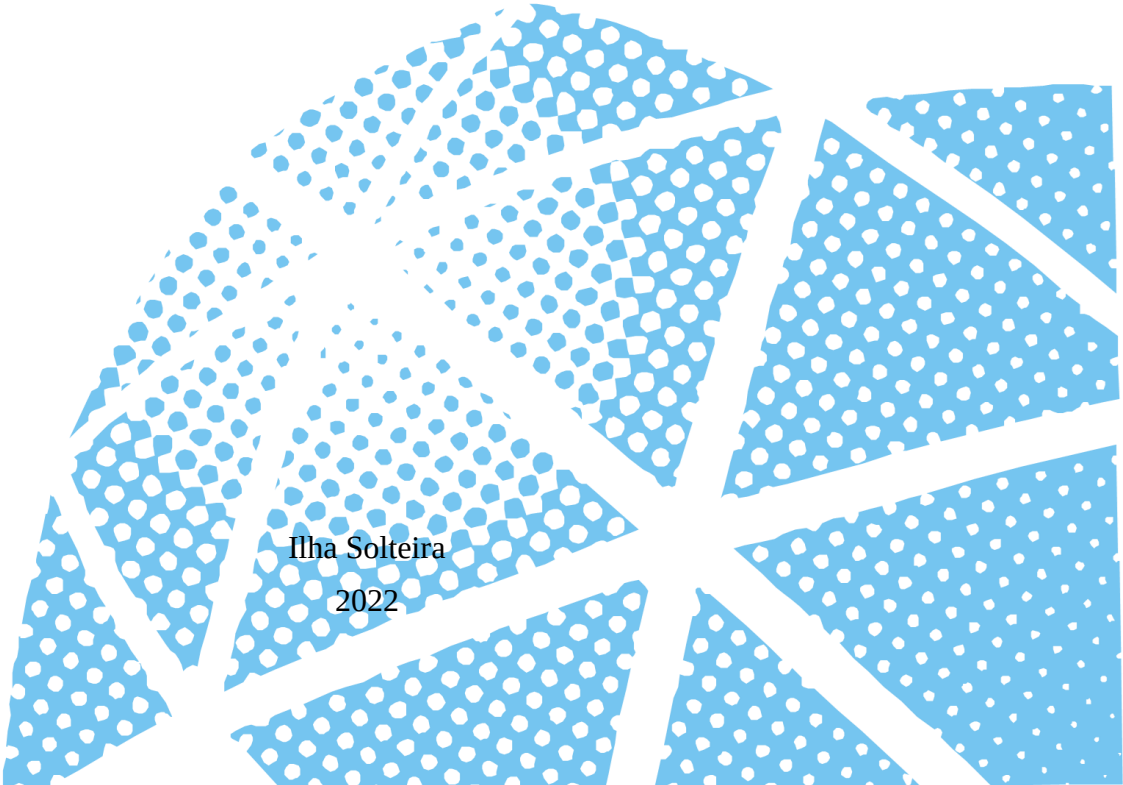
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus of Ilha Solteira

LUCAS FERNANDES DARINI

ALGORITMO TABU SEARCH ESPECIALIZADO PARA O PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE ALIMENTADORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS



Ilha Solteira
2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus of Ilha Solteira

LUCAS FERNANDES DARINI

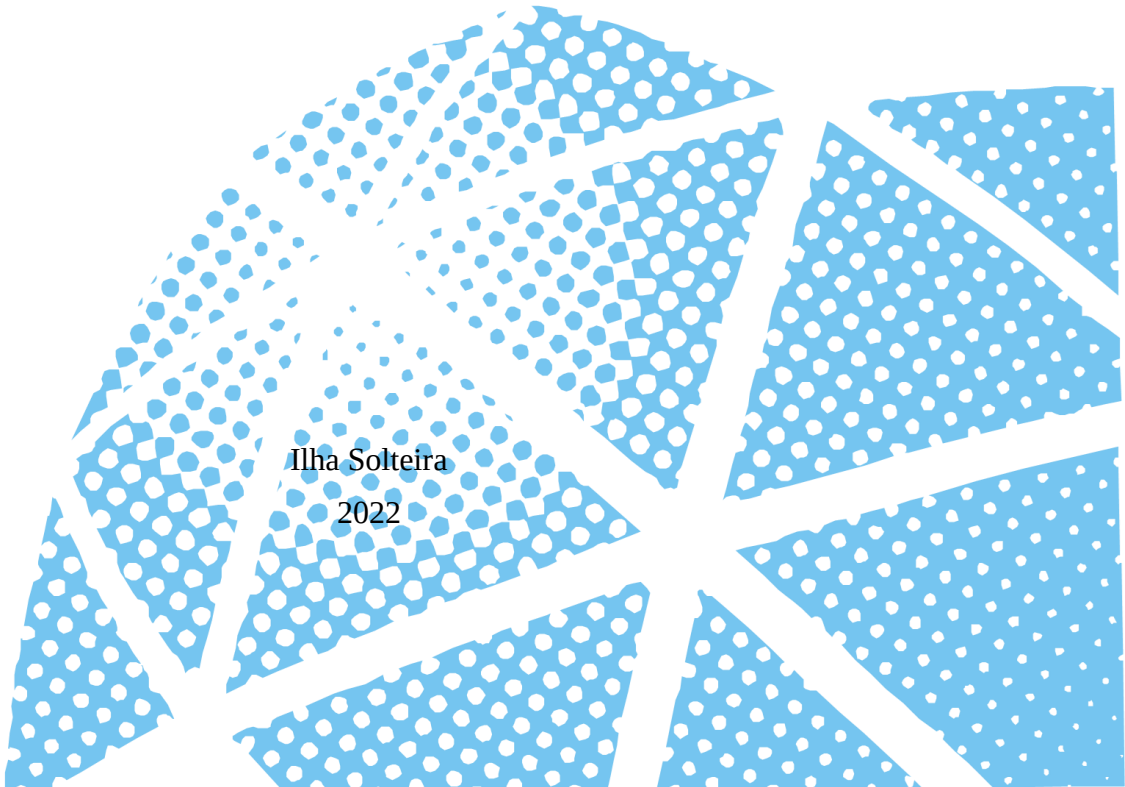
ALGORITMO TABU SEARCH ESPECIALIZADO PARA O PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE ALIMENTADORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro

Orientador

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Sistemas Elétricos.



Ilha Solteira

2022

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Darini, Lucas Fernandes.
D218a Algoritmo tabu search especializado para o problema da reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radiais / Lucas Fernandes Darini. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
75 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Rubén Augusto Romero Lázaro
Inclui bibliografia

1. Problema da reconfiguração. 2. Busca tabu. 3. Meta-heurística. 4. Perdas de potência ativa.

João Josué Barbosa
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos quatro dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e dois, o discente *LUCAS FERNANDES DARINI*, matriculado sob o nº 152.053.158, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro*, o *Prof. Dr. Jonatas Boas Leite* e o *Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado **"Algoritmo tabu search especializado para o problema da reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radiais"**, obtendo a nota 10,0 (dez virgula zero) e conceito aprovado.

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro
- orientador -

LUCAS FERNANDES DARINI
- discente -

Prof. Dr. Jonatas Boas Leite
- Membro da Banca -

Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo
- Membro da Banca -

Faculdade de Engenharia – Departamento de Engenharia Elétrica
Avenida Professor José Carlos Rossi, 1370 - CEP 15.385-000, Ilha Solteira - SP - Brasil
Tel (18) 37431150 - Fax (18) 3742-2735 - www.feis.unesp.br

À minha família, que é o pilar que me sustenta.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Carlos Eduardo e Tatiane, que sempre me apoiaram e incentivaram.

Aos meus avós, que sempre estiveram ao meu lado e me orientaram.

Ao meu irmão, por fazer do ambiente familiar único e divertido.

Aos meus amigos na Faculdade, pelo companheirismo nas muitas noites dedicadas ao estudo.

Ao professor Rubén Romero pelo apoio, disponibilidade e orientação.

Ao Leonardo Henrique Possagnolo e demais membros do LaPSEE, pela imprescindível ajuda, sem a qual este trabalho não seria concluído.

À faculdade de Engenharia de Ilha Solteira e todos seus envolvidos, que sempre farão parte da minha vida.

À FAPESP, pelo apoio financeiro (proc. 2019/13563-0).

"Time is a great teacher, but unfortunately it kills all its pupils."

(Hector Berlioz)

RESUMO

O propósito deste trabalho é desenvolver um algoritmo que resolve o problema da reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição (PRSDR) usando a meta-heurística da busca tabu, isto é, um programa capaz de minimizar as perdas de potência ativa em sistemas de distribuição. Para resolver tal problema, o algoritmo deve encontrar e fornecer uma topologia radial, analisando os ramos dos sistemas. Essa topologia é construída através da abertura e do fechamento das chaves de manobra desses ramos. O principal objetivo é encontrar a topologia radial que fornece o menor valor de perdas de potência ativa, a qual realiza trabalho, para cada sistema. Essa topologia é a solução ótima do problema de reconfiguração. A meta-heurística escolhida e utilizada para atingir esse objetivo foi a Busca Tabu. Essa heurística parte de uma solução inicial, chamada solução incumbente, e constrói a vizinhança dessa solução, sendo essa última o conjunto de soluções geradas fechando-se os ramos abertos da solução inicial e abrindo os ramos fechados do laço respectivo ao ramo agora fechado e ativo. Cada proposta de solução possui um valor de fluxo de potência por ramo, isto é, considerou-se que o sistema possui uma demanda fixa. Definindo o número de iterações que o algoritmo irá repetir o método apresentado, a meta-heurística é capaz de encontrar a solução ótima. Todo o corpo do algoritmo foi implementado usando a linguagem FORTRAN e foi implementado e testado para os sistemas de 14, 33, 84 e 136 barras. Os resultados obtidos foram comparados aos resultados de outros trabalhos desenvolvidos na literatura, e se mostraram de excelente qualidade, muito além das expectativas para um trabalho de graduação.

Palavras-chave – Problema da Reconfiguração. Busca Tabu. Meta-heurística. Topologia Radial. Perdas de Potência Ativa. Vizinhança.

ABSTRACT

The purpose of this work is to develop an algorithm that resolves the optimal reconfiguration problem using the reformulated Tabu Search metaheuristic, that is, a program which minimizes the active power losses in distribution systems. To solve this problem the algorithm must determine a radial topology, by analysing the branches of this system. The radial topology is built by opening and closing the branches switches. The principal objective is find a topology that provides the lowest active power losses for the system which is the optimal solution of the reconfiguration problem. The metaheuristic chosen and used to reach this objective was the reformulated Tabu Search. This heuristic basically departs from an initial solution, called incumbent solution, and construct the neighborhood of this solution which is the other solutions generated by closing the opened branches of the initial solution and opening the closed branches of the loop of this respective now closed branch. Each solution proposal has one power flow value per branch, that is, we are considering that the system has a fixed demand. By setting the number of iterations that the program will repeat the presented method, this heuristic could find that optimal solution. The entire algorithm was implemented using the FORTRAN language. The proposed algorithm was tested with the 14, 33 and 84-buses systems. The results were compared to the results reached with the fellow main project in developing in Brazil. It was also compared to other works developed in the researcher background laboratory. Those results have an excellent quality, and they surpassed the expectations for this level work.

Keywords – Reconfiguration problem. Reformulated Tabu Search. Metaheuristic. Radial topology. Active power losses. Neighborhood.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de duas barras para cálculo da corrente de carga 19

Figura 2 - Modelo de duas barras utilizado para o cálculo da tensão na barra m 20

Figura 3 – Fluxograma do algoritmo da Busca Tabu reformulada 31

Figura 4 - Representação de uma proposta de solução 32

Figura 5 – O modelo do sistema de 14 Barras e seus respectivos laços 38

Figura 6 – Perfil de decréscimo de perdas de potência ativa para o sistema de 14 Barras 43

Figura 7 – Perfil de decréscimo de perdas de potência ativa para o sistema de 33 Barras 45

Figura 8 – Perfil de decréscimo de perdas de potência ativa para o sistema de 84 Barras 48

Figura 9 – Perfil de decréscimo de perdas de potência ativa para o sistema de 136 Barras 52

Figura 10 – Modelo do sistema de 14 Barras 72

Figura 11 – Modelo do sistema de 33 Barras 73

Figura 12 – Modelo do sistema de 84 Barras 74

Figura 13 – Modelo do sistema de 136 Barras 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados obtidos para o sistema de 14 Barras 42

Tabela 2 – Resultados obtidos para o sistema de 33 Barras 44

Tabela 3 – Resultados obtidos para o sistema de 84 Barras 47

Tabela 4 – Resultados obtidos para o sistema de 136 Barras 50

Tabela 5 – Dados do sistema de 14 barras 56

Tabela 6 – Fluxos de potência iniciais para o sistema de 14 barras 57

Tabela 7 – Dados do sistema de 33 barras 57

Tabela 8 – Fluxos de potência iniciais para o sistema de 33 barras 59

Tabela 9 – Dados do sistema de 84 barras 60

Tabela 10 – Fluxos de potência iniciais para o sistema de 84 barras 62

Tabela 11 – Dados do sistema de 136 barras 64

Tabela 12 – Fluxos de potência iniciais para o sistema de 136 barras 68

SUMÁRIO

Capítulo	Título	Página
1	**INTRODUÇÃO**	11
2	**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**	13
3	**ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA RADIAL**	16
3.1	ASPECTOS TEÓRICOS DO ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA RADIAL	17
3.2	EQUAÇÕES	18
4	**O PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO QUANDO É RESOLVIDO UTILIZANDO METAHEURÍTICAS**	22
4.1	REPRESENTAÇÃO EFICIENTE DE UMA PROPOSTA DE SOLUÇÃO	23
4.2	GERAÇÃO DE PROPOSTAS DE SOLUÇÃO RADIAIS	23
4.3	NECESSIDADES DE RESOLVER PROBLEMAS DE FLUXO DE CARGA RADIAL	24
4.4	A RESTRIÇÃO DE RADIALIDADE	25
5	**A METAHEURÍSTICA DA BUSCA TABU REFORMULADA**	26
5.1	ESTRUTURA PRIMÁRIA DA BUSCA TABU REFORMULADA	27
5.2	CARACTERÍSTICAS RELEVANTES CONSIDERADAS PARA UTILIZAÇÃO DA BUSCA TABU REFORMULADA	29
6	**A METAHEURÍSTICA DA BUSCA TABU REFORMULADA APLICADA AO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO**	32
6.1	UMA FORMA DE REPRESENTAÇÃO DE UMA PROPOSTA DE SOLUÇÃO	32
6.2	ALGORITMO PRIM	34
6.3	IMPLEMENTAÇÃO PASSO A PASSO DO ALGORITMO DE BUSCA TABU	35
7	**RESULTADOS**	41
7.1	RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS	41
7.2	RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 33 BARRAS	43
7.3	RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 84 BARRAS	46
7.4	RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 136 BARRAS	48
8	**CONCLUSÃO**	53
9	**BIBLIOGRAFIA**	54
	APÊNDICE A	56
	ANEXO A	72

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A reconfiguração ótima de sistemas de distribuição tem como principal fundamento a determinação de uma topologia radial, com alguns de seus ramos em funcionamento e outros desligados, que apresente a menor quantidade de perdas de potência para aquele sistema e para um perfil de demanda especificado. Essa reconfiguração baseia-se em um processo de otimização que resulte em uma diminuição dessas perdas.

A configuração atual padrão de operação dos sistemas de distribuição é a topologia radial. Esse tipo de distribuição possui circuitos energizados (ativos) que formam os ramos da configuração radial chamada de árvore. Possui ainda circuitos não energizados que formam os ramos de ligação. Uma troca adequada, que não prejudique o sistema em termos de distribuição, entre um ramo da árvore e um ramo de ligação, dá origem a uma nova configuração radial. Portanto, o processo de reconfiguração consiste basicamente em um processo de otimização, que pretende encontrar a melhor configuração radial daquele sistema, ou seja, a configuração que apresente a menor quantidade de perdas de potência entre seus ramos energizados. Para isso, devem-se analisar todas (ou quase todas) as possibilidades de distribuição a fim de se determinar a melhor topologia de operação. Uma outra forma equivalente de caracterizar o problema de reconfiguração ótima de sistemas radiais é a seguinte: dado um grafo, encontrar uma árvore geradora que minimize a função objetivo determinada para o problema, que no caso serão as perdas ativas, satisfazendo as seguintes restrições: (1) os limites de tensão das barras do sistema, (2) a tolerância de corrente máxima nos alimentadores, (3) as duas leis de Kirchhoff que são a base de cálculo do fluxo de carga e (4) a geração de uma proposta de solução que utilize a configuração radial para o sistema.

Diversos problemas são enfrentados para a resolução de problemas de reconfiguração, e todos serão amplamente discutidos ao longo do trabalho. Em pesquisas mais recentes, verificou-se que a melhor forma de resolver problemas com essa característica é através da utilização de meta-heurísticas. O surgimento da meta-heurística da Busca Tabu, bem como seu desenvolvimento e reformulações ao longo dos anos serão abordados à frente. Em seguida, será discutida a implementação da Busca Tabu (TS, do inglês *Tabu Serach*) tanto para problemas

diversos, como apresentado na literatura especializada, quanto para o problema de reconfiguração que é tema do projeto.

Portanto, o objetivo fundamental deste trabalho é formular, produzir e implementar um algoritmo baseado na meta-heurística da Busca Tabu que deve incorporar dentro de sua estrutura um algoritmo de Fluxo de Carga radial, e que permita identificar a melhor proposta de solução (topologia radial) para os sistemas de 14, 33, 84 e 136, lê-se, solução de característica radial com as menores perdas ativas para distribuição, em kW. Para que isso se tornasse possível foi construído incialmente um embasamento teórico tanto sobre o problema de reconfiguração ótima de distribuição radial e a forma como ele é implementado quanto sobre a meta-heurística da TS e as dificuldades de sua implementação para tal problema. Houve ainda a necessidade de se construir e analisar um algoritmo de fluxo de carga radial, que foi utilizado no programa final desenvolvido, o qual é a base para o cálculo das perdas ativas e reativas das diversas propostas de soluções radiais que são geradas durante execução do algoritmo.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na literatura especializada existem diversos trabalhos que discorrem sobre o PRSDR, que em alguns casos pode também ser chamado problema da reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica (RDSEE). O tema é estudado com o uso de heurísticas, meta-heurísticas e técnicas de otimização. A seguir serão apresentados alguns dos trabalhos com contribuição fundamental encontrados na literatura para resolução do problema.

