

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS AUGUSTO PAIVA LUZ

**PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILI-
ZANDO BUSCA TABU**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

MATHEUS AUGUSTO PAIVA LUZ

PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO BUSCA TABU

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientadora: Profa. Dra. Gabriela Helena Bauab Shiguemoto

Coorientador: Prof. Dr. André Luís Shiguemoto

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018



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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Matheus Augusto Paiva Luz

Planejamento da expansão de sistemas de distribuição utilizando Busca Tabu

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 13:30hs do dia 26/11/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

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

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

Prof(a). Dr(a). Edson Aparecido Rozas Theodoro - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

RESUMO

LUZ, Matheus Augusto Paiva. **Planejamento da expansão de sistemas de distribuição utilizando Busca Tabu**. 2018. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2018.

Este trabalho apresenta um estudo sobre o planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica, nele são abordados resultados obtidos com a busca para a melhor configuração da rede. Para se alcançar tal resultado, o estudo se baseou na metaheurística Busca Tabu, aplicada ao software Matlab®. Os critérios de operação da nova configuração da rede foram verificados através do cálculo do fluxo de potência, utilizando a técnica *Backward and Forward Sweep*. Seus resultados serão comparados a outros presentes na literatura, com o intuito de verificar a sua eficácia.

Palavras-chave: Busca Tabu, Sistemas elétricos de potência, Planejamento da expansão de sistemas de distribuição, Metaheurística.

ABSTRACT

LUZ, Matheus Augusto Paiva. **Distribution system planning using Tabu Search**. 2018. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

This assignment shows a study about system planning distribution of electric energy, it deals results obtained with the search of the best network configuration. To achieve such result, the study was based on metaheuristic Tabu Search, applied on Matlab software. The operation criteria of the new network configuration were verified through the calculation of the power flow, using the technique Backward and Forward Sweep. Their results will be compared to others present in the literature, in order to verify their effectiveness.

Palavras-chave: Tabu Search, Electrical power systems, Planning of expansion of distribution systems, Metaheuristic.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL POR FONTE.....	14
FIGURA 2 – SISTEMA DE TRANSMISSÃO BRASILEIRO.....	15
FIGURA 3 – ESTRUTURA UNIFILAR DE UMA REDE RADIAL.....	18
FIGURA 4 – ESQUEMA DE VIZINHANÇA PARA A BUSCA TABU.....	20
FIGURA 5 – SOLUÇÕES ENCONTRADAS EM UMA BUSCA TABU.....	21
FIGURA 6 – TOPOLOGIA DA REDE ANTES E TOPOLOGIA DA REDE APÓS A ADIÇÃO DO TRECHO.....	26
FIGURA 7 - TOPOLOGIA DAS REDES RADIAIS OBTIDAS A PARTIR DA SUBSTITUIÇÃO DO PRIMEIRO TRECHO.....	27
FIGURA 8 - DIAGRAMA DE PROCESSO DO ALGORITMO.....	28
FIGURA 9 - ROTAS VIÁVEIS PARA A REDE DE 23 BARRAS.....	30
FIGURA 10 - TOPOLOGIA INICIAL.....	31
FIGURA 11 - CUSTOS DE PERDAS PARA LISTA TABU DE TAMANHO 5.....	32
FIGURA 12 - CUSTOS DE CONSTRUÇÃO PARA LISTA TABU DE TAMANHO 5.....	33
FIGURA 13 - CUSTOS TOTAIS DA REDE PARA LISTA TABU DE TAMANHO 5.....	33
FIGURA 14 - TOPOLOGIA ÓTIMA LOCAL ENCONTRADA PARA A LISTA TABU DE TAMANHO 5.....	35
FIGURA 15 - CUSTOS DE PERDAS PARA LISTA TABU DE TAMANHO 6.....	36
FIGURA 16 - CUSTOS DE CONSTRUÇÃO PARA LISTA TABU DE TAMANHO 6.....	37
FIGURA 17 - CUSTOS TOTAIS DA REDE PARA LISTA TABU DE TAMANHO 6 E 40 INTERAÇÕES.....	37
FIGURA 18 - TOPOLOGIA ÓTIMA LOCAL ENCONTRADA PARA A LISTA TABU DE TAMANHO 6.....	38
FIGURA 19 - CUSTOS TOTAIS DA REDE PARA LISTA TABU DE TAMANHO 6 E 100 INTERAÇÕES.....	39
FIGURA 20 - CUSTOS DE PERDAS PARA LISTA TABU DE TAMANHO 7.....	40
FIGURA 21 - CUSTOS DE CONSTRUÇÃO PARA LISTA TABU DE TAMANHO 7.....	41

FIGURA 22 - CUSTOS TOTAIS DA REDE PARA LISTA TABU DE TAMANHO 7.....	42
FIGURA 23 - TOPOLOGIA ÓTIMA LOCAL ENCONTRADA PARA A LISTA TABU DE TAMANHO 7.....	42
FIGURA 24 - TOPOLOGIA ÓTIMA GLOBAL ENCONTRADA EM OLIVEIRA.....	44

LISTA DE SÍMBOLOS

V_k	Magnitude da tensão na barra k
θ_k	Ângulo de fase da tensão na barra k
P_k	Magnitude da potência ativa na barra k
Q_k	Magnitude da potência reativa na barra k
I_i	Magnitude da corrente no trecho i .
S_k	Magnitude da potência aparente na barra k
z_i	Impedância do trecho i
k_l	Taxa de recuperação de capital
$c_{ij,a}$	Custo por quilômetro de construção do circuito ij do tipo a
$n_{ij,a}$	Variável binária de tomada de decisão
$l_{ij,a}$	Comprimento em quilômetros do trecho ij
c_{ld}	Custo de unidade de energia na demanda d
$g_{ij,a}$	Condutância do trecho que liga ij
α_d	Número de horas por ano
τ_l	Taxa de juros para as perdas de potência ativa
ϕ_l	Fator de perdas do circuito
e	Erro entre uma interação e outra

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	PARÂMETROS DA CONFIGURAÇÃO INICIAL DA REDE.....	31
TABELA 2	FORMATO DA LISTA TABU DE TAMANHO 5 NAS 8 PRIMEIRAS INTERAÇÕES.....	34
TABELA 3	PARÂMETROS DA CONFIGURAÇÃO DA REDE ÓTIMA PARA LISTA TABU DE TAMANHO 5.....	35
TABELA 4	PARÂMETROS DA CONFIGURAÇÃO DA REDE ÓTIMA PARA LISTA TABU DE TAMANHO 6.....	39
TABELA 5	PARÂMETROS DA CONFIGURAÇÃO DA REDE ÓTIMA PARA LISTA TABU DE TAMANHO 6 PARA 100 INTERAÇÕES.....	39
TABELA 6	PARÂMETROS DA CONFIGURAÇÃO DA REDE ÓTIMA PARA LISTA TABU DE TAMANHO 7.....	42
TABELA 7	ESTUDOS E RESULTADOS REALIZADOS PARA O PROBLEMA DE 23 BARRAS.....	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Objetivos.....	12
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivo Específico.....	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1	Sistemas Elétricos de Potência.....	13
2.2	O Fluxo de Potência.....	14
2.2.1	Método <i>Backward and Forward Sweep</i>	17
2.2.2	Redução de perdas.....	19
2.3	Busca Tabu.....	19
2.3.1	Funcionamento da Busca Tabu.....	20
2.3.2	Características da Busca Tabu.....	22
2.4	Planejamento de sistemas de distribuição.....	23
3	METODOLOGIA PROPOSTA.....	24
3.1	Modelo Matemático.....	24
3.2	Busca tabu aplicada ao problema.....	25
4	TESTES E RESULTADOS.....	29
4.1	Teste para uma Lista Tabu de tamanho 5.....	32
4.2	Teste para uma Lista Tabu de tamanho 6.....	36
4.3	Teste para uma Lista Tabu de tamanho 7.....	40
5	CONCLUSÃO.....	45
6	TRABALHOS FUTUROS.....	46
	REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

Uma rede de distribuição de energia elétrica é definida como o conjunto de equipamentos que tem a função, juntamente com a transmissão, de transportar a energia gerada por meio de usinas, até os centros consumidores, realizando um papel importante em um sistema elétrico de potência, pois faz o intermédio entre fornecedor de energia e seus clientes.

Para disponibilizar energia elétrica a todos os seus consumidores o sistema elétrico de potência precisa se expandir de forma proporcional a sua demanda, embora esta expansão seja vista com bons olhos pela sociedade, para a regulação é importante que a expansão cumpra com critérios e indicadores de qualidade estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL – Nota técnica, 2016).

Atualmente é difícil de imaginar que o desenvolvimento de um país não esteja intimamente ligado ao crescimento do seu setor elétrico. É natural o surgimento de novas empresas e instalação de novas indústrias em países em desenvolvimento, aumentando assim, sua demanda de energia. Comparando os dados de desenvolvimento do Produto Interno Bruto (PIB) apresentados pelo Instituto de Pesquisa de Relações Internacionais (IPRI, 2016) com os dados de consumos de energia elétrica disponíveis no *Global Energy Statistical Yearbook* (2016), nota-se que dos dez países que obtiveram os maiores PIB's em 2015, oito deles estão entre os dez países que mais consumiram energia no mesmo período.

No Brasil não é diferente, o país está em constante desenvolvimento aquecendo cada vez mais o setor elétrico. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2023, feito pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014), o Brasil teve um consumo médio de 534,6 TWh em 2014, tendo projeção de consumo para 2023 de 781,7 TWh o que representa um aumento de 31% da carga. A capacidade instalada de geração de energia elétrica também acompanha esse crescimento, passando de 124,8 GW em 2013 para 195,9 GW em 2023, apresentando crescimento de 36,29%. Ainda segundo a EPE a participação das energias renováveis na matriz energética brasileira passou de 39,4% em 2014 para 41,2% em 2015, tendo previsão de aumento de 23% até 2023 segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2016), para que o país se adeque aos compromissos assumidos pelo Brasil durante a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015.

Devido a estes crescimentos constantes de carga e a descentralização da geração, as redes de distribuição passam a ter papel protagonista na operação do sistema, os pesquisadores da área de sistemas elétricos de potência buscam saber onde, quando e como devem ser instalados novos reforços de forma que atenda à demanda prevista, cumprindo com as restrições econômicas, ambientais e sociais, que vêm crescendo, tanto pelo órgão regulador quanto pela própria sociedade. Cada investimento com infraestrutura e equipamentos na expansão do sistema de distribuição, acarreta reflexos nas tarifas pagas pelos consumidores as concessionárias.

O estudo a seguir visa produzir um algoritmo que verifique as melhores condições de investimento para o planejamento da expansão do sistema de distribuição.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um algoritmo por meio de uma metaheurística, para minimizar os gastos com o planejamento de sistemas de distribuição, utilizando a técnica *Backward and Forward Sweep* com a Busca Tabu e a ferramenta computacional Matlab®.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estudar a estrutura de um sistema elétrico de potência e definir quais fatores influenciarão economicamente o planejamento de sua expansão.
- Analisar a metaheurística Busca Tabu e desenvolver um algoritmo capaz de projetar as configurações de sistemas elétricos de distribuição, minimizando os custos de investimento.
- Compreender a técnica *Backward and Forward Sweep* e verificar por meio desta, a magnitude das perdas nas linhas e se a configuração encontrada cumpre com os critérios de operação.
- Comparar os resultados obtidos através do método abordado com outros estudos existentes na literatura, para apurar a eficácia desta abordagem como solução para o problema de planejamento da expansão do sistema de distribuição (PSD).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão tratados alguns fundamentos básicos para o entendimento geral deste trabalho. O capítulo 2.1 apresenta conceitos sobre os sistemas elétricos de potência e suas divisões. A seção 2.2 aborda conceitos sobre o fluxo de potência. Em 2.3 será introduzido a metaheurística Busca Tabu. Por fim em 2.4 mostra como é feito o planejamento da expansão de sistemas de distribuição e os principais fatores a serem considerados neste processo.

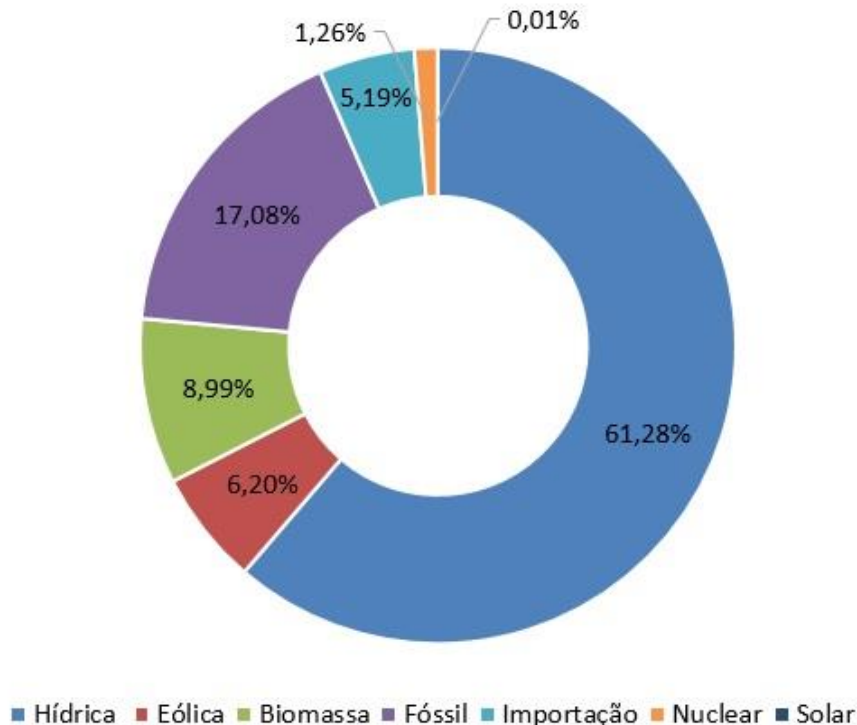
2.1 Sistemas elétricos de potência

Um sistema elétrico de potência (SEP) compreende o conjunto de subsistemas e equipamentos que objetivam fornecer energia elétrica para todos os seus consumidores, sendo constituídos basicamente por quatro seguimentos, a geração, transmissão, distribuição e comercialização.

