-10}, s_{7-16}]$, com perdas de 468,34 kW foi a mesma encontrada por Fontan (2008). De acordo com a autora citada, esta é a solução ótima para o sistema. As perdas encontradas após a reconfiguração apresentam uma redução de 8,87% em relação às perdas antes da reconfiguração.

6 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados com os algoritmos propostos em quatro sistemas de distribuição amplamente utilizados na literatura técnica acerca do tema de reconfiguração de redes. Inicialmente os sistemas serão descritos em detalhe e então os resultados serão apresentados, discutidos e comparados com outros trabalhos apresentados na literatura.

6.1 Descrição dos sistemas teste

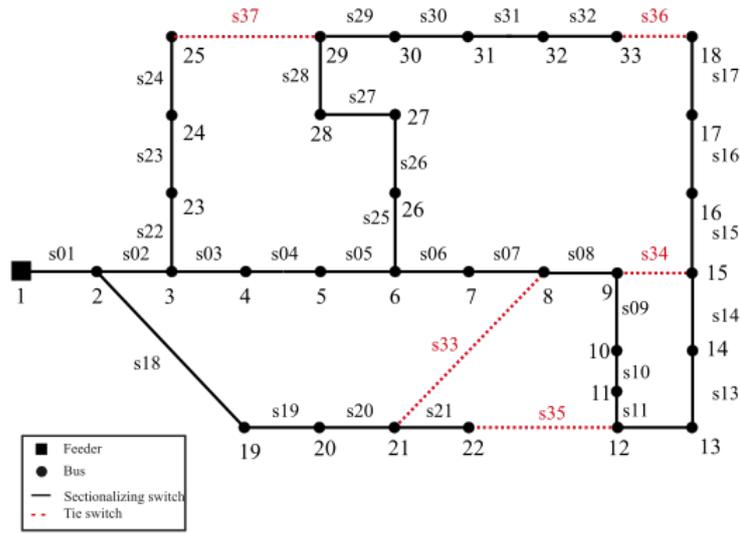
O método proposto foi aplicado em quatro sistemas de distribuição utilizados na literatura técnica. Os sistemas teste 33-Barras de Baran e Wu (1989) e 69-Barras de Savier e Das (2007) são sistemas de cinco dimensões, o sistema 94-Barras apresentado por Su e Lee (2003) é um sistema de treze dimensões e o sistema 135-Barras de Mantovani, Casari e Romero (2000) é de 21 dimensões. Os dados de linhas, cargas e ligações de todos os sistemas estão dispostos no Anexo A.

O sistema 33-Barras de Baran e Wu (1989) possui 37 ramos e tensão de 12,66 kV. Cada ramo possui uma chave, sendo então 32 chaves seccionadoras (normalmente fechadas) e 5 chaves de interligação (normalmente abertas). Para reconfiguração por força bruta ou busca intensiva, seriam 2^{37} , ou mais de 137 bilhões de testes. O total de cargas ativas é de 3715 kW e o total de cargas reativas é de 2300 kvar. O diagrama unifilar desse sistema é apresentado na Figura 11. As chaves seccionadoras, de s1 a s32, são representadas por linhas contínuas enquanto as chaves de interligação, de s33 a s37, são representadas por linhas tracejadas. Cinco malhas são formadas pelo fechamento das chaves de interligação, ou seja, o sistema é de 5 dimensões. Com as chaves de interligação abertas o sistema apresenta 202,67 kW de perdas nas linhas.

O sistema 69-Barras de Savier e Das (2007) possui 73 ramos e tensão de 12,66 kV. Cada ramo possui uma chave, sendo então 68 chaves seccionadoras e 5 chaves de interligação. Para reconfiguração por força bruta ou busca intensiva, seriam 2^{73} , ou mais de $9,44 \cdot 10^{21}$ testes. O diagrama unifilar desse sistema é apresentado na Figura 12. As chaves seccionadoras, de s1 a s68, são representadas por linhas contínuas enquanto as chaves de interligação, de s69 a s73, são representadas por linhas tracejadas. Assim como no sistema 33-Barras, cinco malhas são formadas pelo fechamento das chaves de interligação, ou seja, o sistema é de 5 dimensões. Com as chaves de interligação abertas o sistema apresenta 224,96 kW de perdas nas linhas.

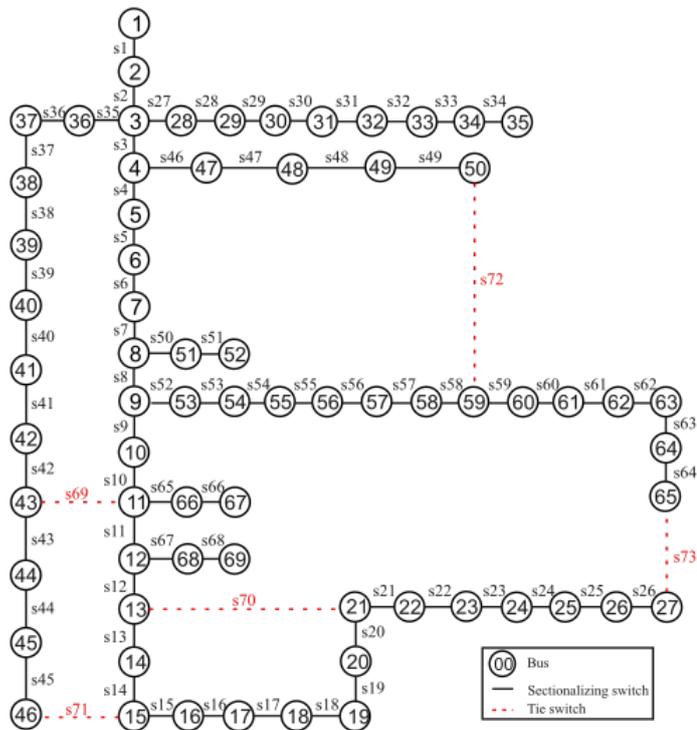
O sistema 94-Barras de Su e Lee (2003) é um sistema real de Taiwan, com tensão

Figura 11 – Sistema 33-Barras de Baran e Wu (1989).



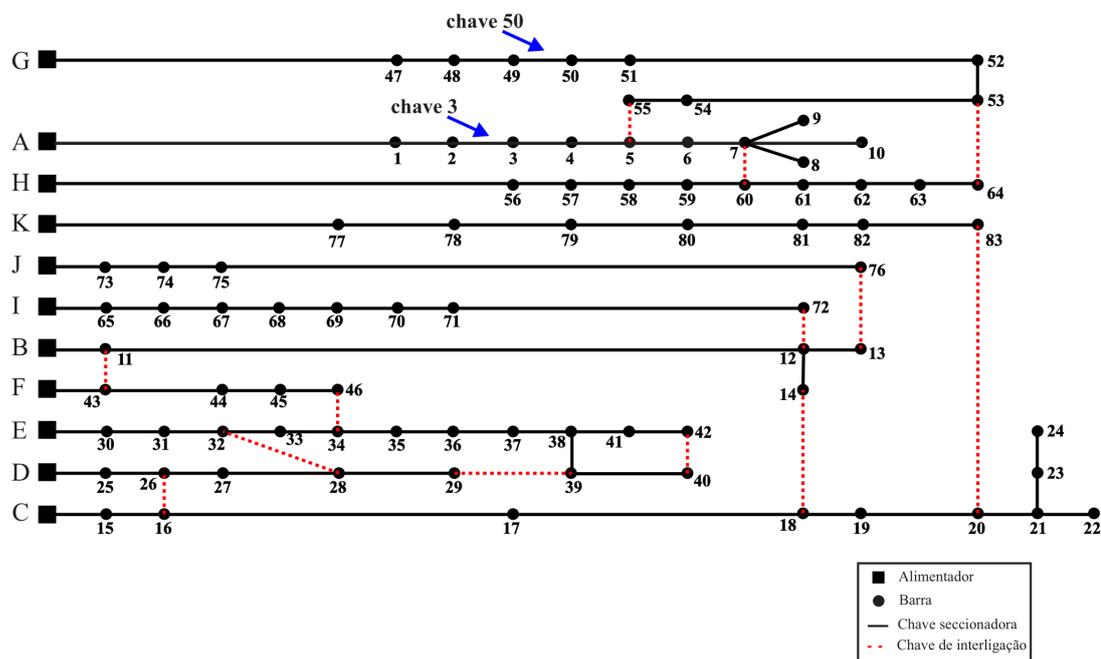
Fonte: (PEGADO, 2019).

Figura 12 – Sistema 69-Barras de Savier e Das (2007).



Fonte: (PEGADO, 2019).

Figura 13 – Sistema 94-Barras de Su e Lee (2003).



Fonte: (PEGADO, 2019).

