

**EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO BUSCA TABU**

**A. Bazan, J. R. S. Mantovani e R. A. Romero – DEE/FEIS/UNESP**

*E-mail : [fernando@dee.feis.unesp.br](mailto:fernando@dee.feis.unesp.br), [mant@dee.feis.unesp.br](mailto:mant@dee.feis.unesp.br), [ruben@dee.feis.unesp.br](mailto:ruben@dee.feis.unesp.br).*

**Palavras-chave** - Redes de distribuição, otimização de perdas, técnicas de busca ótima, otimização combinatória.

**Resumo** - O planejamento da expansão de sistemas de Distribuição de Energia Elétrica tem-se revelado um problema de grande importância para as empresas distribuidoras de energia elétrica. O problema do planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) consiste em minimizar o custo total da expansão do sistema, que compreende a construção de linhas, subestações e a mudança da bitola de alimentadores existentes (recondutoramento).

Os principais aspectos técnicos e econômicos envolvidos no planejamento da expansão de SDEE são: economia, confiabilidade, segurança e qualidade de serviço.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para solução do problema de expansão de redes de distribuição, usando um modelo de otimização não linear que considera uma função objetivo que minimiza os custos de expansão e todas as restrições necessárias para representar realisticamente o sistema. A técnica de solução proposta para este problema é um algoritmo de Busca Tabu (BT).

## **1. INTRODUÇÃO**

O planejamento da expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (PDEE) é um problema relevante e de grande importância para as empresas distribuidoras de Energia Elétrica tanto nos aspectos técnicos como econômico. Sob o aspecto da pesquisa operacional, trata-se de um problema de programação matemática de grande porte envolvendo variáveis reais e inteiras, que permite o estudo e a proposição de diversas técnicas de otimização para sua solução. Para solução do problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica são propostas na literatura técnicas heurísticas e técnicas de otimização clássica e combinatória.

Thompson e Wall [13], formulam o planejamento da distribuição como um modelo de transportes e utilizam a técnica de branch-and-bound para resolver o problema de alocação ótima de subestações. Os custos fixos decorrentes da alocação de novas subestações são considerados e utilizam uma função linearizada por partes dos custos dos alimentadores. Uma proposta heurística construtiva interessante é sugerida por Goswami [5]. Nessa proposta, inicialmente são geradas topologias radiais usando todas as subestações candidatas. Posteriormente, essa topologia encontrada é otimizada usando a técnica de troca de ramos, entre ramos de uma

mesma zona e entre ramos que ligam duas subestações. Esse processo de troca de ramos é realizado até encontrar um ótimo local. Na linha de pesquisa envolvendo os métodos de otimização combinatória para solução do problema de planejamento da distribuição, o algoritmo genético (AG), foi proposto por Ramirez-Rosado e Bernal-Agustín [11] e Proença [10]. O algoritmo genético visa resolver em cada estágio o problema de planejamento considerando um horizonte pré-estabelecido e permite incorporar na modelagem do problema diferentes tipos de sofisticações, sempre com o aumento do custo computacional.

Os requisitos básicos necessários para um sistema de distribuição são: segurança, economia e qualidade de serviço. Neste trabalho, com bases nestes requisitos, apresenta-se uma formulação matemática genérica do problema de expansão de Redes de Distribuição de Energia Elétrica [7], que é um modelo de programação não linear com variáveis reais e binárias. A técnica de solução proposta para este modelo é um algoritmo de Busca Tabu (BT) [3]; que é uma técnica de otimização combinatória, que tem suas origens nos conceitos de inteligência artificial (IA), e tem sido aplicada em diversas áreas de engenharia. Aplicando-se a técnica BT a este problema, procuram-se a(s) melhor(es) configuração(ões) de um conjunto de propostas de solução para cumprir os objetivos fundamentais do problema. Apresentam-se resultados obtidos com as simulações utilizando dois Sistemas de Distribuição, um com 10 barras e 1 subestação existente e outra projetada; e um sistema com 54 barras e 2 subestações existentes e 2 potenciais. Consideram-se três horizontes de planejamento para ambos sistemas.

## **2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA**

O problema básico de planejamento da expansão de sistemas de distribuição elétrica é a minimização do custo totais da expansão do sistema, basicamente a construção de linhas, subestações e a mudança da bitola de alimentadores existentes (recondutoramento).

Os principais aspectos técnico-econômicos envolvidos no planejamento da expansão de SDEE são os seguintes:

- Economia : Minimizar os Custos de Investimentos e Custos de Operação
- Confiabilidade : Maximizar a flexibilidade do sistema, para garantir sua confiabilidade.
- Segurança

- Qualidade de serviço :Este aspecto está relacionado com a confiabilidade do sistema.

Também pode-se mencionar outros fatores importantes de qualidade como:

- Impacto ambiental;
- Desvios de frequência;
- Assimetria do sistema trifásico;
- Presença de harmônicos e outros tipos de problemas para a rede.

O planejamento de sistemas de distribuição pode ser genericamente estabelecido da seguinte forma :

Suponha que exista uma rede de distribuição de energia elétrica atendendo um número fixo de consumidores (nós de consumo) e uma subestação fornecendo a energia requerida para satisfazer a demanda desses consumidores. A carga desse sistema não é estática e aumentará com o tempo. O crescimento da carga impõe a necessidade da expansão da rede: construção de novos alimentadores, subestações e troca de bitola de alimentadores existentes. O custo relacionado com estes investimentos e o custo de operação da rede satisfazendo as restrições do problema constituem o problema de planejamento.

O planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica pode ser formulado genericamente como:

**Minimizar** [Custos de investimentos (construção de novas subestações e alimentadores, recondutoramento, etc) + Custos de Operação (fluxo nas linhas)]

Sujeito a:

- Atendimento da Demanda (Leis de Kirchhoff).
- Qualidade do Serviço Oferecido (Queda de tensão máxima permitida nos alimentadores, presença de harmônicos, desvios de frequência, assimetria do sistema trifásico, e outros tipos de problemas na rede).
- Restrições Físicas de Operação dos Equipamentos Instalados e a Instalar no Sistema (Capacidade das subestações, Máxima fluxo de potência permitido nos alimentadores).
- Restrições Lógicas (Manter radialidade do sistema).
- Impacto ambiental.

### 3. TÉCNICAS DE SOLUÇÃO

A pesquisa desenvolvida e apresentada neste trabalho enfoca a solução do problema da expansão, utilizando-se um algoritmo de busca tabu que pertence à categoria dos algoritmos de otimização combinatória. O algoritmo BT é um algoritmo de busca estatística, para solução de problemas gerais de otimização, adequados para solução de problemas combinatórios. Trata-se basicamente de um processo metaheurístico de busca local, que utiliza algumas estratégias adequadas para a busca de soluções ótimas de problemas de otimização bem e mal

condicionados. Foi desenvolvido por Fred Glover [4] nos anos 80, que tem suas bases em conhecimentos de inteligência artificial.