A geração é a parte do SEP que é responsável por transformar uma fonte primária de energia em eletricidade, sendo composta pelas centrais geradoras, que são classificadas de acordo com a matéria-prima que utilizam na produção de energia elétrica. Estas centrais são escolhidas de acordo com a geografia do local, visando um melhor funcionamento e maior rentabilidade.

Em países como o Brasil que possuem muitos rios com grandes desníveis, a solução para a geração de energia é aproveitar a força da água, como é feito nas usinas hidrelétricas, que são responsáveis por 61,275% da geração de energia elétrica do Brasil de acordo com o Banco de Informações de Geração (BIG, 2016). O restante da matriz de energia elétrica do Brasil utiliza outros recursos como fonte primária, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Matriz de energia elétrica do Brasil por fonte.

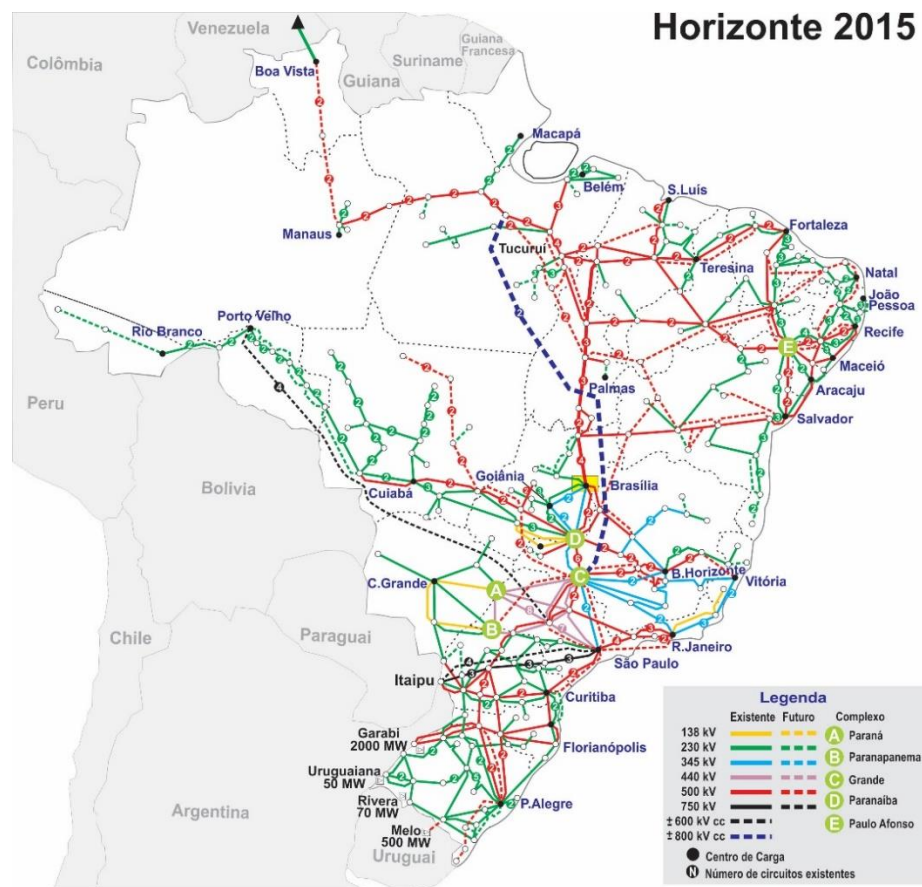


Fonte: Adaptado de Banco de Informações de Geração (BIG, 2016).

As tensões geradas por meio das grandes usinas estão normalmente entre 6 a 25 kV e são ampliadas por transformadores elevadores. No Brasil os níveis de tensões para as transmissões e subtransmissões variam entre 13,8 kV a 765 kV (ANEEL, 2011). Essa elevação ocorre para viabilizar as transmissões de médias e longas distâncias, diminuindo a bitola dos condutores, as perdas por efeito joule e queda de tensão ao longo das linhas.

O vasto território brasileiro que conta com 8.515.767,049 km² (IBGE, 2016) e abundância em recursos naturais justificam sua complexa rede de transmissão, com cerca de 116.000 km de extensão, considerada a maior do mundo (ELETROBRAS, 2016). O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é responsável pelo controle do Sistema Interligado Nacional (SIN) que responde por 98,3% da energia requerida pelo país (ONS, 2016). O Mapa do sistema de transmissão brasileiro é visto na Figura 2.

Figura 2 – Sistema de transmissão brasileiro.



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2015).

A entrega da energia é feita até as redes de distribuição que alimentam os consumidores industriais de médio e pequeno porte, consumidores comerciais e de serviços e consumidores residenciais (LEÃO, 2009). O atendimento é realizado com diferentes níveis de tensão, de acordo com o consumidor e as categorias, classificadas no documento intitulado "Procedimentos de Distribuição" (PRODIST) e estão apresentadas a seguir:

- Alta tensão - valor eficaz de tensão entre as fases é igual ou superior a 69 kV até 230 kV, é disponibilizada quando a demanda contratada pelo interessado é superior a 2.500 kW;
- Média tensão - valor eficaz de tensão entre as fases é superior 1 kV e inferior 69 kV, é disponibilizado quando a demanda contratada pelo interessado é superior a 75 kW e igual ou inferior a 2.500 kW;

- Baixa tensão - valor eficaz de tensão entre as fases é igual ou superior a 1 kV, é disponibilizada quando a demanda contratada é igual ou inferior a 75 kW.

O Brasil conta, em 2015, com mais de 77 milhões de unidades consumidoras, que corresponde ao conjunto de equipamentos e instalações elétricas que recebem energia elétrica em um só ponto de entrega, segundo a Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE, 2015).

Ainda segundo a ABRADEE o setor de distribuição brasileiro é considerado um dos mais regulados e fiscalizados do setor elétrico, a distribuição é regida pela ANEEL, a própria agência define as normas de funcionamento, definições, restrições e penalidades, as regulamentações do setor de distribuição são encontradas no PRO-DIST e na Resolução Normativa ANEEL Nº 414 (ANEEL – Prodist, 2017).

2.2 Fluxo de potência

O fluxo de potência segundo Pellegrino (2006) é uma técnica que determina os fluxos de potência ativa e reativa, sua grandeza e sentido, também as tensões nas barras, módulo e ângulo, entre outras grandezas de interesse, esse cálculo é utilizado tanto na operação quanto na expansão de um sistema elétrico de potência, na operação diferentes contingências são simuladas para obtenção do estado da rede após a contingência, para a expansão ele determina a o estado de operação da rede para a nova configuração.

A rede a ser analisada é composta de barras e nós, sendo quatro grandezas elétricas associadas a cada barra:

- V_k - Magnitude da tensão na barra k;
- θ_k - Ângulo de fase da tensão na barra k;
- P_k - Magnitude da potência ativa na barra k;
- Q_k - Magnitude da potência reativa na barra k.

De acordo com Monticelli (1983), as equações básicas do fluxo de potência são obtidas seguindo as Leis de Kirchhoff e que toda a potência líquida injetada é igual a soma das potências que fluem pelos componentes internos que tem este nó como um de seus terminais, que pode ser expressa matematicamente por meio das equações (1) e (2).

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh} = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2)$$

Ainda para a resolução das inequações do problema de fluxo de carga, há restrições de operação referentes a tensão nas barras de carga, que é estabelecida de acordo com o órgão regulamentador, a restrição está representada através da equação (3).

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (3)$$

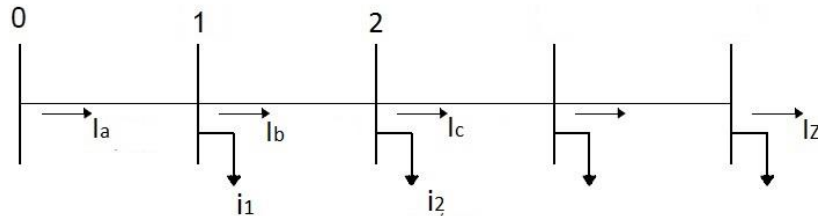
2.2.1 Método *Backward and Forward Sweep*

Segundo Guimarães os sistemas de distribuição de energia elétrica são, na maioria dos casos, configurados de forma radial sendo interligados por chaves de modo a permitir um controle sobre a topologia da rede, evitando problemas com a coordenação da proteção e atenuação de correntes de curto-circuito. O método proposto para a resolução deste problema será o *Backward and Forward Update Sweep* ou BFS, desenvolvido por D. Shimohammadi et al. (1988) que se trata de uma metodologia baseada na técnica Ladder, proposta por W. H. Kersting et al. (1976).

O BFS consiste em dois passos, no *backward* são calculadas as correntes nos trechos de forma regressiva, ou seja, dos pontos finais da rede até o trecho mais próximo da subestação, o *forward* realiza os cálculos das quedas de tensões utilizando as atualizações das correntes obtidas no *backward*, este segundo passo é realizado partindo da subestação em direção aos alimentadores. Esses passos são repetidos até que haja convergência do algoritmo (CARVALHO, 2006).

Para a análise do método considere a estrutura apresentada na Figura 3, o alimentador (barra 0), fornece uma tensão V_0 ao sistema que é composto por cargas consideradas constantes $S_1 = P_1 + jQ_1$, através de linhas representadas por impedâncias em série $z_i = r_i + jx_i$.

Figura 3 – Estrutura unifilar de uma rede radial.



Fonte: Adaptado de “Reconfiguração de redes de distribuição para redução de perdas e balanço de carga” (BARAN e WU, 1989).

Considerando que os valores de potência ativa e potência reativa ou de potência aparente sejam fornecidos, os valores das correntes nos trechos são facilmente calculados através da equação (4) e (5).

$$I_b = \frac{S_2^*}{V_2} - Y_2^{sh} \cdot E_2 \quad (4)$$

$$I_a = \frac{S_1^*}{V_1} + \sum_{x \in Z} I_x \quad (5)$$

Caso a tensão da barra não seja informada, como neste caso, é usual aplicar o *flat start*, sendo assim, todas as barras começam o fluxo de potência com tensão igual a $V = 1 \angle 0^\circ$, esta fase é chamada de *backward*.

Para a atualização das tensões será utilizado os valores de corrente encontrados no *backward*, a equação utilizada é apresentada em (6).

$$V_1 = V_0 - (r_a + jx_a) \cdot I_a \quad (6)$$

A equação anterior é aplicada até a última barra da rede, essa fase é chamada de *forward*, ao final desta fase é dado fim a primeira iteração do método.

Aplicando sucessivamente as equações (4), (5) e (6) obtém-se novos valores de corrente para os trechos e tensão para as barras, o fluxo de potência se encerra quando o critério de convergência, apresentado em (7) é cumprido.

$$|V_1^i - V_1^{i-1}| \leq e \quad (7)$$

Onde e que é chamado de “erro” é uma variável que representa a diferença entre as tensões obtidas entre uma iteração e outra de uma mesma barra.

2.2.2 Redução de perdas

As perdas na rede são expressas através das variáveis do sistema obtidas com as “equações de fluxo ramos”.

O processo para a redução das perdas ocorre com o cálculo do somatório das perdas de carga de cada trecho, como apresentado na equação (8). O objetivo é minimizar o valor de L_P .

$$L_P = \sum_{i=a}^z r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (8)$$

2.3 Busca Tabu

Para este estudo foi definido a utilização de uma meta-heurística para a condução de um algoritmo de busca afim de encontrar a melhor configuração da rede, segundo Glover & Laguna os procedimentos metaheurísticos são estratégias que guiam e modificam outras heurísticas para produzir soluções além daquelas normalmente encontradas em um ótimo local.

Criada por Fred W. Glover em 1986 a Busca Tabu é um procedimento metaheurístico de busca local, que explora o espaço de soluções, utilizando uma estrutura de memória para armazenar as soluções geradas, o que possibilita encontrar soluções além das ótimas locais.