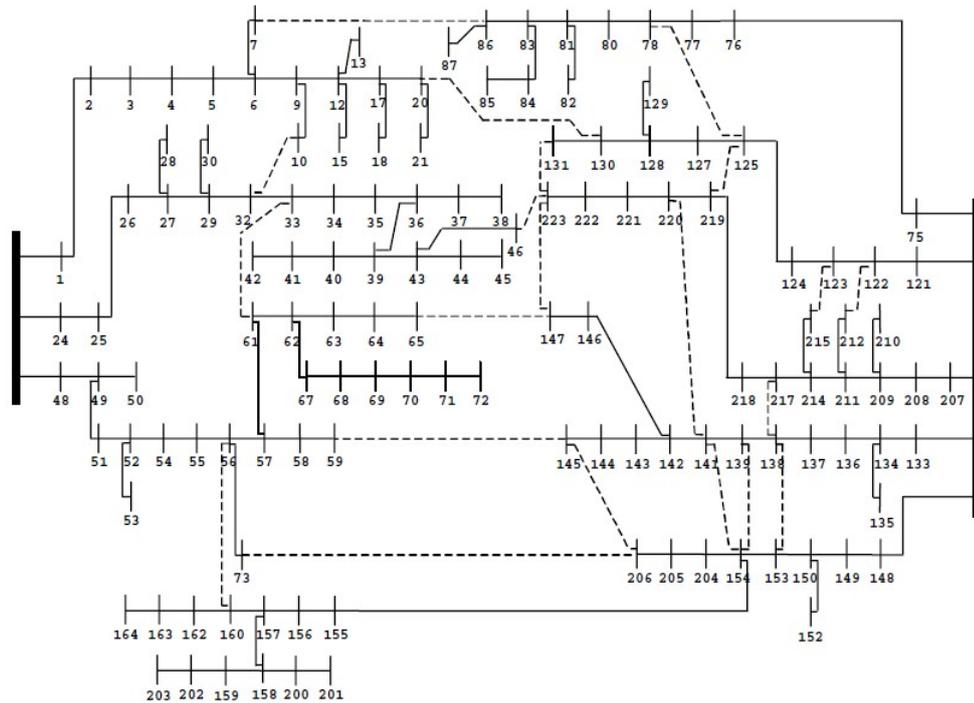
de 11,4 kV. Sua topologia apresenta 11 subestações, 83 chaves seccionadoras (s1 a s83) e 13 chaves de interligação (s83 a s96). Para reconfiguração por força bruta ou busca intensiva, seriam 2^{96} , ou mais de $7,92 \cdot 10^{28}$ testes. Com o fechamento das chaves de interligação são formadas 13 malhas, ou seja, o sistema é de 13 dimensões. Com as chaves de interligação abertas o sistema apresenta 532 kW de perdas nas linhas. O sistema está representado na Figura 13.

Por fim, foi utilizado um sistema ainda maior e real. O sistema 135-Barras, apresentado por Mantovani, Casari e Romero (2000), possui 135 barras, tensão de 13,8 kV, potência base de 100 MVA e 2 subestações. São 156 chaves, sendo 135 chaves seccionadoras, de s1 a s135 e 21 chaves de interligação, de s136 a s156. Para reconfiguração por força bruta ou busca intensiva, seriam 2^{156} , ou mais de $9,13 \cdot 10^{46}$ testes. Com o fechamento das chaves de interligação formam-se 21 malhas. Com as chaves de interligação abertas o sistema possui 319,98 kW de perdas ativas. O sistema está representado na Figura 14.

O algoritmo foi implementado na linguagem *Python* e as simulações foram realizadas em uma máquina com processador *Intel Core i7-7500U CPU @ 2,70 GHz* e 8 GB de memória RAM.

O cálculo do fluxo de potência é obtido a partir do método de injeção de correntes (MIC), implementado no OpenDSS, como explicado no Capítulo 3. É válido salientar que todos os valores de perdas presentes neste trabalho são provenientes dos cálculos de fluxo de potência do OpenDSS, inclusive para as soluções obtidas por trabalhos de outros

Figura 14 – Sistema 135-Barras de Mantovani, Casari e Romero (2000)



Fonte: (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000).

autores da literatura. Essa decisão foi tomada de forma a padronizar os cálculos para que não haja diferenças de medição de perdas para cada solução apresentada.

6.2 Testes com Distância Elétrica

É interessante comentar os resultados da geração de solução inicial por distância elétrica. O algoritmo gerou boas soluções a serem entregues ao algoritmo de Busca Tabu nos quatro sistemas apresentados, como pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 – As soluções iniciais geradas pelo algoritmo de Distância Elétrica para os quatro sistemas.

Sistema	Solução inicial padrão	Solução Inicial com Distância Elétrica	Redução
33-Barras	s33, s37, s35, s36, s34 202,27 kW	s7, s28, s10, s17, s14 146,52 kW	27,69%
69-Barras	s72, s69, s71, s70, s73 224,7 kW	s58, s42, s14, s17, s26 132,03 kW	41,24%
94-Barras	s96, s88, s91, s87, s89, s94, s95, s93, s92, s90, s84, s85, s86 532,8 kW	s96, s88, s82, s72, s89, s94, s95, s37, s92, s90, s84, s7, s86 501,89 kW	5,8%
135-Barras	s137, s141, s138, s145, s146, s136, s150, s152, s143, s156, s142, s149, s147, s153, s140, s155, s154, s144, s151, s148, s139 319,99 kW	s137, s141, s138, s145, s146, s136, s150, s120, s143, s98, s55, s149, s147, s106, s140, s155, s154, s79, s151, s89, s139 318,83 kW	0,36%

Desta maneira, evidencia-se que o método de distância elétrica é eficaz para entregar

boas soluções iniciais, apresentando reduções nas perdas para os sistemas analisados utilizando baixo custo computacional.

6.3 Testes com Busca Tabu

6.3.1 Resultados para o sistema 33-Barras

Para a realização de testes do algoritmo, por padrão, adotou-se um número máximo de iterações $MaxIter = 2000$. Usou-se os valores de 15 e 30 para $BTMax$ (condição de parada de número máximo de iterações sem melhora); usou-se os valores de 5 e 15 (múltiplos do número de dimensões do sistema) para NNb (número de vizinhos gerados por iteração) e os valores de 2, 8 e 15 para o tamanho da Lista Tabu. Cada combinação possível com os parâmetros supracitados foi testada em 100 ensaios.

A solução ótima apresentada pelo algoritmo foi abrir as chaves s7, s9, s14, s32 e s37. Essa configuração apresentou um valor de perdas de potência nas linhas de 139,55 kW, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 31,14% das perdas em relação ao sistema antes da reconfiguração. O tempo médio para realização de um ensaio foi de 0,5 s.

Na Tabela 13 são apresentados os resultados dos testes combinando de diversas maneiras os parâmetros. Pode-se notar que para um maior $BTMax$ ou maior NNb a solução ótima é apresentada com mais frequência, enquanto para T há uma não linearidade, de forma que um valor em torno de 8 seja, na maioria das vezes, melhor que o valor baixo como 2 ou alto como 15.

Tabela 13 – Resultados para o sistema 33-Barras variando $BTMax$, T e NNb em 100 ensaios.

BTMax	NNb	T	Média de Perdas (kW)	Desvio padrão (kW)	Pior Solução	Perdas (kW)	N.º de soluções ótimas
15	5	2	142,41	4,1338	s7, s28, s10, s15, s14	155,01	53
15	5	8	142,45	5,0365	s7, s28, s10, s15, s14	155,01	73
15	5	15	142,55	4,8076	s7, s28, s10, s16, s14	150,26	72
15	15	2	139,62	0,3387	s7, s28, s10, s36, s14	142,46	93
15	15	8	139,91	0,7415	s7, s28, s10, s36, s14	142,46	76
15	15	15	140,06	0,9195	s7, s28, s10, s36, s14	142,46	71
30	5	2	140,39	2,4767	s7, s28, s10, s16, s14	150,26	83
30	5	8	139,62	0,4581	s7, s28, s11, s36, s14	143,17	98
30	5	15	139,55	0	-	-	100
30	15	2	139,57	0,1637	s7, s28, s10, s32, s14	140,72	98
30	15	8	139,64	0,3427	s7, s28, s11, s32, s14	141,64	93
30	15	15	139,71	0,47	s7, s28, s10, s36, s14	142,46	87

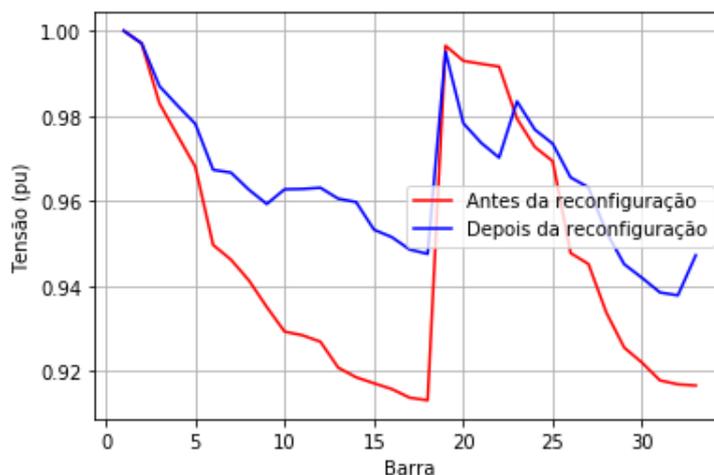
Em comparação com outros métodos presentes na literatura, o algoritmo proposto apresentou melhores resultados, como pode ser visto na Tabela 14. Todos os métodos passaram por 100 execuções e tiveram os mesmos parâmetros: $BTMax = 30$, $NNb = 15$ e $T = 5$. O algoritmo apresentado passou pelas 100 execuções de maneira consideravelmente mais rápida que os demais e apresentou 100% de eficácia ao atingir a solução ótima apresentada pela literatura em todas as execuções.