O algoritmo Busca Tabu Básico (BTB) parte de uma solução inicial e com uma vizinhança claramente especificada. Assim, conhecida uma solução inicial e o conjunto de vizinhos dessa solução, o algoritmo BTB identifica a solução vizinha de melhor qualidade e o processo passa para essa nova solução. Entretanto, para evitar voltar a uma solução já analisada o algoritmo BTB armazena em uma lista o atributo que foi usado no processo de transição. Um atributo proibido evita que se volte a uma solução já analisada, mas também não permite que se visite outras soluções que compartilham atributos proibidos de soluções já visitadas. Este problema é contornado usando um critério de aspiração que elimina a proibição sempre que uma solução candidata, que pode ser obtida acionando um atributo proibido, seja de boa qualidade. A proibição de um atributo é eliminada após um número especificado de transições que geralmente é pequeno, isto é, a estratégia usa informação de memória de curto prazo. No problema analisado são atributos os alimentadores e as subestações. O processo BTB termina após um número especificado de transições. Na Fig. 1 encontra-se o diagrama de blocos do algoritmo BTB implementado neste trabalho para o planejamento da expansão de sistemas de distribuição :

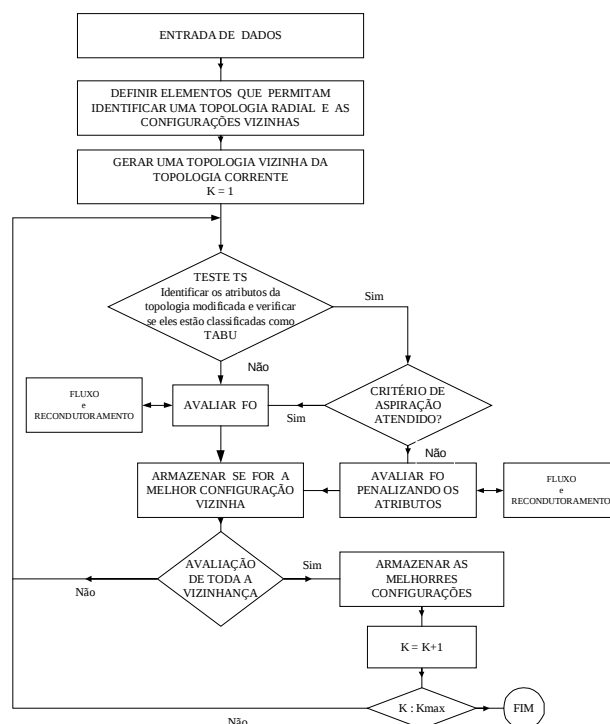


FIG.1 DIAGRAMA DE BLOCOS DO ALGORITMO BUSCA TABU PARA O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO

#### 3.1. Função objetivo

O custo é uma das partes mais importantes no PDEE, assim procura-se o mínimo custo na construção de subestações e alimentadores do sistema de distribuição,

considerando-se custos de investimento na construção de novos alimentadores e subestações (custos fixos) e custos de operação da rede (custos variáveis). O custo total é fornecido por cada configuração corrente no modelo de Busca Tabu. A função objetivo, como já foi definida procura avaliar uma proposta de solução factível no planejamento da expansão da distribuição, em que os termos da função objetivo a serem considerados são: perdas elétricas, confiabilidade, custos de operação e expansão. Dessa forma a função objetivo no algoritmo implementado é calculada como:

$$FO = \sum \{ \sum \text{Custos fixos} + \sum \text{Custos variáveis} \}$$

A função objetivo avalia, para cada configuração radial, o custo total de investimento e de operação do sistema analisado. Os custos fixos são dados pelos custos de construção das linhas e subestações, e pela possível troca de bitola de um alimentador; e os custos variáveis pelos custos de operação das linhas multiplicados pelos valores de seus fluxos de potência.

A confiabilidade da rede está representada na continuidade do serviço de fornecimento de energia, ou seja, que cada ponto de consumo não fique sem suprimento de energia e esteja conectado a alguma fonte de suprimento. Este aspecto está garantido através do algoritmo que garante a radialidade da rede e o não ilhamento das barras com carga.

### 3.2. Fluxo de carga

O método de cálculo de fluxo de carga em redes de distribuição radiais, baseado num equivalente elétrico e na eliminação do ângulo de fase da tensão nas equações a serem resolvidas, foi implementado neste trabalho [1]. Trata-se de um método eficiente e simples para a solução exata do fluxo de carga em redes radiais de média tensão. Este método, conhecido como soma de potências permite a determinação da magnitude de tensão em qualquer nó da rede, sendo possível calcular a magnitude das tensões remanescentes no alimentador, especificado um nó. Aplica-se tanto a sistemas monofásicos como trifásicos. Juntamente com este método de cálculo de fluxo de carga utilizou-se um algoritmo de ordenação e numeração dos nós do sistema de distribuição.

O algoritmo de fluxo de carga implementado consiste basicamente dos seguintes passos:

- Leitura dos dados do sistema: nó inicial, nó final, resistência, reatância, potência ativa, e potência reativa. Tensão no nó fonte (source voltage).
- Assumir a magnitude da tensão para cada nó (para a primeira iteração assumir para todas as barras, tensão igual à barra fonte).
- Passo Upstream*; Desde o nó final até o nó fonte, encontre valores aproximados das potências verdadeiras para cada barra, nestas potências estão incluídas as potências de cada

barra que estão a jusante da barra analisada assim como as perdas totais acumuladas até essa barra, e também a potência da barra.

- Passo Downstream*; Desde o nó fonte até os nós finais, usando a equação fundamental [1], calcular valores aproximados das tensões de cada barra.
- Com as novas tensões, calcular novamente as perdas e com elas as novas potências de cada barra. Comparar as novas perdas totais com as perdas da iteração anterior. Se o valor da diferença entre elas for maior do que a tolerância para convergência, volte ao passo iii.

### 3.3. Codificação

A codificação usada para o problema foi um arranjo vetorial que indica quais os alimentadores estão operando (1) ou não (0) assim como as correspondentes subestações. Adotou-se um vetor adicional que indica o número da bitola do condutor que está operando no sistema. Neste sistema de codificação, adota-se uma notação matricial que permite identificar as ligações das linhas às subestações e permite analisar a radialidade do sistema. Esta forma de codificação está ilustrada na Fig. 2

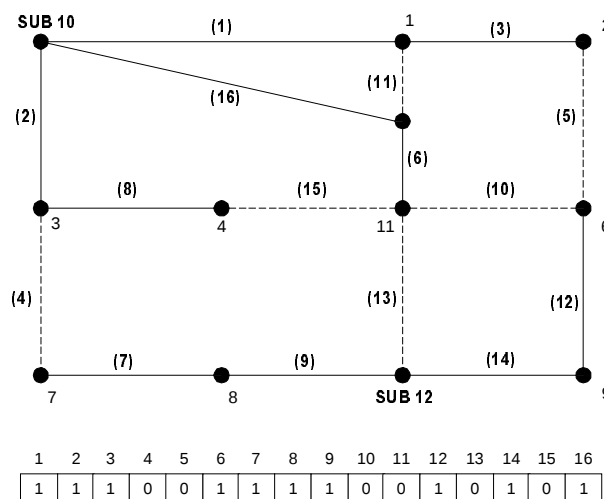


FIG 2. ILUSTRAÇÃO DO ESQUEMA DE CODIFICAÇÃO.