A Busca Tabu tem obtido soluções ótimas ou soluções muito próximas das soluções ótimas para uma vasta variedade de problemas práticos e clássicos, como

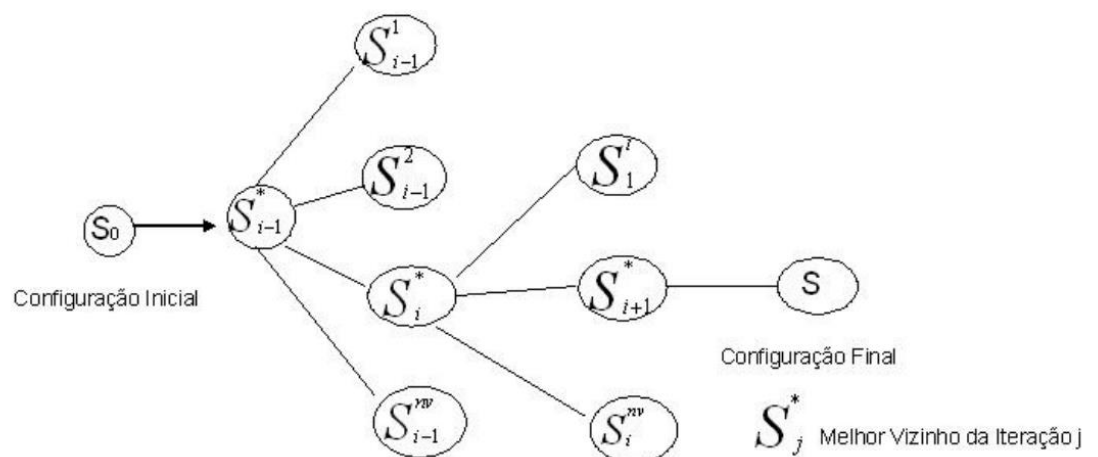
agendamentos, problemas de rotas e de caráter de reconhecimento para redes neurais, abaixo estão algumas aplicações que demonstram o potencial e a variabilidade de problemas e aplicações da Busca Tabu. (Glover, 1997).

- Agendamento de funcionários (Glover e McMillan 1986);
- Reconhecimento de caracteres (Hertz e de Werra 1987);
- Atribuição de caminho para telecomunicação (Oliveira e Stroud 1989);
- Problemas lógicos probabilísticos (Jaumard, Hansen e Poggi de Aragao 1989);
- Problemas de rotas para vendedores (Knox 1989);
- Balanço de canais computacionais (Glover 1989);
- Coloração de gráficos (Wendelin 1988);
- Escala para trabalhadores em shoppings (Eck 1989).

2.3.1 Funcionamento da Busca Tabu

Com o objetivo de minimizar uma função, o algoritmo se movimenta através de inserções ou troca de tarefas, após a análise o vizinho com a atual melhor avaliação se torna a nova solução, mesmo que sua avaliação seja menor que uma já encontrada. A Figura 4 apresenta um esboço do processo de busca pela melhor solução, vamos tratar este exemplo como um problema de minimização.

Figura 4 – Esquema de vizinhança para a Busca Tabu.

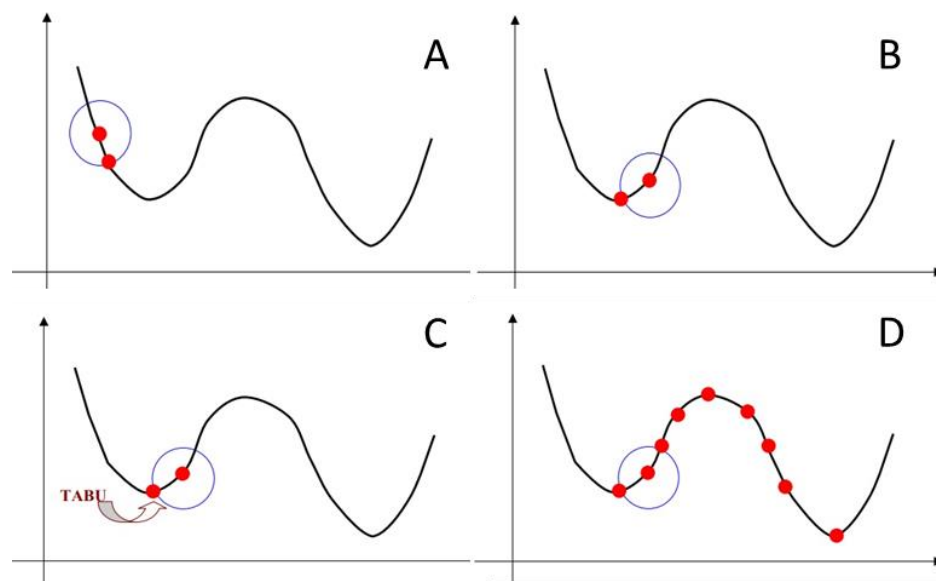


Fonte: Busca Tabu (Glover e Laguna, 1997).

Iniciando com uma configuração inicial teríamos a solução S_0 , ao ser realizado o primeiro movimento, que pode ser uma troca ou inserção de um novo trecho, a solução encontrada para este problema foi a de S_{i-1}^* , o movimento utilizado para se chegar nessa solução é alocado em uma lista, chamada de Lista Tabu, em seguida um novo movimento deve ser realizado e este movimento deve ser diferente do anterior, porque este último se trata de um movimento proibido, pois está na Lista Tabu, entre as duas opções de movimento é escolhida a que fornece um valor menor de solução, no caso S_i^* , novamente o movimento utilizado para encontrar essa última solução é alocado na Lista Tabu. Supondo que a minha solução S_{i-1}^* apresente um valor menor que a solução S_{i+1}^* , a escolha natural seria que o primeiro movimento fosse novamente realizado e a solução atual voltaria a ser S_{i-1}^* , mas como este movimento está na Lista Tabu é necessário que outro seja realizado, encontrando a solução S_{i+1}^* que apresenta um valor maior que a solução anteriormente encontrada.

Com essa breve análise é possível verificar a principal característica da Busca Tabu que é explorar soluções além das ótimas locais, evitando os ciclos que aprisionam as soluções em curtos espaços de vizinhança, essa análise fica mais evidente na Figura 5.

Figura 5 – Soluções encontradas em uma Busca Tabu.



Fonte: Adaptado de Pozo 2017.

Para evitar o retorno a soluções já visitadas, como é mostrado na Figura 5B, é criada uma Lista Tabu, que contém os movimentos considerados proibidos, apresentado na Figura 5C, assim o algoritmo é estimulado a visitar novas vizinhanças até encontrar a solução ótima global, representada na Figura 5D.

Na sua forma clássica a Lista Tabu, contém os últimos movimentos realizados, armazenados em uma lista de tamanho fixo, sendo o primeiro movimento que entra, o último que sai.

2.3.2 Características da Busca Tabu

Para a utilização da Busca Tabu algumas características devem ser estabelecidas para uma melhor estrutura do algoritmo, estas características são abordadas a seguir:

- Uso da memória – O uso da memória é dividido em dois tipos, memória de curto prazo que está relacionada ao quanto os movimentos são recentes, registrando por um determinado tempo os últimos movimentos realizados, já a memória de longo prazo tem uma maior variação, pois armazena o número de vezes que um movimento foi realizado, sendo possível analisar aspectos como qualidade, frequência e influência de um movimento.
- Definição da vizinhança – Definição da movimentação realizada através das soluções, variando entre troca de tarefas, inserções de tarefas, ou trocas e inserções.
- Duração tabu – Definição do número de iterações que um movimento será considerado tabu, tempos curtos podem gerar ciclos, tempos longos prejudicam a busca.
- Critérios de aspiração – Define quando um movimento tabu pode ser realizado, desconsiderando regras de ativação tabu. Movimentos que atualizam o valor da solução incumbente, e também quando todos os movimentos estão classificados como tabu, são critérios amplamente utilizados na literatura (Lopes et. al, 2013).
- Critério de parada – Define quando o algoritmo deve encerrar sua busca, usualmente é definido um número máximo de iterações da busca.

2.4 Planejamento de sistemas de distribuição

As atividades do sistema elétrico de potência são caracterizadas por dois tipos, a operação e a expansão. A operação é responsável pela manutenção dos recursos já disponíveis no SEP, enquanto a expansão compreende novas instalações que serão feitas conforme o aumento da carga (SANT'ANNA, 2009), sendo esta última o foco deste trabalho.

De acordo com Candian (2008), existe uma sequência para os estudos do planejamento de sistemas de distribuição (PSD), nos quais se destacam os seguintes fatores:

- Preparação dos dados - Serão levantadas características da topologia da rede de distribuição, bem como a magnitude de suas grandezas elétricas, como a impedância das linhas de transmissão e as cargas nas barras da rede;
- Formulação de alternativas - Com os dados da rede de distribuição a ser expandida, serão formuladas alternativas que deverão atender as restrições impostas pelo órgão regulamentador, no Brasil a ANEEL;
- Estudos elétricos - Com as diversas alternativas consideradas há a necessidade de verificar se estas são viáveis tecnicamente, para isso será utilizado o cálculo do fluxo de potência;
- Avaliação Final - Verifica-se com o estudo qual a topologia da nova rede de distribuição que apresenta o menor custo, cumprindo com os critérios de qualidade e segurança.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

Com o intuito de proporcionar a melhor configuração da rede para o planejamento da expansão do sistema de distribuição de energia elétrica será elaborado, neste trabalho, um algoritmo de Busca Tabu associado a um fluxo de potência que vai permitir os cálculos para a verificação da factibilidade da rede proposta, bem como suas perdas anuais e seus custos de cabeamento.

A configuração final da rede será obtida através da substituição de rotas existentes através de chaveamentos nas barras, sendo aquela que apresentar a menor custo cumprindo com os critérios imposto pelo órgão regulamentador, será a solução ótima.

3.1 Modelo matemático

Para este estudo foi utilizado um modelo simplificado, utilizado por Hadano (2016), do modelo proposto por Oliveira (2010), nele apenas foram considerados os custos referentes a construção/recondutoramento de circuitos e as perdas ativas no sistema, conforme equação (9).

$$\min f = k_l \sum_{i,j \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} (c_{ij,a} n_{ij,a} l_{ij,a}) + \delta_l c_{ld} \sum_{i,j \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} g_{ij,a} n_{ij,a} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (9)$$

A qual o primeiro termo se refere aos custos de investimento, onde k_l representa taxa de recuperação de capital da construção de circuitos, $c_{ij,a}$ representa o custo por quilômetro de construção do circuito que liga ij usando um condutor do tipo a , $n_{ij,a}$ representa uma variável binária de tomada de decisão e $l_{ij,a}$ representa o comprimento em quilômetros do trecho ij , para o segundo termo, que se refere as perdas ativas do sistema, c_{ld} sendo o custo de unidade de energia na demanda d , $g_{ij,a}$ é a condutância do trecho que liga ij , V_i e V_j como sendo a magnitude das tensões nas

barras i e j , θ_{ij} como sendo a diferença angular entre as barras i e j e por fim δ_l que é uma constante que tem por objetivo transformar potência em energia, conforme equação (10).

$$\delta_l = \alpha_d \tau_l \phi_l \quad (10)$$

Sendo α_d o número de horas por ano, τ_l a taxa de juros para as perdas de potência ativa e ϕ_l o fator de perdas do circuito.

Para uma contraprova do resultado das perdas ativas obtido no fluxo de potência será utilizado a equação (11) apresentada por Nahman e Peric (2008), que transforma a equação (9) de potência para energia.

$$L_p = 8760 c_{ld} \phi_l \sum_{i=0}^{n-1} r_{ij} |I_{ij}|^2 \quad (11)$$

Onde r_{ij} é a resistência do trecho que liga as barras i a j e I_{ij} é a corrente que circula no trecho de i a j .

3.2 Busca tabu aplicada ao problema

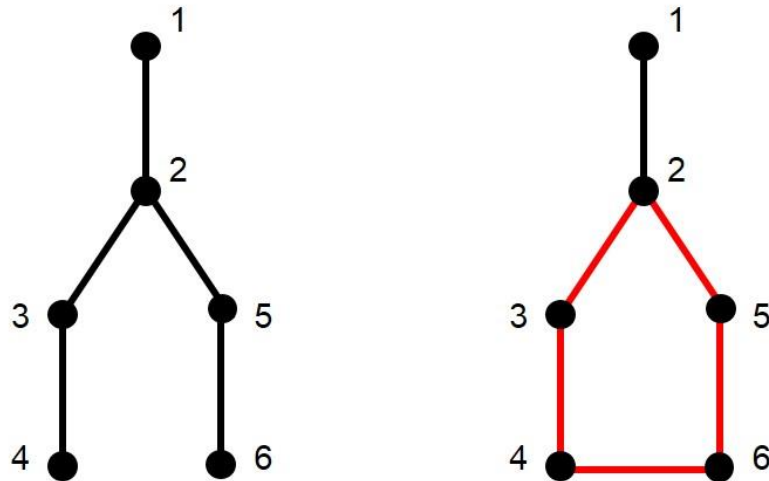
Com os dados de custo de construção e das perdas de circuito é dado sequência ao trabalho buscando novas topologias da rede através de substituição de trechos, essa escolha foi feita para cumprir com o critério de radialidade, apresentado na equação (12), imposto pelo problema.

$$n = m - 1 \quad (12)$$

Onde o número de trechos n tem que ser igual ao meu número de barras $m - 1$.

A troca do trecho no circuito é realizada em duas etapas, na primeira há a adição do trecho a rede, formando uma malha, conforme mostra a Figura (6), o critério para a adição de um trecho que ainda não esteja no circuito é do que apresentar o menor tamanho, conseqüentemente, uma menor impedância.