Tabela 14 – Resultados de diferentes métodos da literatura para o sistema 33-Barras.

Método	Média de perdas (kW)	Desvio padrão	Tempo (s)	Pior solução	N.º de soluções globais
Proposto	139,55	0	31	-	100
(ABDELAZIZ <i>et al.</i> , 2010)	141,54	2,0806	105	s33, s28, s9, s36, s34 146,37 kW	36
(ANDRADE; FERREIRA, 2018)	139,82	0,9014	60	s6, s37, s11, s32, s34 144,42 kW	62
(JEON; KIM, 2000)	139,73	0,7436	90	s33, s28, s10, s32, s34 143,94 kW	93

A aplicação do método também resultou em considerável melhora no perfil de tensão do sistema. A menor tensão de barramento, que anteriormente era de 0,9132 pu na barra 18, passa a ser de 0,94 pu na barra 32 após a reconfiguração e obtenção da solução ótima. O efeito da reconfiguração nas tensões das barras pode ser observado na Figura 15, que relaciona o nível de tensão com as barras.

Figura 15 – Tensões antes e depois da reconfiguração de acordo com as barras para o sistema 33-Barras.



Fonte: Autoria própria (2021).

6.3.2 Resultados para o sistema 69-Barras

Assim como para o sistema 33-Barras, para a realização de testes do algoritmo para o sistema 69-Barras adotou-se, por padrão, um número máximo de iterações $MaxIter = 2000$. Usou-se os valores de 20 e 30 para $BTMax$; usou-se os valores de 5 e 15 para NNb e os valores de 5, 10 e 15 para o tamanho da Lista Tabu. Cada combinação possível com os parâmetros supracitados foi testada em 100 ensaios.

A solução ótima apresentada pelo algoritmo foi abrir as chaves s14, s55, s61, s69 e s70. Essa configuração apresentou um valor de perdas de potência nas linhas de 98,47 kW, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 56,17% em relação ao sistema não reconfigurado. O tempo médio para realização de um ensaio foi de 1,4 s.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados dos testes combinando de todas as maneiras possíveis os parâmetros supracitados. Pode-se notar que, neste caso, o valor de $BTMax$ foi relativamente irrelevante, porém, para quanto maior o NNb com maior frequência a solução ótima é apresentada, enquanto para T um valor até 15 é interessante, porém, de acordo com testes realizados, valores maiores que 20 tornam a diminuir o rendimento do algoritmo.

Tabela 15 – Resultados para o sistema 69-Barras variando $BTMax$, T e NNb em 100 ensaios.

BTMax	NNb	T	Média de Perdas (kW)	Desvio padrão (kW)	Pior Solução	Perdas (kW)	N.º de soluções ótimas
20	5	5	100,78	3,5034	s55, s41, s13, s18, s96	115,75	33
20	5	10	99,87	1,4216	s55, s69, s12, s18, s96	101,79	38
20	5	15	100,51	2,6087	s58, s41, s13, s20, s61	115,60	30
20	15	5	98,53	0,6304	s55, s10, s13, s70, s63	104,81	80
20	15	10	98,47	0,0030	s55, s69, s14, s70, s61	98,48	91
20	15	15	98,47	0	-	-	100
30	5	5	100,57	3,0299	s58, s41, s13, s18, s61	115,62	33
30	5	10	100,89	3,3454	s58, s41, s13, s18, s61	115,62	32
30	5	15	100,28	2,6123	s55, s41, s13, s18, s63	115,75	32
30	15	5	98,55	0,6387	s55, s10, s13, s70, s63	104,82	84
30	15	10	98,47	0,0030	s55, s69, s14, s70, s61	98,48	94
30	15	15	98,47	0	-	-	100

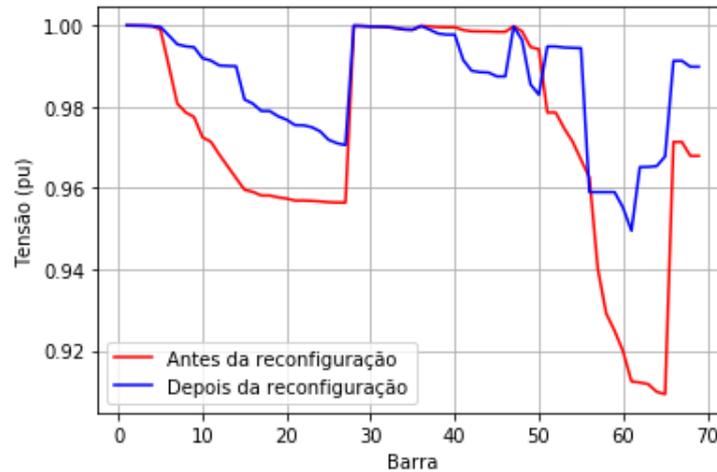
Em comparação com outros métodos presentes na literatura e implementados para testes, o algoritmo proposto apresentou melhores resultados, como pode ser visto na Tabela 16. Todos os métodos passaram por 100 execuções e tiveram os mesmos parâmetros: $BTMax = 20$, $NNb = 15$ e $T = 15$. O algoritmo apresentado passou pelas 100 execuções de maneira consideravelmente mais rápida que os algoritmos de Abdelaziz *et al.* (2010) e de Jeon e Kim (2000), enquanto foi levemente mais lento que o algoritmo de Andrade e Ferreira (2018), porém, foi o único a atingir 100% de eficácia apresentando a solução ideal de acordo com a literatura em todas as execuções.

Tabela 16 – Resultados de diferentes métodos da literatura para o sistema 69-Barras.

Método	Média de perdas (kW)	Desvio padrão	Tempo (s)	Pior solução	N.º de soluções globais
Proposto	98,47	0	111	-	100
(ABDELAZIZ <i>et al.</i> , 2010)	99,24	3,1873	149	s55, s69, s13, s70, s73 121,04 kW	53
(ANDRADE; FERREIRA, 2018)	98,55	0,5771	107	s55, s10, s14, s70, s61 104,12 kW	88
(JEON; KIM, 2000)	98,48	0,0035	159	s55, s69, s14, s70, s61 98,50 kW	98

A aplicação do método também resultou em considerável melhora no perfil de tensão do sistema. A menor tensão de barramento, que anteriormente era de 0,9092 pu na barra 65, passa a ser de 0,95 pu na barra 61 após a reconfiguração e obtenção da solução ótima. O efeito da reconfiguração nas tensões das barras pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Tensões antes e depois da reconfiguração de acordo com as barras para o sistema 69-Barras.



Fonte: Autoria própria (2021).

6.3.3 Resultados para o sistema 94-Barras

Da maneira que foi realizado com os sistemas anteriores, para a realização de testes do algoritmo para o sistema 94-Barras adotou-se, por padrão, um número máximo de iterações $MaxIter = 2000$. Usou-se os valores de 5 e 15 para $BTMax$; usou-se os valores de 13 e 26 para NNb e os valores de 10, 20 e 30 para o tamanho da Lista Tabu. Cada combinação possível com os parâmetros supracitados foi testada em 100 ensaios.

A solução ótima apresentada pelo algoritmo foi abrir as chaves s55, s7, s86, s72, s13, s89, s90, s83, s92, s39, s34, s42 e s62. Essa configuração apresentou um valor de perdas de potência nas linhas de 470,67 kW, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 11,66% em relação ao sistema não reconfigurado. O tempo médio para realização de um ensaio foi de 1,2 s.

Na Tabela 17 são apresentados os resultados dos testes combinando de todas as maneiras possíveis os parâmetros. Pode-se notar que, neste caso, os valores de $BTMax$ e NNb foram relevantes, visto que quanto maiores tais valores maior o rendimento do algoritmo, enquanto para T um valor até 20 é interessante, porém, de acordo com testes realizados, valores a partir de 30 tornam a diminuir o rendimento do algoritmo.

Em comparação com outros métodos presentes na literatura e implementados para testes, o algoritmo proposto apresentou melhores resultados, como pode ser visto na Tabela 18. Todos os métodos passaram por 100 execuções e tiveram os mesmos parâmetros: $BTMax = 15$, $NNb = 13$ e $T = 10$. O método proposto passou pelas 100 execuções de maneira consideravelmente mais rápida que os demais algoritmos, sendo também o único a atingir eficácia de 100% ao apresentar a melhor solução de acordo com a literatura.

Tabela 17 – Resultados para o sistema 94-Barras variando $BTMax$, T e NNb em 100 ensaios.