O trabalho de Merlin e Back (1975) foi pioneiro no tema de RSDEE. O objetivo do trabalho é justamente obter uma configuração para sistemas de distribuição com perdas reduzidas. Para alcançar tal objetivo os autores propõem pela primeira vez a alteração da topologia da rede de distribuição. Utilizam uma heurística que, partindo da configuração malhada, com todos os ramos fechados, ou seja, conduzindo corrente, calcula o valor das perdas dessa configuração através da execução de um fluxo de carga. Em seguida, abre-se a chave relativa ao ramo que conduz o menor valor de corrente, e que mantém a rede interligada. Os autores afirmam que a abertura do ramo de menor fluxo de corrente provoca a perturbação mínima na distribuição dos fluxos nos demais ramos do sistema. O processo de identificação e abertura do ramo de menor fluxo é repetido de forma iterativa até que se obtenha uma configuração radial. Para um sistema com *nb* barra e *nr* ramos o processo termina após retirar ($nr - nb + 1$) ramos.

Mantovani, Casari e Romero (2000) apresentaram um algoritmo heurístico que, partindo de uma configuração inicial, fornece uma configuração ou um conjunto de configurações que permitam a operação da rede com perdas mínimas nos alimentadores. Utilizam o limite de queda de tensão como mecanismo para reduzir o número de soluções candidatas da heurística e implementam um algoritmo de fluxo de carga (FC) radial com o objetivo de reduzir os esforços computacionais. Esse FC possui baixo tempo de processamento e precisão adequada, o que permite ser utilizado com ferramenta auxiliar em algoritmos de reconfiguração de redes.

Ritter, Franco e Romero (2015) realizaram uma importante análise das diferenças entre as possíveis formas de operação do sistema de distribuição, radial e malhada. Provam de forma experimental que o sistema radial é uma das piores topologias se o objetivo é garantir que o

sistema opere com o valor mínimo de perdas de potência. Além disso, é um dos primeiros trabalhos a considerar que um sistema fracamente malhado, ou seja, com a existência de alguns laços em determinados casos pode ser interessante, o que representou uma tentativa de quebra de paradigma no tema de operação de sistemas de distribuição.

Mishima et al. (2005) propõem um método baseado na meta-heurística Busca Tabu que tem como objetivo determinar as melhores posições das chaves seccionadoras do sistema de distribuição, de forma que opere com menor valor de perdas, respeitando as restrições de capacidade dos transformadores e carregamento das linhas como também os limites de tensão. O diferencial do trabalho é que considera a inclusão, mesmo que de forma arbitrária, de geradores distribuídos (células de combustível, microturbinas à gás dentre outros) na resolução do problema de minimização de perdas.

Abdelaziz et al. (2010) apresentam um algoritmo baseado na meta-heurística Busca Tabu, mas modificado. As modificações foram utilizar uma lista Tabu com seu tamanho variando de acordo com o tamanho do sistema em análise e uma migração randômica no processo de busca, com o objetivo de diversificar essa busca e direcioná-la a regiões inexploradas da vizinhança. O objetivo do projeto manteve-se em remanejar os ramos do sistemas, através do fechamento e abertura das chaves de manobra desses ramos, no intuito de reduzir o valor das perdas de potência ativa.

O trabalho de Possagnolo (2015) apresenta várias versões da meta-heurísticas de busca em vizinhança variável (VNS, do inglês *Variable Neighborhood Search*) com objetivo de minimização de perdas ou custo das perdas. O autor discorre sobre importantes fundamentos a respeito da busca em vizinhança varável e utiliza demanda variável em sua análise, tornando-a bem mais próxima à real em comparação à utilização de demanda fixa, proporcionando uma solução ainda mais adequada para o RSDEE.

Macedo et al. (2018) apresentam uma análise sobre os tópicos relevantes que são considerados para resolução do problema da reconfiguração, sendo eles: (a) o espaço de busca, como determiná-lo e sua importância para construção de algoritmos que usam meta-heurísticas, (b) modelos matemáticos exatos e sua importância na otimização e (c) principais ferramentas para utilização das meta-heurísticas aplicadas ao problema. Nesse último, os expoentes são: a forma de representar cada proposta de solução, formas de se gerar a solução inicial para que tenha boa qualidade, como determinar a qualidade de cada proposta de solução gerada pela varredura da meta-heurística e a forma de se construir as vizinhanças. O trabalho retrata um

modelo bem estruturado e eficiente, e que pode ser utilizado para uma grande variedade de meta-heurísticas e suas derivações quando aplicadas ao PRSDR.

O trabalho de Alves (2019) apresenta uma proposta baseada na meta-heurística Busca Tabu, chamada de Busca Tabu Reformulada para resolver o PRSDR. Partindo de uma solução inicial gerada de forma aleatória e com o objetivo de obter a topologia radial que apresente o menor custo de operação, realiza uma integração entre os métodos de reconfiguração de alimentadores e de alocação de bancos de capacitores fixos e chaveados.

Capítulo 3

ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA RADIAL

O algoritmo de fluxo de carga radial utilizado para o cálculo das perdas de potência ao longo do sistema de distribuição utilizado é relativamente simples, formado basicamente por cinco etapas fundamentais, que são: (i) Inicialmente, após a declaração das variáveis utilizadas, o programa abre um arquivo, chamado result.dat, para escrever os resultados obtidos. (ii) É realizada a escolha da unidade em que se encontram os dados do sistema, pelo próprio usuário na janela de execução, entre unidades em p.u. (opção relacionada ao dígito 1) ou em Ohm, (opção relacionada ao dígito 2). (iii) Ler os dados do sistema disponibilizados através de um arquivo auxiliar ao FORTRAN, chamado datos.dat. Esse processo é realizado através de uma sub-rotina que também converte os dados para p.u. (por unidade) quando apresentados em valores reais (Ohm). (iv) Faz o reordenamento das barras do sistema, tomando a barra da subestação como a primeira, renumerando-as em ordem crescente na direção das barras terminais do sistema de distribuição, ou seja, seguindo o fluxo de carga ao longo dessas barras. Esse processo é feito através de outra sub-rotina. (v) Então, através de uma terceira e última sub-rotina são calculados os valores das tensões nas barras, bem como as perdas relativas de potência ao longo do sistema de distribuição. Todos os dados obtidos são apresentados no arquivo antes mencionado.

A estrutura da primeira sub-rotina, a de leitura de dados é:

Passo 1: incialmente lê-se os dados fornecidos através do arquivo datos.dat, que fornece o número de barras bem como suas impedâncias, o nó de referência do sistema, a potência base entre outros.

Passo 2: Caso esses valores estejam em unidade real, Ohm, o algoritmo converte esses valores para valores por unidade, p.u., para que seja possível a realização do restante do cálculo do fluxo de carga.

Os dados mais importantes lidos são apresentados no arquivo result.dat para revisão do usuário.

A estrutura da segunda sub-rotina, que ordena e renumera os nós e as barras do circuito, é:

O algoritmo estabelece o nó referência e utiliza um vetor auxiliar gerado com a dimensão igual à quantidade de barras do sistema para renumerá-lo e tornar possível o cálculo de tensões e de perdas pela terceira sub-rotina. Esse ordenamento é realizado no sentido do fluxo de carga, partindo do nó referência, atrelado à subestação, estabelecido inicialmente. O vetor renumerado é apresentado no arquivo de resultados. O programa ainda realoca os dados fornecidos conforme a nova numeração, evitando erros de execução. Esses dados realocados são apresentados junto ao vetor renumerado.

A estrutura da terceira sub-rotina, do fluxo radial propriamente dito, é:

Essa sub-rotina tem a função de calcular todas as correntes nas barras e nos ramos, partindo da tensão referência, sendo essa igual à da barra da subestação, com operações de “forward” e “backward”, que serão explicadas. Calcula ainda as perdas em kW que o sistema apresenta quando energizado e as novas tensões das barras. Feito isso, recalcula novamente as correntes das barras e dos ramos, repetindo o processo. Esse continua sendo realizado até que a diferença entre as perdas de iterações subsequentes seja menor que a tolerância ∈ pré-definida. Todos os valores obtidos nessa sub-rotina são apresentados no arquivo de dados mencionado.

3.1. ASPECTOS TEÓRICOS DO ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA RADIAL

Nesta seção será analisada a teoria envolvida no algoritmo de fluxo de carga radial, algoritmo relativamente simples, mas ao mesmo tempo bem eficiente. Esse fato o torna um algoritmo bastante utilizado por pesquisadores na área de distribuição de energia. É conhecido também como algoritmo de varredura, pois realiza processos iterativos ao longo de todo o percurso do fluxo de carga, das barras extremas até a subestação e vice-versa.

O processo de execução do algoritmo se inicia escolhendo uma tensão base para o sistema, sendo geralmente a tensão da subestação a escolhida, ou seja, para barra k subsequente, assume-se $V_k = V_{ref} + j0$, onde V_{ref} é a tensão da subestação. Conhecendo-se a tensão em todas as barras do sistema, é possível determinar todas as correntes de carga nas barras bem como as correntes nos ramos de todo o sistema radial. O cálculo dessas correntes se inicia nas barras extremas, sendo feito em direção à subestação, em um método chamado “backward”. Através das correntes calculadas nos ramos de distribuição é possível determinar um valor aproximado para as perdas ativas e reativas desse sistema.

O método de “backward” fornece a corrente fornecida pela subestação. Então, utilizando os valores de correntes nos ramos e partindo da subestação é possível calcular as tensões em todas as barras do sistema, até que se determinem as tensões das barras extremas, num método chamado “forward”. A partir desses novos valores de tensão, as correntes das barras e ramos são recalculadas reiniciando o processo descrito, que termina em calcular novamente os valores aproximados de perdas ativas e reativas de potência. A repetição sistemática desse processo é o que caracteriza o algoritmo de varredura. O critério de parada geralmente utilizado é a variação das perdas ativas entre iterações consecutivas, chamada de ΔP_{at}. O processo termina quando o valor absoluto dessa variação é menor que a tolerância especificada para o problema, ou seja, quando $|\Delta P_{at}| \leq \in$.

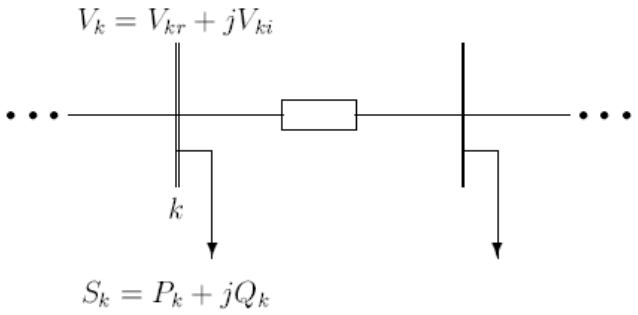
3.2. EQUAÇÕES

Nesta seção são apresentadas as equações utilizadas para o desenvolvimento do algoritmo.

a) Equações para o cálculo da corrente de carga

A Figura 1 simboliza um modelo de duas barras em um sistema de distribuição radial. Dessa forma, a carga da barra k é representada na forma $S_k = P_k + jQ_k$ e sua respectiva tensão representada na forma $V_k = V_{kr} + jV_{ki}$, separando as partes real e imaginária. Através dessa carga e da tensão, pretende-se encontrar relações matemáticas para a determinação da corrente de carga, representada na forma $I_k = I_{kr} + jI_{ki}$.

Figura 1 – Modelo de duas barras para cálculo da corrente de carga



Fonte: Elaborado pelo autor

Têm-se os seguintes dados:

$$V_k = V_{kr} + jV_{ki} \qquad S_k = P_k + jQ_k \tag{1}$$

E, por definição, temos:

$$S_k = V_k I_k^* \Longrightarrow I_k^* = \frac{P_k + jQ_k}{V_{kr} + jV_{ki}} = \frac{P_k + jQ_k}{V_{kr} + jV_{ki}} . \frac{V_{kr} - jV_{ki}}{V_{kr} - jV_{ki}} \tag{2}$$

Fazendo-se as devidas operações e igualando o resultado da expressão acima à $I_k = I_{kr} + jI_{ki}$ obtém-se:

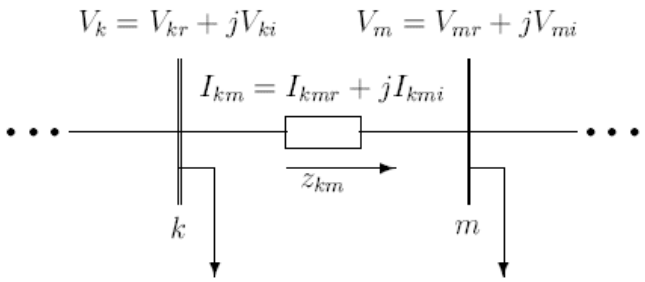
$$I_{kr} = \frac{(P_k V_{kr} + Q_k V_{ki})}{(V_{kr}^2 + V_{ki}^2)} \tag{3}$$

$$I_{ki} = \frac{(P_k V_{ki} - Q_k V_{kr})}{(V_{kr}^2 + V_{ki}^2)} \tag{4}$$

b) Equações para o cálculo de tensão nas barras

A Figura 2 representa o modelo de duas barras utilizado para calcular a tensão na barra m, conhecendo-se a tensão na barra k, representada por $V_k = V_{kr} + jV_{ki}$ e a corrente no ramo km, representada por $I_{km} = I_{kmr} + jI_{kmi}$. A tensão na barra m é $V_m = V_{mr} + jV_{mi}$. É conhecida também a impedância do ramo km, representada por $Z_{km} = r_{km} + jx_{km}$.

Figura 2 – Modelo de duas barras utilizado para o cálculo da tensão na barra m



Fonte: Elaborado pelo autor

Por definição, tem-se que:

$$V_k = V_{kr} + jV_{ki} = V_m + (r_{km} + jx_{km})(I_{kmr} + jI_{kmi}) \quad (2.5)$$

Fazendo-se as corretas simplificações, obtemos:

$$V_{mr} = V_{kr} - r_{km}I_{kmr} + x_{km}I_{kmi} \quad (6)$$

$$V_{mi} = V_{ki} - r_{km}I_{kmi} - x_{km}I_{kmr} \quad (7)$$

Verifica-se que, conhecendo os valores de V_k e I_{km} é possível determinar o valor da tensão na barra subsequente, barra m, através das equações acima. Esse é o processo “forward”.

c) Equações para cálculo das perdas de potência do sistema de distribuição

Apresenta-se agora as equações utilizadas para os cálculos de perdas ativas e reativas ao longo do fluxo de carga. A equação das perdas para um ramo como o da Figura 2 tem a seguinte configuração:

$$S_{km} = P_{kmp} + jQ_{kmp} = \Delta V_{km} I_{km}^{*} = (r_{km} + jx_{km}) I_{km} I_{km}^{*} = (r_{km} + jx_{km}) I_{km}^{2} \quad (8)$$

E, portanto, as perdas ativas e reativas do ramo k-m, respectivamente, são dadas pelas equações abaixo:

$$P_{kmp} = r_{km} I_{km}^{2} \quad (9)$$

$$Q_{kmp} = x_{km} I_{km}^{2} \quad (10)$$

As equações apresentadas podem ser generalizadas e aplicadas para todos os ramos do sistema. As perdas ativas e reativas serão determinadas através do somatório das perdas de todos os ramos. Essas relações são suficientes para elaboração do algoritmo de fluxo de carga radial.

Capítulo 4

O PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO QUANDO É RESOLVIDO UTILIZANDO META-HEURÍTICAS

O objetivo deste capítulo é fazer uma análise profunda das diferentes propostas existentes na literatura especializada para contornar os diferentes aspectos específicos relacionados com as aplicações das meta-heurísticas ao problema de reconfiguração ótima de sistemas de distribuição radiais. Isso se deve ao fato de que algumas características específicas do problema de reconfiguração geram alguns empecilhos para a correta aplicação e utilização das meta-heurísticas.

Deve-se observar, portanto, que a utilização das meta-heurísticas de otimização se faz interessante nos seguintes casos:

- Quando a solução ótima não é muito importante do ponto de vista prático por diferentes motivos como a existência de muitas soluções ótimas locais de qualidade muito próximas da solução ótima geral.
- Quando os dados usados apresentam incerteza elevada como acontece em muitos problemas relacionados com planejamento.
- Quando não existe um método exato de otimização para resolver o problema em análise.
- Quando existem limitações de tempo de processamento para encontrar a solução procurada e quando existem problemas de memória para o armazenamento de dados.
- Quando se pretende encontrar uma boa solução inicial para ser usada como ponto de partida na aplicação de uma técnica de otimização mais sofisticada.

Para o problema da reconfiguração ótima de sistemas de distribuição já existe um modelo matemático completo e muito eficiente utilizado quando se deseja implementar técnicas de otimização exatas e solvers comerciais. Porém, esse modelo ainda apresenta um tempo de

processamento muito elevado para sistemas mais robustos e de grande porte. A seguir são apresentados de forma preliminar tópicos relevantes relacionados com a aplicação de meta-heurísticas na resolução do problema da reconfiguração de sistemas de distribuição radiais.

4.1. REPRESENTAÇÃO EFICIENTE DE UMA PROPOSTA DE SOLUÇÃO

A primeira característica que deve ser levada em consideração na resolução de um problema através da utilização de meta-heurísticas é a forma de representação das propostas de solução. Essa representação deve tornar possível tanto a análise da factibilidade daquela proposta quanto a constatação do valor de sua função objetivo de interesse, modelo que foi utilizado no projeto, que no caso do problema da reconfiguração é o valor total das perdas de potência ativa do sistema em kW. Além disso, é necessário que a representação da proposta de solução permita a geração de novas propostas, a partir da solução corrente, seguindo a lógica da meta-heurística TS implementada.

As meta-heurísticas precisam de uma topologia radial para iniciar o processo de otimização como acontece no algoritmo de busca tabu, de um conjunto inicial de topologias radiais como acontece em um algoritmo genético ou no algoritmo da busca dispersa, ou de uma estratégia construtiva para gerar uma topologia radial de qualidade como acontece no algoritmo GRASP. Assim, para cada meta-heurística pode ser oportuno projetar uma estratégia diferente para gerar uma topologia radial inicial ou um conjunto de topologias radiais diferentes e de qualidade. Para cada topologia radial gerada, deve-se resolver um problema de fluxo de carga radial para verificar a qualidade da proposta de solução e para verificar se a proposta é factível ou infactível.

4.2. GERAÇÃO DE PROPOSTAS DE SOLUÇÃO RADIAIS

As primeiras propostas de geração desse tipo de solução na literatura especializada eram baseadas na aleatoriedade, sem nenhum controle sobre a radialidade da proposta. Assim, se a topologia gerada de forma aleatória não era radial, então essa proposta de solução era descartada e, portanto, se realizava uma nova tentativa. Pesquisas recentes foram capazes de solucionar esse problema de forma mais eficiente que a utilizada até então. Assim, é possível gerar de forma aleatória topologias radiais usando estratégias relativamente simples. A estratégia mais

eficiente consiste em usar o algoritmo de Prim para gerar uma topologia radial. Essa estratégia foi utilizada na geração da topologia inicial, partindo do fluxo de potência calculado quando todos os ramos se encontram fechados, ou seja, do fluxo de potência do sistema malhado. Nesse contexto, pode-se gerar um vetor de pesos, fornecendo pesos unitários a cada ramo ou pesos aleatórios variando em um intervalo, o algoritmo de Prim gera uma nova topologia radial. Outra maneira consiste em fornecer pesos aleatoriamente, mas de maneira mais controlada do que a mencionada, a fim de minimizar a taxa de soluções infactíveis do problema. Esse processo aleatório controlado não foi utilizado. Utilizou-se apenas a estratégia da variação da taxa de pesos inicial, com essa variação sendo estipulada em 60% para os sistemas de 14, 33, 84 e 136 barras, por ter sido utilizada apenas para a geração da solução incumbente inicial utilizada durante a heurística da TS. Assim, os ramos mais próximos da subestação podem receber pesos de valores maiores. Entretanto, as melhores propostas de geração de topologias radiais iniciais de qualidade são aquelas que usam informação das características do problema ou algoritmos heurísticos generalizados. Finalmente, neste trabalho, é escolhida essa alternativa para gerar topologias radiais iniciais e de qualidade, a partir da análise de funcionamento do algoritmo da busca tabu.