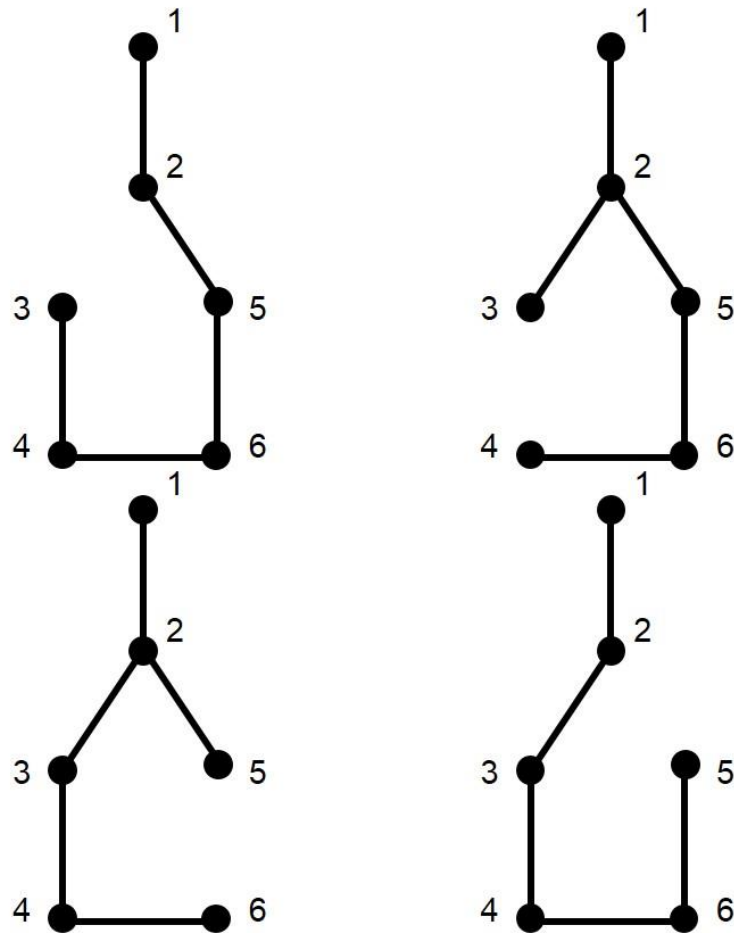
Figura 6 – Topologia da rede antes e topologia da rede após a adição do trecho.



Fonte: Autoria própria.

Em seguida o algoritmo identifica os trechos que compõem essa malha e retira um desses trechos para que a substituição seja feita, após a retirada do trecho a rede volta a ter topologia radial, com isso o fluxo de potência pode ser calculado para a verificação da factibilidade e dos custos de investimento da nova rede, que é a soma dos custos de construção da rede com os custos das perdas ativas, os valores de investimento são armazenados e o trecho volta a fazer parte do circuito, formando novamente uma malha na rede, em seguida um novo trecho que compõe a malha é retirado, como feito anteriormente o fluxo de potência é calculado e conseqüentemente obtêm-se novos valores de investimento para essa nova rede, este processo é realizado até que todos os trechos que compõem a malha sejam substituídos, conforme apresentado na Figura (7).

Figura 7 – Topologia das redes radiais obtidas a partir da substituição do primeiro trecho.

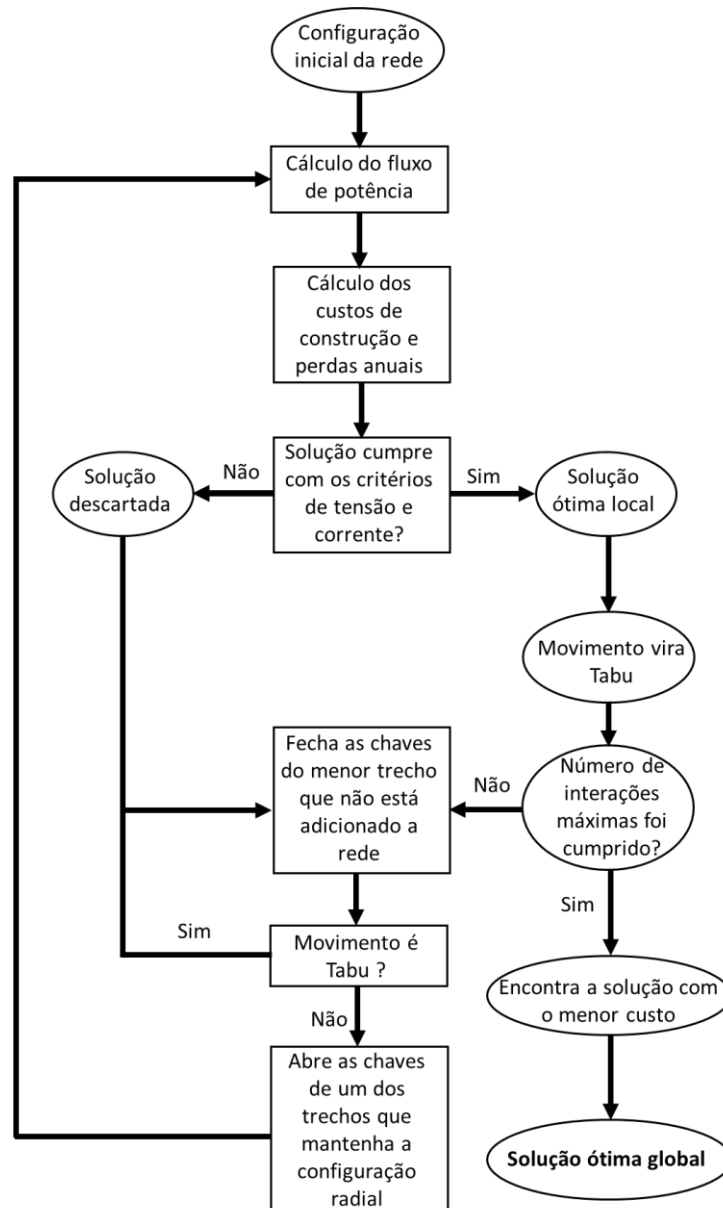


Fonte: Autoria própria.

Com todos os dados de investimento da retirada de cada um dos trechos o trecho a ser definitivamente retirado para aquela interação é aquele em que a rede apresentou o menor custo de investimento. Para a finalização da interação o trecho que foi adicionado a rede entra para a lista tabu, se tornando um movimento proibido, ou seja, este trecho só poderá ser retirado após um determinado número de interações, definida como o comprimento da lista tabu.

De forma simplificada a Figura 8 mostra o diagrama do processo de otimização utilizando Busca Tabu.

Figura 8 – Diagrama de processo do algoritmo.



Fonte: Autoria própria.

Os códigos para a programação do fluxo de potência *Backward and Forward Sweep* e do algoritmo de Busca Tabu, serão desenvolvidos através do software Matlab®, utilizado amplamente para resoluções de problemas de engenharia que envolvam principalmente vetores e matrizes.

Para a verificação da eficácia da configuração obtida, os resultados deste trabalho serão comparados com outros presentes na literatura.

4 TESTES E RESULTADOS

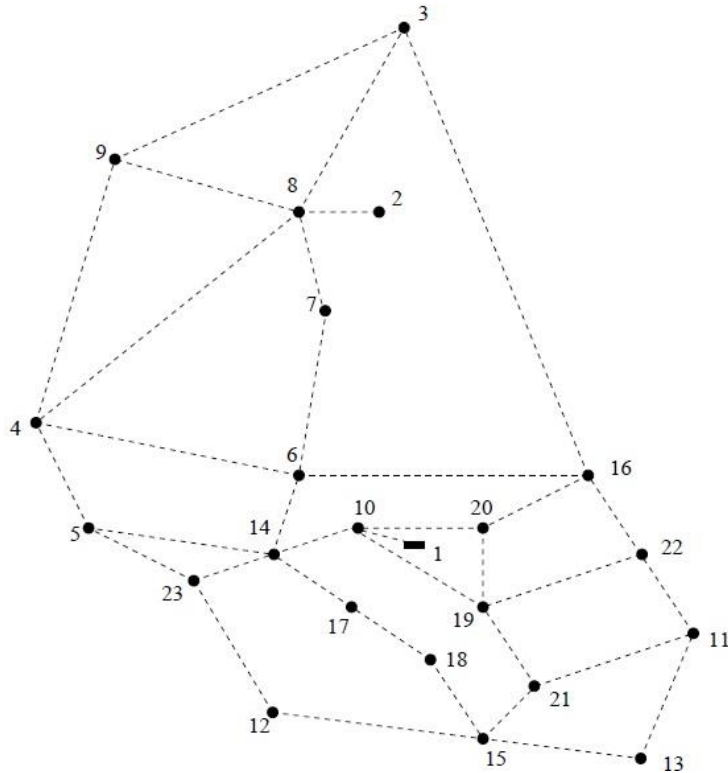
O algoritmo de Busca Tabu desenvolvido para este trabalho foi elaborado na linguagem M utilizando o software Matlab®, todos os testes a seguir foram feitos em um computador que conta com um processador Intel® Core™ i5-4200U com velocidade de processamento de 2,30 GHz, com 4 Gb de memória ram instalada e sistema operacional de 64 bits.

O sistema utilizado neste trabalho foi o apresentado em Nahman e Peric (2008), que é uma rede de distribuição de 34,5 kV alimentada por uma subestação de 10 MVA, que alimenta uma área de produção de óleo com 22 barras, sendo 21 de carga. As rotas viáveis propostas são mostradas na Figura 9. Todos os condutores são de alumínio 1/0 e são utilizados os parâmetros encontrados em Grigsby (2001), que estão no Anexo A.

Para os testes realizados foi considerado somente a construção de circuitos, com desvio máximo de tensão de 3%, fator de potência médio sendo igual a 0,9, com custo de perdas de energia de 0,05 US\$/kWh, fator de perdas de 0,35, taxa de juros de 0,1 com o período de planejamento sendo de 20 anos o erro utilizado para o fluxo de potência foi de 0,001.

Todos os valores de tensão na barra e ângulos obtidos nos testes a seguir se encontram no Anexo B.

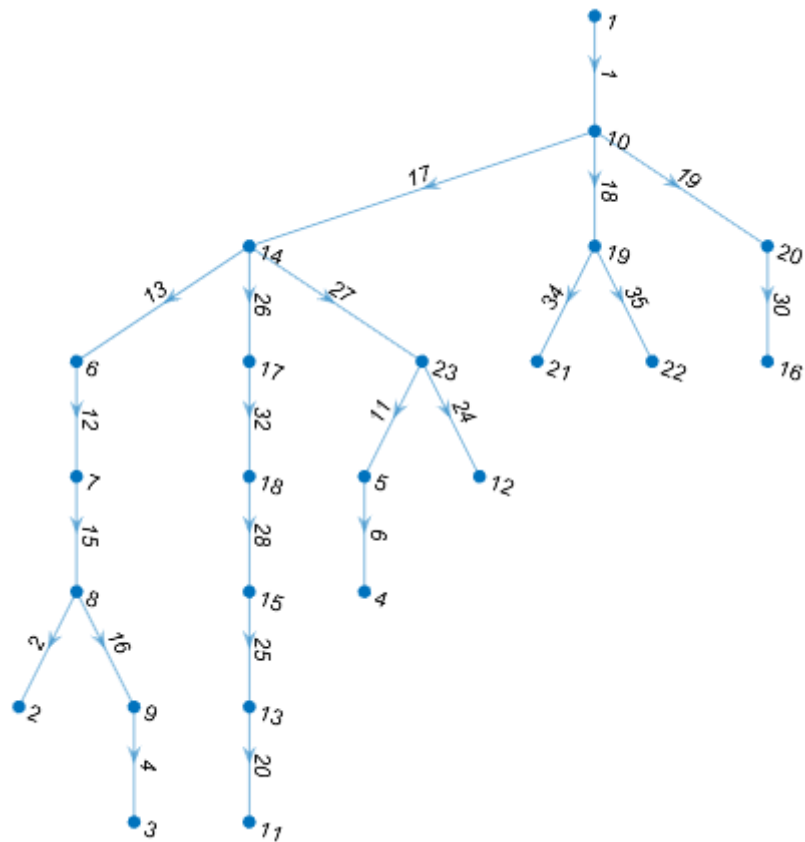
Figura 9 – Rotas viáveis para a rede de 23 barras.



Fonte: Planejamento integrado da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica (Oliveira, 2010).

Para todos os testes a seguir a topologia inicial da rede, apresentada na Figura 10, foi definida como sendo a rede que tenha o menor gasto com a construção de condutores possível e que seja factível, isso significa que a mesma tem que atender a todas as cargas, ter formato radial, cumprir com os critérios de tensão previamente estabelecidos e ainda cumprir com o critério de corrente máxima no condutor.

Figura 10 – Topologia inicial.



Fonte: Autoria própria.

Na figura acima é possível ver a topologia inicial que foi utilizada neste estudo, nela estão os números das barras e dos trechos utilizados, os dados que garantem a factibilidade desta rede estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros da configuração inicial da rede.