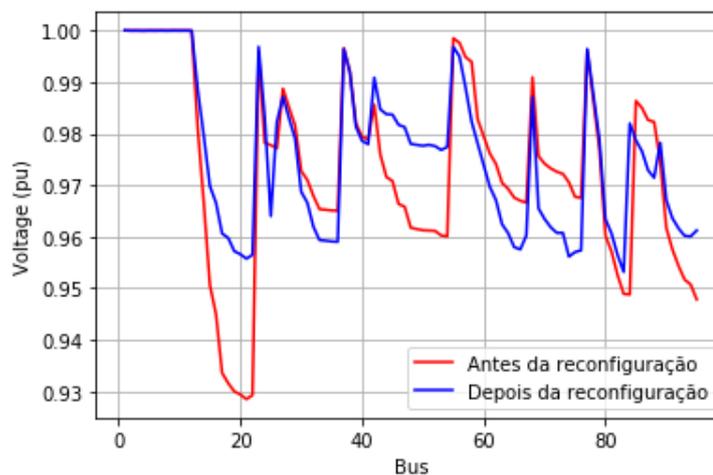
BTMax	NNb	T	Média de Perdas (kW)	Desvio padrão (kW)	Pior Solução	Perdas (kW)	N.º de soluções ótimas
5	13	10	471,52	4,6171	s96, s88, s82, s72, s89, s94, s42, s36, s92, s90, s55, s7, s86	503,13	90
5	13	20	471,51	4,5679	s96, s88, s82, s72, s89, s94, s42, s36, s92, s90, s55, s7, s86	503,13	90
5	13	30	471,27	2,5136	s96, s88, s82, s72, s89, s34, s42, s36, s92, s90, s55, s7, s86	488,91	82
5	26	10	471,10	3,2570	s96, s88, s82, s72, s89, s94, s42, s36, s92, s90, s55, s7, s86	503,13	92
5	26	20	471,55	4,8239	s96, s88, s82, s72, s89, s94, s42, s36, s92, s90, s55, s7, s86	503,13	89
5	26	30	470,82	0,6481	s63, s88, s82, s72, s89, s34, s42, s36, s92, s90, s55, s7, s86	474,21	93
15	13	10	470,67	0	-	-	100
15	13	20	470,67	0	-	-	100
15	13	30	470,67	0	-	-	100
15	26	10	470,67	0	-	-	100
15	26	20	470,67	0	-	-	100
15	26	30	470,67	0	-	-	100

Tabela 18 – Resultados de diferentes métodos vistos na literatura para o sistema 94-Barras.

Método	Média de perdas (kW)	Desvio padrão	Tempo (s)	Pior solução	N.º de soluções globais
Proposto	470,67	0	190	-	100
(ABDELAZIZ <i>et al.</i> , 2010)	498,67	18,5498	397	s96, s88, s91, s87, s89, s94, s95, s93, s92, s90, s84, s85, s86 532,81 kW	0
(ANDRADE; FERREIRA, 2018)	475,50	11,4318	196	s96, s88, s91, s87, s89, s34, s95, s93, s92, s90, s84, s85, s86 510,39 kW	41
(JEON; KIM, 2000)	475,28	11,7134	221	s96, s88, s91, s87, s89, s33, s95, s93, s92, s90, s84, s85, s86 511,39 kW	45

A aplicação do método também resultou em considerável melhora no perfil de tensão do sistema. A menor tensão de barramento, que anteriormente era de 0,9285 pu na barra 21, passa a ser de 0,95 pu na barra 83 após a reconfiguração e obtenção da solução ótima. O efeito da reconfiguração nas tensões das barras pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Tensões antes e depois da reconfiguração de acordo com as barras para o sistema 94-Barras.



Fonte: Autoria própria (2021).

6.3.4 Resultados para o sistema 135-Barras

Para a realização de testes do algoritmo para o sistema 135-Barras adotou-se, por padrão, um número máximo de iterações $MaxIter = 2000$. Usou-se os valores de 10 e 25 para $BTMax$ (condição de parada de número máximo de iterações sem melhora); usou-se os valores de 21 e 42 (múltiplos do número de dimensões do sistema) para NNb (número de vizinhos gerados por iteração) e os valores de 5, 10 e 20 para o tamanho da Lista Tabu. Cada combinação possível com os parâmetros supracitados foi testada em 100 ensaios.

A solução ótima apresentada pelo algoritmo foi abrir as chaves s137, s96, s138, s145, s146, s7, s150, s118, s141, s156, s53, s90, s147, s106, s51, s155, s126, s144, s151, s148, s38. Essa configuração apresentou um valor de perdas de potência nas linhas de 279,97 kW, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 12,5% em relação ao sistema não reconfigurado. O tempo médio para realização de um ensaio foi de 3,6 s.

Embora a solução encontrada seja de boa qualidade e proporcione considerável redução de perdas para o sistema, outros autores na literatura encontraram outras soluções. A solução obtida supera a solução de Mantovani, Casari e Romero (2000), cujas perdas são de 285,43 kW; supera a solução de Braz (2010), cuja perdas são de 280,66 kW; mas é ligeiramente inferior à solução de Carreno, Romero e Padilha-Feltrin (2008), cujas perdas são de 279,86 kW. Os valores das perdas para os três trabalhos supracitados foram obtidas pelo OpenDSS, assim como para o presente trabalho, de forma a obter tais valores através do mesmo método de cálculo de fluxo de potência empregado pelo OpenDSS.

Na Tabela 19 são apresentados os resultados dos testes combinando de diversas maneiras os parâmetros supracitados. Para cada combinação de parâmetros o algoritmo

Tabela 19 – Resultados para o sistema 135-Barras variando *BTMax* e *NNb* em 100 ensaios.

BTMax	NNb	T	Média de Perdas (kW)	Desvio padrão (kW)	Pior Solução	Perdas (kW)	N.º de soluções ótimas
10	21	5	280,39	1,0994	s137, s141, s138, s145, s146, s136, s150, s152, s143, s97, s55, s149, s147, s106, s51, s155, s126, s144, s151, s148, s38	284,60	73
10	21	10	279,98	0,0195	s137, s96, s138, s145, s84, s7, s150, s118, s141, s135, s54, s90, s147, s106, s51, s128, s126, s144, s151, s148, s38	280,05	93
10	21	20	279,98	0,0195	s137, s96, s138, s145, s84, s7, s150, s118, s141, s135, s54, s90, s147, s106, s51, s128, s126, s144, s151, s148, s38	280,05	93
10	42	5	280,16	0,7138	s137, s141, s138, s145, s84, s7, s150, s96, s143, s135, s54, s149, s147, s106, s51, s128, s126, s144, s151, s148, s38	283,40	68
10	42	10	280,14	0,7492	s137, s141, s138, s145, s84, s7, s150, s96, s143, s135, s54, s149, s147, s106, s51, s128, s126, s144, s151, s148, s38	283,40	61
10	42	20	280,10	0,6746	s137, s141, s138, s145, s84, s7, s150, s96, s143, s135, s54, s149, s147, s106, s51, s128, s126, s144, s151, s148, s38	283,40	61
25	21	5	280,15	0,7333	s137, s141, s138, s145, s146, s7, s150, s152, s143, s97, s142, s149, s147, s106, s51, s155, s126, s144, s151, s148, s38	284,00	85
25	21	10	280,02	0,4	s137, s96, s138, s145, s84, s7, s150, s152, s143, s97, s142, s149, s147, s106, s51, s155, s126, s144, s151, s148, s38	284,00	90
25	21	20	279,97	0,0109	s137, s96, s138, s145, s84, s7, s150, s118, s141, s135, s54, s90, s147, s106, s51, s128, s126, s144, s151, s148, s38	280,05	98
25	42	5	280,12	0,6557	s137, s141, s138, s145, s146, s7, s150, s96, s143, s135, s54, s149, s147, s106, s51, s128, s126, s144, s151, s148, s38	283,40	58
25	42	10	280,20	0,8173	s137, s141, s138, s145, s146, s7, s150, s96, s143, s135, s142, s149, s147, s106, s51, s155, s126, s144, s151, s148, s35	283,57	59
25	42	20	280,15	0,7325	s137, s141, s138, s145, s84, s7, s150, s96, s143, s135, s54, s149, s147, s106, s51, s128, s126, s144, s151, s148, s38	283,40	53

foi executado 100 vezes. Pode-se notar que, para este sistema, o algoritmo não apreciou uma grande geração de vizinhos, ou seja, as execuções com 21 vizinhos saíram-se melhor do que as execuções com 42 vizinhos, fixando-se os outros parâmetros. Já em relação ao *BTMax*, para as mesmas condições houve uma ligeira melhora ou piora na geração de soluções ótimas (no caso, a melhor solução entregue pelo algoritmo, descrita no parágrafo anterior). Já para *T*, os valores de 10 e 20 saíram-se melhores que 5, mas não em todos os casos. Em resumo, este sistema foi mais desafiador que os anteriores no sentido de realizar o ajuste fino destes parâmetros, porém ainda assim obtendo uma grande convergência em obter soluções de boa qualidade, haja visto a média de perdas obtida nas 100 iterações e a quantidade de soluções ótimas iguais para 100 iterações.

Em comparação com outros métodos presentes na literatura e implementados para testes, o algoritmo proposto apresentou, na média, melhores resultados, como pode ser visto na Tabela 20. Todos os métodos passaram por 100 execuções e tiveram os mesmos parâmetros: $BTMax = 25$, $NNb = 21$ e $T = 20$. O método proposto saiu-se melhor que os demais nos quesitos média de perdas, desvio padrão e tempo, o que significa que

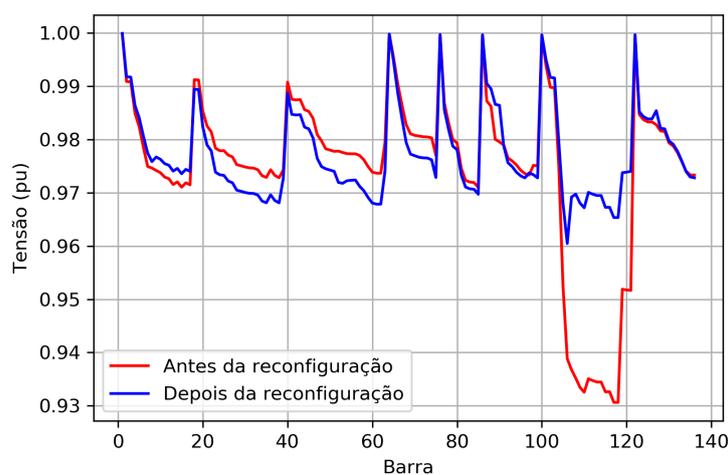
na média as soluções trazidas pelo método são de qualidade e o tempo de execução é consideravelmente menor. Porém, melhores soluções foram trazidas pelos outros algoritmos.