4.3. NECESSIDADES DE RESOLVER PROBLEMAS DE FLUXO DE CARGA RADIAL

Como observado anteriormente, para toda e qualquer proposta de solução gerada se deve, inicialmente, resolver um problema de fluxo de carga radial para encontrar o valor das perdas de potência ativa do sistema, que na verdade representa a função objetivo do problema de reconfiguração, ou seja, o que se deseja determinar através da implementação e execução do algoritmo, e verificar também se não existem violações no limite dos módulos de tensão calculados para as barras bem como no limite dos módulos de corrente calculados para os condutores daquele sistema. Deve-se observar que o objetivo central do problema de reconfiguração é encontrar uma topologia radial de perdas mínimas. Assim, em princípio, existe o pressuposto de que a topologia base já é factível e, portanto, não apresenta violações de limites de tensão ou corrente elétrica. Dessa forma, se em algum momento uma metaheurística gera uma proposta de solução infactível, então essa proposta é de pior qualidade que a topologia base e, portanto, deve ser descartada.

Em análise de operação de sistemas de distribuição radiais já se encontra consolidada a premissa de que essa análise deve ser realizada através de um algoritmo de fluxo de carga radial. Em outras palavras, na análise da operação de um sistema de distribuição radial não é usado o método de Newton, muito usado em sistemas de transmissão. Por esse motivo existem muitos algoritmos de fluxo de carga radial para resolver o estado de operação de um sistema de distribuição radial. Na literatura já se encontra consagrado como sendo o método mais adequado o método de fluxo de carga radial de varredura, originalmente apresentado em (SHIRMOHAMMADI; HONG, 1988). Por esse motivo, neste trabalho foi programado em Fortran esse método de fluxo de carga radial de varredura e que será apresentado e explicado adiante.

4.4. A RESTRIÇÃO DE RADIALIDADE

Embora todo sistema seja construído de forma malhada, ou seja, utilizando malhas para distribuição, ele ainda deve operar com topologia radial por necessidades operacionais. Dessa forma, a construção através de malhas deve permitir que se alterem as topologias radiais através da alteração das malhas utilizadas para distribuição, de forma que alguns ramos permaneçam abertos para conseguir uma eficiente topologia radial de operação. Entretanto, deve-se observar que quanto mais malhada é a topologia de operação, então menores são as perdas como foi verificado em (RITTER; ROMERO, 2015).

Apenas recentemente foi resolvido o problema de restrição de operação radial nos modelos exatos e foram propostas na literatura especializada formas eficientes de gerar topologias radiais iniciais e durante o processo de otimização. Na literatura existe a convicção de que as melhores propostas para gerar topologias radiais de forma aleatória, aleatória controlada ou usando informação especializada consiste em usar o algoritmo de Prim sob as diferentes formas, por isso escolheu-se trabalhar com esse algoritmo neste trabalho. A vantagem do algoritmo de Prim é que gera uma topologia radial com um tempo de processamento insignificante quando comparado com o tempo de processamento usado para resolver um problema de fluxo de carga radial. Essa característica pode não ser verdadeira na resolução de outros problemas de otimização. Dessa forma, pode-se gerar uma topologia radial de qualidade com um tempo de processamento insignificante quando comparado com o tempo de processamento usado para avaliar a qualidade dessa proposta de solução radial.

Capítulo 5

A META-HEURÍSTICA DA BUSCA TABU REFORMULADA

A meta-heurística da Busca Tabu foi proposta por Fred Glover em 1986, mas no passado, não era como é atualmente, e o objetivo de Glover era que a busca local superasse os ótimos locais pré-existentes. Podemos dizer que a Busca Tabu é uma extensão da busca local tradicional chamada de busca local através de vizinhança, e que encontra outras soluções partindo de uma solução inicial ou de um conjunto de soluções. Em outras palavras, o TS executa um conjunto de transições na vizinhança da solução inicial gerada e, durante essas transições, deve passar pela solução ideal desta vizinhança ou por soluções próximas da ideal. Ao fazer disto um processo repetitivo, o TS certamente deverá encontrar a melhor solução de todo o sistema em análise.

Existem duas grandes diferenças entre a TS e a Busca Local Convencional. A primeira é que a Busca Tabu parte da solução corrente, chamada neste trabalho de solução inicial, e vai para a melhor solução da vizinhança dessa primeira proposta, mesmo que essa última apresente função objetivo pior que a que dá início ao processo de reconfiguração. Isso significa que, ao longo da execução do algoritmo de TS pode haver uma degradação da qualidade das propostas de solução para que a solução ótima do sistema seja encontrada. A segunda é que a vizinhança é variável, isto é, se altera e não é a mesma para propostas de soluções diferentes, com essa alteração ocorrendo sempre que há a migração para uma nova proposta ao longo da execução do algoritmo. Essa característica é fundamental e permite à TS realizar uma eficiente e inteligente busca por novas e melhores soluções.

Devido à essa constante mudança de vizinhança, surge a necessidade de armazenar todas as soluções já visitadas ao longo da execução da meta-heurística, para evitar uma busca repetida de propostas. Essas soluções visitadas são todas as soluções que o algoritmo tomou como incumbente ou corrente durante sua execução e busca pela solução ótima do sistema, ou seja, as soluções alcançadas durante as transições. Em sistemas de grande porte, esse armazenamento de soluções pode se tornar um grande problema e a TS pode necessitar um critério de aspiração

de soluções para reduzir os esforços computacionais. Porém, nesse caso, devido a utilização de sistemas de pequeno e médio porte apenas, não houve a necessidade de utilizar um critério de aspiração. Tendo isso em vista, foi possível, para todos os sistemas, armazenar todas as soluções visitadas e, após utilização dessa solução como solução corrente, ela se tornou proibida para o algoritmo e não foi visitada novamente. É importante esclarecer que se armazena apenas as soluções que são de fato visitadas, e não todas as soluções da vizinhança de cada iteração, isto é, armazena-se apenas a melhor solução de cada vizinhança visto que essa sempre será a próxima solução incumbente do algoritmo. Esse processo será mais bem explicado à frente. Essa proibição é uma forma de atributo proibido, mas não é considerada uma proibição convencional e inicial propriamente dita como ocorre em outros algoritmos de TS. Outra razão de não ter utilizado um critério de aspiração é que o algoritmo frequentemente encontra uma solução com melhor função objetivo na vizinhança da solução corrente em análise. A falta de um atributo proibido de fato e de um critério de aspiração são as razões pelas quais foi utilizada a Busca Tabu Reformulada para resolução do problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radiais (PRSDR).

É importante mencionar que outras estratégias de reconfiguração não foram utilizadas para esse problema. Uma dessas estratégias é o Path Relinking. Essa estratégia consiste em, após finalizar a recombinação através da meta-heurística, combinar duas propostas encontradas para gerar uma nova solução de qualidade superior. Tendo em vista que o programa encontra soluções de boa qualidade e encontrou as soluções ótimas para todos os quatro sistemas para os quais foi implementado, não houve necessidade de utilizar o Path Relinking.

5.1. ESTRUTURA PRIMÁRIA DA BUSCA TABU REFORMULADA

A Busca Tabu é considerada uma maneira bastante eficiente para percorrer todo o espaço de busca em um problema de distribuição, porque percorre esse espaço de forma inteligente e seletiva, utilizando estruturas de memória durante as transições.

A estrutura básica da TS reformulada é mostrada a seguir:

- **Etapa 1:** Inicialmente, é necessário encontrar e definir os dados do sistema, que são encontrados executando o algoritmo de fluxo de potência para o sistema com todos os ramos fechados. Assim, é possível determinar os dados iniciais de todos os ramos

do sistema em análise. Esses dados serão utilizados pelo algoritmo Prim para gerar a proposta de solução inicial, que será então a primeira solução corrente que neste caso também é a incumbente da meta-heurística TS. Além disso, é necessário escolher uma forma de representar cada proposta de solução. Essa representação é justamente o formato das propostas de solução e é a base da lógica, chamada *p*. Então, para cada proposta, é necessário calcular sua respectiva função objetivo, que nesse caso são as perdas de potência ativa calculadas através do algoritmo de fluxo de potência (carga), chamada *f(p)*. Finalmente, define-se a estrutura da vizinhança, que será o espaço de busca da estratégia de identificação e avaliação de propostas de solução vizinhas. Feito isso, é possível definir o chamado atributo de proibição do algoritmo, que é justamente se a proposta de solução de melhor função objetivo da vizinhança já foi ou não visitada e a duração da proibição através da TS até o critério de parada estipulado. Como mencionado anteriormente, a proposta é armazenar soluções completas e, portanto, não é usado lista de atributos proibidos nem critério de aspiração. Dessa forma, uma solução vizinha é descartada se já se encontra armazenada na matriz de propostas de soluções já visitadas.

- **Etapa 2:** Partindo desses dados iniciais é possível gerar uma topologia radial inicial de qualidade usando o algoritmo de Prim após especificar os pesos associados a cada ramo. Assim, pode-se atribuir pesos aleatórios aos ramos ou, melhor ainda, usar como pesos dos ramos a potência que passa pelo ramo quando se resolve um problema de fluxo de carga com todos os ramos fechados. A primeira solução incumbente da lógica TS é chamada *inc*. Usando o algoritmo de fluxo de potência obtém-se a sua função objetivo, chamada *pinc*. Essa proposta deverá ser incluída na matriz de soluções já visitadas que será utilizada como uma espécie de atributo proibido para a meta-heurística.
- **Etapa 3:** Através da identificação dos vizinhos da topologia corrente, chamado N1, determina-se todos os vizinhos da solução corrente, ou seja, a vizinhança, e calcula-se a função objetivo de cada uma dessas propostas de solução vizinhas usando o algoritmo de fluxo de carga que foi incluído ao algoritmo principal como uma sub-rotina. Então, ordena-se essas propostas a partir da qualidade de sua função objetivo, sendo a primeira proposta da lista aquela que apresenta a melhor função objetivo, isto é, a solução que apresente as menores perda de potência ativa, chama p^{best}.
- **Etapa 4**: Então, deve-se analisar se a melhor solução da vizinhança já foi ou não visitada ao longo das transições do algoritmo. Caso não tenha sido, o algoritmo faz

a transição para essa proposta, tornando-a nova solução corrente a ser utilizada na heurística. Caso tenha sido, analisa-se a segunda colocada da lista de melhores soluções da vizinhança, processo que deve ser repetido até encontrar um vizinho que ainda não foi visitado caso a segunda também já tenha sido visitada. Após encontrar a melhor proposta de solução que ainda não foi visitada, o algoritmo a torna a solução corrente. Adicionalmente, deve-se analisar a possibilidade de atualizar a incumbente, isto é, a melhor proposta de solução encontrada durante o processo até o estágio corrente.

- **Etapa 5**: Inclui-se a nova solução corrente à matriz de soluções visitadas, para que possa ser utilizada como uma proibição nas futuras iterações. Finalmente, o algoritmo analisa se atingiu o número de iterações estipulado previamente. Caso não tenha, o programa volta à **Etapa 3.** Se sim, fornece a matriz de soluções visitadas ordenadas pela qualidade da função objetivo das integrantes, com a melhor delas no topo da lista que é a incumbente de todo o processo de otimização e o programa termina.

Os sistemas em análise neste projeto não são tão complicados quanto outros sistemas podem ser, portanto essa estrutura é suficiente para resolver o PRSDR. A estrutura apresentada e utilizada é chamada Busca Tabu reformulada porque não utilizada nenhum critério de aspiração e nem lista de atributos proibidos durante a execução do algoritmo. A única proibição utilizada é se a solução em análise na vizinhança já foi ou não visitada. Essa verificação é realizada comparando o vizinho candidato com as topologias já visitadas e armazenadas na matriz de topologias já visitadas. Dessa forma, existe certeza ao verificar se uma topologia vizinha já foi visitada anteriormente. Essa certeza não existe quando é usado lista de atributos proibidos e critério de aspiração no caso do TS tradicional.

5.2. CARACTERÍSTICAS RELEVANTES CONSIDERADAS PARA UTILIZAÇÃO DA BUSCA TABU REFORMULADA

Deve-se considerar algumas características antes da implementação da Busca Tabu reformulada quando aplicada ao problema da reconfiguração. Essas características são:

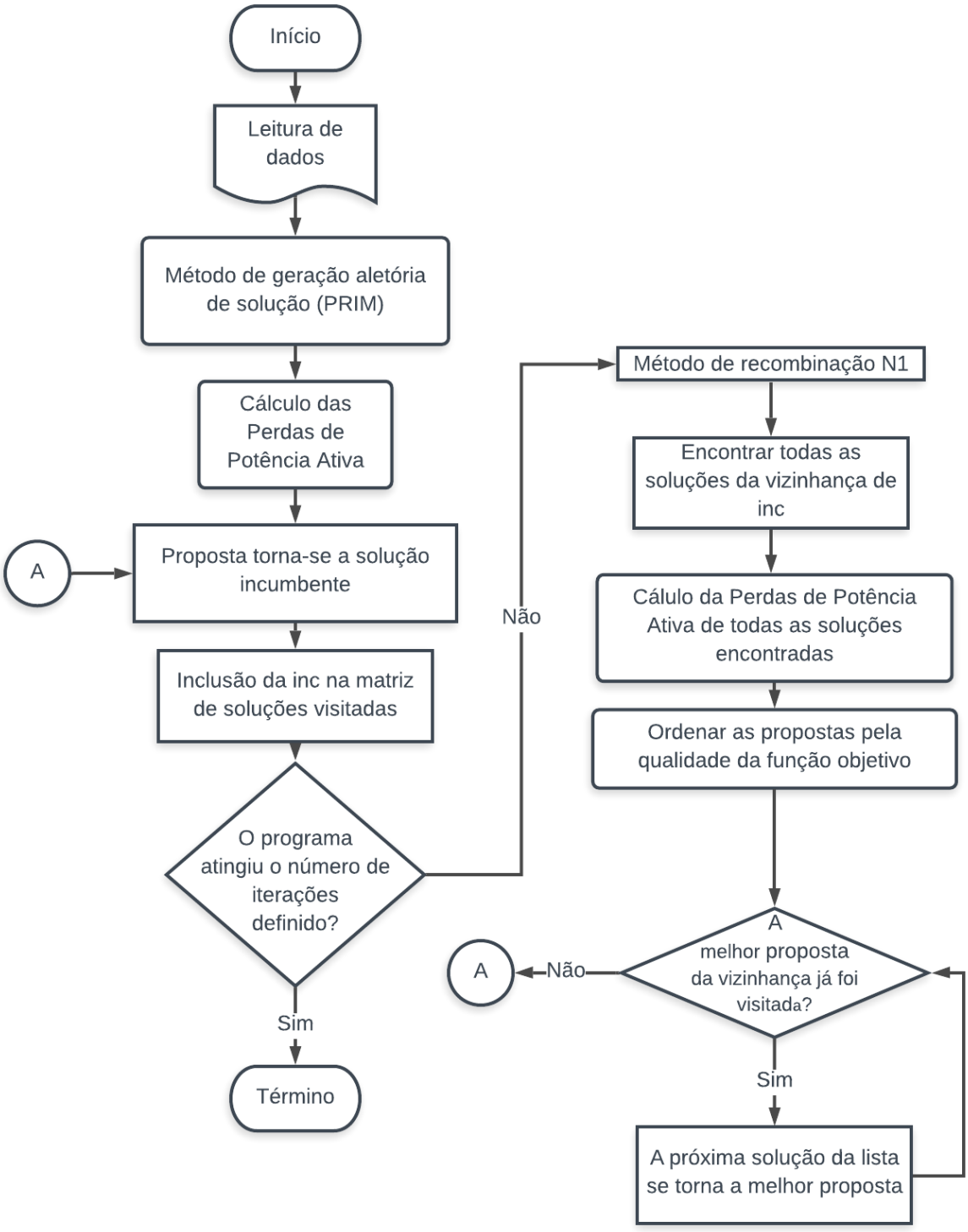
a) A forma de representar cada proposta de solução;
b) A forma como é gerada a solução inicial de qualidade;
c) A forma de se determinar a qualidade da proposta de solução e sua factibilidade;
d) A estrutura da vizinhança, a forma como é construída e a forma de implementar a transição da topologia corrente para a nova topologia corrente.

Como foi dito, a TS reformulada não usa atributo proibido nem critério de aspiração de fato e esse conceito pode ser excluído para este projeto.

O ponto positivo de usar esse formato de Busca Tabu é que ele exclui qualquer dúvida a respeito da visita ou não a uma proposta por armazenar todas aquelas que foram visitadas. Em grandes problemas ou sistemas, esse armazenamento certamente geraria problemas de armazenamento de memória, o que não acontece para os sistemas implementados.

O fluxograma mostrado na Figura 3 fornece as informações apresentadas anteriormente de forma mais simples e clara, permitindo uma melhor compreensão da meta-heurística da Busca Tabu.

Figura 3 – Fluxograma do algoritmo da Busca Tabu reformulada



Fonte: Elaborado pelo autor

Capítulo 6

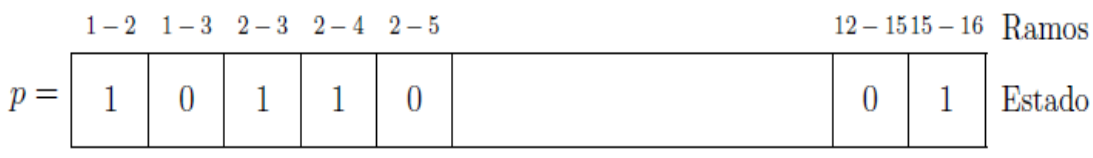
A META-HEURÍSTICA DA BUSCA TABU REFORMULADA APLICADA AO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO

No capítulo anterior fora apresentada a meta-heurística da Busca Tabu reformulada em sua forma geral. Este capítulo irá apresentar as características específicas de como a TS reformulada é aplicada ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radiais. Portanto, inicialmente será mostrado como representar uma proposta de solução. Em seguida, será explicado como implementar as demais características primárias da TS reformulada que foram apresentadas no Capítulo 4.