### 3.4. Configuração radial inicial

Foi verificado experimentalmente que os algoritmos combinatoriais apresentam melhor desempenho quando os processos de otimização são iniciados com boas configurações iniciais em lugar de configurações obtidas aleatoriamente [8]. Esta característica é muito mais importante no caso do algoritmos BT, devido ao grande esforço computacional solicitado por este algoritmo, e que quando se utiliza uma boa técnica heurística para gerar a configuração básica e inicial, encontram-se soluções de boa qualidade com maior frequência. A heurística, usada neste trabalho, consiste em estabelecer ligações de linhas dos sistemas às subestações já construídas até chegar à capacidade máxima das mesmas. A subestação não podendo fornecer mais energia, o algoritmo de configuração inicial adicionará outra

subestação ao sistema com vistas a satisfazer a demandas dos demais nós que ainda não estão ligadas ao sistema. As primeiras subestações a avaliar-se são aquelas que já estão construídas no sistema, devido a que têm um custo zero. A heurística continuará alocando as subestações de menor custo para garantir que todos os nós com carga sejam atendidos. A heurística não adiciona no sistema nós sem carga a não ser que o respectivo nó seja utilizado só como transporte, ou para conectar algum outro nó que tem carga.

Com a configuração inicial radial, é avaliada a capacidade de transporte de fluxo das linhas e se alguma delas não cumpre com as restrições, a bitola do alimentador é trocada por um de capacidade maior.

### 3.5. Estrutura de vizinhança

Com a solução inicial radial, encontram-se os vizinhos desta solução. A estrutura de vizinhança é determinada através de uma técnica heurística conhecida como “branch exchange technique”, [5], sendo executada da seguinte forma :

- i. Seja uma topologia radial qualquer da rede de distribuição e inclua um dos alimentadores que não está ligado na configuração inicial. Devido a inclusão deste alimentador, a configuração resultante pode ser radial ou perder a radialidade, tornando-se infactível.
- ii. Se a nova configuração for infactível, deve-se desligar um outro alimentador que faça a configuração vizinha factível ou seja radial.
- iii. Neste critério, tem-se dois tipos de troca de linhas:

Intrazona : quando a troca de linhas é dentro de uma área servida por uma subestação de distribuição;

Interzona : quando a troca de linhas é realizado entre áreas servidas por subestações adjacentes.

Em outra família de vizinhança, dentro da vizinhança de troca de linhas, trocam-se a bitola de linhas que não cumprem com os requisitos de capacidade de fluxo de potência do alimentador. Este conceito é conhecido como reconductoramento do sistema de energia Elétrica. Assim, inicia-se o processo com o sistema básico que já está construído e adiciona-se linhas para unir aqueles nós com carga ao sistema; As linhas que são adicionadas são as de menor capacidade, e como é lógico pensar, as mais atrativas sob o aspecto econômico. O fluxo de potência que passa pela linha, em seguida será avaliado se a linha cumpre com os requisitos de capacidade. No caso de não atender adota-se uma bitola imediatamente superior conseqüentemente de mais alto custo, calculando-se novamente todo o fluxo de potência para a nova proposta de expansão do sistema.

### 3.6. Infactibilidades

Dentro dos problemas de infactibilidade que se pode encontrar são as configurações não radiais, mas com o critério de vizinhança é uma estratégia adequada, o

problema de que o sistema proposto não seja radial não ocorre, já que, se em algum momento encontra-se alguma configuração não radial, o critério de vizinhança do algoritmo BT buscará retirar algum circuito, convertendo o sistema novamente em um sistema radial.

Também dentro das infactibilidades do sistema encontram-se as violações de limites de capacidade de linhas e níveis de tensão nos nós mais afastados das subestações. Quando qualquer magnitude de tensão é violada no sistema proposto ele será penalizado com um valor de custo muito alto, assim esses sistemas dificilmente ou nunca serão adotados como próxima configurações.

As infactibilidades com relação às violações dos limites de capacidade das linhas, pode ser solucionadas adotando-se para o mesmo caminho da linha, um outro alimentador com capacidade maior, mas isto envolverá um maior custo da função objetivo. Mas como os parâmetros da nova linha mudaram, deve-se avaliar um novo fluxo de potência para o sistema.

### 3.7. Avaliação das configurações vizinhas

Uma vez determinada uma configuração vizinha factível, deve-se encontrar o valor da função objetivo (custo fixo, custo de operação, e perdas) da respectiva configuração para depois de avaliar todos os vizinhos propostos implementar a transição passando para a melhor configuração.

O vizinho factível referido, corresponde à configuração que é totalmente radial, não possui laços dentro do sistema que está vinculado a uma subestação, e tampouco laços entre sistemas que unem duas ou mais subestações.

Para cada novo vizinho, avaliam-se as linhas que são construídas neste estágio, assim os custos fixos das respectivas linhas é adicionado, o custo de cada nova subestação também é adicionado à função objetivo. Como cada novo vizinho implica calcular o respectivo fluxo de potência, com os valores fornecidos são calculados os custos de operação do sistema e também as restrições de capacidade das linhas. As tensões de cada nó são avaliadas e a configuração penalizada em caso não cumpra a restrição de mínima tensão. Também é considerado dentro da avaliação, a capacidade que cada subestação tem de fornecer energia para o sistema, e se as respectivas subestações cumprem com esses limites de capacidade, e caso não cumprem, são penalizadas com um alto custo.

### 3.8. Lista tabu

A Lista Tabu é implementada com o objetivo de prevenir ciclos e evitar visitar configurações já visitadas. Assim, quando uma configuração é construída, os atributos usados para encontrar essa topologia são colocadas na lista tabu. Portanto, o movimento reverso desses atributos permanece proibido durante um número especificado de iterações. Esta lista é armazenada na parte superior de uma matriz quadrada de extensão igual ao número de

linhas do sistema, e são armazenados os atributos de cada transição.

O critério de aspiração usado é o tradicional, ou seja, quando a função objetivo de uma configuração cujo atributo encontra-se na lista tabu é de boa qualidade ela é avaliada e seu valor é penalizado. Se ela mesmo com a penalização manter-se de boa qualidade passa a ser a nova solução corrente.

### 3.9. Critério de parada

O critério de parada determina que, se a solução incumbente não apresenta melhoria durante um número especificado de iterações, deve-se interromper o processo iterativo.

## 4. TESTES E RESULTADOS

O algoritmo para a solução do problema de planejamento da expansão, proposto neste trabalho, foi implementado em linguagem de programação FORTRAN e foram realizados testes com o programa desenvolvido utilizando-se dois sistemas.

As características elétricas, e custos dos alimentadores possíveis de serem alocados durante a etapa de planejamento são dados na tabela I.