Tabela 20 – Resultados de diferentes métodos vistos na literatura para o sistema 135-Barras.

Método	Média de perdas (kW)	Desvio padrão	Tempo (s)	Melhor solução
Proposto	279,97	0,0109	394	s137, s96, s138, s145, s146, s7, s150, s118, s141, s156, s53, s90, s147, s106, s51, s155, s126, s144, s151, s148, s38 279,97 kW
(ABDELAZIZ <i>et al.</i> , 2010)	285,63	9,8876	1622	s137, s96, s138, s145, s146, s7, s150, s118, s141, s135, s142, s90, s147, s106, s51, s155, s126, s144, s151, s148, s35 279,89 kW
(ANDRADE; FERREIRA, 2018)	281,41	4,2148	1073	s137, s96, s138, s145, s84, s7, s150, s118, s141, s156, s53, s90, s147, s106, s51, s128, s126, s144, s151, s148, s139 279,89 kW
(JEON; KIM, 2000)	280,68	1,5526	1166	s137, s96, s138, s145, s146, s7, s150, s118, s141, s135, s142, s90, s147, s106, s51, s155, s126, s144, s151, s148, s35 279,87 kW

A aplicação do método também resultou em considerável melhora no perfil de tensão do sistema. A menor tensão de barramento, que anteriormente era de 0,9306 pu na barra 116, passa a ser de 0,9604 pu na barra 105 após a reconfiguração e obtenção da solução ótima proposta pelo algoritmo. O efeito da reconfiguração nas tensões das barras pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 – Tensões antes e depois da reconfiguração de acordo com as barras para o sistema 135-Barras.



Fonte: Autoria própria (2021).

7 Conclusão

Nesse trabalho foi desenvolvida uma ferramenta computacional capaz de realizar reconfiguração de redes de distribuição utilizando o *software* OpenDSS aliado à meta-heurística Busca Tabu e ao conceito de Distância Elétrica. A união dos dois métodos propostos pôde fornecer boas soluções de reconfiguração com rapidez e baixo custo computacional.

Foi proposto um novo método de obtenção de solução inicial baseado no conceito de distância elétrica, onde obtém-se a conectividade entre barras a fim de inferir se as perdas em determinada linha são maiores ou menores que em outras linhas. Com esse conceito, foi possível avançar consideravelmente na obtenção de uma boa solução, utilizando apenas de cálculos de fluxo de potência a partir da configuração atual da rede.

Além disso, foi proposto um método de geração de vizinhos a ser aplicado no algoritmo de busca tabu ainda não visto na literatura, que consiste em gerar um vizinho alterando apenas uma chave por dimensão do sistema de distribuição. Com essa estratégia foi possível fazer um método de busca tabu descendente em relação às perdas.

A grande vantagem de trabalhar com o OpenDSS é a garantia de execução do fluxo de potência com qualidade. O *software* fornece todos os dados necessários, como tensões, potências, correntes, admitâncias etc. de forma confiável, sem que seja necessário ao usuário preocupar-se com a acurácia de tais dados. Além disso, o OpenDSS é consideravelmente utilizado nas empresas e na academia, sendo inclusive recomendado pela ANEEL para sistemas de médio e grande portes.

Os métodos apresentados foram testados em quatro sistemas amplamente utilizados na literatura técnica onde foi possível comprovar a eficácia do algoritmo.

Como sugestões para futuros trabalhos, recomenda-se:

- Testar o algoritmo em sistemas maiores e com presença de geração distribuída;
- Desenvolver interface amigável ao usuário para o algoritmo;
- Preparar o algoritmo para lidar com mudanças de carga em tempo real.

Referências

- ABDELAZIZ, A. Y. *et al.* Distribution system reconfiguration using a modified tabu search algorithm. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 80, n. 8, p. 943–953, 2010. Citado 6 vezes nas páginas 18, 41, 58, 59, 61 e 64.
- ANDRADE, B. A. R. de; FERREIRA, N. R. Simulated annealing and tabu search applied on network reconfiguration in distribution systems. In: IEEE. *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. [S.l.], 2018. p. 1–6. Citado 4 vezes nas páginas 58, 59, 61 e 64.
- ANEEL. Módulo 8-qualidade da energia elétrica. *ANEEL Resolução Normativa*, v. 424, p. 2010, 2010. Citado na página 31.
- ANEEL. Módulo 1-introdução. *ANEEL Resolução Normativa*, v. 424, p. 2010, 2018. Citado na página 13.
- BAGHERI, A.; BAGHERI, M.; LORESTANI, A. Optimal reconfiguration and dg integration in distribution networks considering switching actions costs using tabu search algorithm. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Springer, p. 1–20, 2020. Citado na página 19.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Power Engineering Review*, IEEE, v. 9, n. 4, p. 101–102, 1989. Citado 7 vezes nas páginas 9, 17, 38, 53, 54, 72 e 73.
- BRAZ, H. D. d. M. Configuração de sistemas de distribuição usando um algoritmo genético sequencial. Universidade Federal de Campina Grande, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 62.
- CARRENO, E. M.; ROMERO, R.; PADILHA-FELTRIN, A. An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 23, n. 4, p. 1542–1551, 2008. Citado na página 62.
- CHIANG, H.-D.; JEAN-JUMEAU, R. Optimal network reconfigurations in distribution systems: Part 1: A new formulation and a solution methodology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 4, p. 1902–1909, 1990. Citado na página 41.
- CIVANLAR, S. *et al.* Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988. Citado 3 vezes nas páginas 17, 47 e 71.
- DORIGO, M.; STUTZLE, T. *Handbook of Metaheuristics*, Glover F. & Kochenberger GA editors. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2003. Citado na página 14.
- DUGAN, R. C. Reference guide: The open distribution system simulator (opensds). *Electric Power Research Institute, Inc*, v. 7, p. 29, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- DUGAN, R. C.; MCDERMOTT, T. E. An open source platform for collaborating on smart grid research. In: IEEE. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [S.l.], 2011. p. 1–7. Citado na página 20.

- FANG, S.; ZHANG, X. A hybrid algorithm of particle swarm optimization and tabu search for distribution network reconfiguration. *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi, v. 2016, 2016. Citado na página 18.
- FEOFILOFF, P.; KOHAYAKAWA, Y.; WAKABAYASHI, Y. Uma introdução sucinta à teoria dos grafos. 2011. Citado na página 38.
- FONTAN, D. M. S. *et al.* Reconfiguração de sistemas de distribuição utilizando um algoritmo evolutivo. Universidade Federal de Campina Grande, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 52.
- FRANCO, J. *et al.* An efficient implementation of tabu search in feeder reconfiguration of distribution systems. In: IEEE. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [S.l.], 2012. p. 1–8. Citado na página 18.
- FREITAS, P. R. R. d. *Impacto de funções inteligentes de inversores de sistemas fotovoltaicos na operação de redes de distribuição de energia elétrica*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- FREITAS, P. R. R. de. Modelos avançados de análise de redes elétricas inteligentes utilizando o software opendss. 2015. Citado na página 27.
- GARCÍA-MARTÍNEZ, S.; ESPINOSA-JUÁREZ, E. Optimal reconfiguration of electrical networks by applying tabu search to decrease voltage sag indices. *Electric Power Components and Systems*, Taylor & Francis, v. 41, n. 10, p. 943–959, 2013. Citado na página 18.
- GARCÍA-MARTÍNEZ, S.; ESPINOSA-JUÁREZ, E.; PÉREZ-ROJAS, C. Optimal location of voltage sag monitors considering electrical network reconfiguration in presence of dg by using tabu search. In: IEEE. *2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*. [S.l.], 2018. p. 197–202. Citado na página 19.
- GLOVER, F. Tabu search—part i. *ORSA Journal on computing*, Informs, v. 1, n. 3, p. 190–206, 1989. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 30.
- GLOVER, F.; TAILLARD, E. A user’s guide to tabu search. *Annals of operations research*, Springer, v. 41, n. 1, p. 1–28, 1993. Citado na página 33.
- GOMES, A. Uma introdução à busca tabu. *Departamento de Ciência da Computação, Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, SP, Brasil*. Recuperado de: <http://www.ime.usp.br/~gold/cursos/2009/mac5758/AndreBuscaTabu.pdf>, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 7, n. 3, p. 1484–1491, 1992. Citado na página 17.
- GUIMARAES, M. A.; CASTRO, C. A. Reconfiguration of distribution systems for loss reduction using tabu search. In: *IEEE Power System Computation Conference (PSCC)*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 41.