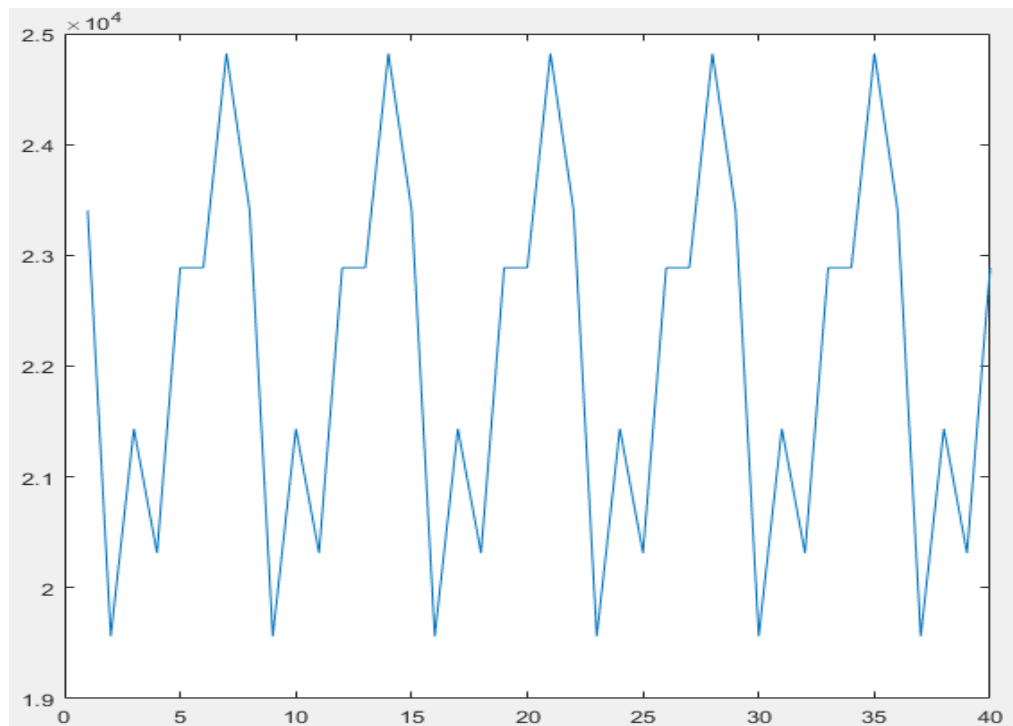
Barra com a menor tensão na rede	0,9948 pu
Trecho com a maior corrente	0,705 pu = 204,52 A
Custo de perdas em 20 anos	US\$ 21.429
Custo de construção dos circuitos	US\$ 151.892
Custo total	US\$ 173.321

Para comprovar a autenticidade de que essa configuração é a que representa o menor gasto, nos dados apresentados nos testes a seguir é possível verificar que em todas as configurações de redes analisadas o gasto de construção de circuitos é maior ou no mínimo igual ao desta rede.

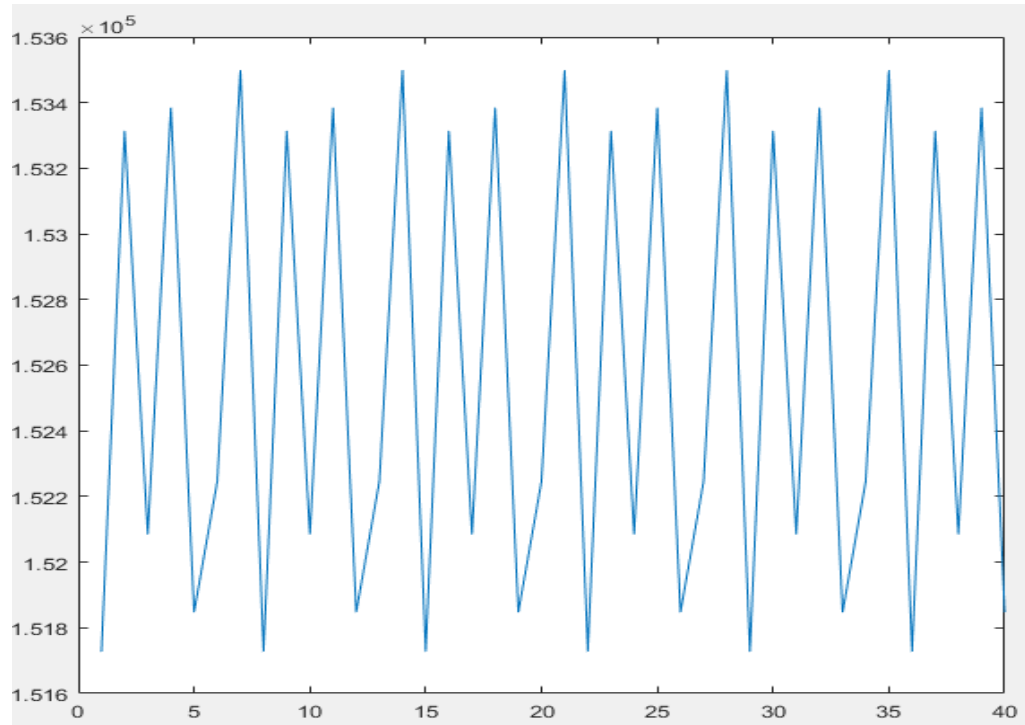
4.1 Teste para uma Lista Tabu de tamanho 5

O primeiro teste foi realizado com uma Lista Tabu de tamanho 5 com um número máximo de interações de 40, as Figuras 11, 12 e 13 mostram as variações de valores encontrados para os custos de perdas ativas ao longo do período de 20 anos, custos de construção de circuito e custos totais, que é a soma dos custos de perdas com os custos de construção de circuitos, respectivamente.

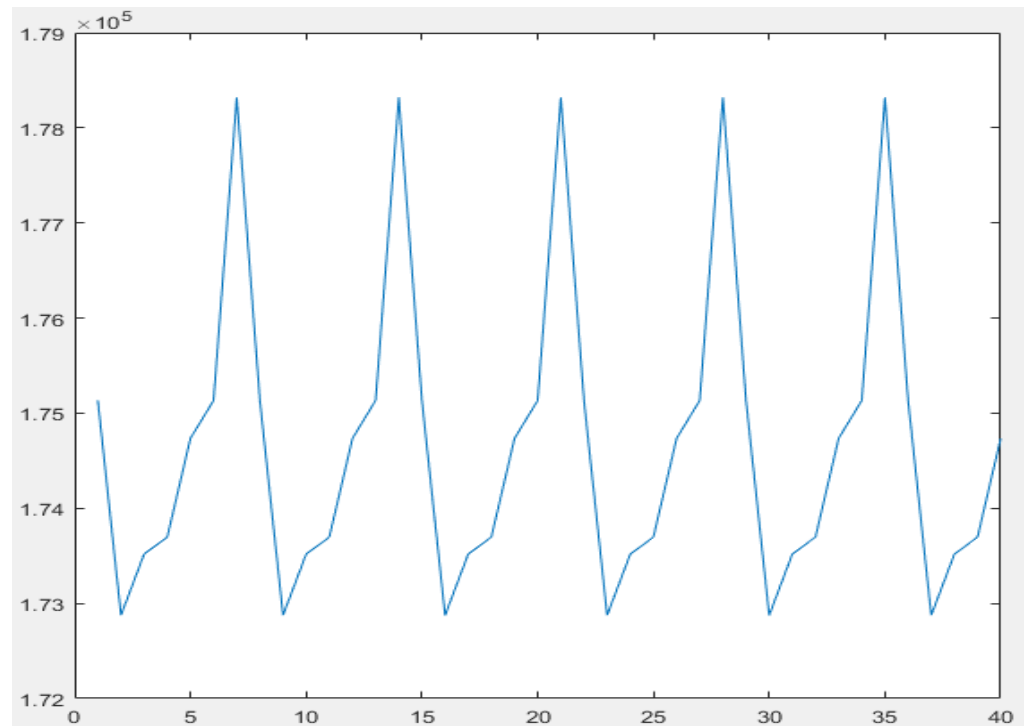
Figura 11 – Custos de perdas para Lista Tabu de tamanho 5.



Fonte: Autoria própria.

Figura 12 – Custos de construção para Lista Tabu de tamanho 5.

Fonte: Autoria própria.

Figura 13 – Custos totais da rede para Lista Tabu de tamanho 5.

Fonte: Autoria própria.

Pelo comportamento dos dados apresentados para o teste com Lista Tabu de tamanho 5 nota-se a formação de ciclos, ou seja, a partir de um determinado ponto as mudanças na topologia da rede eram as mesmas, essa análise é facilmente diagnosticada verificando a Tabela 2, nela mostra o comportamento da Lista Tabu nas 8 primeiras interações.

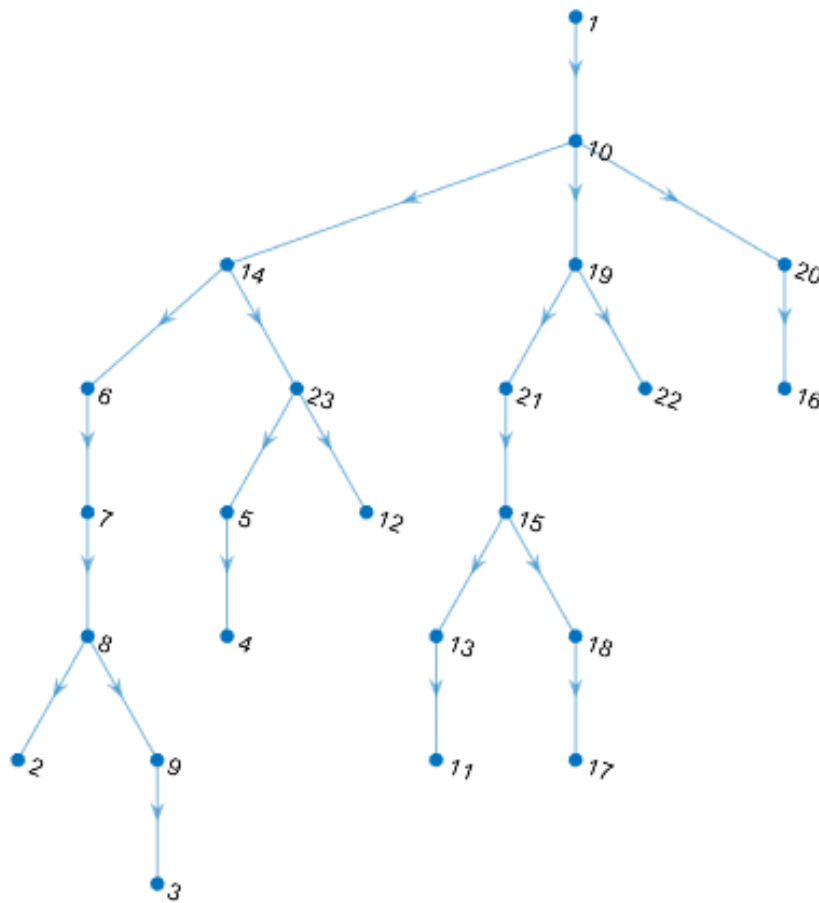
Tabela 2 – Formato da Lista Tabu de tamanho 5 nas 8 primeiras interações.

Interação	Lista Tabu				
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	29
2	0	0	0	29	26
3	0	0	29	26	28
4	0	29	26	28	32
5	29	26	28	32	18
6	26	28	32	18	34
7	32	18	34	17	29
8	18	34	17	29	26

É possível notar observando o comportamento da interação 2 e 8 que a ordem dos trechos adicionados a rede vai se repetindo, em ambas interações o último e penúltimo trechos adicionados são o 29 seguido pelo trecho 26, com esses dados e visualizando o comportamento dos gráficos para este teste é previsível que na nona interação o trecho a ser adicionado a rede e conseqüentemente a Lista Tabu é o trecho 28.

No entanto, este teste obteve uma topologia ótima local factível que pode ser vista na Figura 14.

Figura 14 – Topologia ótima local encontrada para a Lista Tabu de tamanho 5.



Fonte: Autoria própria.

Para comprovar a factibilidade dessa rede perante as configurações previamente apresentadas, a seguir na Tabela 3, seguem os principais dados que configuram a factibilidade e mostram os resultados obtidos com a minimização dos custos para este teste.

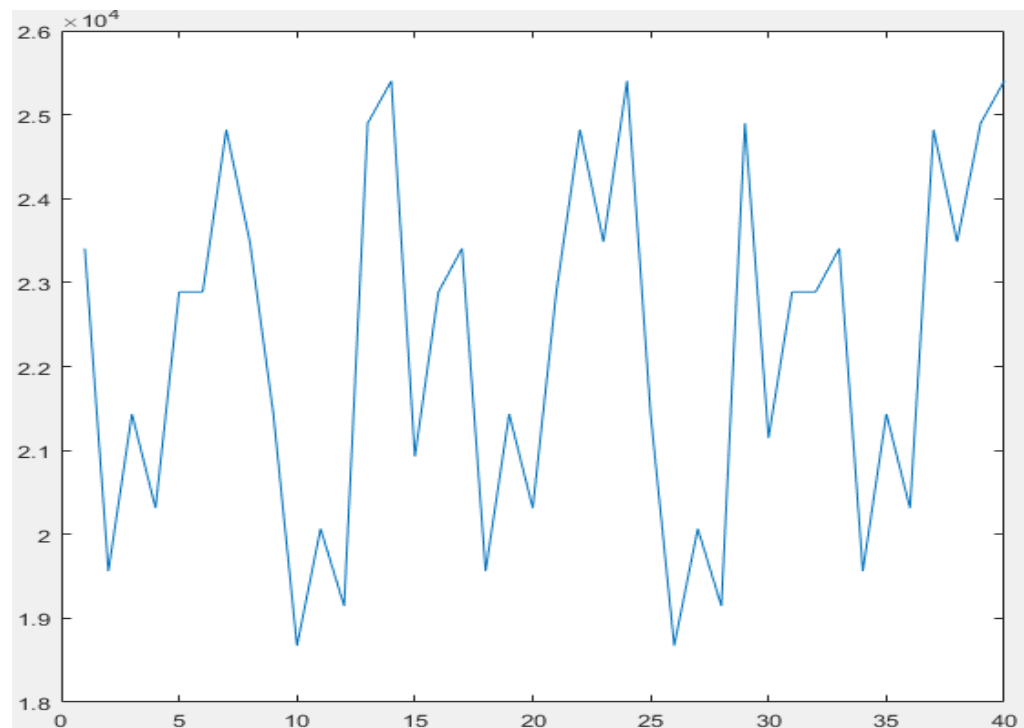
Tabela 3 – Parâmetros da configuração da rede ótima para Lista Tabu de tamanho 5.