6.1. UMA FORMA DE REPRESENTAÇÃO DE UMA PROPOSTA DE SOLUÇÃO

A melhor forma de representar uma proposta de solução para a metaheurística da TS reformulada, sugerida na literatura especializada, é através de um vetor de tamanho nl, sendo nl o número de ramos do sistema de distribuição como se mostra na Figura 4. Essa representação foi a utilizada no desenvolvimento do programa e é a que é fornecida pelo algoritmo ao fim de sua execução, para cada respectivo sistema.

Figura 4 - Representação de uma proposta de solução



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4, o vetor que representa uma proposta de solução tem elementos binários. Assim, um valor de 1 indica que o ramo se encontra fechado, ou seja, energizado, e um valor de 0 indica que o ramo se encontra aberto. Essa representação foi utilizada neste projeto pois permite a utilização do método de identificação N1, método de troca entre dois ramos, um aberto e outro fechado. Para tornar mais fácil a visualização do que esses resultados representam, na seção de resultados serão mostrados apenas os ramos abertos das propostas. Isso não significa que o algoritmo não fornece o estado de todos os ramos do sistema, os resultados foram apenas simplificados para melhor entendimento. O aspecto mais importante é que a informação apresentada na Figura 4 deve representar uma topologia radial. Adicionalmente, toda proposta de solução gerada a partir de uma proposta de solução radial ou de várias propostas de solução radiais também deve ser radial. Implementar de forma eficiente essa estratégia é um dos problemas mais críticos na idealização de uma técnica de otimização no problema da reconfiguração de sistemas de distribuição radiais.

Assumindo que a proposta apresentada na Figura 4 representa uma topologia radial, então é possível encontrar a qualidade dessa proposta de solução. Para isso, deve-se resolver um problema de fluxo de carga radial para calcular as perdas de potência ativa e reativa da topologia, e as perdas ativas do sistema elétrico representam a função objetivo do problema, isto é, a qualidade da proposta de solução. Adicionalmente, a solução encontrada pelo algoritmo de fluxo de carga radial permite verificar a factibilidade da proposta de solução. Assim, após resolver o problema de fluxo de carga radial é possível verificar se existem violações de limites de tensão ou de corrente. Caso exista algum tipo de violação, então a proposta de solução é considerada não factível e, caso entre nessa caracterização, é descartada. O motivo principal para usar essa estratégia é que a topologia corrente de operação de um sistema de distribuição já é factível. A reconfiguração apenas melhora a já existente operação factível e, portanto, propostas não factíveis devem ser descartadas.

Finalmente, utilizando essa representação, atendem-se as duas primeiras características apresentadas na Seção 3.2 para a Busca Tabu reformulada. Além disso, através do algoritmo de fluxo de carga radial atende-se, também, a terceira característica que é justamente avaliar a qualidade de uma proposta de solução e se a essa é factível ou não.

6.2. ALGORITMO PRIM

Até esse momento mencionou-se muito o algoritmo Prim e um pouco de seu funcionamento devido à sua importância e relevância no projeto, mas sua estrutura não foi apresentada de fato. O algoritmo Prim, proposto por Robert C. Prim em 1957, foi utilizado na geração aleatória controlada de soluções iniciais. Esse algoritmo funciona da seguinte forma: inicialmente resolve-se o fluxo de carga radial para o sistema malhado, a fim de obter os fluxos de potência em cada ramo nessa configuração. Com os dados de fluxos nos ramos, lembrando que o sistema malhado é o sistema que apresenta menor função objetivo e que as propostas de solução radiais geradas devem se aproximar do sistema nessa configuração, cria-se o arquivo de dados utilizado pelo PRIM. A cada ramo é atrelado seu respectivo valor de fluxo de potência obtido do sistema malhado como sendo pesos dos ramos, formando um vetor de ramos e um vetor de fluxos de potência ou pesos. Com o algoritmo, esses vetores são lidos inicialmente e faz-se uma variação desses fluxos iniciais, tratados como pesos dos ramos para o algoritmo, em uma porcentagem pré-estabelecida, como 80% por exemplo, ou seja, multiplica-se os pesos iniciais de cada ramo por um número em um intervalo entre 0.2 e 1.8, sendo esse número gerado aleatoriamente através da sub-rotina de geração de números aleatórios.

Feito isso, o PRIM, nesse caso utilizado para maximizar a árvore, analisa os ramos e inclui na proposta de solução aqueles de maior peso, até que todas as barras estejam alimentadas, partindo da subestação. Sendo assim, ao partir da subestação, ele inclui à proposta o ramo de maior peso e que contém o nó (barra) de referência. Em seguida, inclui o ramo de maior peso e que contenha uma das barras dos ramos anteriormente incluídos, ou seja, deve-se verificar todas as barras já alimentadas e seus respectivos ramos com intuito de determinar o de maior peso, não importando a posição da barra (inicial ou final) já que ambas estão alimentadas para todos os ramos já incluídos. O processo é repetido até que todas as barras estejam alimentadas.

Por incluir à proposta de solução sempre o ramo de maior peso do sistema, considera-se que se trata de um Prim de maximização. Ao se energizar todas as barras do sistema, gera-se uma proposta de solução utilizada aqui como solução incumbente inicial. Esse mesmo processo foi utilizado para todos os sistemas implementados. É importante enfatizar que para gerar uma nova solução, o algoritmo deve alterar os pesos do sistema malhado, e não da última proposta de solução gerada. Para isso, após lido o arquivo de dados, os vetores de ramos e pesos são armazenados para serem utilizados sempre que o Prim recomeçar a sua lógica, caso seja necessário.

6.3. IMPLEMENTAÇÃO PASSO A PASSO DO ALGORITMO DE BUSCA TABU

Nesta seção será apresentada a forma como foi implementada a TS reformulada, mas agora aplicada ao PRSDR.

Etapa 1:

Nessa etapa são estabelecidos todos os dados do sistema, sendo eles: todas as impedâncias dos ramos, a potência aparente de cada barra, os valores base do sistema para utilização em p.u., o erro máximo para convergência entre duas iterações consecutivas do fluxo de carga e a solução base obtida ao executar o fluxo de potência para o sistema com todos os ramos fechados. Essa solução é justamente aquela que será utilizada pelo algoritmo Prim para geração da primeira proposta de solução, que será a primeira solução corrente e incumbente da TS reformulada. A forma de representar essas propostas bem como a maneira de determinar a função objetivo de cada uma delas. Portanto, na primeira etapa o algoritmo deve ler todos esses dados e gerar a primeira proposta da heurística TS. Verifica-se que há apenas um valor de fluxo de potência para cada ramo, obtido através do fluxo de potência com todos os ramos do sistema em operação, para a geração dessa primeira proposta de solução, ou seja, considera-se uma **demanda fixa** para o desenvolvimento deste trabalho. Neste trabalho são geradas topologias radiais com diversidade usando as ideias fundamentais de Merlin-Back. De acordo com Merlin-Back e com os demais trabalhos experimentais utilizados como embasamento teórico para construção deste, pode-se concluir que do ponto de vista prático a melhor topologia visando minimizar as perdas é a topologia malhada, isto é, o sistema de distribuição deve operar com todos os ramos fechados. Nesse contexto, uma topologia radial produz um incremento das perdas em relação à topologia totalmente malhada. Os sistemas de distribuição operam de forma radial por outros motivos tais como a facilidade de gerenciamento da proteção e a melhoria nas correntes de curto-circuito.

Dessa forma, os fluxos de potência através dos ramos do sistema de distribuição, com todos os ramos operando, representam os valores ideais para se ter perdas mínimas. Portanto, uma topologia radial de qualidade seria aquela topologia em que os fluxos dos ramos na topologia radial se afastem o menos possível da topologia totalmente malhada. Nessa estratégia, em cada passo se resolve um problema de fluxo de carga malhado da topologia corrente e, com essa informação, se retira aquele ramo que não desconecta o sistema e leva ao menor valor de fluxo

de potência. Esse processo é repetido até encontrar uma topologia radial. Neste trabalho usamos essa estratégia fundamental, mas em um contexto mais generalizado.

Inicialmente, como mencionado, com os dados de fluxo de potência de cada ramo, através do algoritmo Prim é gerada a primeira topologia radial de fato. Em outras palavras, forma-se a primeira proposta de solução, que é justamente aquela proveniente dos dados dos ramos que fora obtido executando o fluxo de potência para o sistema malhado. O algoritmo principal realiza a leitura dos dados de fluxo de potência dos ramos, que serão utilizados como pesos e os demais dados do sistema mencionados anteriormente. Com essas informações, fornece a primeira solução, solução essa que não entra na heurística da TS, é apenas utilizada pelo algoritmo Prim para gerar a primeira solução corrente. Essa solução é formada fechando os ramos que possuem os maiores pesos, ou seja, os maiores valores de fluxo de potência, até que todas as barras estejam alimentadas. O ramo fechado recebe o número um como referência na proposta de solução. Deve-se observar que, mesmo que se trate de um ramo com um alto valor de fluxo de potência quando o sistema apresenta característica malhada, se suas barras inicial e final já foram alimentadas, esse respectivo ramo deve permanecer aberto, recebendo referência zero na proposta de solução. Essa, portanto, é a proposta de solução proveniente dos dados do sistema, que será utilizada pelo Prim para construir uma nova solução, que é justamente a primeira solução corrente da lógica Tabu.

Etapa 2:

Nessa etapa, através do Prim, usando uma sub-rotina de geração de números aleatórios, alteram-se os pesos iniciais da solução de dados para obter uma nova proposta. É gerado uma quantidade de números aleatórios exatamente igual ao número de ramos do sistema. Esses números se encontram na faixa entre 0,4 e 1,6, ou seja, variação de 60% nos pesos iniciais. Então, multiplicam-se os pesos iniciais dos ramos por seus respectivos números aleatórios gerados, ou seja, o peso do ramo um é multiplicado pelo número aleatório um gerado e assim sucessivamente. Em seguida, o algoritmo fecha os ramos que possuem os maiores pesos até que todas as barras estejam alimentadas, da mesma forma que para a solução de dados. Fazendo isso, o algoritmo Prim é completado, é uma nova solução completamente diferente da proveniente dos dados do sistema é gerada, chamada *inc*. Essa última, portanto, é a que será utilizada como a primeira solução corrente da lógica da TS reformulada, que tem início logo após a finalização do Prim no algoritmo principal. O algoritmo Prim fornece a topologia radial mínima do sistema de distribuição, e que as somas dos pesos dos ramos da topologia são

maximizadas. O algoritmo de Prim é exato, isto é, sempre encontra a solução ótima do problema de árvore geradora (topologia radial) mínima (ou máxima). Entretanto, para o problema da reconfiguração encontra apenas uma solução de boa qualidade porque não existe uma relação exata entre os pesos atribuídos aos ramos e as perdas mínimas.

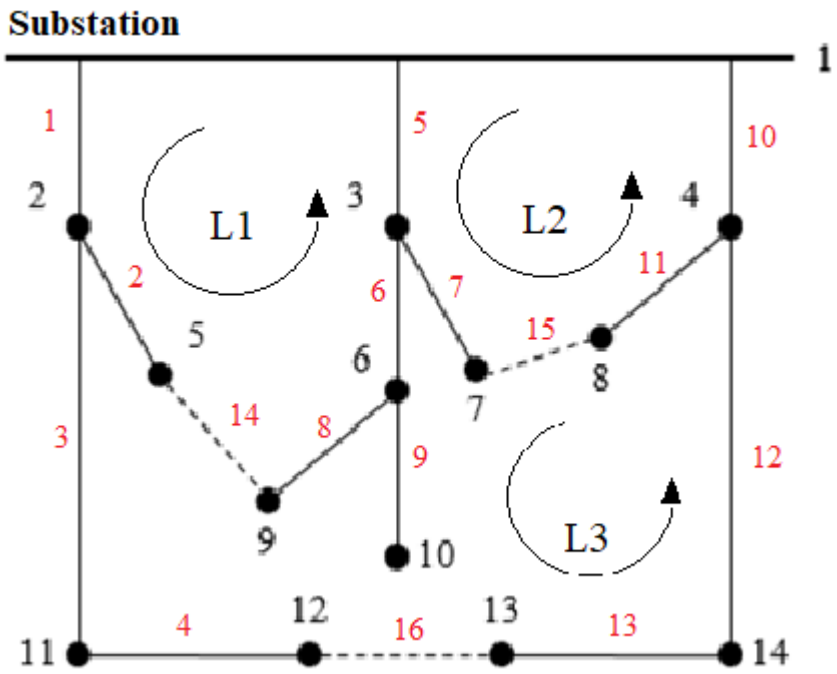
Finalmente, usando a lógica do fluxo de potência, calculam-se as perdas de potência ativa e reativa (pinc) para essa a solução corrente. A partir desse momento, usa-se a Busca Tabu reformulada e o método de vizinhança N1 para construir a vizinhança da proposta. Além disso, deve-se armazenar a solução corrente na matriz de soluções visitadas a fim de garantir que essa solução não será visitada novamente e evitar repetições no programa principal. Fazendo-se isso, cria-se uma espécie de atributo proibido, mas essa proibição não desclassifica a TS de ser uma TS reformulada, como mencionado.

Etapa 3:

Nesta etapa, devem-se determinar todos os vizinhos da solução corrente e calcular a função objetivo de cada um desses vizinhos, utilizando o algoritmo de fluxo de carga radial atrelado ao algoritmo principal como uma sub-rotina. Para a determinação dos vizinhos utiliza-se a especificação de vizinhança N1.

O método de vizinhança N1 é o método mais básico da meta-heurística de Busca Tabu, mas ainda assim é um método extremamente poderoso. É possível verificar sua qualidade através dos resultados obtidos a partir da implementação desse projeto. Esse método de construção da estrutura da vizinhança é iniciado a partir da identificação de todos os laços do sistema em análise.

Figura 5 – O modelo do sistema de 14 barras e seus respectivos laços



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 5 mostra uma possível configuração de solução do sistema de 14 barras. A barra 1 é a subestação e os números em vermelho indicam os ramos do sistema e cada ramo possui uma chave de manobra para ligamento ou desligamento. A configuração radial mostrada é formada pelos ramos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, totalizando 13 ramos fechados. Os ramos 14, 15 e 16 são considerados ramos de ligação, nesse caso, pois estão abertos. Um caminho fechado em uma topologia é chamado de laço. Sabe-se que, da teoria de sistemas de distribuição, laços que contém apenas um ramo de ligação são laços independentes. Esses laços são chamados laços básicos. A topologia da Figura 5 apresenta três laços: L1 (formado pelos ramos 1, 2, 5, 6, 8 e 14), L2 (formado pelos ramos 5, 7, 10, 11 e 15) e L3 (formado pelos ramos 1, 3, 4, 10, 12, 13 e 16).

Como foi dito, a topologia radial apresentada possui os ramos 14, 15 e 16 desligados, ou seja, esses ramos estão com suas chaves de manobra abertas. Se fecharmos uma dessas chaves, por exemplo a chave referente ao ramo 14, um laço será formado. Nesse caso, o ramo L1 é formado e, para tornar o sistema novamente radial, um dos ramos do laço L1 deverá ser aberto para dar lugar ao ramo 14.

O método de vizinhança N1 funciona, basicamente, da mesma forma em que a estrutura acima apresentada, e é igual para todos os sistemas, sendo as diferenças apenas no número de barras e de ramos em cada sistema de distribuição. Inicialmente, nesse método, identificam-se todos os ramos abertos da solução corrente em análise. Em seguida, usa-se uma lógica para encontrar todos os laços formados por esses ramos abertos. Após identificar todos os laços, para cada laço, fecha-se um ramo aberto e abre-se um respectivo ramo fechado. Fazendo-se isso, para cada troca de um ramo aberto por outro fechado, obtém-se uma nova proposta de solução. Deve-se realizar essa troca para cada ramo do laço, sempre fechando um laço da solução corrente e não um laço aberto das novas propostas de solução geradas. Sendo assim, para que a lógica funcione, após cada troca de ramos, armazena-se cada nova solução gerada em uma matriz e retorna-se para a solução atual para uma nova análise. O número de novas propostas geradas é igual ao número de ramos fechados para cada laço da solução corrente. Portanto, se faz necessário armazenar, temporariamente, todas as novas propostas de solução geradas pela execução do método de vizinhança N1. Essa matriz é justamente a vizinhança da solução corrente e será descartada ao final da iteração, para reduzir os esforços computacionais. O método N1 é o método de construção de vizinhança da Busca Tabu reformulada nesse caso. Há inúmeros outros métodos de construção de vizinhança na teoria de meta-heurística, mas, em um projeto desse nível, o método N1 é suficiente para obter resultados bastante significativos.

Após encontrar todas as novas propostas de solução para a solução corrente, devem-se calcular as perdas de potência ativa e reativa de cada uma dessas propostas, utilizando o algoritmo de fluxo de carga radial anteriormente explicado, o mesmo que foi feito incialmente para a solução corrente. A função objetivo de cada uma das candidatas é também armazenada, na forma de vetor, para comparação futura na **Etapa 4**. A maior parte dessas candidatas possui diferentes valores de função objetivo entre si. Pode ocorrer uma igualdade de função objetivo entre duas trocas de ramos consecutivas se, na primeira troca, o ramo conectado é um ramo sem carga. Esse fato raramente ocorre e não prejudica a execução do algoritmo devido ao atributo proibido, base no valor da função objetivo de cada proposta. Caso duas ou mais propostas de solução possuam o mesmo valor de perdas de potência ativa, apenas uma dessas soluções será visitada ao longo da heurística porque não é necessário e nem adequado haver duas soluções de mesma função objetivo nos resultados fornecidos. Para isso, a solução de mesma função objetivo que a já armazenada na matriz de soluções visitadas será simplesmente descartada. Com a informação das perdas de potência ativa, a matriz de candidatas será ordenada com base na qualidade da função objetivo das integrantes e será identificada a melhor da lista. Essa

solução, com o menor valor de função objetivo entre todas as propostas geradas, caso não tenha sido visitada, será chamada p^{best}.

Etapa 4:

Após identificar a melhor solução da vizinhança, deve-se analisar se essa solução já foi visitada, comparando-a a todas as soluções incluídas na matriz de soluções visitadas, e por isso a importância e relevância dessa última como substituição ao critério de atributo proibido. Essa comparação é feita analisando somente a função objetivo das propostas, para diminuir esforços computacionais. Esse método de comparação pode ser utilizado porque raramente teremos duas soluções com mesma função objetivo e caso ocorra, a segunda será descartada. Caso a candidata se encontre na matriz de soluções visitadas, faz-se uma nova verificação para a candidata imediatamente seguinte na matriz vizinhança construída e ordenada na **Etapa 3**. Esse processo é repetido até que se encontre a melhor solução da vizinhança que ainda não foi visitada ao longo da execução do programa. Ao encontrar, essa solução torna-se a solução incumbente da TS.