- GUIMARÃES, M. A. do N. *Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica utilizando algoritmos de Busca Tabu*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, 2005. Citado na página 40.
- HINES, P. *et al.* The topological and electrical structure of power grids. In: IEEE. *2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences*. [S.l.], 2010. p. 1–10. Citado na página 35.
- JEON, Y.-J.; KIM, J.-C. Network reconfiguration in radial distribution system using simulated annealing and tabu search. In: IEEE. *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37077)*. [S.l.], 2000. v. 4, p. 2329–2333. Citado 6 vezes nas páginas 18, 41, 58, 59, 61 e 64.
- JR, W. S.; GRAINGER, J. *Power system analysis*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 27.
- KAVITHA, T. *et al.* An $\tilde{O}(m^2n)$ algorithm for minimum cycle basis of graphs. *Algorithmica*, Springer, v. 52, n. 3, p. 333–349, 2008. Citado na página 38.
- LAVORATO, M. *et al.* Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 27, n. 1, p. 172–180, 2011. Citado na página 32.
- MANTOVANI, J. R.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. *Controle and Automacao*, p. 150–159, 2000. Citado 6 vezes nas páginas 9, 53, 55, 56, 62 e 78.
- MELLO, A. P. C. d. *et al.* Reconfiguração de redes de distribuição considerando multivariáveis e geração distribuída. Universidade Federal de Santa Maria, 2014. Citado na página 14.
- MERLIN, A. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration for an urban power distribution system. *Proc. of 5th PSCC, 1975*, v. 1, p. 1–18, 1975. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 39.
- MISHIMA, Y. *et al.* Method for minimum-loss reconfiguration of distribution system by tabu search. *Electrical Engineering in Japan*, Wiley Online Library, v. 152, n. 2, p. 18–25, 2005. Citado na página 18.
- PEARL, J. Heuristics: Intelligent search strategies for computer problem solving. 1 1984. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/5127296>>. Citado na página 32.
- PEGADO, R. d. A. Tese (Doutorado), 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/17174>>. Citado 12 vezes nas páginas 13, 18, 21, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 36, 54 e 55.
- PEPONIS, G.; PAPADOPOULOS, M.; HATZIARGYRIOU, N. Distribution network reconfiguration to minimize resistive line losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 10, n. 3, p. 1338–1342, 1995. Citado na página 17.
- PEREIRA, F. S. *Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônias de formigas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010. Citado na página 71.

- RADATZ, P. Modelos avançados de análise de redes elétricas inteligentes utilizando o software opendss. *São Paulo*, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 22, 24 e 25.
- SAVIER, J.; DAS, D. Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 22, n. 4, p. 2473–2480, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 9, 53 e 54.
- SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 4, n. 2, p. 1492–1498, 1989. Citado na página 17.
- SU, C.-T.; LEE, C.-S. Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 1022–1027, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 9, 53, 55 e 75.

Anexos

ANEXO A – Dados dos sistemas teste

Neste anexo são apresentados os dados completos dos sistemas utilizados nos testes dos Capítulos 5 e 6.

A.1 Sistema 5-Barras

O sistema 5-Barras é um sistema didático utilizado para exemplificar a geração de matriz de distância elétrica neste trabalho. Seus dados de linha e de barras estão disponíveis nas Tabelas A.1 e A.2, respectivamente. Os dados do sistema foram extraídos de Pereira (2010).

Tabela A.1 – Dados de linha do Sistema 5-Barras.

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R (pu)	Xl (pu)
1	1	2	0,0066	0,0033
2	1	3	0,0016	0,0006
3	2	3	0,0003	0,0002
4	2	4	0,0051	0,0005
5	3	4	0,0005	0,0005
6	3	5	0,0027	0,0012
7	4	5	0,0033	0,0015

Tabela A.2 – Dados de barra do Sistema 5-Barras.

Barra	Pl (pu)	Ql (pu)
1	0	0
2	1,28	1,28
3	0,32	0,16
4	1,6	0,8
5	0,74	0,37

A.2 Sistema 16-Barras

O sistema 16-Barras proposto por Civanlar *et al.* (1988) possui três subestações, 13 chaves de seccionamento e 3 chaves de interligação. Os dados de impedância das linhas e as cargas e capacitâncias estão dispostos na Tabela A.3.

Tabela A.3 – Dados do Sistema 16-Barras.

Barra (De)	Barra (Para)	R (Ω /km)	Xl (Ω /km)	Carga Barra (Para)		Capacitância (Mvar) Barra (Para)
				PI (MW)	QI (Mvar)	
1	4	0,075	0,1	2	1,6	-
4	5	0,08	0,11	3	1,5	1,1
4	6	0,09	0,18	2	0,8	1,2
6	7	0,04	0,04	1,5	1,2	-
2	8	0,11	0,11	4	2,7	-
8	9	0,08	0,11	5	3	1,2
8	10	0,11	0,11	1	0,9	-
9	11	0,11	0,11	0,6	0,1	0,6
9	12	0,08	0,11	4,5	2,0	3,7
3	13	0,11	0,11	1,0	0,9	-
13	14	0,09	0,12	1,0	0,7	1,8
13	15	0,08	0,11	1	0,9	-
15	16	0,04	0,04	2,1	1,0	1,8
5	11	0,04	0,04			
10	14	0,04	0,04			
7	16	0,09	0,12			

A.3 Sistema 33-Barras

O sistema 33-Barras 10 MVA de Baran e Wu (1989) possui possui 37 ramos e um alimentador de 12,66 kV. Na Tabela A.4 são apresentados os dados de entrada do sistema.

Tabela A.4 – Dados do Sistema 33-Barras.

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R (Ω \km)	Xl (Ω \km)	Imax (A)	Carga Barra (Para)	
						PI (kW)	QI (kvar)
1	1	2	0,0922	0,047	1000	100	60
2	2	3	0,493	0,2511	1000	90	40
3	3	4	0,3661	0,1864	1000	120	80
4	4	5	0,3811	0,1941	1000	60	30
5	5	6	0,8190	0,7070	1000	60	20
6	6	7	0,1872	0,6188	1000	200	100
7	7	8	0,7115	0,2351	1000	200	100
8	8	9	1,0299	0,7400	1000	60	20
9	9	10	1,0440	0,7400	1000	60	20
10	10	11	0,1967	0,0651	1000	45	30
11	11	12	0,3744	0,1298	1000	60	35
12	12	13	1,4680	1,1549	1000	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	1000	120	80
14	14	15	0,5909	0,5260	1000	60	10
15	15	16	0,7462	0,5449	1000	60	10
16	16	17	1,2889	1,7210	1000	60	20
17	17	18	0,7320	0,5739	1000	90	40
18	2	19	0,1640	0,1565	1000	90	40
19	19	20	1,5042	1,3555	1000	90	40
20	20	21	0,4095	0,4784	1000	90	40
21	21	22	0,7089	0,9373	1000	90	40
22	3	23	0,4512	0,3084	1000	90	50
23	23	24	0,8980	0,7091	1000	420	200
24	24	25	0,8959	0,7071	1000	420	200
25	6	26	0,2031	0,1034	1000	60	25
26	26	27	0,2842	0,1447	1000	60	25
27	27	28	1,0589	0,9338	1000	60	20
28	28	29	0,8043	0,7006	1000	120	70
29	29	30	0,5074	0,2585	1000	200	100
30	30	31	0,9745	0,9629	1000	150	70
31	31	32	0,3105	0,3619	1000	210	100
32	32	33	0,3411	0,5302	1000	60	40
33	25	29	0,5000	0,5000	1000	60	40
34	8	21	2,000	2,0000	1000		
35	12	22	2,0000	2,0000	1000		
36	9	15	2,0000	2,0000	1000		
37	18	33	0,5000	0,5000	1000		

A.4 Sistema 69-Barras

O sistema 69-Barras de Baran e Wu (1989) de 10 MVA é composto por 73 ramos, 68 chaves normalmente fechadas e uma subestação de 12,66 kV. Os dados desse sistema estão apresentados na Tabela A.5.

Tabela A.5 – Dados do Sistema 69-Barras.

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R ($\Omega \setminus k$)	Xl ($\Omega \setminus km$)	Carga Barra (Para)	
					PI (kW)	QI (kvar)
1	1	2	0,0005	0,0012	0	0
2	2	3	0,0005	0,0012	0	0
3	3	4	0,0015	0,0036	0	0
4	4	5	0,0251	0,0294	0	0
5	5	6	0,3660	0,1864	2,6	2,2
6	6	7	0,3811	0,1941	40,4	30
7	7	8	0,0922	0,0470	75	54
8	8	9	0,0493	0,0251	30	22
9	9	10	0,8190	0,2707	28	19
10	10	11	0,1872	0,0619	145	104
11	11	12	0,7114	0,2351	145	104
12	12	13	1,03	0,34	8	5
13	13	14	1,044	0,345	8	5,5
14	14	15	1,058	0,3496	0	0
15	15	16	0,1966	0,065	45,5	30
16	16	17	0,3744	0,1238	60	35
17	17	18	0,0047	0,00116	60	35
18	18	19	0,3276	0,1083	0	0
19	19	20	0,2106	0,069	1	0,6
20	20	21	0,3416	0,1129	114	81
21	21	22	0,014	0,0046	5	3,5
22	22	23	0,1591	0,0526	0	0
23	23	24	0,3463	0,1145	28	20
24	24	25	0,7488	0,2475	0	0
25	25	26	0,3089	0,1021	14	10
26	26	27	0,1732	0,0572	14	10
27	3	28	0,0044	0,0108	26	18,6
28	28	29	0,064	0,1565	26	18,6
29	29	30	0,3978	0,1315	0	0
30	30	31	0,0702	0,0232	0	0
31	31	32	0,351	0,116	0	0
32	32	33	0,839	0,2816	14	10
33	33	34	1,708	0,5646	19,5	14
34	34	35	1,474	0,4873	6	4
35	3	36	0,0044	0,0108	26	18,55
36	36	37	0,064	0,1565	26	18,55
37	37	38	0,1053	0,123	0	0
38	38	39	0,0304	0,0355	24	17
39	39	40	0,0018	0,0021	24	17
40	40	41	0,7283	0,8509	1,2	1,0
41	41	42	0,3100	0,3623	0	0
42	42	43	0,041	0,0478	6	4,3
43	43	44	0,0092	0,0116	0	0
44	44	45	0,1089	0,1373	39,22	26,3
45	45	46	0,009	0,0012	39,22	26,3
46	4	47	0,0034	0,0084	0	0
47	47	48	0,0851	0,2083	79	56,4
48	48	49	0,2898	0,7091	384,7	274,5
49	49	50	0,0822	0,2011	384,7	274,5
50	8	51	0,0928	0,0473	40,5	28,3