TABELA I  
CARACTERÍSTICAS ALIMENTADORES USADOS NOS TESTES

| Cabo  | tipo | MVAmax | R(pu/km) | X(pu/Km) | CF(\$/KM) | CV(\$/KM/MVA) |
|-------|------|--------|----------|----------|-----------|---------------|
| 1/0   | 1    | 9,00   | 0,3655   | 0,2520   | 20,00     | 1,00          |
| 2/0   | 2    | 11,00  | 0,2921   | 0,2466   | 30,00     | 2,00          |
| 3/0   | 3    | 12,50  | 0,2359   | 0,2402   | 40,00     | 4,00          |
| 4/0   | 4    | 14,00  | 0,1932   | 0,2279   | 50,00     | 5,00          |
| 2x1/0 | 5    | 19,00  | 0,1827   | 0,1260   | 60,00     | 6,00          |
| 2x2/0 | 6    | 22,40  | 0,1460   | 0,1233   | 70,00     | 7,00          |
| 2x3/0 | 7    | 25,00  | 0,1180   | 0,1201   | 80,00     | 8,00          |
| 2x4/0 | 8    | 28,00  | 0,0966   | 0,1140   | 90,00     | 9,00          |

### 4.1. Sistema I

Características do sistema

Alimentadores existentes: 3

Alimentadores potenciais: 13

Subestações existentes: 1

Subestações potenciais: 1

Nós de consumo: 3

Os dados de linhas da rede básica para este sistema estão apresentados na tabela II

TABELA II  
DADOS DE LINHAS DO SISTEMA I-CASO BASE

| Linha | NOF | NOI | Liga | Dist(Km) | Cabo |
|-------|-----|-----|------|----------|------|
| 1     | 1   | 10  | 1    | 0,200    | 1    |
| 2     | 3   | 10  | 1    | 0,200    | 1    |
| 3     | 2   | 1   | 1    | 0,100    | 1    |
| 4     | 7   | 3   | 0    | 0,100    | 1    |
| 5     | 6   | 2   | 0    | 0,200    | 1    |
| 6     | 5   | 11  | 0    | 0,100    | 1    |
| 7     | 7   | 8   | 0    | 0,100    | 1    |
| 8     | 3   | 4   | 0    | 0,100    | 1    |
| 9     | 8   | 12  | 0    | 0,100    | 1    |
| 10    | 11  | 6   | 0    | 0,100    | 1    |
| 11    | 1   | 5   | 0    | 0,100    | 1    |
| 12    | 6   | 9   | 0    | 0,100    | 1    |
| 13    | 12  | 11  | 0    | 0,100    | 1    |
| 14    | 9   | 12  | 0    | 0,100    | 1    |
| 15    | 4   | 11  | 0    | 0,100    | 1    |
| 16    | 10  | 5   | 0    | 0,230    | 1    |

TABELA III  
CARGAS CONECTADAS ÀS BARRAS

| Nó | MVA       |            |             |
|----|-----------|------------|-------------|
|    | Estágio I | Estágio II | Estágio III |
| 1  | 5         | 6          | 7           |
| 2  | 5         | 5,7        | 6,3         |
| 3  | 2         | 2,2        | 2,6         |
| 4  | 5         | 6          | 6,6         |
| 5  | 4         | 4,4        | 5,1         |
| 6  | 5         | 6,5        | 7,1         |
| 7  | 6,7       | 7,7        | 9,2         |
| 8  | 5         | 6          | 7           |
| 9  | 5         | 5,7        | 7           |
| 11 | 5         | 5          | 5           |

TABELA IV  
DADOS DAS SUBESTAÇÕES DO SISTEMA I

| Sub    | MVA | Custo |
|--------|-----|-------|
| sub 10 | 30  | 0     |
| sub 12 | 35  | 1500  |

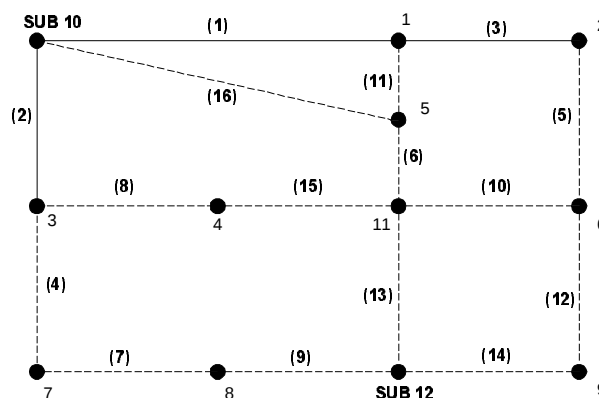


FIG 3. SISTEMA INICIAL EXISTENTE

#### 4.1.1. Resultados do primeiro estágio

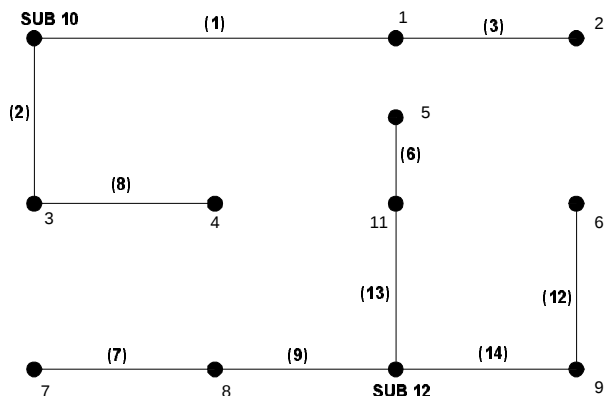


FIG. 4 PROPOSTA DE PLANEJAMENTO DO PRIMEIRO ESTÁGIO

Custo total do primeiro estágio : 1540,4980

TABELA V  
RESULTADOS DO PRIMEIRO ESTÁGIO DO SISTEMA I

| Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo |
|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|
| 1     | 1       | 2    | 5     | 0       | —    | 9     | 1       | 3    | 13    | 1       | 2    |
| 2     | 1       | 1    | 6     | 1       | 1    | 10    | 0       | —    | 14    | 1       | 2    |
| 3     | 1       | 1    | 7     | 1       | 1    | 11    | 0       | —    | 15    | 0       | —    |
| 4     | 0       | —    | 8     | 1       | 1    | 12    | 1       | 1    | 16    | 0       | —    |

Potência subestação 10 : 17,0983 MVA

Potência subestação 12 : 30,7174 MVA

#### Comentários sobre o primeiro estágio

Há uma solicitação maior da nova subestação; na solução final as linhas com menor distância são alocadas. A linha 5, torna o sistema muito caro e a queda de tensão no final da linha será alto em comparação a os demais nós.

As linha que mudaram de bitola foram 1,9,13 e 14, elas poderão transmitir um fluxo maior de corrente e evitará queda de tensão elevada.