Barra com a menor tensão na rede	0.9950 pu
Trecho com a maior corrente	0.641 pu = 185,80 A
Custo de perdas em 20 anos	US\$ 19.560
Custo de construção dos circuitos	US\$ 153.314
Custo total	US\$ 172.874

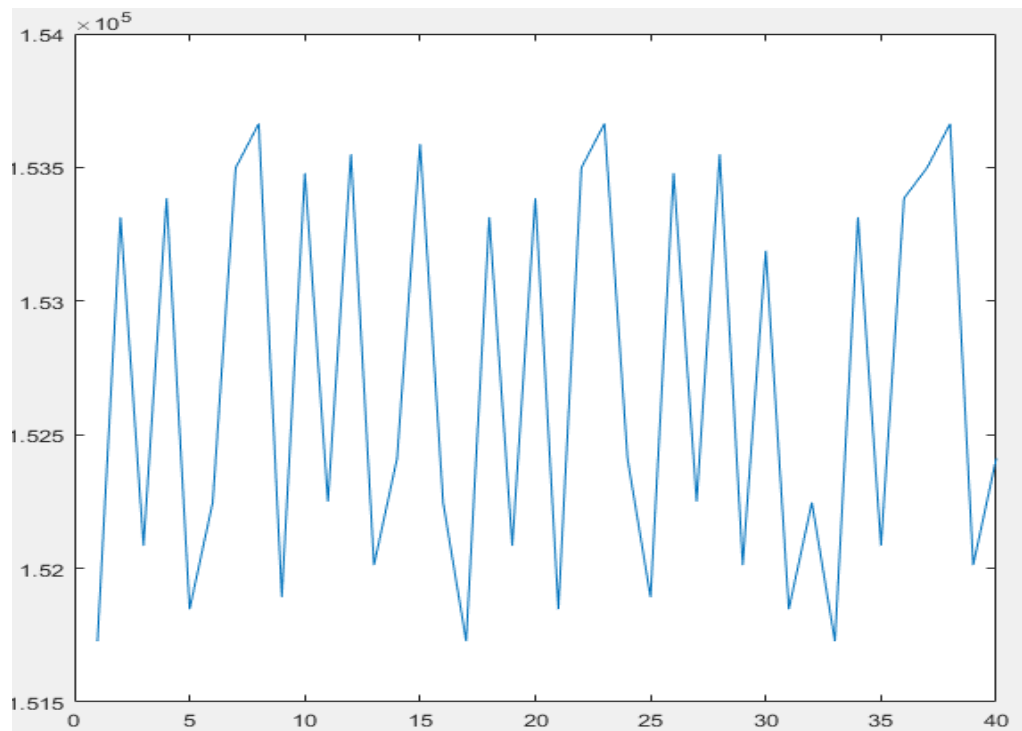
4.2 Teste para uma Lista Tabu de tamanho 6

Como os resultados do primeiro teste utilizando a Lista Tabu de tamanho 5 não apresentaram um resultado de busca muito conclusivo, devido a formação de ciclos, buscou-se uma forma da busca ir além da troca de apenas 6 trechos, para isso foi acrescentado em uma unidade a Lista Tabu, chegando a 6 casas, o número de interações foi mantido em 40, o resultado deste teste está apresentado nas Figuras 15, 16 e 17.

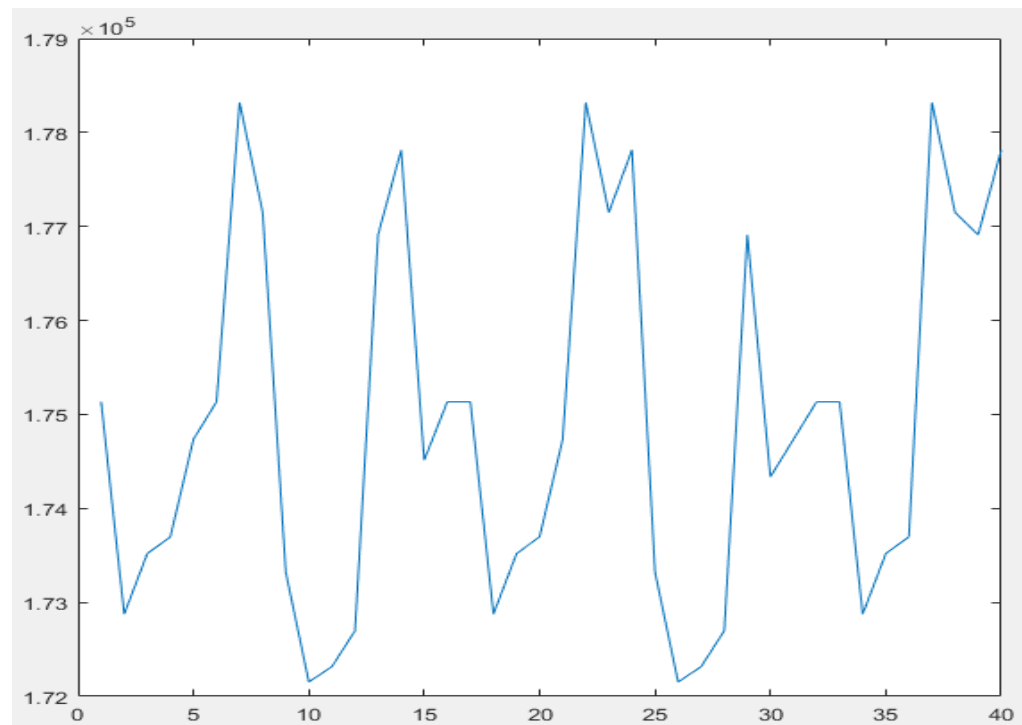
Figura 15 – Custos de perdas para Lista Tabu de tamanho 6.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16 – Custos de construção para Lista Tabu de tamanho 6.

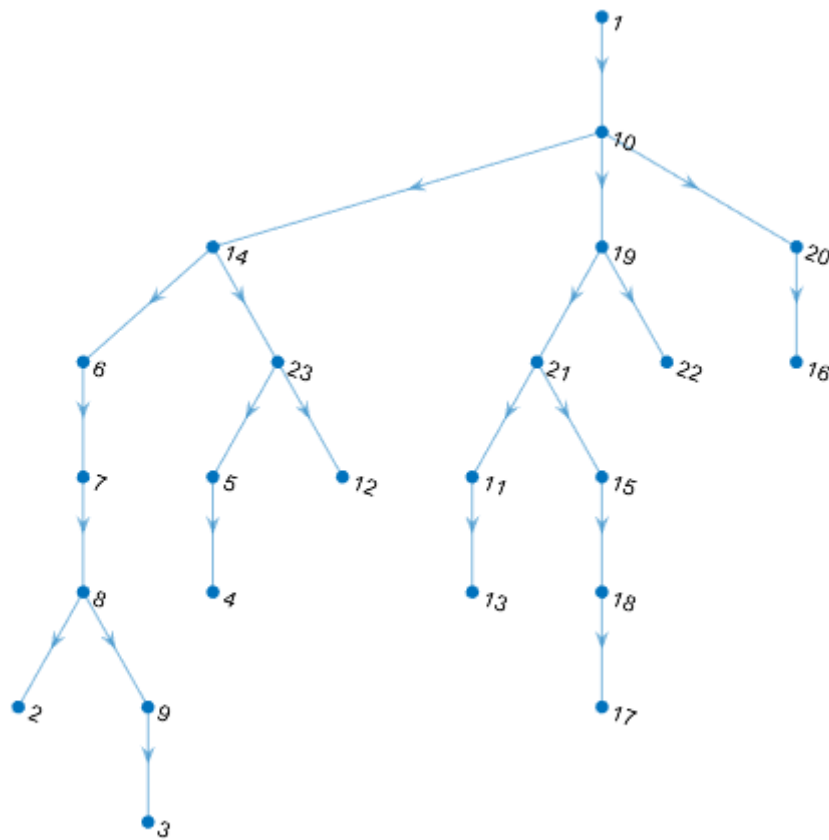
Fonte: Autoria própria.

Figura 17 – Custos totais da rede para Lista Tabu de tamanho 6 e 40 interações.

Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 17, que apresenta o custo total que soma o custo com as perdas ativas mais o custo de construção dos circuitos, não foi possível notar ciclos, apenas uma semelhança de comportamento do gráfico das interações de 10 a 25 para as interações de 26 a 40. Ainda neste teste foi possível notar que a solução ótima obteve um valor ainda menor, consequentemente chegando a uma nova topologia da rede.

Figura 18 – Topologia ótima local encontrada para a Lista Tabu de tamanho 6.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 18 é possível ver a mudança da configuração da rede ótima, antes as barras 13 e 11 eram “filhas” da barra 15, agora elas são alimentadas pela barra 21.

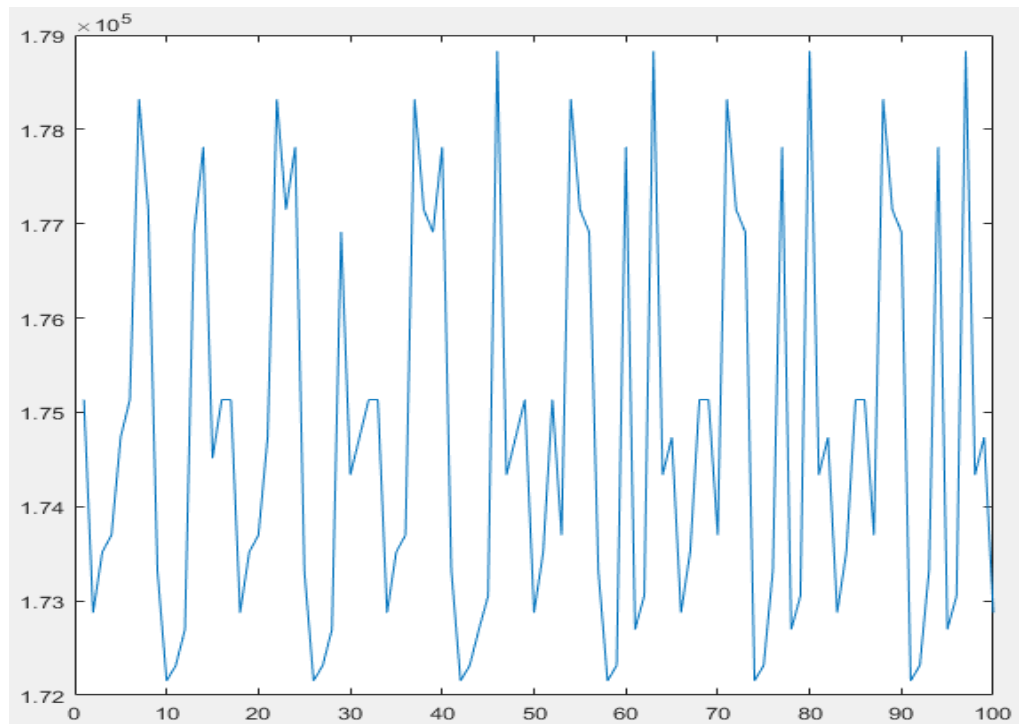
Os resultados que demonstram a factibilidade dessa topologia são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros da configuração da rede ótima para Lista Tabu de tamanho 6.

Barra com a menor tensão na rede	0.9951 pu
Trecho com a maior corrente	0,6093 pu = 176,61 A
Custo de perdas em 20 anos	US\$ 18.674
Custo de construção dos circuitos	US\$ 153.479
Custo total	US\$ 172.153

Para garantir que esta é a melhor rede para a condição de Lista Tabu de tamanho 6, foi proposto o aumento do número de interações para 100, esse aumento leva a uma varredura ainda maior desse sistema, possibilitando uma resposta além da que foi obtida para 40 interações, o resultado desse teste pode ser visto na Figura 19 e na Tabela 5.

Figura 19 – Custos totais da rede para Lista Tabu de tamanho 6 e 100 interações.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Parâmetros da configuração da rede ótima para Lista Tabu de tamanho 6 para 100 interações.