Tabela A.5 (*continuação*)

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R (Ω \k)	Xl (Ω \km)	Carga Barra (Para)	
					PI (kW)	QI (kvar)
51	51	52	0,3319	0,114	3,6	2,7
52	9	53	0,174	0,0886	4,35	3,5
53	53	54	0,203	0,1034	26,4	19
54	54	55	0,2842	0,1447	24	17,2
55	55	56	0,2813	0,1433	0	0
56	56	57	1,59	0,5337	0	0
57	57	58	0,7837	0,263	0	0
58	58	59	0,3042	0,1006	100	72
59	59	60	0,3861	0,1172	0	0
60	60	61	0,5075	0,2585	1244	888
61	61	62	0,0974	0,0496	32	23
62	62	63	0,145	0,0738	0	0
63	63	64	0,7105	0,3619	227	162
64	64	65	1,041	0,5302	59	42
65	11	66	0,2012	0,0611	18	13
66	66	67	0,0047	0,0014	18	13
67	12	68	0,7394	0,2444	28	20
68	68	69	0,0047	0,0016	28	20
69	11	43	0,5	0,5		
70	13	21	0,5	0,5		
71	15	46	1	0,5		
72	50	59	2	1		
73	27	65	1	0,5		

A.5 Sistema 94-Barras

O sistema de 94-nós e 100 MVA de Su e Lee (2003)) é um sistema de distribuição real da Companhia de Energia de Taiwan (TPC). Sua topologia possui 11 alimentadores de 11,4 kV. Os dados construtivos desse sistema são apresentados na Tabela A.6.

Tabela A.6 – Sistema 94-Barras

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R (Ω /km)	Xl (Ω /km)	Imax (A)	Carga Barra (Para)	
						Pl (MW)	Ql (Mvar)
1		A					
2		B					
3		C					
4		D					
5		E					
6		F					
7		G					
8		H					
9		I					
10		J					
11		K					
12	A	1	0,0324	0,1104	10000	0	0
13	1	2	0,2096	0,4304	10000	0,1	0,05
14	2	3	0,2358	0,4842	10000	0,3	0,2
15	3	4	0,0917	0,1882	10000	0,35	0,25
16	4	5	0,2096	0,4304	10000	0,22	0,1
17	5	6	0,0393	0,0807	10000	1,1	0,8
18	6	7	0,0405	0,138	10000	0,4	0,32
19	7	8	0,093736	0,192481	10000	0,3	0,2
20	7	9	0,210906	0,433082	10000	0,3	0,23
21	7	10	0,0524	0,1076	10000	0,3	0,26
22	B	11	0,0786	0,1614	10000	0	0
23	11	12	0,028383	0,057867	10000	1,2	0,8
24	12	13	0,0262	0,0538	10000	0,8	0,6
25	12	14	0,0786	0,1614	10000	0,7	0,5
26	C	15	0,1134	0,3864	10000	0	0
27	15	16	0,0524	0,1076	10000	0,3	0,15
28	16	17	0,008733	0,017933	10000	0,5	0,35
29	17	18	0,03144	0,06456	10000	0,7	0,4
30	18	19	0,0393	0,0807	10000	1,2	1
31	19	20	0,08515	0,17485	10000	0,3	0,3
32	20	21	0,2358	0,4842	10000	0,4	0,35
33	21	22	0,1572	0,3228	10000	0,05	0,02
34	21	23	0,1965	0,4035	10000	0,05	0,02
35	23	24	0,131	0,269	10000	0,05	0,01
36	D	25	0,0567	0,1932	10000	0,05	0,03
37	25	26	0,1048	0,2152	10000	0,1	0,06
38	26	27	0,2489	0,5111	10000	0,1	0,07
39	27	28	0,0243	0,0828	10000	1,8	1,3
40	28	29	0,0655	0,1345	10000	0,2	0,12
41	E	30	0,1965	0,396	10000	0	0
42	30	31	0,131	0,269	10000	1,8	1,6
43	31	32	0,131	0,269	10000	0,2	0,15
44	32	33	0,0262	0,0538	10000	0,2	0,1
45	33	34	0,1703	0,3497	10000	0,8	0,6
46	34	35	0,0524	0,1076	10000	0,1	0,06
47	35	36	0,4978	1,0222	10000	0,1	0,06
48	36	37	0,0393	0,0807	10000	0,02	0,01
49	37	38	0,0393	0,0807	10000	0,02	0,01
50	38	39	0,0786	0,1614	10000	0,02	0,01
51	39	40	0,1048	0,2152	10000	0,02	0,01
52	38	41	0,1965	0,4035	10000	0,2	0,16
53	41	42	0,2096	0,4304	10000	0,05	0,03
54	F	43	0,0486	0,1656	10000	0	0
55	43	44	0,01965	0,04035	10000	0,03	0,02

Tabela A.6 (*continuação*)

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R (Ω/km)	Xl (Ω/km)	Imax (A)	Carga Barra (Para)	
						Pl (MW)	Ql (Mvar)
56	44	45	0,131	0,269	10000	0,8	0,7
57	45	46	0,2358	0,4842	10000	0,2	0,15
58	G	47	0,0405	0,138	10000	0	0
59	47	48	0,0655	0,1345	10000	0	0
60	48	49	0,0655	0,1345	10000	0	0
61	49	50	0,0393	0,0807	10000	0,2	0,16
62	50	51	0,0786	0,1614	10000	0,8	0,6
63	51	52	0,00655	0,01345	10000	0,5	0,3
64	52	53	0,0786	0,1614	10000	0,5	0,35
65	53	54	0,01048	0,02152	10000	0,5	0,3
66	54	55	0,131	0,269	10000	0,2	0,08
67	H	56	0,02835	0,0966	10000	0	0
68	56	57	0,5371	1,1029	10000	0,03	0,02
69	57	58	0,0524	0,1076	10000	0,6	0,42
70	58	59	0,0405	0,138	10000	0	0
71	59	60	0,0393	0,0807	10000	0,02	0,01
72	60	61	0,0262	0,0538	10000	0,02	0,01
73	61	62	0,1048	0,2152	10000	0,2	0,13
74	62	63	0,2358	0,4842	10000	0,3	0,24
75	63	64	0,0243	0,0828	10000	0,3	0,2
76	I	65	0,0486	0,1656	10000	0	0
77	65	66	0,1703	0,3497	10000	0,05	0,03
78	66	67	0,1215	0,414	10000	0	0
79	67	68	0,2187	0,7452	10000	0,4	0,36
80	68	69	0,0486	0,1656	10000	0	0
81	69	70	0,0729	0,2484	10000	0	0
82	70	71	0,0567	0,1932	10000	2	1,5
83	71	72	0,004367	0,0088	10000	0,2	0,15
84	J	73	0,324	1,1024	10000	0	0
85	73	74	0,0324	0,1104	10000	0	0
86	74	75	0,0567	0,1932	10000	1,2	0,95
87	75	76	0,004418	0,015055	10000	0,3	0,18
88	K	77	0,05022	0,17112	10000	0	0
89	77	78	0,0648	0,2208	10000	0,4	0,36
90	78	79	0,0243	0,0828	10000	2	1,3
91	79	80	0,0655	0,132	10000	0,2	0,14
92	80	81	0,0655	0,132	10000	0,5	0,36
93	81	82	0,0917	0,1883	10000	0,1	0,03
94	82	83	0,1572	0,3229	10000	0,4	0,36
95	5	55	0,131	0,269	10000	0	0
96	7	60	0,131	0,269	10000	0	0
97	11	43	0,131	0,269	10000	0	0
98	12	72	0,3406	0,6994	10000	0	0
99	13	76	0,22925	0,47075	10000	0	0
100	14	18	0,179033	0,3608	10000	0	0
101	16	26	0,0917	0,1883	10000	0	0
102	20	83	0,011229	0,023057	10000	0	0
103	28	32	0,023434	0,04812	10000	0	0
104	29	39	0,0393	0,0807	10000	0	0
105	34	46	0,0262	0,0538	10000	0	0
106	40	42	0,1965	0,4035	10000	0	0
107	53	64	0,01965	0,04035	10000	0	0

A.6 Sistema 135-Barras

O sistema 135-Barras de Mantovani, Casari e Romero (2000) tem potência base de 100 MVA, tensão de 13,8 kV e 21 chaves de interligação. Os dados construtivos desse sistema são apresentados na Tabela A.7.