Etapa 5:

A última etapa é basicamente a mesma que a já explicada no Capítulo 3. Deve-se incluir a nova solução encontrada, encontrada na **Etapa 4**, na matriz de soluções visitadas. Finalmente, o algoritmo analisa se atingiu o número de iterações definido previamente. Caso não, volta à **Etapa 3**. Caso tenha, fornece a matriz de soluções visitadas ordenadas através da qualidade da função objetivo, com a melhor das propostas ocupando o topo da lista e chamada de incumbente, e o algoritmo é finalizado.

Capítulo 7

RESULTADOS

Os algoritmos da Busca Tabu reformulada e do Fluxo de Potência (carga) radial foram desenvolvidos utilizando a linguagem FORTRAN, por meio do software Microsoft Developer Studio, com ambos estruturados e combinados em um arquivo f90 principal. Os testes foram executados utilizando um notebook com um processador Intel® Core ™ i5-5200U de 2,2 GHz e 8 GB de RAM. Para analisar a performance do algoritmo, os testes foram realizados para os sistemas de 14, 33, 84 e 136 Barras e as estruturas desses sistemas está mostrada no Anexo.

7.1. RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS

A primeira reconfiguração usando a heurística da TS reformulada foi aplicada ao sistema de 14 barras. Esse sistema possui 13 barras em operação, uma barra referente à subestação e 16 ramos, mas apenas 13 ramos são energizados e irão compor as propostas de solução geradas. A tensão base do sistema é 23 kV e potência base é 100 MVA. Esse sistema possui apenas 190 topologias radiais possíveis, um número relativamente pequeno quando comparado os demais sistemas comumente utilizados em uma escala global. Isso o torna um sistema mais fácil de implementar e analisar, o que reduz o processamento necessário para atingir a solução ótima e topologia ótima.

O algoritmo da TS forneceu a solução ótima em 0,86s, tendo executado 48 problemas de fluxos de carga. Utilizou-se duas iterações para esse caso, que foram suficientes para encontrar a melhor solução do sistema.

A primeira solução incumbente gerada pelo algoritmo Prim por meio da solução de dados (base) é a proposta que possui 508,0224 kW de perdas de potência ativa. A solução ótima do sistema e a solução ótima fornecida pelo algoritmo possui 466,1021 kW de perdas de potência ativa.

A Tabela 1 mostra todas as soluções visitadas durante as iterações do algoritmo. A tabela mostra ainda os ramos abertos para cada proposta, as perdas de potência ativa que a solução compreende e o decréscimo percentual das perdas de potência ativa em relação a primeira solução incumbente.

Tabela 1 – Resultados obtidos para o sistema de 14 Barras

Heurística	Soluções	Número de Iterações	Perdas de Potência Ativa (kW)	Queda percentual em relação a solução inicial	Ramos Abertos	Tempo de Execução
TS Reformulada	Primeira solução	0	508,0224	-	7, 13, 14	0,86s
	Solução de Transição	1	483,8675	4,7547%	7, 14, 16	
	Solução ótima	2	466,1021	8,2517%	7, 8, 16	

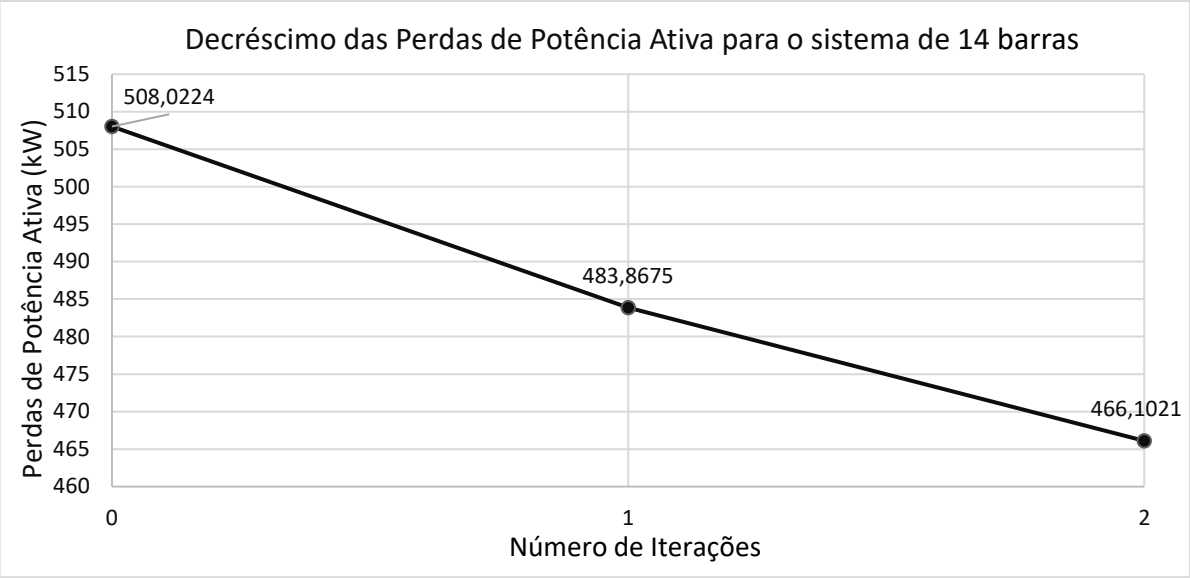
Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a Tabela 1 é possível notar que houve um decréscimo de 8,2517% entre a primeira solução e a solução ótima encontrada. Isso representa uma melhora substancial considerando o número de iterações utilizadas. Além disso, o tempo de execução é extremamente baixo, o que permite a utilização do algoritmo de forma prática para sistemas de pequeno porte.

A solução ótima fornecida pela Busca Tabu reformulada neste projeto é a solução ótima do sistema como mostrado em MANTOVANI, et al. (2000).

A Figura 6 mostra a evolução e o decréscimo das perdas de potência ativa para o sistema fornecida pela reconfiguração utilizando a TS reformulada. Essa redução foi obtida durante as transições da meta-heurística. Através do gráfico é possível verificar de uma maneira melhor essa evolução, pois fornece uma melhor ilustração do decréscimo obtido. Além disso, a compreensão dos resultados mostrados na Tabela 1 é facilitada utilizando o gráfico apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Perfil de decréscimo de perdas de potência ativa para o sistema de 14 barras



Fonte: Elaborado pelo autor

Como mencionado anteriormente, a melhor solução encontrada pela Busca Tabu reformulada foi a proposta com 466,1021 kW de perdas de potência ativa. Essa solução é a última solução mostrada no perfil da Figura 6 e foi encontrada utilizando-se apenas duas iterações.

7.2. RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 33 BARRAS

A segunda reconfiguração usando a heurística da TS reformulada foi aplicada ao sistema de 33 barras. Esse sistema possui 32 barras em operação, uma barra referente à subestação e 37 ramos, mas apenas 32 ramos são energizados e irão compor as propostas de solução geradas. A tensão base do sistema é 12,66 kV e potência base é 1000 kVA. As demandas totais de potência ativa e reativa são, respectivamente 3715 kW e 2300 kVAr e a tensão mínima no sistema inicial é 0,9131 p.u. Esse sistema possui 50751 topologias radiais possíveis e é claramente mais complexo que o primeiro sistema analisado, porém o algoritmo ainda encontra a solução ótima desse sistema em poucas iterações, apesar do número extremamente superior de topologias radiais possíveis.

O algoritmo da TS forneceu a solução ótima em 0,953s, tendo executado 265 problemas de fluxos de carga. Utilizou-se quatro iterações para esse caso, que foram suficientes para encontrar a melhor solução do sistema. Esse número de iterações é substancialmente baixo para a meta-heurística utilizada, e é o mesmo número mostrando em POSSAGNOLO, et al. (2015) utilizado para obter a solução ótima do sistema, embora nesse trabalho o autor tenha usado diferentes heurísticas.

A primeira solução incumbente gerada pelo algoritmo Prim por meio da solução de dados (base) é a proposta que possui 158,4095 kW de perdas de potência ativa. A solução ótima do sistema e solução ótima fornecida pelo algoritmo possui 139,5513 kW de perdas de potência ativa.

A Tabela 2 mostra todas as soluções visitadas durante as iterações do algoritmo. A tabela mostra ainda os ramos abertos para cada proposta, as perdas de potência ativa que a solução compreende e o decréscimo percentual das perdas de potência ativa em relação a primeira solução incumbente.

Tabela 2 – Resultados obtidos para o sistema de 33 barras

Heurística	Soluções	No. de Iterações	Perdas de Potência Ativa (kW)	Queda percentual em relação à solução inicial	Ramos Abertos	Tempo de Execução
TS Reformulada	Primeira solução	0	158,4095	-	6, 10, 14, 26, 36	0,953s
	Soluções de Transição	1	144,7374	8,6309%	6, 10, 14, 36, 37	
		2	142,6782	9,9308%	7, 10, 14, 36, 37	
		3	140,2789	11,4454%	7, 10, 14, 32, 37	
	Solução ótima	4	139,5513	11,9047%	7, 9, 14, 32, 37	

Fonte: Elaborado pelo autor

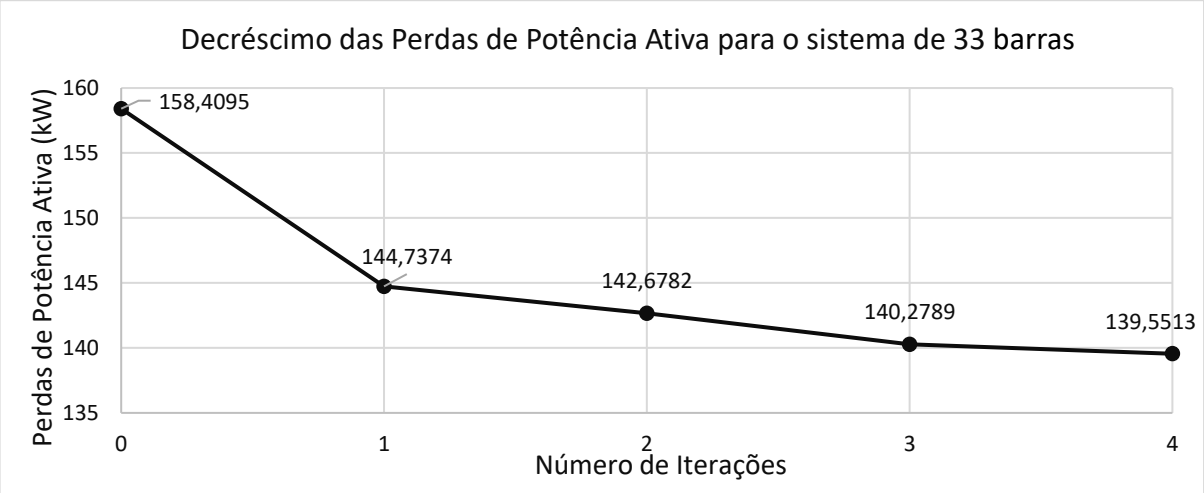
Analisando a Tabela 2 é possível notar que houve um decréscimo de 11,9047% entre a primeira solução e a solução ótima encontrada. Isso representa uma melhora substancial considerando o número de iterações utilizadas. Além disso, o tempo de execução é extremamente baixo, o que permite a utilização do algoritmo de forma prática para sistemas de pequeno porte. Nota-se ainda que o decréscimo percentual para esse sistema foi maior que para

o sistema de 14 barras, ou seja, obteve-se uma melhora na eficiência do algoritmo apesar do aumento do porte e da complexidade do sistema.

A solução ótima fornecida pela Busca Tabu reformulada neste projeto é a solução ótima do sistema como mostrado em MANTOVANI, et al. (2000). Comparando os resultados obtidos nesse trabalho com os resultados disponíveis nos documentos usados para embasamento teórico, é possível verificar a qualidade dos resultados apresentados.

A Figura 7 mostra a evolução e o decréscimo das perdas de potência ativa para o sistema fornecida pela reconfiguração utilizando a TS reformulada. Essa redução foi obtida durante as transições da meta-heurística. Através do gráfico é possível verificar de uma maneira melhor essa evolução, pois fornece uma melhor ilustração do decréscimo obtido. Além disso, a compreensão dos resultados mostrados na Tabela 2 é facilitada utilizando o gráfico apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Perfil de decréscimo de perdas de potência ativa para o sistema de 33 Barras



Fonte: Elaborado pelo autor

Como mencionado anteriormente, a melhor solução encontrada pela Busca Tabu reformulada foi a proposta com 139,5513 kW de perdas de potência ativa. Essa solução é a última solução mostrada no perfil da Figura 7 e foi encontrada utilizando-se quatro iterações.

7.3. RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 84 BARRAS

A terceira reconfiguração usando a heurística da TS reformulada foi aplicada ao sistema de 84 Barras. Esse sistema possui 83 barras em operação, uma barra referente à subestação e 96 ramos, mas apenas 83 ramos são energizados e irão compor as propostas de solução geradas. A tensão base do sistema é 11,40 kV e potência base é 10 MVA. As demandas totais de potência ativa e reativa são, respectivamente 28351 kW e 20700 kVAr e a tensão mínima no sistema inicial é 0,9285 p.u. Esse sistema possui $3{,}5196 \cdot 10^{11}$ topologias radiais possíveis, valor 693 vezes maior que as possibilidades do sistema de 33 barras. O número de topologias é calculado usando o Teorema Matriz-Árvore como mostrado em POSSAGNOLO, et al. (2015)

O algoritmo da TS forneceu a solução ótima em 1,427s, tendo executado 1077 problemas de fluxos de carga. Utilizou-se oito iterações para esse caso, que foram suficientes para encontrar a melhor solução do sistema. Esse número de iterações é consideravelmente baixo em se tratando do método de vizinhança utilizado e da complexidade do sistema em análise.

A primeira solução incumbente gerada pelo algoritmo Prim por meio da solução de dados (base) é a proposta que possui 574,8112 kW de perdas de potência ativa. A solução ótima do sistema e solução ótima fornecida pelo algoritmo possui 469,8733 kW de perdas de potência ativa.

A Tabela 3 mostra todas as soluções visitadas durante as iterações do algoritmo. A tabela mostra ainda os ramos abertos para cada proposta, as perdas de potência ativa que a solução compreende e o decréscimo percentual das perdas de potência ativa em relação a primeira solução incumbente.

Tabela 3 – Resultados obtidos para o sistema de 84 barras

Heurística	Soluções	Número de Iterações	Perdas de Potência Ativa (kW)	Queda percentual em relação a solução inicial	Ramos Abertos	Tempo de Execução
TS Reformulada	Primeira solução	0	574,8112	-	9, 25, 28, 33, 40, 42, 61, 69, 82, 84, 86, 88, 89	1,427s
	Soluções de Transição	1	515,4269	10,3311%	9, 25, 28, 33, 40, 42, 61, 72, 82, 84, 86, 88, 89	
		2	511,1604	11,0733%	9, 28, 33, 40, 42, 61, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90	
		3	472,3054	17,8330%	9, 33, 40, 42, 61, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90, 92	
		4	471,5005	17,9730%	9, 34, 40, 42, 61, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90, 92	
		5	470,8073	18,0936%	9, 34, 40, 42, 55, 61, 72, 82, 86, 88, 89, 90, 92	
		6	470,2793	18,1854%	9, 34, 40, 42, 55, 61, 72, 83, 86, 88, 89, 90, 92	
		7	469,9692	18,2394%	9, 13, 34, 40, 42, 55, 61, 72, 83, 86, 89, 90, 92	
	Solução ótima	8	469,8733	18,2561%	9, 13, 34, 40, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92	

Fonte: Elaborado pelo autor

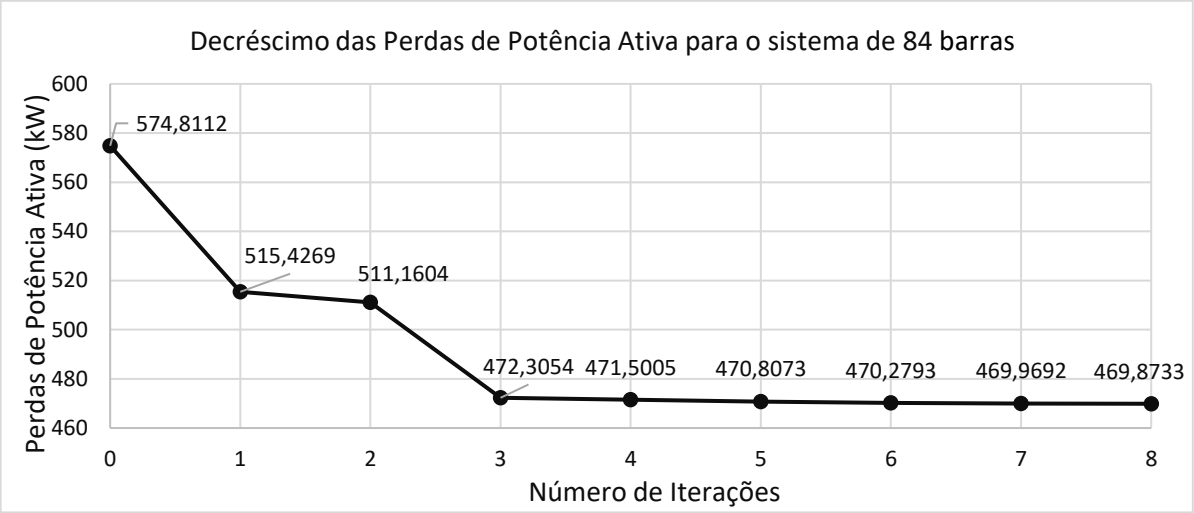
Analisando a Tabela 3 é possível notar que houve um decréscimo de 18,2561% entre a primeira solução e a solução ótima encontrada. Isso representa uma melhora substancial considerando o número de iterações utilizadas. Além disso, o tempo de execução é extremamente baixo, o que permite a utilização do algoritmo de forma prática para sistemas de médio porte. Nota-se ainda que o decréscimo percentual para esse sistema foi maior que para os sistemas de 14 e 33 barras, ou seja, obteve-se uma melhora na eficiência do algoritmo apesar do aumento do porte e da complexidade do sistema. Essa melhoria depende também da solução utilizada como incumbente inicial, que para o nosso algoritmo é variável, já que depende tanto do algoritmo do Prim quando da sub-rotina de número aleatórios, que varia e não é constante para toda execução do algoritmo para um mesmo sistema.

A solução ótima fornecida pela Busca Tabu reformulada neste projeto é a solução ótima do sistema como mostrado em MANTOVANI, et al. (2000). Comparando os resultados obtidos nesse trabalho com os resultados disponíveis nos documentos usados para embasamento teórico, é possível verificar a qualidade dos resultados apresentados nesse.

A Figura 8 mostra a evolução e o decréscimo das perdas de potência ativa para o sistema fornecida pela reconfiguração utilizando a TS reformulada. Essa redução foi obtida durante as

transições da meta-heurística. Através do gráfico é possível verificar de uma maneira melhor essa evolução, pois fornece uma melhor ilustração do decréscimo obtido. Além disso, a compreensão dos resultados mostrados na Tabela 3 é facilitada utilizando o gráfico apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Perfil de decréscimo de perdas de potência ativa para o sistema de 84 barras



Fonte: Elaborado pelo autor

Como mencionado anteriormente, a melhor solução encontrada pela Busca Tabu reformulada foi a proposta com 469,8733 kW de perdas de potência ativa. Essa solução é a última solução mostrada no perfil da Figura 8 e foi encontrada utilizando-se oito iterações.