#### 4.1.2. Resultados do segundo estágio

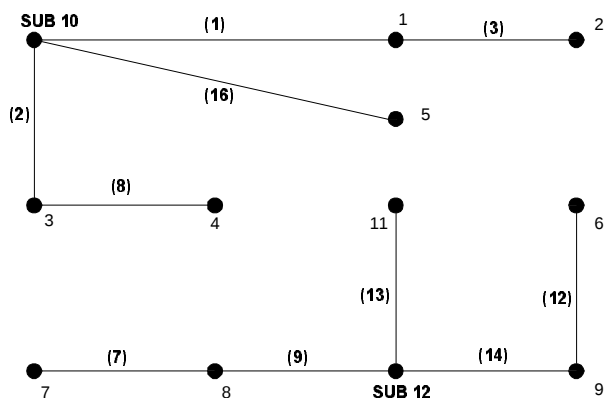


FIG.5 SISTEMA RESULTANTE DO SEGUNDO ESTÁGIO

Custo total do segundo estágio: 49,1035

TABELA VI  
RESULTADOS DO SEGUNDO ESTÁGIO DO SISTEMA I

| Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo |
|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|
| 1     | 1       | 3    | 5     | 0       | —    | 9     | 1       | 4    | 13    | 1       | 2    |
| 2     | 1       | 1    | 6     | 0       | —    | 10    | 0       | —    | 14    | 1       | 3    |
| 3     | 1       | 1    | 7     | 1       | 1    | 11    | 0       | —    | 15    | 0       | —    |
| 4     | 0       | —    | 8     | 1       | 1    | 12    | 1       | 1    | 16    | 1       | 1    |

Potência subestação 10 : 24,4804 MVA

Potência subestação 12 : 30,9748 MVA

#### Comentários sobre o segundo estágio

O algoritmo Busca Tabu tentará adicionar nós no sub-sistema que está fornecendo menos potência. Assim pode-se observar que é adicionado o nó 5 no sistema fornecido pela subestação sub 10 e é retirado da subestação sub 12.

A linha 1, 9 e 14 aumentaram para uma bitola maior. Foi adicionada a linha 16 e retirada do sistema a linha 6.

#### 4.1.3. Resultados do terceiro estágio

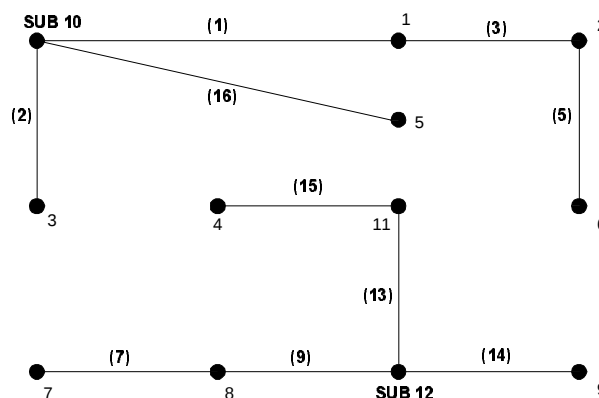


FIG. 6 SISTEMA RESULTANTE DO TERCEIRO ESTÁGIO

Custo total do terceiro estágio : 96,3485

TABELA VII  
RESULTADOS DO TERCEIRO ESTÁGIO DO SISTEMA I

| Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo |
|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|
| 1     | 1       | 6    | 5     | 1       | 1    | 9     | 1       | 5    | 13    | 1       | 3    |
| 2     | 1       | 5    | 6     | 0       | —    | 10    | 0       | —    | 14    | 1       | 3    |
| 3     | 1       | 4    | 7     | 1       | 2    | 11    | 0       | —    | 15    | 1       | 1    |
| 4     | 0       | —    | 8     | 0       | —    | 12    | 0       | —    | 16    | 1       | 1    |

Potência subestação 10 : 28,2899 MVA

Potência subestação 12 : 34,6584 MVA

#### Comentários sobre o terceiro estágio

Neste estágio final é adicionado á subestação sub12, o nó 4 e liberado o nó 6, assim as subestações trabalharão em seus limites máximos.

Os alimentadores das linhas 1, 2 e 3 foram trocados para uma bitola muito maior, devido ao fluxo de potência

nestas linhas. As linhas 8 e 12 foram retiradas e foram adicionada as linhas 5 e 15.

#### 4.2. Sistema II [10]

Características do sistema

Alimentadores existentes : 16

Alimentadores potenciais : 45

Subestações existentes : 2

Subestações potenciais : 2

Nós de consumo : 54

##### 4.2.1. Dados das linhas do sistema II

TABELA VIII  
DADOS DE LINHAS DO SISTEMA II

| Linha | NOF | NOI | Liga | Dist(Km) | cabo | Linha | NOF | NOI | Liga | Dist(Km) | cabo |
|-------|-----|-----|------|----------|------|-------|-----|-----|------|----------|------|
| 4     | 101 | 1   | 1    | 0,281    | 2    | 35    | 6   | 28  | 0    | 0,5      | 1    |
| 5     | 101 | 3   | 1    | 0,218    | 2    | 36    | 104 | 30  | 0    | 0,281    | 1    |
| 6     | 3   | 4   | 1    | 0,312    | 1    | 37    | 30  | 29  | 0    | 0,312    | 1    |
| 7     | 4   | 7   | 1    | 0,25     | 1    | 38    | 30  | 43  | 0    | 0,406    | 1    |
| 8     | 4   | 5   | 1    | 0,312    | 1    | 39    | 43  | 37  | 0    | 0,25     | 1    |
| 9     | 7   | 8   | 1    | 0,312    | 1    | 40    | 37  | 31  | 0    | 0,187    | 1    |
| 10    | 5   | 6   | 1    | 0,25     | 1    | 41    | 31  | 10  | 0    | 0,312    | 1    |
| 11    | 1   | 9   | 1    | 0,343    | 1    | 42    | 13  | 43  | 0    | 0,375    | 1    |
| 12    | 1   | 2   | 1    | 0,312    | 1    | 43    | 12  | 45  | 0    | 0,25     | 1    |
| 13    | 9   | 10  | 1    | 0,718    | 1    | 44    | 45  | 44  | 0    | 0,218    | 1    |
| 14    | 102 | 14  | 1    | 0,375    | 1    | 45    | 44  | 38  | 0    | 0,312    | 1    |
| 15    | 14  | 15  | 1    | 0,375    | 1    | 46    | 38  | 39  | 0    | 0,343    | 1    |
| 16    | 15  | 16  | 1    | 0,281    | 1    | 47    | 39  | 32  | 0    | 0,406    | 1    |
| 17    | 102 | 11  | 1    | 0,281    | 1    | 48    | 39  | 33  | 0    | 0,281    | 1    |
| 18    | 11  | 12  | 1    | 0,312    | 1    | 49    | 33  | 8   | 0    | 0,468    | 1    |
| 19    | 12  | 13  | 1    | 0,437    | 1    | 50    | 33  | 34  | 0    | 0,187    | 1    |
| 20    | 19  | 20  | 0    | 0,312    | 1    | 51    | 34  | 35  | 0    | 0,218    | 1    |
| 21    | 18  | 19  | 0    | 0,25     | 1    | 52    | 35  | 36  | 0    | 0,218    | 1    |
| 22    | 17  | 18  | 0    | 0,406    | 1    | 53    | 103 | 36  | 0    | 0,25     | 1    |
| 23    | 9   | 17  | 0    | 0,43     | 1    | 54    | 103 | 28  | 0    | 0,312    | 1    |
| 24    | 18  | 21  | 0    | 0,312    | 1    | 55    | 103 | 41  | 0    | 0,312    | 1    |
| 25    | 104 | 21  | 0    | 0,25     | 1    | 56    | 41  | 40  | 0    | 0,375    | 1    |
| 26    | 104 | 22  | 0    | 0,375    | 1    | 57    | 40  | 16  | 0    | 0,25     | 1    |
| 27    | 9   | 22  | 0    | 0,468    | 1    | 58    | 41  | 42  | 0    | 0,375    | 1    |
| 28    | 22  | 23  | 0    | 0,343    | 1    | 59    | 42  | 48  | 0    | 0,25     | 1    |
| 29    | 23  | 24  | 0    | 0,281    | 1    | 60    | 48  | 49  | 0    | 0,375    | 1    |
| 30    | 24  | 25  | 0    | 0,218    | 1    | 61    | 49  | 50  | 0    | 0,218    | 1    |
| 31    | 25  | 8   | 0    | 0,281    | 1    | 62    | 42  | 47  | 0    | 0,312    | 1    |
| 32    | 8   | 27  | 0    | 0,375    | 1    | 63    | 47  | 46  | 0    | 0,312    | 1    |
| 33    | 27  | 26  | 0    | 0,343    | 1    | 64    | 46  | 14  | 0    | 0,343    | 1    |
| 34    | 27  | 28  | 0    | 0,312    | 1    |       |     |     |      |          |      |