Tabela A.7 – Sistema 135-Barras

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R (Ω)	X (Ω)	Carga Barra (Para)	
					PI (kW)	QI (kvar)
1	0	1	0,33205	0,76653	0	0
2	1	2	0,00188	0,00433	47,78	19,009
3	2	3	0,22324	0,51535	42,551	16,929
4	3	4	0,09943	0,22953	87,022	34,622
5	4	5	0,15571	0,35945	311,31	123,855
6	5	6	0,16321	0,37677	148,869	59,228
7	6	7	0,11444	0,26417	238,672	94,956
8	6	9	0,05675	0,05666	62,299	24,786
9	9	10	0,52124	0,27418	124,598	49,571
10	9	12	0,10877	0,1086	140,175	55,768
11	12	13	0,39803	0,20937	116,813	46,474
12	12	15	0,91744	0,31469	249,203	99,145
13	12	17	0,11823	0,11805	291,447	115,952
14	17	18	0,50228	0,26421	303,72	120,835
15	17	20	0,05675	0,05666	215,396	85,695
16	20	21	0,29379	0,15454	198,586	79,007
17	0	24	0,33205	0,76653	0	0
18	24	25	0,00188	0,00433	0	0
19	25	26	0,22324	0,51535	0	0
20	26	27	0,10881	0,25118	30,127	14,729
21	27	28	0,71078	0,37388	230,972	112,92
22	27	29	0,18197	0,42008	60,256	29,458
23	29	30	0,30326	0,15952	230,972	112,92
24	29	32	0,02439	0,0563	120,507	58,915
25	32	33	0,04502	0,10394	0	0
26	33	34	0,01876	0,04331	56,981	27,857
27	34	35	0,11823	0,11805	364,665	178,281
28	35	36	0,02365	0,02361	0	0
29	36	37	0,18954	0,0997	124,647	60,939
30	37	38	0,39803	0,20937	56,981	27,857
31	36	39	0,05675	0,05666	0	0
32	39	40	0,09477	0,04985	85,473	41,787
33	40	41	0,41699	0,21934	0	0
34	41	42	0,11372	0,05982	396,735	193,96
35	39	43	0,07566	0,07555	0	0
36	43	44	0,3696	0,19442	181,152	88,563
37	44	45	0,26536	0,13958	242,172	118,395
38	43	46	0,05675	0,05666	75,316	36,821
39	0	48	0,33205	0,76653	0	0
40	48	49	0,11819	0,27283	1,254	0,531
41	49	50	2,96288	1,01628	6,274	2,66
42	49	51	0,00188	0,00433	0	0
43	51	52	0,06941	0,16024	117,88	49,971
44	52	53	0,81502	0,42872	62,668	26,566
45	52	54	0,06378	0,14724	172,285	73,034
46	54	55	0,13132	0,30315	458,556	194,388
47	55	56	0,06191	0,14291	262,962	111,473

Tabela A.7 (continuação)

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R (Ω)	X (Ω)	Carga	
					Barra (Para)	
					PI (kW)	QI (kvar)
48	56	57	0,11444	0,26417	235,761	99,942
49	57	58	0,28374	0,28331	0	0
50	58	59	0,28374	0,28331	109,215	46,298
51	57	61	0,04502	0,10394	0	0
52	61	62	0,02626	0,06063	72,809	30,865
53	62	63	0,06003	0,13858	258,473	109,57
54	63	64	0,03002	0,06929	69,169	29,322
55	64	65	0,02064	0,04764	21,843	9,26
56	62	67	0,10881	0,25118	0	0
57	67	68	0,25588	0,1346	20,527	8,702
58	68	69	0,41699	0,21934	150,548	63,819
59	69	70	0,50228	0,26421	220,687	93,552
60	70	71	0,3317	0,17448	92,384	39,163
61	71	72	0,20849	0,10967	0	0
62	56	73	0,13882	0,32047	226,693	96,098
63	0	75	0,0075	0,01732	0	0
64	75	76	0,27014	0,62362	294,016	116,974
65	76	77	0,3827	0,88346	83,015	33,028
66	77	78	0,33018	0,7622	83,015	33,028
67	78	80	0,3283	0,75787	103,77	41,285
68	80	81	0,17072	0,39409	176,408	70,184
69	81	82	0,55914	0,29412	83,015	33,028
70	81	83	0,05816	0,13425	217,917	86,698
71	83	84	0,7013	0,3689	23,294	9,267
72	84	85	1,02352	0,53839	5,075	2,019
73	83	86	0,06754	0,15591	72,638	28,899
74	86	87	1,32352	0,45397	405,99	161,523
75	0	121	0,01126	0,02598	0	0
76	121	122	0,72976	1,68464	100,182	42,468
77	122	123	0,22512	0,51968	142,523	60,417
78	123	124	0,20824	0,48071	96,042	40,713
79	124	125	0,0469	0,10827	300,454	127,366
80	125	127	0,6195	0,61857	141,238	59,873
81	127	128	0,34049	0,33998	279,847	118,631
82	128	129	0,56862	0,29911	87,312	37,013
83	128	130	0,10877	0,1086	243,849	103,371
84	130	131	0,56862	0,29911	247,75	105,025
85	0	133	0,01126	0,02598	0	0
86	133	134	0,41835	0,96575	89,878	38,101
87	134	135	0,10499	0,13641	1137,28	482,108
88	134	136	0,43898	1,01338	458,339	194,296
89	136	137	0,0752	0,02579	385,197	163,29
90	137	138	0,07692	0,17756	0	0
91	138	139	0,33205	0,76653	79,608	33,747
92	139	141	0,08442	0,19488	87,312	37,013
93	141	142	0,1332	0,30748	0	0
94	142	143	0,2932	0,29276	74,001	31,37
95	143	144	0,21753	0,21721	232,05	98,369
96	144	145	0,26482	0,26443	141,819	60,119
97	142	146	0,10318	0,23819	0	0
98	146	147	0,13507	0,31181	76,449	32,408
99	0	148	0,00938	0,02165	0	0
100	148	149	0,16884	0,38976	51,322	21,756
101	149	150	0,11819	0,27283	59,874	25,381
102	150	152	2,28608	0,78414	9,065	3,843
103	150	153	0,45587	1,05236	2,092	0,887

Tabela A.7 (continuação)

Linha	Barra (De)	Barra (Para)	R (Ω)	X (Ω)	Carga Barra (Para)	
					PI (kW)	QI (kvar)
104	153	154	0,696	1,60669	16,735	7,094
105	154	155	0,45774	1,05669	1506,522	638,634
106	155	156	0,20298	0,26373	313,023	132,694
107	156	157	0,21348	0,27737	79,831	33,842
108	157	158	0,54967	0,28914	51,322	21,756
109	158	159	0,54019	0,28415	0	0
110	157	160	0,0455	0,05911	202,435	85,815
111	160	162	0,47385	0,24926	60,823	25,784
112	162	163	0,86241	0,45364	45,618	19,338
113	163	164	0,56862	0,29911	0	0
114	158	200	0,77711	0,40878	157,07	66,584
115	200	201	1,08038	0,5683	0	0
116	159	202	1,09933	0,57827	250,148	106,041
117	202	203	0,47385	0,24926	0	0
118	154	204	0,32267	0,74488	69,809	29,593
119	204	205	0,14633	0,33779	32,072	13,596
120	205	206	0,12382	0,28583	61,084	25,894
121	0	207	0,01126	0,02598	0	0
122	207	208	0,6491	1,49842	94,622	46,26
123	208	209	0,04502	0,10394	49,858	24,375
124	209	210	0,5264	0,18056	123,164	60,214
125	209	211	0,02064	0,04764	78,35	38,304
126	211	212	0,53071	0,27917	145,475	71,121
127	211	214	0,09755	0,2252	21,369	10,447
128	214	215	0,11819	0,27283	74,789	36,564
129	214	217	0,13882	0,32047	227,926	111,431
130	217	218	0,04315	0,09961	35,614	17,411
131	218	219	0,09192	0,2122	249,295	121,877
132	219	220	0,16134	0,37244	316,722	154,842
133	220	221	0,37832	0,37775	333,817	163,199
134	221	222	0,39724	0,39664	249,295	121,877
135	222	223	0,2932	0,29276	0	0
136	7	86	0,13132	0,30315	0	0
137	10	32	0,26536	0,13958	0	0
138	20	130	0,14187	0,14166	0	0
139	46	223	0,08512	0,08499	0	0
140	33	61	0,04502	0,10394	0	0
141	59	145	0,14187	0,14166	0	0
142	65	147	0,14187	0,14166	0	0
143	73	206	0,0394	0,09094	0	0
144	78	125	0,12944	0,29882	0	0
145	125	219	0,01688	0,03898	0	0
146	131	223	0,3317	0,17448	0	0
147	139	154	0,14187	0,14166	0	0
148	138	217	0,07692	0,17756	0	0
149	138	153	0,07692	0,17756	0	0
150	141	154	0,07692	0,17756	0	0
151	141	220	0,07692	0,17756	0	0
152	145	206	0,26482	0,26443	0	0
153	160	56	0,49696	0,64567	0	0
154	212	122	0,17059	0,08973	0	0
155	215	123	0,05253	0,12126	0	0
156	223	147	0,2932	0,29276	0	0