7.4. RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 136 BARRAS

A última reconfiguração usando a heurística da TS reformulada foi aplicada ao sistema de 136 barras. Esse sistema possui 135 barras em operação, uma barra referente à subestação e 156 ramos, mas apenas 135 ramos são energizados e irão compor as propostas de solução geradas. A tensão base do sistema é 13,8 kV e potência base é 100 MVA. As demandas totais de potência ativa e reativa são, respectivamente 18313,81 kW e 7932,53 kVAr e a tensão mínima no sistema

inicial é 0,9307 p.u. Esse sistema possui $2{,}2686 \cdot 10^{18}$ topologias radiais possíveis, valor dez milhões de vezes maior que as possibilidades do sistema de 84 barras. O número de topologias é calculado usando o Teorema Matriz-Árvore como mostrado em Leonardo et al. (2015). Devido à grande diferença no número de topologias, fica evidente que se trata de um sistema consideravelmente mais complexo de se resolver. Essa complexidade pode ser potencializada também pela localização dos ramos e chaves, ou seja, da topologia da rede malhada. Isso ficará evidente no aumento expressivo do tempo de execução e do número de iterações que o algoritmo executa para encontrar a solução ótima.

O algoritmo da TS forneceu a solução ótima em 8,093 segundos, tendo executado 4730 problemas de fluxos de carga. Utilizou-se 16 iterações para esse caso, que foram suficientes para encontrar a melhor solução do sistema. Esse número de iterações é consideravelmente baixo em se tratando do método de vizinhança utilizado e da complexidade do sistema em análise, mas equivale ao dobro de iterações utilizadas no sistema anterior. O número de vezes em que foi chamado o algoritmo de fluxo de potência foi quatro vezes maior e o tempo de execução foi oito vezes maior, também em relação ao sistema anterior. Apesar disso, pode-se considerar que, pela enormidade de propostas existentes para o sistema de 136 barras e pela complexidade desse sistema, o algoritmo tem ótimo rendimento e resolve o PRSDR para esse caso de forma relativamente rápida.

A primeira solução incumbente gerada pelo algoritmo Prim por meio da solução de dados (base) é a proposta que possui 300,9390 kW de perdas de potência ativa. A solução ótima do sistema e solução ótima fornecida pelo algoritmo possui 280,1973 kW de perdas de potência ativa.

A Tabela 4 mostra todas as soluções visitadas durante as iterações do algoritmo. A tabela mostra ainda os ramos abertos para cada proposta, as perdas de potência ativa que a solução compreende e o decréscimo percentual das perdas de potência ativa em relação a primeira solução incumbente.

Tabela 4 – Resultados obtidos para o sistema de 136 barras

Heurística	Soluções	Número de Iterações	Perdas de Potência Ativa (kW)	Queda percentual em relação a solução inicial	Ramos Abertos	Tempo de Execução
TS Reformulada	Primeira solução	0	300,9390	-	9, 54, 79, 90, 96, 106, 126, 135, 136, 138, 139, 140, 141, 143, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	8,093s
	Soluções de Transição	1	286,4746	4,8064%	9, 54, 90, 96, 106, 126, 135, 136, 138, 139, 140, 141, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	
		2	284,1626	5,5747%	9, 54, 90, 106, 118, 126, 135, 136, 138, 139, 140, 141, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	
		3	283,9351	5,6503%	7, 9, 54, 90, 106, 118, 126, 135, 138, 139, 140, 141, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	
		4	283,8218	5,6879%	7, 9, 53, 90, 106, 118, 126, 135, 138, 139, 140, 141, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	
		5	282,8438	6,0129%	7, 9, 53, 90, 106, 118, 126, 135, 138, 139, 140, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 152, 155	
		6	282,0204	6,2865%	7, 9, 51, 53, 90, 106, 118, 126, 135, 138, 139, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 152, 155	
		7	281,3159	6,5206%	7, 9, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 138, 139, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	
		8	280,7291	6,7156%	7, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 139, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	
		9	280,4557	6,8065%	7, 38, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	
		10	280,2739	6,8669%	7, 38, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 126, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155, 156	
		11	280,4043	6,8235%	7, 38, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 126, 137, 138, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 152, 155, 156	
		12	280,4106	6,8214%	7, 38, 50, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 126, 137, 138, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155, 156	
		13	280,5807	6,7649%	7, 38, 50, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 137, 138, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 156	
		14	280,4440	6,8104%	7, 38, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 156	
		15	280,3122	6,8541%	7, 38, 51, 53, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 156	
	Solução ótima	16	280,1973	6,8923%	7, 51, 53, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 137, 138, 139, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 156	

Fonte: Elaborado pelo autor

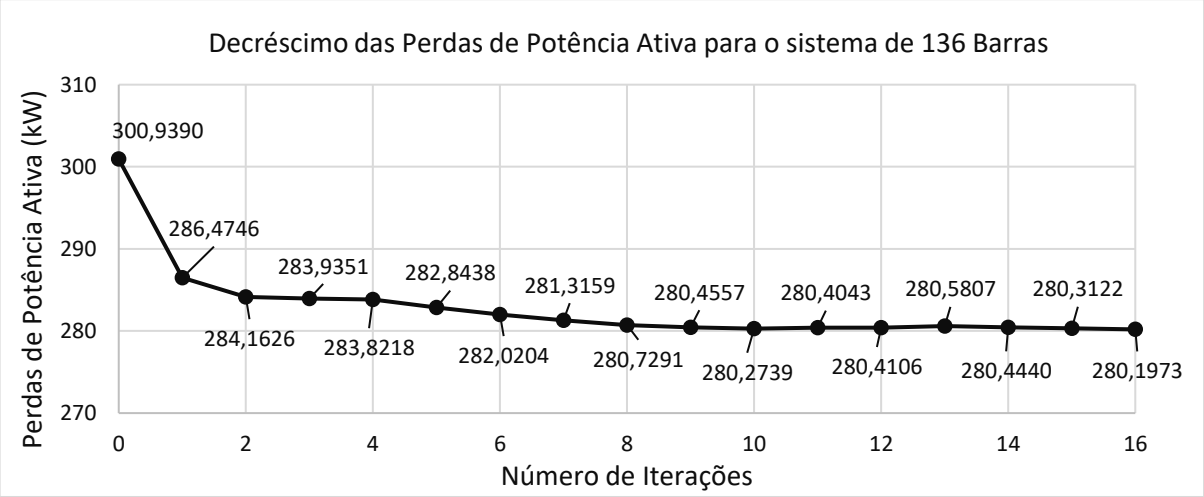
Analisando a Tabela 4 é possível notar que houve um decréscimo de 6,8923% entre a primeira solução e a solução ótima encontrada. Isso representa uma melhora substancial considerando o número de iterações utilizadas. Além disso, o tempo de execução é extremamente baixo, o que permite a utilização do algoritmo de forma prática para sistemas de pequeno porte. Nota-se ainda que o decréscimo percentual para esse sistema foi menor que para os sistemas de 14, 33 e 84 Barras, e isso se deve ao fato de que a solução incumbente inicial gerada já era de ótima qualidade, então, percentualmente, a melhora proporcionada não é tão significativa, mas, em termos operacionais, representa uma ótima evolução para um sistema dessa proporção. Como foi dito, essa melhoria depende da solução utilizada como incumbente inicial, que para o nosso algoritmo é variável, já que depende tanto do algoritmo do Prim quando da sub-rotina de número aleatórios, que varia e não é constante para toda execução do algoritmo para um mesmo sistema. Caso fosse piorada, de alguma forma, a solução corrente inicial, a melhora em termos percentuais seria superior à apresentada.

Nota-se ainda, pela tabela, que da iteração 10 até a iteração 13 houve uma degradação da qualidade das propostas de solução respectivas a essas iterações. Isso é comum em algoritmos que utilizam a TS reformulada, como foi dito ao longo da teoria desse projeto. A heurística migra para uma proposta de pior qualidade para mudar a vizinhança em análise, o que possibilita encontrar a solução ótima do sistema, como ocorreu para o sistema de 136 barras. A solução ótima fornecida pela Busca Tabu reformulada neste projeto, última proposta da Tabela 4, é bem próxima da solução ótima do sistema mostrada em POSSAGNOLO, et al. (2015). Vale ressaltar que, nesse caso, apesar de os valores desse trabalho e do artigo mencionado serem iguais, as propostas de solução são diferentes (evidenciado pelos ramos abertos apresentados), e os valores também são possivelmente diferentes, mas acabaram sendo iguais, nesse caso, devido aos métodos de aproximação diferentes dos softwares utilizados. Comparando os resultados obtidos nesse trabalho com os resultados disponíveis nos documentos usados para embasamento teórico, é possível verificar a qualidade dos resultados apresentados nesse. A solução ótima para esse sistema apresenta 280,1672 kW de perdas de potência ativa, o que representa uma diferença de apenas 0,01% para melhor solução apresentada pelo algoritmo em 16 iterações. O algoritmo encontra essa solução, usando a mesma estrutura e características dos resultados apresentados até aqui, após 259 iterações e 65,414 s de processamento. Como o ganho é pouco expressivo, apresentou-se os resultados até a segunda melhor solução, encontrada em um tempo relativamente inferior. O autor trouxe esse dado apenas para conhecimento dos leitores, e a explicação para essa diferença se encontra nas limitações da estrutura de geração de números aleatórios do Fortran, e varia para cada caso ou execução do

algoritmo. Para cada número aleatório gerado, o algoritmo parte de uma região da vizinhança, que pode estar mais próxima ou não da solução ótima, e por isso a diferença no tempo de processamento e no número de iterações necessárias para encontrar a solução ótima.

A Figura 9 mostra a evolução e o decréscimo das perdas de potência ativa para o sistema fornecida pela reconfiguração utilizando a TS reformulada. Essa redução foi obtida durante as transições da meta-heurística. Através do gráfico é possível verificar de uma maneira melhor essa evolução, pois fornece uma melhor ilustração do decréscimo obtido. Além disso, a compreensão dos resultados mostrados na Tabela 4 é facilitada utilizando o gráfico apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Perfil de decréscimo de perdas de potência ativa para o sistema de 136 barras.



Fonte: Elaborado pelo autor

Como mencionado anteriormente, a melhor solução encontrada pela Busca Tabu reformulada foi a proposta com 280,1973 kW de perdas de potência ativa. Essa solução é a última solução mostrada no perfil da Figura 9 e foi encontrada utilizando-se 16 iterações.

Capítulo 8

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um algoritmo baseado na meta-heurística da Busca Tabu reformulada, amplamente utilizada na área de pesquisa em distribuição energia elétrica, que combinada à teoria de fluxo de potência radial, permite resolver o problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radiais (PRSDR), tema principal do projeto.

É importante enfatizar que foi utilizada a TS reformulada e, desta forma, não se utilizou uma lista de atributos proibidos nem critério de aspiração para verificar se uma proposta de solução vizinha já foi visitada anteriormente. A proposta na TS reformulada foi de armazenar de forma completa as propostas de soluções escolhidas no processo de transições e, portanto, preservar a capacidade de verificar de forma precisa se uma proposta de solução vizinha já foi visitada anteriormente. Deve-se observar que para o sistema mais complexo, o sistema de 136 barras, foi realizado apenas 16 transições e, portanto, a tarefa de armazenar e verificar as soluções completas foi muito simples e rápida. Para os quatro sistemas implementados, de 14, 33, 84 e 136 barras, o algoritmo encontra e fornece as melhores propostas de solução mostradas na literatura especializada, de 466,1021 kW, 139,5513 kW, 469,8733 kW e 280,1973 kW de perdas de potência ativa, respectivamente, conforme mostrado no Capítulo 5. Portanto, sob todas essas circunstâncias, e por se tratar de um trabalho, a nível de graduação, para conclusão de curso, considera-se que os resultados obtidos são bastante expressivos e de excelente qualidade. Além disso, baseado também na qualidade desses, o propósito inicial do trabalho foi atingido e cumprido.

O trabalho de graduação aqui proposto permitiu ao aluno entender as teorias sobre as meta-heurísticas, em especial da Busca Tabu, bem como a forma como a distribuição de energia elétrica ocorre em escala global, visto que foram utilizados sistemas que se aproximam de casos reais, mas em uma forma mais simplificada. Permitiu, ainda, o desenvolvimento das técnicas de programação e da lógica computacional, principalmente da linguagem FORTRAN, tópicos amplamente utilizados nas futuras áreas de atuação em engenharia elétrica.

Capítulo 9

BIBLIOGRAFIA

[1] *Alves, Bruna Pardim.* "Busca Tabu reformulada aplicada ao problema de operação de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais", 2019. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Unesp - Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2019.

[2] *A.Y. Abdelaziz, F.M. Mohamed, S.F. Mekhamer, M.A.L. Badr.*: "Distribution system reconfiguration using a modified Tabu Search algorithm", Electric Power Systems Research, Vol. 80, pp. 943-953, 2010.

[3] *Baran, M. E. and Wu, F. F.*: "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1401–1407, 1989.

[4] *Civanlar, S.; Grainger, J. J.; Yin, H. and Lee, S. S. H.*: "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, pp. 1217–1223, 1988.

[5] *Delbem, A. C. B., Carvalho, A. C., Bretas, N.G.:* "Main chain representation for evolutionary algorithms applied to distribution systems reconfiguration", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, pp. 425-436, 2005.

[6] *D. Shirmohammadi, H.W. Hong, A. Semlyen, G.X. Luo:* "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 753-762, 1988.

[7] *Ritter D., Franc J.F. o, Romero R.*:" Analysis of the radial operation of distribution system considering operation with minimum losses", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 67, pp 453-461, 2015.

[8] *E.R. Ramos, A.G. Exposito, J.R. Santos, and F.L. Iborra* "Path-based distribution network modeling: Application to reconfiguration for loss reduction", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 2, pp 556-564, 2005.

[9] *E.M. Carreño, R. Romero, A. Padilha-Feltrin*: "An efficient codification to solve distribution net- work reconfiguration for loss reduction problem", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 4, pp. 1542-1551, 2008.

[10] *F.V. Gomes, S. Carneiro, J.L.R. Pereira, M.P. Vinagre, P.A.N. Garcia, L.R. Araujo*: "A new distribution system reconfiguration approach using optimum power flow and sensitivity analysis for loss reduction", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 4, pp. 1616-1623, 2006.

[11] *F. Glover, G. Kochenberger*: "Handbook of metaheuristics", Kluwer Academic Publishers, 2003.

[12] *Merlin, A.; Back, H.*: "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.

[13] *Mantovani, José R.S., CASARI, Fernando, ROMERO, Rubén A.:* "Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério da queda de tensão", Sba Controle & Automação, Ilha Solteira, v. 11, n. 3, p.150-159, dez. 2000.

[14] *Macedo, L.H., Franco, J.F., Mahdavi, M. et al.* "A Contribution to the Optimization of the Reconfiguration Problem in Radial Distribution Systems". *J Control Autom Electr Syst*, Vol. 29**,** 756–768, 2018.

[15] *Mishima, Y., Nara K., Satoh, T., Ito, T. Kaneda, H.:* "Method for Minimum-Loss Reconfiguration of Distribution System by Tabu Search", Electrical Engineering in Japan, Vol. 152, No. 2, 2005.

[16] *Possagnolo, Leonardo Henrique F. M.*: "Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma metaheurística de busca em vizinhança variàvel". 2015. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Ilha Solteira, 2015.

[17] *Rupolo, D.*: 'Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica através de um algoritmo de busca dispersa". 2013. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Ilha Solteira, 2013.

APÊNDICE A

Como mencionado, para execução do Algoritmo de Fluxo de Carga Radial do tipo varredura são necessários alguns dados do sistema. Esses dados, fornecidos ao algoritmo no formato de arquivo .dat ou .txt, envolvem o número de linhas, nó de referência e sua tensão, o número de barras, a potência base em kW utilizada na conversão dos valores para p.u., caso seja necessário, e máxima variação de perdas ativas no sistema entre iterações consecutivas, utilizada como critério de parada do algoritmo, para todos os sistemas testados.

Já o algoritmo da Busca Tabu, mais precisamente na parte do Prim implementado, necessita dos dados do fluxo de potência de cada ramo quando o sistema apresenta todos os ramos fechados, bem como quais barras estão atreladas a esses respectivos ramos. Esses dados são utilizados para gerar a primeira solução incumbente para cada respectivo sistema, e são fornecidos como arquivo .dat ou .txt.

Os dados do sistema de 14 barras são apresentados abaixo e nas Tabelas 5 e 6:

- Nó de referência do sistema: 14;
- N° de barras: 14, N° de ramos possíveis: 16 e N° de ramos ativos: 13;
- Tensão na subestação (utilizada como tensão base para o sistema): 23 kV;
- Base de potência aparente: 100000 kVA.

Tabela 5 – Dados do sistema de 14 barras

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Número do ramo	Barra Inicial	Barra Final	Resistência [p.u]	Reatância [p.u]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	14	13	7,5000	10,0000	1	2100	-800
2	13	12	8,0000	11,0000	2	1000	900
3	13	11	9,0000	18,0000	3	1000	1100
4	11	10	4,0000	4,0000	4	1000	900
5	14	9	11,0000	11,0000	5	4500	1700
6	9	8	8,0000	11,0000	6	600	-500
7	9	7	11,0000	11,0000	7	1000	900
8	8	6	11,0000	11,0000	8	5000	1800
9	8	5	8,0000	11,0000	9	4000	2700

10	14	4	11,0000	11,0000	10	1500	1200
11	4	3	9,0000	12,0000	11	2000	-400
12	4	2	8,0000	11,0000	12	3000	400
13	2	1	4,0000	4,0000	13	2000	1600
14	12	6	4,0000	4,0000	14	0	0
15	7	3	4,0000	4,0000			
16	10	1	9,0000	12,0000			

Fonte: MANTOVANI, et al. (2000).

Tabela 6 – Fluxos de potência iniciais para o sistema de 14 barras

Sistema de 14 barras			
Ramo	Barra Inicial	Barra Final	Fluxo de Potência [kW]
1	14	13	11050,4
2	13	12	5893,2
3	13	11	2805
4	11	10	1256.5
5	14	9	11177,6
6	9	8	7325
7	9	7	632,3
8	8	6	2285,2
9	8	5	4819,2
10	14	4	7605,1
11	4	3	2514,5
12	4	2	3905,1
13	2	1	2947,9
14	12	6	2852,7
15	7	3	1977,2
16	10	1	796,4

Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados do sistema de 33 barras são apresentados abaixo e nas Tabelas 7 e 8.