TABELA IX  
DADOS DE NÓS DO SISTEMA II

| Nó | MVA       |            |             | Nó | MVA       |            |             |
|----|-----------|------------|-------------|----|-----------|------------|-------------|
|    | Estágio I | Estágio II | Estágio III |    | Estágio I | Estágio II | Estágio III |
| 1  | 3,31      | 3,81       | 5,00        | 26 | 0,00      | 0,80       | 2,00        |
| 2  | 1,10      | 1,30       | 2,00        | 27 | 0,00      | 1,20       | 2,70        |
| 3  | 0,40      | 0,50       | 1,50        | 28 | 0,40      | 0,50       | 1,80        |
| 4  | 1,40      | 1,91       | 3,50        | 29 | 0,60      | 0,90       | 2,30        |
| 5  | 2,00      | 2,30       | 3,50        | 30 | 2,00      | 2,30       | 3,70        |
| 6  | 0,60      | 0,70       | 1,90        | 31 | 0,60      | 0,70       | 0,70        |
| 7  | 0,20      | 0,50       | 0,80        | 32 | 0,00      | 1,50       | 1,20        |
| 8  | 1,50      | 1,70       | 1,50        | 33 | 1,80      | 2,30       | 2,00        |
| 9  | 1,91      | 2,00       | 3,20        | 34 | 0,90      | 1,00       | 0,80        |
| 10 | 2,00      | 2,41       | 2,00        | 35 | 0,00      | 0,00       | 0,00        |
| 11 | 0,20      | 0,30       | 1,00        | 36 | 0,20      | 0,20       | 0,30        |
| 12 | 1,00      | 1,60       | 2,80        | 37 | 1,00      | 1,60       | 1,60        |
| 13 | 0,90      | 1,00       | 2,50        | 38 | 0,00      | 0,00       | 0,00        |
| 14 | 0,80      | 0,90       | 2,00        | 39 | 0,80      | 0,90       | 0,70        |
| 15 | 1,00      | 1,20       | 1,00        | 40 | 1,00      | 1,20       | 1,00        |
| 16 | 1,30      | 1,50       | 1,20        | 41 | 0,30      | 0,50       | 1,80        |
| 17 | 0,50      | 0,60       | 2,00        | 42 | 0,00      | 0,00       | 0,80        |
| 18 | 0,90      | 1,00       | 2,50        | 43 | 0,00      | 0,00       | 1,50        |
| 19 | 1,00      | 1,20       | 2,80        | 44 | 0,50      | 1,00       | 0,80        |
| 20 | 0,50      | 0,70       | 2,30        | 45 | 0,50      | 0,50       | 0,50        |
| 21 | 0,50      | 1,60       | 3,20        | 46 | 0,00      | 1,60       | 1,60        |
| 22 | 0,50      | 1,00       | 1,00        | 47 | 0,50      | 0,50       | 0,60        |
| 23 | 0,50      | 0,90       | 1,00        | 48 | 0,50      | 0,60       | 2,00        |
| 24 | 0,50      | 0,40       | 0,40        | 49 | 0,00      | 0,60       | 2,00        |
| 25 | 0,60      | 0,80       | 0,80        | 50 | 0,00      | 0,00       | 1,00        |

TABELA X  
DADOS DAS SUBESTAÇÕES DO SISTEMA II

| Nome | node | MVA  | Custo |
|------|------|------|-------|
| S1   | 101  | 33,4 | 100   |
| S2   | 102  | 33   | 80    |
| S3   | 103  | 22   | 200   |
| S4   | 104  | 22   | 240   |

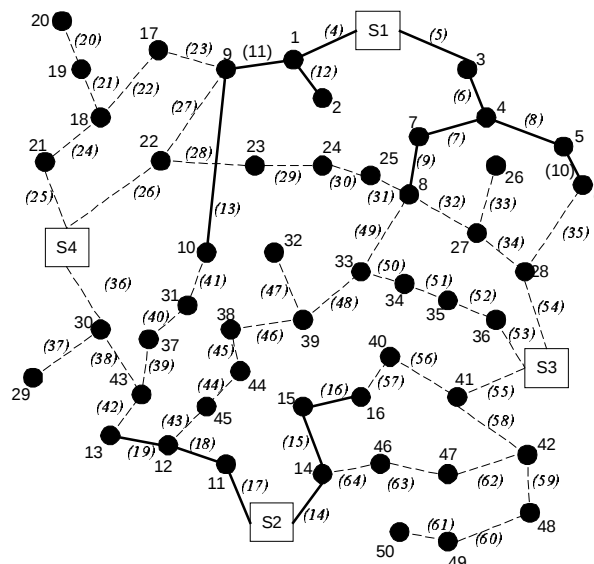


FIG. 7 SISTEMA INICIAL EXISTENTE E SUBESTAÇÕES E ALIMENTADORES POTENCIAIS.