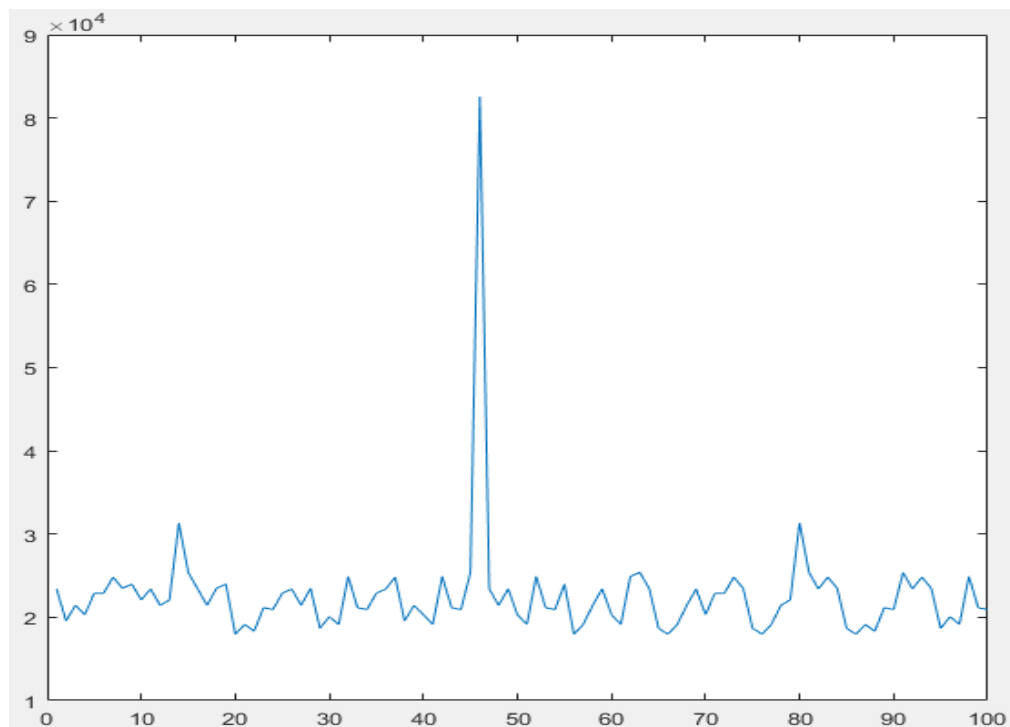
Barra com a menor tensão na rede	0.9951 pu
Trecho com a maior corrente	0,6093 pu = 176,61 A
Custo de perdas em 20 anos	US\$ 18.674
Custo de construção dos circuitos	US\$ 153.479
Custo total	US\$ 172.153

Os resultados do teste de 40 e 100 interações em relação a solução foram iguais, ou seja, ambos chegaram na mesma configuração de rede, a diferença se dá no tempo computacional, a de 40 interações leva cerca de 1 segundo a menos que a de 100 interações.

4.3 Teste para uma Lista Tabu de tamanho 7

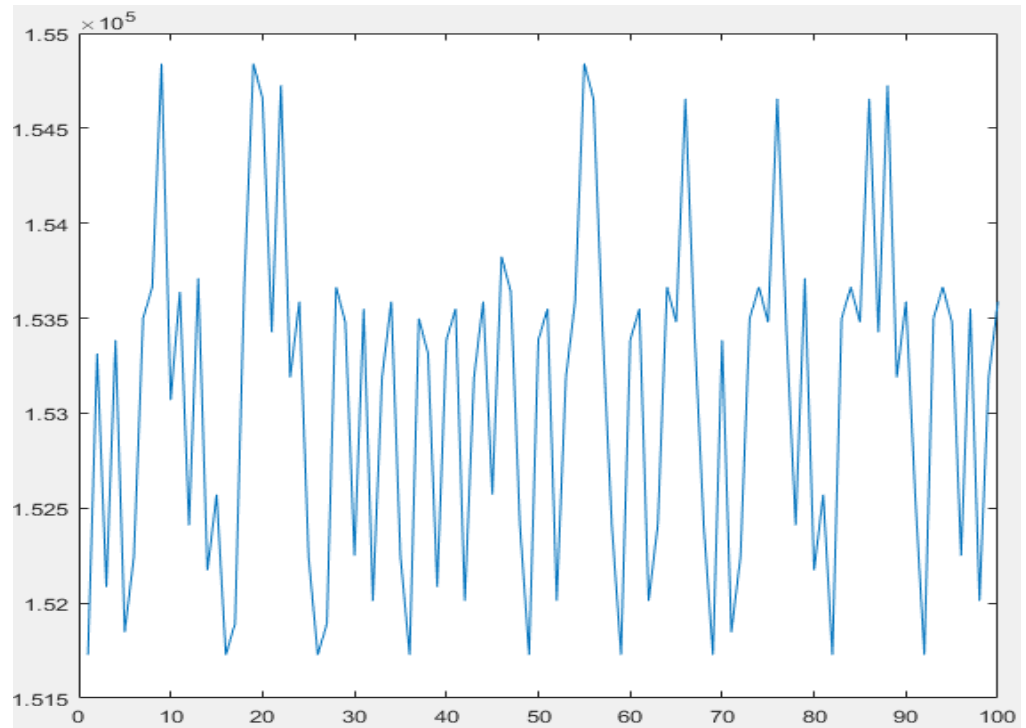
Para verificar se o teste com tamanho 6 obteve a topologia ótima foi feito o teste para Lista Tabu de tamanho 7, ela foi iniciada na topologia apresentada na Figura 10, como os outros testes e foi feito uma análise para 100 interações, o comportamento dos resultados para o custo das perdas ativas, de construção e o custo total estão representados nas Figuras 20, 21 e 22.

Figura 20 – Custos de perdas para Lista Tabu de tamanho 7.



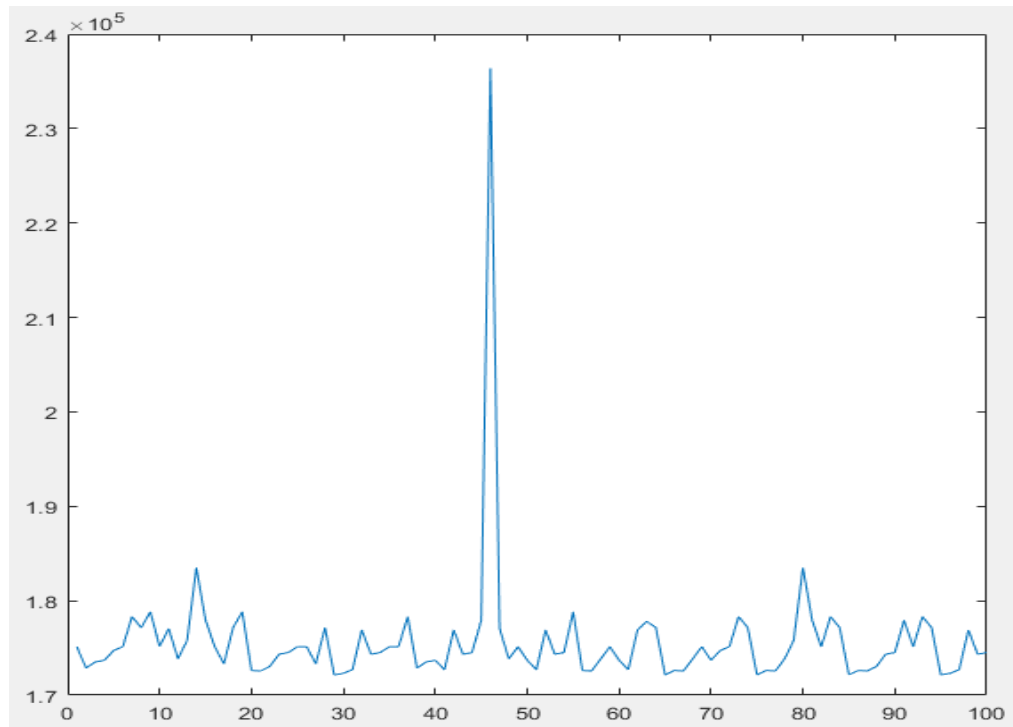
Fonte: Autoria própria.

Figura 21 – Custos de construção para Lista Tabu de tamanho 7.



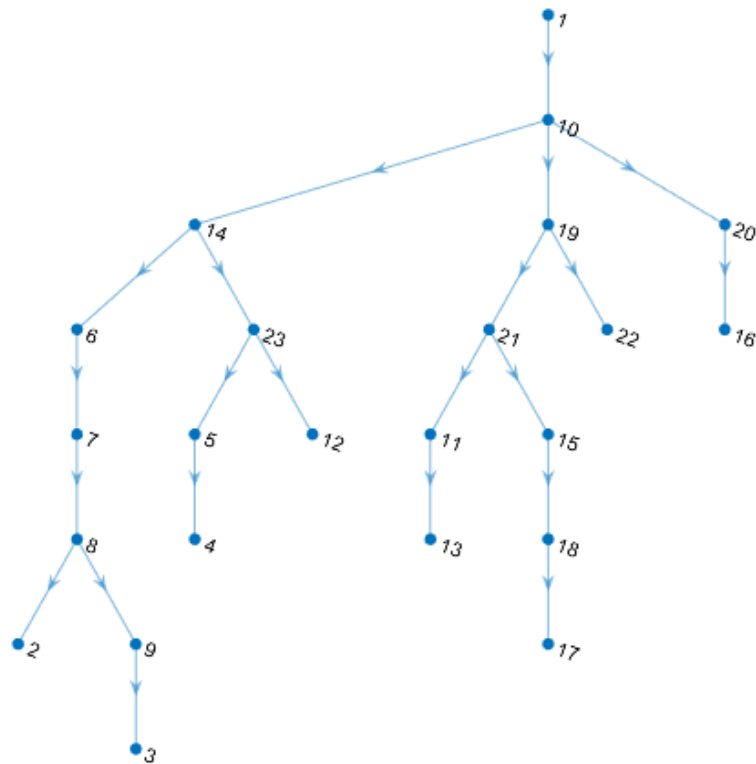
Fonte: Autoria própria.

Figura 22 – Custos totais da rede para Lista Tabu de tamanho 7.



Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – Topologia ótima local encontrada para a Lista Tabu de tamanho 7.



Fonte: Autoria própria.

Ao comparar as redes encontradas no teste com Lista Tabu 6 e Lista Tabu 7, é possível verificar que as redes ótimas foram idênticas, isso fica ainda mais claro ao comparar as Tabela 5 e 6.

Tabela 6 – Parâmetros da configuração da rede ótima para Lista Tabu de tamanho 7.

Barra com a menor tensão na rede	0.9951 pu
Trecho com a maior corrente	0,6093 pu = 176,61 A
Custo de perdas em 20 anos	US\$ 18.674
Custo de construção dos circuitos	US\$ 153.479
Custo total	US\$ 172.153

4.4 Análise dos resultados

A configuração ótima encontrada neste estudo se apresenta nas Figura 23 e seus parâmetros estão disponíveis na Tabela 6 e no Anexo B, porém é preciso comparar esse resultado com outros obtidos na literatura, a Tabela 7 apresenta o estudo de outros autores que aplicaram diferentes métodos de otimização neste mesmo sistema.

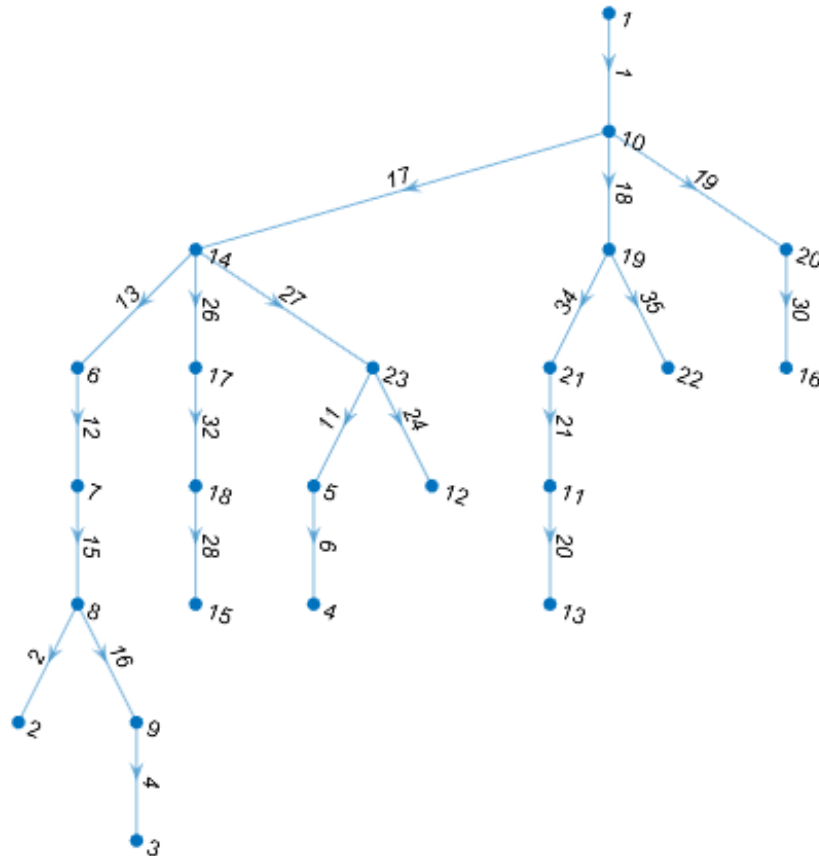
Tabela 7 – Estudos e resultados realizados para o problema de 23 barras.