- Nó de referência do sistema: 1;
- N° de barras: 33, N° de ramos possíveis: 37 e N° de ramos ativos: 32;
- Tensão na subestação (utilizada como tensão base para o sistema): 12,66 kV;

Tabela 7 – Dados do sistema de 33 barras

Dados de Ramos					Dados de Barras		
Número do Ramo	Barra Inicial	Barra Final	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Número da Barra	Demanda Ativa (kW)	Demanda Reativa (kVar)
1	1	2	0,0922	0,0470	1	0,0	0,0
2	2	3	0,4930	0,2511	2	100,0	60,0
3	3	4	0,660	0,1864	3	90,0	40,0
4	4	5	0,3811	0,1941	4	120,0	80,0
5	5	6	0,8190	0,7070	5	60,0	30,0
6	6	7	0,1872	0,6188	6	60,0	20,0
7	7	8	0,7114	0,2351	7	200,0	100,0
8	8	9	1,0300	0,7400	8	200,0	100,0
9	9	10	1,0440	0,7400	9	60,0	20,0
10	10	11	0,1966	0,0650	10	60,0	20,0
11	11	12	0,3744	0,1238	11	45,0	30,0
12	12	13	1,4680	1,1550	12	60,0	35,0
13	13	14	0,5416	0,7129	13	60,0	35,0
14	14	15	0,5910	0,5260	14	120,0	80,0
15	15	16	0,7463	0,5450	15	60,0	10,0
16	16	17	1,2890	1,7210	16	60,0	20,0
17	17	18	0,7320	0,5740	17	60,0	20,0
18	2	19	0,1640	0,1565	18	90,0	40,0
19	19	20	1,5042	1,3554	19	90,0	40,0
20	20	21	0,4095	0,4784	20	90,0	40,0
21	21	22	0,7089	0,9373	21	90,0	40,0
22	3	23	0,4512	0,3083	22	90,0	40,0
23	23	24	0,8980	0,7091	23	90,0	50,0
24	24	25	0,8960	0,7011	24	420,0	200,0
25	6	26	0,2030	0,1034	25	420,0	200,0
26	26	27	0,2842	0,1447	26	60,0	25,0
27	27	28	1,0590	0,9337	27	60,0	25,0
28	28	29	0,8042	0,7006	28	60,0	20,0
29	29	30	0,5075	0,2585	29	120,0	70,0
30	30	31	0,9744	0,9630	30	200,0	600,0
31	31	32	0,3105	0,3619	31	150,0	70,0
32	32	33	0,3410	0,5302	32	210,0	100,0
33	8	21	2,0000	2,0000	33	60,0	40,0
34	9	15	2,0000	2,0000			
35	12	22	2,0000	2,0000			
36	18	33	0,5000	0,5000			
37	25	29	0,5000	0,5000			

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 – Fluxos de potência iniciais para o sistema de 33 barras

Sistema de 33 barras			
Ramo	Barra Inicial	Barra Final	Fluxo de Potência [kW]
1	1	2	3838,3
2	2	3	2707,2
3	3	4	1250,0
4	4	5	1125,3
5	5	6	1061,3
6	6	7	441,6
7	7	8	241,4
8	8	9	362,1
9	9	10	70,4
10	10	11	10,3
11	11	12	34,7
12	12	13	220,6
13	13	14	159,8
14	14	15	39,7
15	15	16	209,1
16	16	17	148,6
17	17	18	88,0
18	2	19	1019,3
19	19	20	927,7
20	20	21	825,1
21	21	22	408,8
22	3	23	1336,7
23	23	24	1239,3
24	24	25	806,6
25	6	26	552,0
26	26	27	491,4
27	27	28	430,6
28	28	29	368,4
29	29	30	626,5
30	30	31	423,6
31	31	32	272,4
32	32	33	62,3
33	8	21	320,9
34	9	15	230,6
35	12	22	315,3
36	18	33	2,2
37	25	29	380,6

Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados do sistema de 84 barras são apresentados abaixo e nas Tabelas 9 e 10.

- Nó de referência do sistema: 84;
- N° de barras: 84, N° de ramos possíveis: 96 e N° de ramos ativos: 83;
- Tensão na subestação (utilizada como tensão base para o sistema): 11,4 kV;

Tabela 9 – Dados do sistema de 84 barras

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	1	84	0,1944	0,6624	1	0,00	0,00
2	1	2	0,2096	0,304	2	100,00	50,00
3	2	3	0,2358	0,4842	3	300,00	200,0
4	3	4	0,0917	0,1883	4	350,00	250,00
5	4	5	0,2096	0,4304	5	220,00	100,00
6	5	6	0,0393	0,0807	6	1100,00	800,00
7	6	7	0,0405	0,1380	7	400,00	320,00
8	7	8	0,1048	0,2152	8	300,00	200,00
9	7	9	0,2358	0,4842	9	300,00	230,00
10	7	10	0,1048	0,2152	10	300,00	260,00
11	11	84	0,0786	0,1614	11	0,00	0,00
12	11	12	0,3406	0,6944	12	1200,00	800,00
13	12	13	0,0262	0,0538	13	800,00	600,00
14	12	14	0,0786	0,1614	14	700,00	500,00
15	15	84	0,1134	0,3864	15	0,00	0,00
16	15	16	0,0524	0,1076	16	300,00	150,00
17	16	17	0,0524	0,1076	17	500,00	350,00
18	17	18	0,1572	0,3228	18	700,00	400,00
19	18	19	0,0393	0,0807	19	1200,00	1000,00
20	19	20	0,1703	0,3497	20	300,00	300,00
21	20	21	0,2358	0,4842	21	400,00	350,00
22	21	22	0,1572	0,3228	22	50,00	20,00
23	21	23	0,1965	0,4035	23	50,00	20,00
24	23	24	0,1310	0,2690	24	50,00	10,00
25	25	84	0,0567	0,1932	25	50,00	30,00
26	25	26	0,1048	0,2152	26	100,00	60,00
27	26	27	0,2489	0,5111	27	100,00	70,00
28	27	28	0,0486	0,1656	28	1800,00	1300,00
29	28	29	0,1310	0,2690	29	200,00	120,00
30	30	84	0,1965	0,3960	30	0,00	0,00
31	30	31	0,1310	0,2690	31	1800,00	1600,00
32	31	32	0,1310	0,2690	32	200,00	150,00
33	32	33	0,0262	0,0538	33	200,00	100,00
34	33	34	0,1703	0,3497	34	800,00	600,00
35	34	35	0,0524	0,1076	35	100,00	60,00
36	35	36	0,4978	1,0222	36	100,00	60,00
37	36	37	0,0393	0,0807	37	20,00	10,00
38	37	38	0,0393	0,0807	38	20,00	10,00
39	38	39	0,0786	0,1614	39	20,00	10,00
40	39	40	0,2096	0,4304	40	20,00	10,00
41	38	41	0,1965	0,4035	41	200,00	160,00
42	41	42	0,2096	0,4304	42	50,00	30,00
43	43	84	0,0486	0,1656	43	0,00	0,00
44	43	44	0,0393	0,0807	44	30,00	20,00
45	44	45	0,1310	0,2690	45	800,00	700,00

46	45	46	0,2358	0,4842	46	200,00	150,00
47	47	84	0,2430	0,8280	47	0,00	0,00
48	47	48	0,0655	0,1345	48	0,00	0,00
49	48	49	0,0655	0,1345	49	0,00	0,00
50	49	50	0,0393	0,0807	50	200,00	160,00
51	50	51	0,0786	0,1614	51	800,00	600,00
52	51	52	0,0393	0,0807	52	500,00	300,00
53	52	53	0,0786	0,1614	53	500,00	350,00
54	53	54	0,0524	0,1076	54	500,00	300,00
55	54	55	0,1310	0,2690	55	200,00	80,00
56	56	84	0,2268	0,7728	56	0,00	0,00
57	56	57	0,5371	1,1029	57	30,00	20,00
58	57	58	0,0524	0,1076	58	600,00	420,00
59	58	59	0,0405	0,1380	59	0,00	0,00
60	59	60	0,0393	0,0807	60	20,00	10,00
61	60	61	0,0262	0,0538	61	20,00	10,00
62	61	62	0,1048	0,2152	62	200,00	130,00
63	62	63	0,2358	0,4842	63	300,00	240,00
64	63	64	0,0243	0,0828	64	300,00	200,00
65	65	84	0,0486	0,1656	65	0,00	0,00
66	65	66	0,1703	0,3497	66	50,00	30,00
67	66	67	0,1215	0,4140	67	0,00	0,00
68	67	68	0,2187	0,7452	68	400,00	360,00
69	68	69	0,0486	0,1656	69	0,00	0,00
70	69	70	0,0729	0,2484	70	0,00	0,00
71	70	71	0,0567	0,1932	71	2000,00	1500,00
72	71	72	0,0262	0,0528	72	200,00	150,0
73	73	84	0,3240	1,1040	73	0,00	0,00
74	73	74	0,0324	0,1104	74	0,00	0,00
75	74	75	0,0567	0,1932	75	1200,00	950,00
76	75	76	0,0486	0,1656	76	300,00	180,00
77	77	84	0,2511	0,8556	77	0,00	0,00
78	77	78	0,1296	0,4416	78	400,00	360,00
79	78	79	0,0486	0,1656	79	2000,00	1300,00
80	79	80	0,1310	0,2640	80	200,00	140,00
81	80	81	0,1310	0,2640	81	500,00	360,00
82	81	82	0,0917	0,1883	82	100,00	30,00
83	82	83	0,3144	0,6456	83	400,00	360,00
84	5	55	0,1310	0,2690	84	0,00	0,00
85	7	60	0,1310	0,2690			
86	11	43	0,1310	0,2690			
87	12	72	0,3406	0,6994			
88	13	76	0,4585	0,9415			
89	14	18	0,5371	1,0824			
90	16	26	0,0917	0,1883			
91	20	83	0,0786	0,1614			
92	28	32	0,0524	0,1076			
93	29	39	0,0786	0,1614			
94	34	46	0,0262	0,0538			
95	40	42	0,1965	0,4035			
96	53	64	0,0393	0,0807			

Fonte: MANTOVANI, et al. (2000)

Tabela 10 – Fluxos de potência iniciais para o sistema de 84 barras

Sistema de 84 Barras.			
Ramo	Barra Inicial	Barra Final	Fluxo de Potência [kW]
1	1	84	2883,9
2	1	2	2883,9
3	2	3	2745,9
4	3	4	2357
5	4	5	1918,7
6	5	6	1632,5
7	7	8	275,2
8	7	9	360,8
9	6	7	378,6
10	7	10	397,3
11	11	84	3844,9
12	11	12	4203,2
13	12	13	602
14	12	14	899,8
15	15	84	3759
16	15	16	3759
17	16	17	4995,9
18	17	19	4364,9
19	18	19	3553,4
20	19	20	1989,7
21	20	21	681,9
22	21	22	53,9
23	21	23	104,4
24	23	24	51
25	25	84	3747,4
26	25	26	3689,3
27	26	27	1974,4
28	27	28	1836,9
29	28	29	469,9
30	30	84	3526,1
31	30	31	3526,1
32	31	32	1126,3
33	32	33	35,5
34	33	34	235,5
35	34	35	400
36	35	36	283,3
37	36	37	166,1
38	37	38	143,9
39	39	40	97,9
40	38	39	116,8
41	38	41	219,4
42	41	42	37,3
43	43	84	3385,8
44	43	44	3019,2
45	45	46	2977,5
46	44	45	1899
47	47	84	3891,3
48	47	48	3891,3

49	48	49	3875,2
50	49	50	3859,1
51	50	51	3593,7
52	51	52	2577,3
53	52	53	1991,8
54	53	54	754,2
55	54	55	174,9
56	56	84	2623,8
57	56	57	2623,8
58	57	58	2529,4
59	58	59	1791,5
60	59	60	1788,6
61	60	61	385,8
62	61	62	363,4
63	62	63	126,7
64	63	64	267,1
65	65	84	2249,1
66	65	66	2249,1
67	66	67	2177,7
68	67	68	2164,2
69	68	69	1602
70	69	70	1599
71	70	71	1594,5
72	71	72	915,6
73	73	84	2301,7
74	73	74	2301,7
75	74	75	2297,7
76	75	76	761,4
77	77	84	3592,1
78	77	78	3592,1
79	78	79	3016,3
80	79	80	654
81	80	81	429,1
82	81	82	315,3
83	82	83	414,3
84	5	55	89,6
85	7	60	1376,9
86	11	43	370,6
87	12	72	1172,4
88	13	76	421,9
89	14	18	39,5
90	16	26	1596,2
91	20	83	893,6
92	28	32	887,5
93	29	39	236,7
94	34	46	1634,5
95	40	42	94,8
96	53	64	623,6

Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados do sistema de 136 barras são apresentados abaixo e nas Tabelas 11 e 12.

- Nó de referência do sistema: 136;
- N° de barras: 136, N° de ramos possíveis: 156 e N° de ramos ativos: 135;
- Tensão na subestação (utilizada como tensão base para o sistema): 13,8 kV;

Tabela 11 – Dados do sistema de 136 barras

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Número do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Número da barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	136	1	0,33205	0,76653	1	0	0
2	1	2	0,00188	0,00433	2	47,78	19,009
3	2	3	0,22324	0,51535	3	42,551	16,929
4	3	4	0,09943	0,22953	4	87,022	34,622
5	4	5	0,15571	0,35945	5	311,31	123,855
6	5	6	0,16321	0,37677	6	148,869	59,228
7	6	7	0,11444	0,26417	7	238,672	94,956
8	6	8	0,05675	0,05666	8	62,299	24,786
9	8	9	0,52124	0,27418	9	124,598	49,571
10	8	10	0,10877	0,1086	10	140,175	55,768
11	10	11	0,39803	0,20937	11	116,813	46,474
12	10	12	0,91744	0,31469	12	249,203	99,145
13	10	13	0,11823	0,11805	13	291,447	115,952
14	13	14	0,50228	0,26421	14	303,72	120,835
15	13	15	0,05675	0,05666	15	215,396	85,695
16	15	16	0,29379	0,15454	16	198,586	79,007
17	136	17	0,33205	0,76653	17	0	0
18	17	18	0,00188	0,00433	18	0	0
19	18	19	0,22324	0,51535	19	0	0
20	19	20	0,10881	0,25118	20	30,127	14,729
21	20	21	0,71078	0,37388	21	230,972	112,92
22	20	22	0,18197	0,42008	22	60,256	29,458
23	22	23	0,30326	0,15952	23	230,972	112,92
24	22	24	0,02439	0,0563	24	120,507	58,915
25	24	25	0,04502	0,10394	25	0	0
26	25	26	0,01876	0,04331	26	56,981	27,857
27	26	27	0,11823	0,11805	27	364,665	178,281
28	27	28	0,02365	0,02361	28	0	0
29	28	29	0,18954	0,0997	29	124,647	60,939
30	29	30	0,39803	0,20937	30	56,981	27,857
31	28	31	0,05675	0,05666	31	0	0

32	31	32	0,09477	0,04985	32	85,473	41,787
33	32	33	0,41699	0,21934	33	0	0
34	33	34	0,11372	0,05982	34	396,735	193,96
35	31	35	0,07566	0,07555	35	0	0
36	35	36	0,3696	0,19442	36	181,152	88,563
37	36	37	0,26536	0,13958	37	242,172	118,395
38	35	38	0,05675	0,05666	38	75,316	36,821
39	136	39	0,33205	0,76653	39	0	0
40	39	40	0,11819	0,27283	40	1,254	0,531
41	40	41	2,96288	1,01628	41	6,274	2,66
42	40	42	0,00188	0,00433	42	0	0
43	42	43	0,06941	0,16024	43	117,88	49,971
44	43	44	0,81502	0,42872	44	62,668	26,566
45	43	45	0,06378	0,14724	45	172,285	73,034
46	45	46	0,13132	0,30315	46	458,556	194,388
47	46	47	0,06191	0,14291	47	262,962	111,473
48	47	48	0,11444	0,26417	48	235,761	99,942
49	48	49	0,28374	0,28331	49	0	0
50	49	50	0,28374	0,28331	50	109,215	46,298
51	48	51	0,04502	0,10394	51	0	0
52	51	52	0,02626	0,06063	52	72,809	30,865
53	52	53	0,06003	0,13858	53	258,473	109,57
54	53	54	0,03002	0,06929	54	69,169	29,322
55	54	55	0,02064	0,04764	55	21,843	9,26
56	52	56	0,10881	0,25118	56	0	0
57	56	57	0,25588	0,1346	57	20,527	8,702
58	57	58	0,41699	0,21934	58	150,548	63,819
59	58	59	0,50228	0,26421	59	220,687	93,552
60	59	60	0,3317	0,17448	60	92,384	39,163
61	60	61	0,20849	0,10967	61	0	0
62	47	62	0,13882	0,32047	62	226,693	96,098
63	136	63	0,0075	0,01732	63	0	0
64	63	64	0,27014	0,62362	64	294,016	116,974
65	64	65	0,3827	0,88346	65	83,015	33,028
66	65	66	0,33018	0,7622	66	83,015	33,028
67	66	67	0,3283	0,75787	67	103,77	41,285
68	67	68	0,17072	0,39409	68	176,408	70,184
69	68	69	0,55914	0,29412	69	83,015	33,028
70	68	70	0,05816	0,13425	70	217,917	86,698
71	70	71	0,7013	0,3689	71	23,294	9,267
72	71	72	1,02352	0,53839	72	5,075	2,019
73	70	73	0,06754	0,15591	73	72,638	28,899
74	73	74	1,32352	0,45397	74	405,99	161,524
75	136	75	0,01126	0,02598	75	0	0
76	75	76	0,72976	1,68464	76	100,182	42,468

77	76	77	0,22512	0,51968	77	142,523	60,417
78	77	78	0,20824	0,48071	78	96,042	40,713
79	78	79	0,0469	0,10827	79	300,454	127,366
80	79	80	0,6195	0,61857	80	141,238	59,873
81	80	81	0,34049	0,33998	81	279,847	118,631
82	81	82	0,56862	0,29911	82	87,312	37,013
83	81	83	0,10877	0,1086	83	243,849	103,371
84	83	84	0,56862	0,29911	84	247,75	105,025
85	136	85	0,01126	0,02598	85	0	0
86	85	86	0,41835	0,96575	86	89,878	38,101
87	86	87	0,10499	0,13641	87	1137,28	482,108
88	86	88	0,43898	1,01338	88	458,339	194,296
89	88	89	0,0752	0,02579	89	358,197	163,29
90	89	90	0,07692	0,17756	90	0	0
91	90	91	0,33205	0,76653	91	79,608	33,747
92	91	92	0,08442	0,19488	92	87,312	37,013
93	92	93	0,1332	0,30748	93	0	0
94	93	94	0,2932	0,29276	94	74,001	31,37
95	94	95	0,21753	0,21721	95	232,05	98,369
96	95	96	0,26482	0,26443	96	141,819	60,119
97	93	97	0,10318	0,23819	97	0	0
98	97	98	0,13507	0,31181	98	76,449	32,408
99	136	99	0,00938	0,02165	99	0	0
100	99	100	0,16884	0,38976	100	51,322	21,756
101	100	101	0,11819	0,27283	101	58,874	25,381
102	101	102	2,28608	0,78414	102	9,065	3,843
103	101	103	0,45587	1,05236	103	2,092	0,887
104	103	104	0,696	1,60669	104	16,735	7,094
105	104	105	0,45774	1,05669	105	1506,522	638,634
106	105	106	0,20298	0,26373	106	313,023	132,694
107	106	107	0,21348	0,27737	107	79,831	33,842
108	107	108	0,54967	0,28914	108	51,322	21,756
109	108	109	0,54019	0,28415	109	0	0
110	107	110	0,0455	0,05911	110	202,435	85,815
111	110	111	0,47385	0,24926	111	60,823	25,784
112	111	112	0,86241	0,45364	112	45,618	19,338
113	112	113	0,56862	0,29911	113	0	0
114	108	114	0,77711	0,40878	114	157,07	66,584
115	114	115	1,08038	0,5683	115	0	0
116	109	116	1,09933	0,57827	116	250,148	106,041
117	116	117	0,47385	0,24926	117	0	0
118	104	118	0,32267	0,74488	118	69,809	29,593
119	118	119	0,14633	0,33779	119	32,072	13,596
120	119	120	0,12382	0,28583	120	61,084	25,894
121	136	121	0,01126	0,02598	121	0	0