#### 4.2.2. Resultados do primeiro estágio

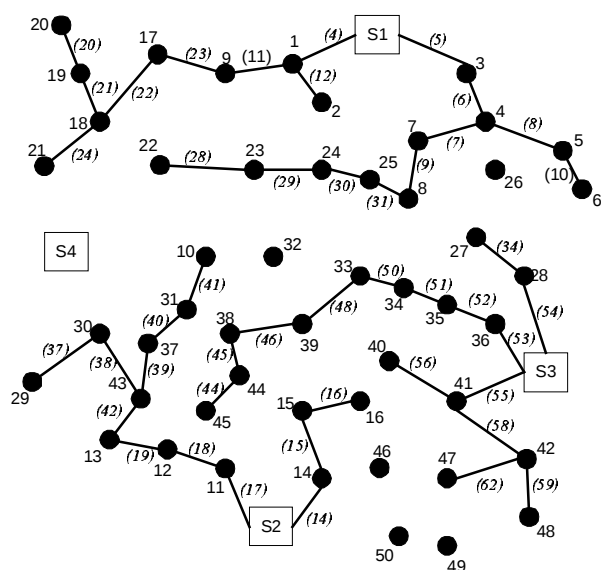


FIG. 8 SISTEMA RESULTANTE DO PRIMEIRO ESTÁGIO

Custo total primeiro estágio : 603,9703

TABELA XI  
RESULTADOS DO PRIMEIRO ESTÁGIO DO SISTEMA II

| Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo |
|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|
| 4     | 1       | 2    | 20    | 1       | 1    | 35    | 0       | --   | 50    | 1       | 1    |
| 5     | 1       | 2    | 21    | 1       | 1    | 36    | 0       | --   | 51    | 1       | 1    |
| 6     | 1       | 1    | 22    | 1       | 1    | 37    | 1       | 1    | 52    | 1       | 1    |
| 7     | 1       | 1    | 23    | 1       | 1    | 38    | 1       | 1    | 53    | 1       | 1    |
| 8     | 1       | 1    | 24    | 1       | 1    | 39    | 1       | 1    | 54    | 1       | 1    |
| 9     | 1       | 1    | 25    | 0       | --   | 40    | 1       | 1    | 55    | 1       | 1    |
| 10    | 1       | 1    | 26    | 0       | --   | 41    | 1       | 1    | 56    | 1       | 1    |
| 11    | 1       | 1    | 27    | 0       | --   | 42    | 1       | 1    | 57    | 0       | --   |
| 12    | 1       | 1    | 28    | 1       | 1    | 43    | 0       | --   | 58    | 1       | 1    |
| 13    | 0       | --   | 29    | 1       | 1    | 44    | 1       | 1    | 59    | 1       | 1    |
| 14    | 1       | 1    | 30    | 1       | 1    | 45    | 1       | 1    | 60    | 0       | --   |
| 15    | 1       | 1    | 31    | 1       | 1    | 46    | 1       | 1    | 61    | 0       | --   |
| 16    | 1       | 1    | 32    | 0       | --   | 47    | 0       | --   | 62    | 1       | 1    |
| 17    | 1       | 1    | 33    | 0       | --   | 48    | 1       | 1    | 63    | 0       | --   |
| 18    | 1       | 1    | 34    | 1       | 1    | 49    | 0       | --   | 64    | 0       | --   |
| 19    | 1       | 1    |       |         |      |       |         |      |       |         |      |

Potência subestação S1 : 18,2462 MVA

Potência subestação S2 : 11,7899 MVA

Potência subestação S3 : 7,4941 MVA

Potência subestação S4 : 0 MVA

#### Comentários sobre o primeiro estágio

Foram utilizadas as subestações já existentes. O algoritmo BT não indicou a construção de uma nova subestação, para evitar uma função objetivo de alto custo. Foi retirada do sistema a linha 13, devido à queda de tensão que ela ocasiona.

#### 4.2.3. Resultados do segundo estágio

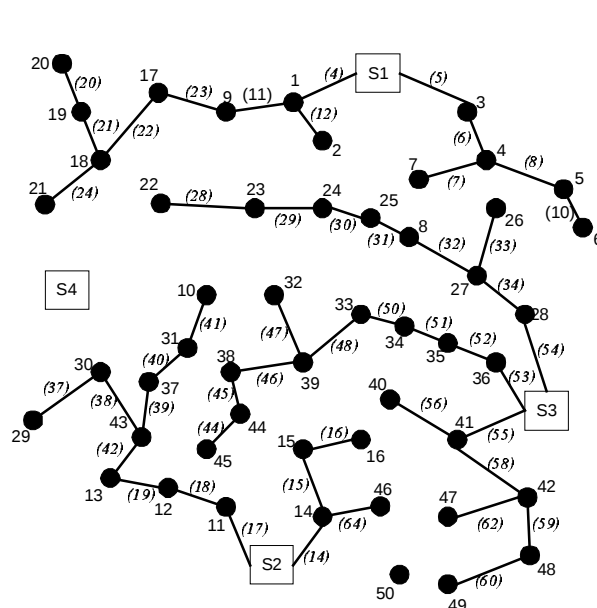


FIG. 9 SISTEMA RESULTANTE DO SEGUNDO ESTÁGIO

Custo total do segundo estágio : 169,0558

TABELA XII  
RESULTADOS DO SEGUNDO ESTÁGIO DO SISTEMA II

| Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo |
|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|
| 4     | 1       | 3    | 20    | 1       | 1    | 35    | 0       | --   | 50    | 1       | 1    |
| 5     | 1       | 2    | 21    | 1       | 1    | 36    | 0       | --   | 51    | 1       | 1    |
| 6     | 1       | 1    | 22    | 1       | 1    | 37    | 1       | 1    | 52    | 1       | 1    |
| 7     | 1       | 1    | 23    | 1       | 1    | 38    | 1       | 1    | 53    | 1       | 1    |
| 8     | 1       | 1    | 24    | 1       | 1    | 39    | 1       | 1    | 54    | 1       | 1    |
| 9     | 0       | --   | 25    | 0       | --   | 40    | 1       | 1    | 55    | 1       | 1    |
| 10    | 1       | 1    | 26    | 0       | --   | 41    | 1       | 1    | 56    | 1       | 1    |
| 11    | 1       | 1    | 27    | 0       | --   | 42    | 1       | 1    | 57    | 0       | --   |
| 12    | 1       | 1    | 28    | 1       | 1    | 43    | 0       | --   | 58    | 1       | 1    |
| 13    | 0       | --   | 29    | 1       | 1    | 44    | 1       | 1    | 59    | 1       | 1    |
| 14    | 1       | 1    | 30    | 1       | 1    | 45    | 1       | 1    | 60    | 1       | 1    |
| 15    | 1       | 1    | 31    | 1       | 1    | 46    | 1       | 1    | 61    | 0       | --   |
| 16    | 1       | 1    | 32    | 1       | 1    | 47    | 1       | 1    | 62    | 1       | 1    |
| 17    | 1       | 3    | 33    | 1       | 1    | 48    | 1       | 1    | 63    | 0       | --   |
| 18    | 1       | 2    | 34    | 1       | 1    | 49    | 0       | --   | 64    | 1       | 1    |
| 19    | 1       | 2    |       |         |      |       |         |      |       |         |      |

Potência subestação S1 : 18,4515 MVA

Potência subestação S2 : 16,5701 MVA

Potência subestação S3 : 18,5265 MVA

Potência subestação S4 : 0 MVA

#### Comentários sobre o segundo estágio

Como se observa na fig. 9 a subestação S3 está alimentando um número muito grande de consumidores, mas ela está fornecendo quase tanta energia como a subestação S1.

A linha 32 foi adicionada e retirada a linha 9. Assim a subestação fornecerá aos nós 22, 23, 24, 25 e 8.