Método	Custo total (US\$)	Tempo (s)
Branch and bound (Oliveira, 2010)	172.119	1.705
AHC final (Oliveira, 2010)	172.119	28,98
Colônia de formigas (Gomez et al., 2004)	172.913	-
Simulated Annealing (Nahman e Peric, 2008)	172.899	4.578
SA-MILP (Popovic et al., 2014)	173.142	12,4
Busca Tabu (Koutsoukis et al., 2014)	172.445	7,23
GRASP com first-improving (Hadano, 2017)	177.346	263,58
GRASP com best-improving (Hadano, 2017)	175.962	364,33
Busca Tabu	172.153	5.04

O melhor resultado já obtido para esta rede está presente no trabalho de Oliveira, nele o resultado alcançado é de US\$ 172.119 de custos totais, o resultado presente neste trabalho chega a US\$ 172.153, sendo assim nosso resultado apresenta uma diferença de 0,019% essa diferença provavelmente se deve ao uso de

diferentes métodos de fluxo de potência, o estudo de Oliveira não cita qual foi usado, porém apresenta o resultado da configuração ótima da rede, que está apresentada na Figura 24.

Figura 24 – Topologia ótima global encontrada em Oliveira.



Fonte: Autoria própria com base nos dados encontrados (Oliveira, 2018).

Os dois últimos testes realizados neste estudo passaram pela configuração ótima encontrada em Oliveira, esta análise foi feita por comparação de vetores, foi colocado um vetor binário que tinha valor 1 para o trecho que já estava alocado na rede e 0 para que não estava, com isso para o teste com Lista Tabu de tamanho 7, a configuração de Oliveira foi encontrada nas interações seis e oitenta, para a Lista Tabu de tamanho 6 foi encontrada nas interações cinco e trinta e em ambos obteve-se o mesmo custo de configuração de rede, porém o custo das perdas ativas foi menor em Oliveira, o resultado obtido com a rede de Oliveira neste estudo foi de US\$ 173.322, apresentando uma diferença de 0,7%.

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo de construir um algoritmo Busca Tabu que otimizasse o problema de planejamento de expansão do sistema de distribuição foi realizado, os resultados apresentados comprovam a eficácia do método.

Foi verificado que este estudo chegou a resultados bem próximos do ótimo global, quando este método foi comparado a um estudo anterior que utilizou o mesmo fluxo de potência, porém um outro método de otimização, no caso o estudo apresentado em Hadano, foi obtido uma diferença de 2,16% para menos, apresentando um melhor resultado em um tempo computacional 72 vezes menor.

O que se pode concluir de uma forma geral é que a Busca Tabu apresenta um resultado satisfatório com o melhor tempo computacional, dentre os estudos realizados, como apresentado em Koutsoukis, o resultado obtido com este método para este estudo já tinha obtido o melhor tempo computacional, o mesmo conseguiu ser reduzido, isso se dá provavelmente pelos avanços tecnológicos, onde os computadores de hoje em dia são bem mais eficientes do que os de 2014, quando foi realizado o último estudo envolvendo essa busca para este problema.

6 ESTUDOS FUTUROS

Para a utilização da Busca Tabu seria interessante aumentar a complexidade da busca, utilizando critérios de aspiração e memória de longo prazo, por exemplo. A aplicação deste método em redes mais robustas, envolvendo banco de capacitores, reguladores de tensão e construção de subestações, onde provavelmente o tempo computacional da Busca Tabu teria ainda mais destaque.

A utilização de novos métodos para a solução do problema de PSD é aconselhável para estudos futuros, dando continuidade na busca para qual seria o melhor método de otimização para aplicação deste problema.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Cartilha de Acesso ao Sistema de Distribuição.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Nota técnica nº0075/2011-SRD/ANEEL**. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0075_DANIEL_SRD.pdf. Acesso em: 12 de dezembro de 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA - ABRADDEE. **Redes de energia elétrica**. Disponível em: <http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica>. Acesso 10 de outubro de 2016.

BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO – BIG. **Capacidade de geração do Brasil**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 17 de dezembro de 2016.

BARAN, M. E; WU, F. F. **Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, nº2, April 1989.

CANDIAN, F. J. **Planejamento da expansão de sistemas elétricos de distribuição considerando fatores de riscos em análise econômica**. 2008. 74 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/87136>>.

CARVALHO, M. R. **Estudo comparativo de fluxo de potência para sistemas de distribuição radial**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ECK, B. T. **Good solution to job shop scheduling problems via tabu search**. Relatório de pesquisa, Department of Industrial Engineering and Operations Research, Columbia University, New York, maio 1989.

ELETROBRAS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. **Como a energia elétrica é transmitida no Brasil**. Disponível em: <http://www.eletrobras.com/elb/natrilha-daenergia/energia-eletrica/main.asp?View={05778C21-A140-415D-A91F-1757B393FF92}>. Acesso 15 de outubro de 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balço energético nacional 2016**. Relatório Síntese - anos base 2015. Disponível em: [ben.epe.gov.br/downloads/Síntese do Relatório Final_2016_Web.pdf](http://ben.epe.gov.br/downloads/Síntese%20do%20Relatório%20Final_2016_Web.pdf). Acesso 01 de novembro de 2016.

GLOBAL ENERGY STATISCAL YEARBOOK 2016. **Electricity domestic consumption**. Ano de 2015. Disponível em: <https://yearbook.enerdata.net/electricity-domestic-consumption-data-by-region.html>. Acesso 24 de outubro de 2016.

GLOVER, F. W. & LAGUNA, M. **Tabu Search**. Norwich, USA: Kluwer Academic Publishers, 1997.

GLOVER, F. & MCMILLAN, C. **The General Employee Scheduling Problem: An integration of management Science and artificial intelligence.** Computers and Operations Research, Vol.13, nº15, pp. 563-593.

GÓMEZ, J. F., KHODR, H.M., OLIVEIRA, P. M., OCQUE, L, YUSTA, J. M., VILLASANA, R.; URDANETA, A. J. **Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits.** IEEE *Transactions on Power Systems*, 996-1004, maio 2004.

GRIGSBY, L. L. **Electric Power Engineering Handbook.** Ed. CRC/IEEE Press, 2001.

GUIMARÃES, M. A. do N. **Reconfiguração de sistema de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos de Busca Tabu.** Campinas, SP. 2005. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000381854>. Acesso em 10 de maio de 2017.

HADANO, F. S., **Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica por meio de uma metaheurística GRASP.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

HERTZ, A. & de WERRA, D. forthcoming **The Tabu Search Metaheuristic: How we used it.** Annals of Mathematics and Artificial Intelligence.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Área territorial brasileira.** Ano de 2016. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm. Acesso 18 de outubro de 2016.

INSTITUTO DE PESQUISA DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS – IPRI. **As 15 maiores economias do mundo (PIB e PIB PPC).** Ano base 2015. Disponível em: <http://www.funag.gov.br/ipri/index.php/servidores/47-estatisticas/94-as-15-maiores-economias-do-mundo-em-pib-e-pib-ppp>. Acesso em: 01 de novembro de 2016.

JAUMARD, B., HANSEN, P., and de POGGI A. M., Column generation methods for probabilistic logic, McGill University, novembro 1989.

KERSTING, W.H.; MENDICE, D. L.. **An Application of Ladder Network Theory to the Solution of Three-Phase Radial Load-flow Problems.** IEEE/pes 1976 Winter Meeting, New York, NY, January 1976.

KNOX, J. **The application of tabu search to the symmetric traveling salesman problem.** Dissertação de pós-doutorado, School of Business, University of Colorado, julho 1989.

KOUTSOUKIS, N. C.; GEORGILAKIS, P. S.; HATZIARGYRIOU, N. D. **A Tabu Search Method for Distribution Network Planning Considering Distributed Generation and Uncertainties.** IEEE *Transactions on Power Systems*, 2014.

LEÃO, R. **GTD - Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica.** 2009 37 f. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2009. 2015. 87 f. Tese (graduação em engenharia elétrica) - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

LOPES, H. S. RODRIGUES, L. C. de A. STEINER, M. T. A. **Meta-heurísticas em pesquisa operacional**. 472 p. Curitiba, PR: Omnipax, 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Resenha energética brasileira. Exercício de 2015**. Disponível em: goo.gl/UT8dJe. Acesso 01 de novembro de 2016.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

NAHMAN, J. M. PERIC, D. M. **Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique**. IEEE Transactions on Power Systems, May 2008.

OLIVEIRA, M. L. de. **Planejamento integrado da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica**. Campinas, SP, 2010. Disponível em: <http://www.biblioteca-digital.unicamp.br/document/?code=000769849>. Acesso em 20 de março de 2017.

OLIVEIRA, S. and STROUD, G. **A parallel version of tabu search and the path assignment problem**. *Heuristics for Combinatorial Optimization*, seção 4, pp 1-24. 1989.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Mapas do SIN**. Sistema de Transmissão Horizonte de 2015. Disponível em: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx. Acesso 26 de setembro de 2016.

PELLEGRINO, P. E. M. **Fluxo de Carga - Fundamentos**. 2006. Disponível em: <http://centralmat.com.br/Artigos/Mais/loadFlow.html>. Acesso em 10 de novembro de 2016.

POPOVIC´, Z.N. ; KERLETA, V. Dj.; POPOVIC´, D.S. **Hybrid simulated annealing and mixed integer linear programming algorithm for optimal planning of radial distribution networks with distributed generation**. *Electric Power Systems Research*, 108: 211-222, dezembro 2013.

POZO, A. **Busca Tabu – Metaheurística**. Notas de aula. Computação Bioinspirada. Universidade Federal do Paraná, 2017.

SANT'ANNA, B. V. dos S. **Planejamento da Expansão dos Sistemas de Distribuição - Metodologia para a Consideração de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. 2009. 85 f. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Agosto, 2009.

WENDELIN, C. **Graph partitioning with the aid of the tabu method**. Relatório de projeto, Institute für Hohere Studien, Vienna, Austria, junho 1988.

ANEXO A – Dados da rede de 23 barras

Dados dos trechos			
Nº trecho	Nº Barra	Nº Barra	Comprimento (km)
1	1	10	0,20209
2	2	8	0,07560
3	3	8	2,70790
4	3	9	1,82020
5	3	16	4,22370
6	4	5	0,94020
7	4	6	1,50170
8	4	8	2,30530
9	4	9	3,44791
10	5	14	1,01620
11	5	23	0,64091
12	6	7	0,81807
13	6	14	0,81772
14	6	16	1,17520
15	7	8	0,68661
16	8	9	2,05670
17	10	14	0,42971
18	10	19	0,59489
19	10	20	0,69728
20	11	13	0,50527
21	11	21	0,63941
22	11	22	0,69245
23	12	15	0,98085
24	12	23	0,67855
25	13	15	0,62291
26	14	17	0,44821
27	14	23	0,48604
28	15	18	0,57114
29	15	21	0,60687
30	16	20	0,50185
31	16	22	0,94829
32	17	18	0,44113
33	19	20	0,73027
34	19	21	0,55500
35	19	22	0,58266

Dados do condutor				
Tipo	Capacidade (A)	Resistência (Ω /km)	Reatância (Ω /km)	Custo (US\$)
1	230	0,6045	0,429	10000

Dados das cargas		
Barra	S_D (kVA)	S⁰ (kVA)
1	0	10000
2	0	-
3	640	-
4	320	-
5	320	-
6	320	-
7	320	-
8	320	-
9	320	-
10	320	-
11	320	-
12	320	-
13	320	-
14	320	-
15	320	-
16	320	-
17	320	-
18	320	-
19	320	-
20	320	-
21	320	-
22	320	-
23	320	-

ANEXO B – Tensões nas barras das redes ótimas encontradas em cada teste

Número da barra	Lista Tabu de tamanho 5		Lista Tabu de tamanho 6		Lista Tabu de tamanho 7	
	Tensão (pu)	Ângulo (rad)	Tensão (pu)	Ângulo (rad)	Tensão (pu)	Ângulo (rad)
1	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0
2	0.9966	-0.0023	0.9967	-0.0024	0.9967	-0.0024
3	0.9950	-0.0035	0.9951	-0.0035	0.9951	-0.0035
4	0.9978	-0.0015	0.9979	-0.0015	0.9979	-0.0015
5	0.9980	-0.0013	0.9981	-0.0014	0.9981	-0.0014
6	0.9977	-0.0015	0.9978	-0.0016	0.9978	-0.0016
7	0.9971	-0.0020	0.9971	-0.0020	0.9971	-0.0020
8	0.9966	-0.0023	0.9967	-0.0024	0.9967	-0.0024
9	0.9956	-0.0031	0.9957	-0.0031	0.9957	-0.0031
10	0.9993	-0.0004	0.9994	-0.0004	0.9994	-0.0004
11	0.9976	-0.0016	0.9981	-0.0013	0.9981	-0.0013
12	0.9981	-0.0013	0.9982	-0.0013	0.9982	-0.0013
13	0.9977	-0.0016	0.9981	-0.0014	0.9981	-0.0014
14	0.9985	-0.0010	0.9986	-0.0010	0.9986	-0.0010
15	0.9979	-0.0014	0.9981	-0.0014	0.9981	-0.0014
16	0.9990	-0.0006	0.9991	-0.0007	0.9991	-0.0007
17	0.9976	-0.0016	0.9978	-0.0016	0.9978	-0.0016
18	0.9977	-0.0016	0.9979	-0.0015	0.9979	-0.0015
19	0.9987	-0.0008	0.9989	-0.0008	0.9989	-0.0008
20	0.9991	-0.0006	0.9991	-0.0006	0.9991	-0.0006
21	0.9984	-0.0011	0.9984	-0.0012	0.9984	-0.0012
22	0.9986	-0.0009	0.9988	-0.0009	0.9988	-0.0009
23	0.9982	-0.0012	0.9983	-0.0012	0.9983	-0.0012