122	121	122	0,6491	1,49842	122	94,622	46,26
123	122	123	0,04502	0,10394	123	49,858	24,375
124	123	124	0,5264	0,18056	124	123,164	60,214
125	123	125	0,02064	0,04764	125	78,35	38,304
126	125	126	0,53071	0,27917	126	145,475	71,121
127	125	127	0,09755	0,2252	127	21,369	10,447
128	127	128	0,11819	0,27283	128	74,789	36,564
129	127	129	0,13882	0,32047	129	227,926	111,431
130	129	130	0,04315	0,09961	130	35,614	14,411
131	130	131	0,09192	0,2122	131	249,295	121,877
132	131	132	0,16134	0,37244	132	316,722	154,842
133	132	133	0,37832	0,37775	133	333,817	163,199
134	133	134	0,93724	0,93664	134	249,295	121,877
135	134	135	0,2932	0,29276	135	0	0
136	7	73	0,13132	0,30315	136	0	0
137	9	24	0,26536	0,13958			
138	15	83	0,14187	0,14166			
139	38	135	0,08512	0,08499			
140	25	51	0,04502	0,10394			
141	50	96	0,14187	0,14166			
142	55	98	0,14187	0,14166			
143	62	120	0,0394	0,09094			
144	66	79	0,12994	0,29882			
145	79	131	0,01688	0,03898			
146	84	135	0,3317	0,17448			
147	91	104	0,14187	0,14166			
148	30	129	0,07692	0,17756			
149	90	103	0,07692	0,17756			
150	92	104	0,07692	0,17756			
151	92	132	0,07692	0,17756			
152	96	120	0,26482	0,26443			
153	110	47	0,49696	0,64567			
154	126	76	0,17059	0,08973			
155	128	77	0,05253	0,12126			
156	135	98	0,2932	0,29276			

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 12 – Fluxos de potência iniciais para o sistema de 136 barras

Sistema de 136 Barras			
Ramo	Barra Inicial	Barra Final	Fluxo de Potência [kW]
1	136	1	2693,7880
2	1	2	2670,1361
3	2	3	2618,6362
4	3	4	2557,6662
5	4	5	2457,5658
6	5	6	2113,3386
7	6	7	396,3589
8	6	8	1555,2665
9	8	9	42,7455
10	8	10	1492,5008
11	10	11	125,7575
12	10	12	268,5881
13	10	13	946,9472
14	13	14	327,2096 -
15	13	15	313,3246
16	15	16	213,8090
17	136	17	2957,6296
18	17	18	2928,8311
19	18	19	2928,6688
20	19	20	2909,4323
21	20	21	257,3877
22	20	22	2609,2959
23	22	23	257,2222
24	22	24	2272,6673
25	24	25	1997,1043
26	25	26	1333,0676
27	26	27	1269,3219
28	27	28	862,4056
29	28	29	202,2305
30	29	30	63,4360
31	28	31	660,4457
32	31	32	537,5735
33	32	33	442,261
34	33	34	441,7493
35	31	35	129,9793
36	35	36	471,843
37	36	37	269,6851
38	35	38	354,0886
39	136	39	3448,7816
40	39	40	3409,9714

41	40	41	6,8154
42	40	42	3388,0685
43	42	43	3387,8518
44	43	44	68,0895
45	43	45	3183,7603
46	45	46	2990,1456
47	46	47	2480,2854
48	47	48	533,0469
49	48	49	49,1856
50	49	50	49,1803
51	48	51	241,0214
52	51	52	882,9018
53	52	53	279,5003
54	53	54	54,0548
55	54	55	97,6890
56	52	56	527,6505
57	56	57	527,3448
58	57	58	504,6053
59	58	59	340,4252
60	59	60	100,3631
61	60	61	0
62	47	62	284,6182
63	136	63	2255,9271
64	63	64	2255,5554
65	64	65	1926,0081
66	65	66	1822,7703
67	66	67	1041,9605
68	67	68	926,7768
69	68	69	89,3716
70	68	70	646,4828
71	70	71	30,5358
72	71	72	5,4621
73	70	73	382,1589
74	73	74	438,4247
75	136	75	1879,7815
76	75	76	1879,3961
77	76	77	1365,3089
78	77	78	1420,7158
79	78	79	1312,2351
80	79	80	1113,5264
81	80	81	957,2432
82	81	82	94,8652
83	81	83	567,8673
84	83	84	158,4108
85	136	85	2750,6182

86	85	86	2749,791
87	86	87	1236,4781
88	86	88	1385,1369
89	88	89	879,0205
90	89	90	460,335
91	90	91	1498,9985
92	91	92	604,9666
93	92	93	893,133
94	93	94	359,4791
95	94	95	279,584
96	95	96	49,241
97	93	97	542,3829
98	97	98	542,0298
99	136	99	2415,3619
100	99	100	2414,8238
101	100	101	2349,4313
102	101	102	9,8472
103	101	103	2268,1311
104	103	104	948,521
105	104	105	1534,3607
106	105	106	168,3875
107	106	107	473,7188
108	107	108	499,814
109	108	109	272,4642
110	107	110	1052,0233
111	110	111	115,6632
112	111	112	49,5609
113	112	113	0
114	108	114	170,7431
115	114	115	0
116	109	116	272,2111
117	116	117	0
118	104	118	342,1951
119	118	119	265,9996
120	119	120	231,0642
121	136	121	2044,9969
122	121	122	2044,5314
123	122	123	1912,5613
124	123	124	137,1513
125	123	125	1718,3717
126	125	126	234,5631
127	125	127	1851,6019
128	127	128	305,4625
129	127	129	1524,1850
130	129	130	1523,2958

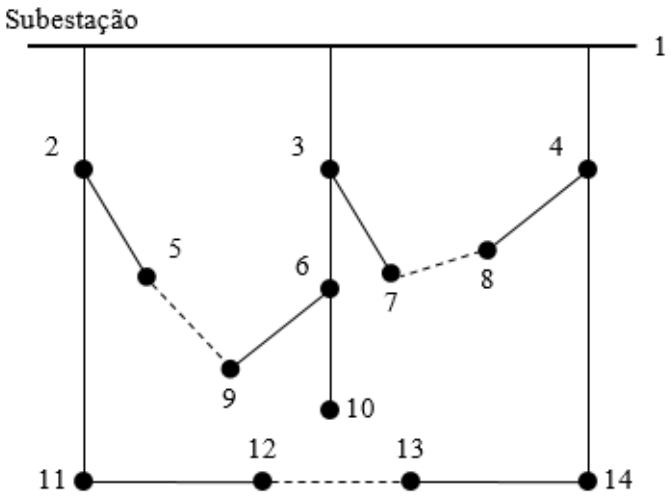
131	130	131	1482,8382
132	131	132	1770,6648
133	132	133	882,1509
134	133	134	512,7403
135	134	135	246,2168
136	7	73	143,5813
137	9	24	148,2786
138	15	83	167,7500
139	38	135	437,3607
140	25	51	668,7354
141	50	96	71,6854
142	55	98	118,2276
143	62	120	50,0608
144	66	79	680,8726
145	79	131	588,5714
146	84	135	161,5762
147	91	104	808,2938
148	30	129	256,8532
149	90	103	1293,5647
150	92	104	209,9250
151	92	132	544,9433
152	96	120	203,1792
153	110	47	1386,2930
154	126	76	388,9062
155	128	77	225,6855
156	135	98	375,8412

Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO A

A seguir serão apresentados os quatro sistemas analisados no projeto:

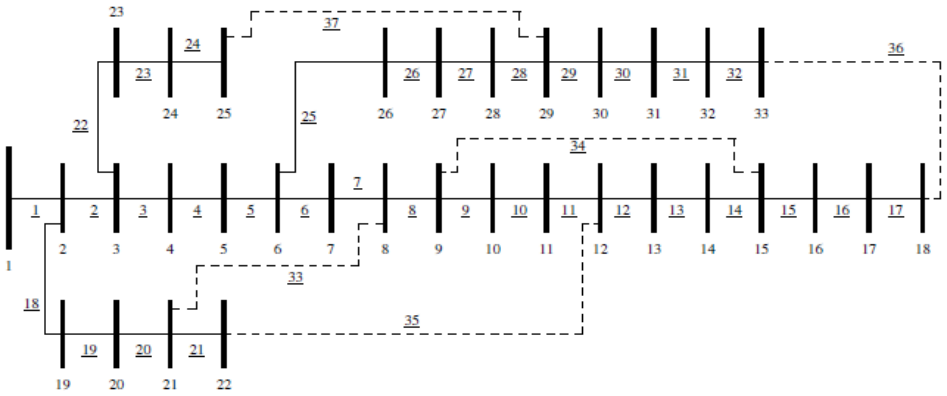
Figura 10 – Modelo do sistema de 14 barras



Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema anteriormente mostrado possui treze ramos fechados (ligados), ou seja, em operação, e três ramos abertos (desligados), totalizando dezesseis ramos distribuídos entre as 14 barras. A configuração mostrada na Figura 10 mostra uma possível proposta de solução desse sistema, mas não necessariamente será utilizada no algoritmo, foi apresentada apenas para melhor entendimento e ilustração. Todas as propostas de solução relativas a esse sistema apresentam configuração semelhante, com treze ramos fechados e três abertos e todas as barras alimentadas, necessariamente, alterando-se apenas os ramos que se encontram em operação ou não entre as diferentes propostas.

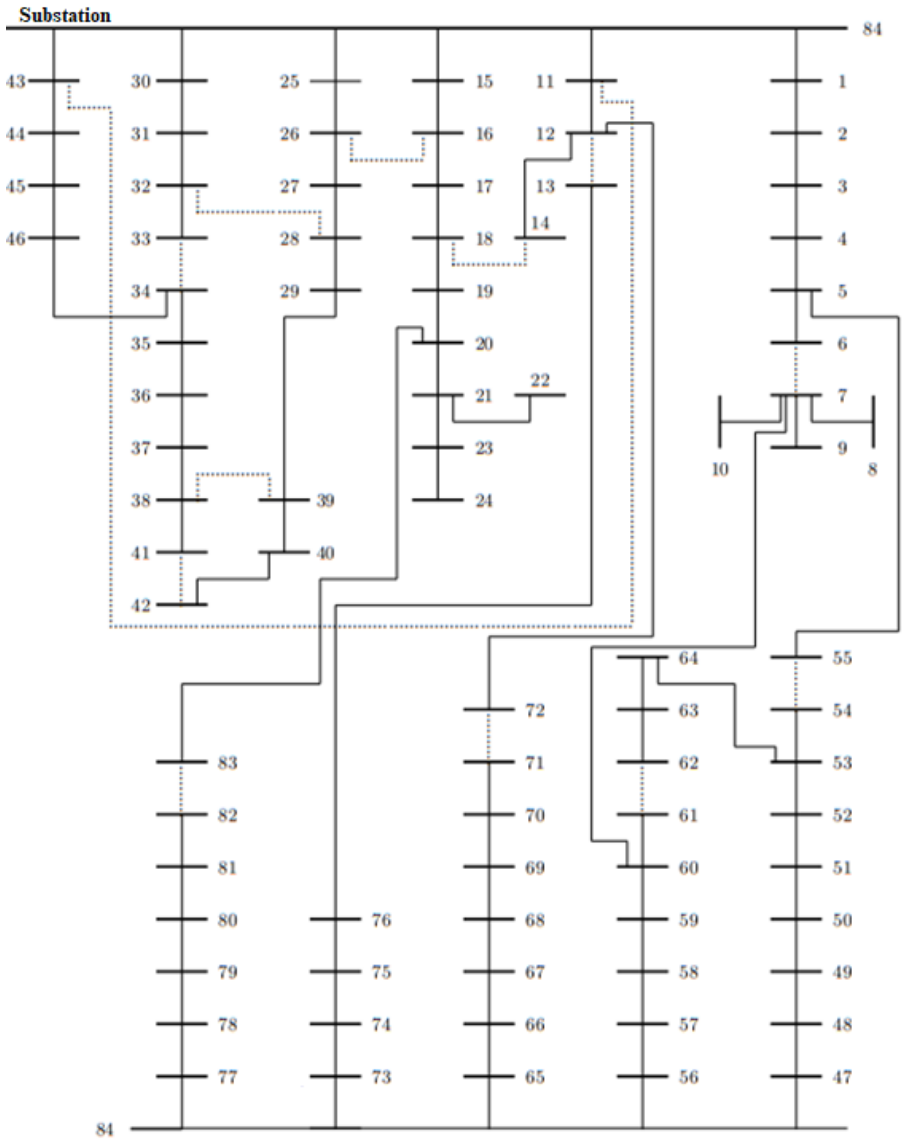
Figura 11 – Modelo do sistema de 33 barras



Fonte: Baran e Wu (1989)

O sistema anteriormente mostrado possui 32 ramos fechados (ligados), ou seja, em operação, e cinco ramos abertos (desligados), totalizando trinta e sete ramos distribuídos entre as 33 barras. A configuração mostrada na Figura 11 mostra a configuração inicial usada no algoritmo a qual é a solução base para a geração da primeira solução corrente pelo algoritmo PRIM. Todas as propostas de solução relativas a esse sistema apresentam configuração semelhante, com 32 ramos fechados e cinco abertos e todas as barras alimentadas, necessariamente, alterando-se apenas os ramos que se encontram em operação ou não entre as diferentes propostas.

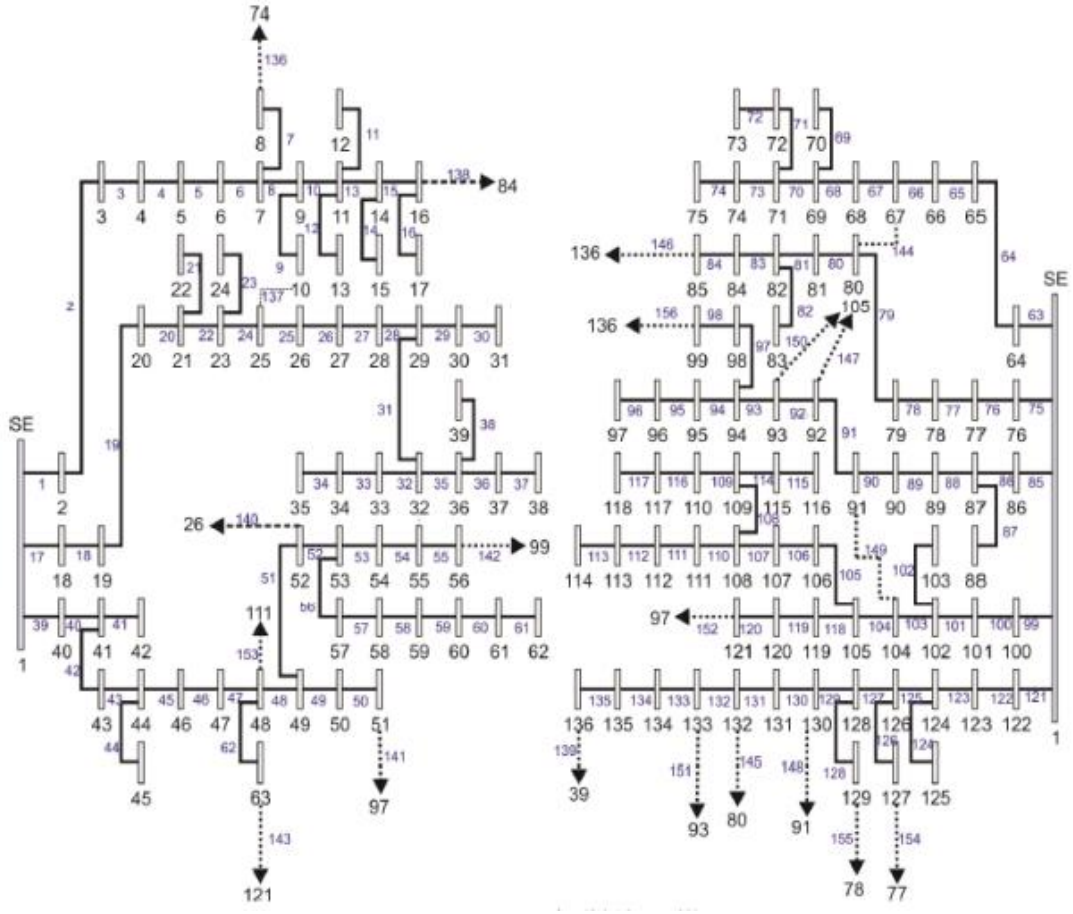
Figura 12 – Modelo do sistema de 84 barras



Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema anteriormente mostrado possui 83 ramos fechados (ligados), ou seja, em operação, e treze ramos abertos (desligados), totalizando noventa e seis ramos distribuídos entre as 84 barras. A configuração mostrada na Figura 12 mostra uma possível proposta de solução desse sistema, mas não necessariamente será utilizada no algoritmo, foi apresentada apenas para melhor entendimento e ilustração. Todas as propostas de solução relativas a esse sistema apresentam configuração semelhante, com 83 ramos fechados e treze abertos e todas as barras alimentadas, necessariamente, alterando-se apenas os ramos que se encontram em operação ou não entre as diferentes propostas.

Figura 13 – Modelo do sistema de 136 barras



Fonte: RUPOLO, et. al (2013).

O sistema anteriormente mostrado possui 135 ramos fechados (ligados), ou seja, em operação, e 21 ramos abertos (desligados), totalizando 156 ramos distribuídos entre as 136 barras. A configuração mostrada na Figura 13 mostra uma possível proposta de solução desse sistema, mas não necessariamente será utilizada no algoritmo, foi apresentada apenas para melhor entendimento e ilustração. Todas as propostas de solução relativas a esse sistema apresentam configuração semelhante, com 135 ramos fechados e 21 abertos e todas as barras alimentadas, necessariamente, alterando-se apenas os ramos que se encontram em operação ou não entre as diferentes propostas.