As linhas 4, 17, 18 e 19 mudaram para uma bitola maior. Foram adicionados ao sistema as cargas 26, 32 e 49, que no primeiro estágio não tinham carga.

A subestação S4 não foi escolhida por que é uma das mais caras do conjunto de subestações. No caso de num outro estágio se precisar de mais energia, ela poderá fazer parte do sistema. O custo do segundo estágio foi menor, devido a grande quantidade de alimentadores e subestações a ser construídas no primeiro estágio.

#### 4.2.4. Resultados do terceiro estágio

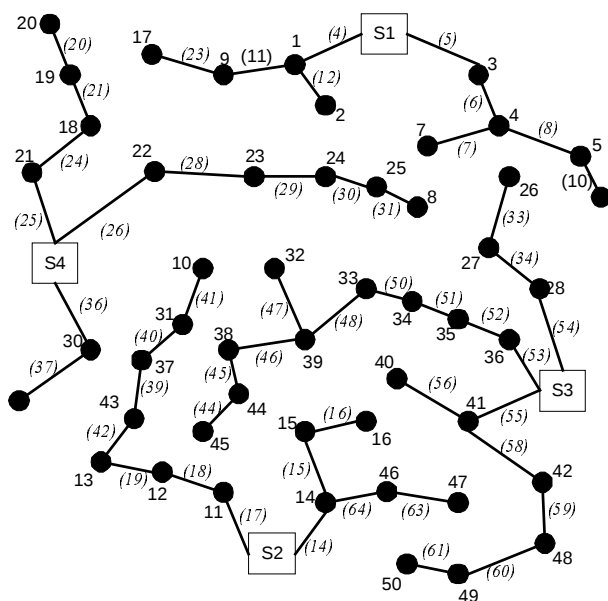


FIG. 10 SISTEMA RESULTANTE DO TERCEIRO ESTÁGIO.

Custo total do terceiro estágio : 443,2252

TABELA XIII  
RESULTADOS DO TERCEIRO ESTÁGIO DO SISTEMA II

| Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo | Linha | ligação | tipo |
|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|
| 4     | 1       | 3    | 20    | 1       | 1    | 35    | 0       | --   | 50    | 1       | 1    |
| 5     | 1       | 3    | 21    | 1       | 1    | 36    | 1       | 1    | 51    | 1       | 1    |
| 6     | 1       | 2    | 22    | 0       | --   | 37    | 1       | 1    | 52    | 1       | 1    |
| 7     | 1       | 1    | 23    | 1       | 1    | 38    | 0       | --   | 53    | 1       | 1    |
| 8     | 1       | 1    | 24    | 1       | 1    | 39    | 1       | 1    | 54    | 1       | 1    |
| 9     | 0       | --   | 25    | 1       | 3    | 40    | 1       | 1    | 55    | 1       | 1    |
| 10    | 1       | 1    | 26    | 1       | 1    | 41    | 1       | 1    | 56    | 1       | 1    |
| 11    | 1       | 1    | 27    | 0       | --   | 42    | 1       | 1    | 57    | 0       | --   |
| 12    | 1       | 1    | 28    | 1       | 1    | 43    | 0       | --   | 58    | 1       | 1    |
| 13    | 0       | --   | 29    | 1       | 1    | 44    | 1       | 1    | 59    | 1       | 1    |
| 14    | 1       | 1    | 30    | 1       | 1    | 45    | 1       | 1    | 60    | 1       | 1    |
| 15    | 1       | 1    | 31    | 1       | 1    | 46    | 1       | 1    | 61    | 1       | 1    |
| 16    | 1       | 1    | 32    | 0       | --   | 47    | 1       | 1    | 62    | 0       | --   |
| 17    | 1       | 4    | 33    | 1       | 1    | 48    | 1       | 1    | 63    | 1       | 1    |
| 18    | 1       | 3    | 34    | 1       | 1    | 49    | 0       | --   | 64    | 1       | 1    |
| 19    | 1       | 2    |       |         |      |       |         |      |       |         |      |

Potência subestação S1 : 23,7789 MVA

Potência subestação S2 : 18,9795 MVA

Potência subestação S3 : 21,7981 MVA

Potência subestação S4 : 21,8047 MVA

#### Comentários sobre o terceiro estágio

No terceiro estágio é adicionada a subestação S4, já que o sistema precisa de mais energia. O processo de planejamento tenta estabilizar o sistema fazendo com que cada subestação entregue quantidades parecidas de energia ao sistema.

São trocadas as bitolas de algumas linhas para fornecer maior energia.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma formulação que considera as alternativas de construções de linhas e subestações em sistemas de distribuição. A técnica de solução propostas para resolver este problema de programação não-linear inteiro misto do tipo binário (0/1), foi através de algoritmo de busca tabu. A metodologia proposta é flexível, aplicada para análise e estudos de planejamento de alguns sistemas de distribuição e forneceu como resultado um conjunto de soluções alternativas juntamente com a melhor solução para o problema.

A principal vantagem da utilização desta técnica para resolver o problema de planejamento está na facilidade de se trabalhar com um modelo não linear do problema e incorporar à formulação modelos reais de componentes dos sistemas. A técnica de fluxo de carga utilizada mostrou-se eficiente, segura e adequada para a solução deste tipo de problema.

Os resultados obtidos através das simulações dos sistemas encontrados na literatura [10] comprovam a eficiência da metodologia desenvolvida e implementada.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES pelo apoio financeiro.

## 7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Céspedes R. New Method for the Analysis of Distribution Networks. IEEE. 1990
- [2] Da Silva. Transmission Network Expansion Planning Under Tabu Search Approach . IEEE. 2001
- [3] Gallego. "Tabu Search Algorithm for Network Synthesis". IEEE.2000.
- [4] Glover, F., Laguna, M., Tabu Search, University of Colorado at Boulder, Kluwer Academic Publishers.
- [5] Goswami, S.K. Distribution System Planning Using Branch Exchange Technique. IEEE.1997.
- [6] Kagan, N. "Electrical Distribution System Planning Using Multiobjective and Fuzzy Mathematical Programming", PhD Thesis, University of London. 1992
- [7] Khator, S.R., Leung, L.C. Power Distribution Planning: A Review of Models and Issues. IEEE. 1997

- [8] Montecelli A., Romero R. Tutorial on modern heuristic optimization techniques with application to power systems. IEEE 2002
- [9] Ponnavaikko. Distribution System Planning Through a Quadratic Mixed Integer Programming Approach. IEEE.1987.
- [10]Proença, L.B. “Algoritmos Genéticos no Planejamento da Expansão de Distribuição de Energia Eletrica”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 1993.
- [11]Ramirez Rosado, I.J., Bernal Agustín, J.L. Genetic Algorithm Applied to the Design of Large Power Distribution Systems. IEEE. 1998.
- [12]Sun. Optimal Distribution Substation and Primary Feeder Via teh Fixed Charge Network Formulation. IEEE. 1982.
- [13]Thompson, G. L., Wall, D.L. A Branch and Bound Model for Choosing Optimal Substation Locations. IEEE. 1981.