

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

1210001129



Nº 41

ALGORITMO DE BUSCA TABU USADO NO
PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL
ALUNO: MARCO APARECIDO QUEIROZ DUARTE
ORIENTADOR: RUBÉN A. ROMERO LÁZARO

Te.1129



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**"ALGORITMO DE BUSCA TABU USADO NO PROBLEMA DA
RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL"**

Proc. 17/2000 NRD. 005/2000

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCN. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
<i>24/01/2000</i>	<i>31/3/2000</i>
REGISTRADO POR	TOMBO
<i>Bélica</i>	<i>1129</i>
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
<i>Doação</i> <i>R\$ 10,00</i>	<i>D812 a</i>

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica (ME).



3040400
ALUNO

: MARCO APARECIDO QUEIROZ DUARTE

ORIENTADOR

: RUBÉN AUGUSTO ROMERO LÁZARO

ILHA SOLTEIRA, OUTUBRO DE 1999

“Algoritmo de Busca Tabu Usado no Problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radial”

Marco Aparecido Queiroz Duarte

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA (ME).



Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi - Coordenador

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro - orientador



Prof. Dr. Carlos Alberto Favarim Murari



Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin

Ilha Solteira – SP, outubro de 1999



AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, que me permitiu realizar este trabalho, juntamente com todas as pessoas que ajudaram.

Ao meu orientador Rubén Augusto Romero Lázaro, por toda a competência, disposição e atenção a mim prestados em todos os momentos deste trabalho. Também por sua amizade e compreensão.

Ao professor José Roberto Sanches Mantovani, que muito me auxiliou nas horas de dificuldades e que foi para mim um segundo orientador e também por sua amizade.

Aos professores Carlos Roberto Minussi e Antônio Padilha Feltrin pela vezes que também me auxiliaram em momentos de dúvidas e por suas amizades.

Aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, que de uma maneira ou de outra colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho de mestrado. Por suas amizades, conquistadas ao longo do tempo que passamos juntos e que ficarão para sempre no meu coração.

A todos os amigos, companheiros de estudo, com os quais eu sempre pude contar. Em especial aos amigos Wendel Cleber Soares, Fernando Casari, Edmárcio Antônio Bellati, Sônia Angelina Garcia Modesto, Robin Pereira Koloski e Eliedete Pinheiro dos Santos que muito me ajudaram e torceram para o sucesso deste trabalho.

Aos meus pais José Benedito Duarte e Maria Antônia de Queiroz Duarte que mesmo a distância, muito torcem e me abençoam que eu tenha êxito em tudo que faço.

À minha esposa Maria Dolores e ao meu filho Marcos Eduardo que sempre estiveram ao meu lado em qualquer momento, para os quais eu dedico todo o meu esforço, inclusive este trabalho.

APOIO FINANCEIRO

Este trabalho contou com o apoio financeiro da FAPESP- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo através do projeto 97/05177-7.



RESUMO

Neste trabalho é apresentado um algoritmo de Busca Tabu que realiza reconfiguração de sistemas de distribuição radiais visando minimização de perdas. O objetivo do algoritmo é encontrar a configuração que apresenta menor perda ativa para cada sistema testado, mantendo a radialidade e respeitando as restrições de operação do sistema.

O algoritmo desenvolvido foi implementado em linguagem de programação Fortran (Fortran Visual Workbench v 1.0) e foi testado em três sistemas hipotéticos conhecidos da literatura especializada e um sistema real. Os três sistemas hipotéticos são de 14 barras [10], 32 barras [3] e 69 barras [15]. O sistema real é o sistema de 135 barras [22]. Seus dados completos são apresentados no Apêndice.

ABSTRACT

In this work it is presented a Tabu Search algorithm that carries out radial distribution systems reconfiguration on loss minimization. The algorithm's goal is to meet the configuration with less real loss for every tested system that maintains the radiality and respects the system operation constraints.

The developed algorithm was implemented in Fortran language (Fortran Visual Workbench v. 1.0) and was tested in three hypothetical systems well-known in the specialized literature and a real system. The three hypothetical systems are 14-bus [10], 32-bus [3], 69-bus [15] and the real system is a 135-bus [22].

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	6
INTRODUÇÃO.....	6
CAPÍTULO II.....	9
TÉCNICAS DE SOLUÇÃO USADAS NO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS	9
2.1. ALGORITMOS HEURÍSTICOS USADOS NO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO	9
2.1.1. ALGORITMO HEURÍSTICO DE CIVANLAR.....	9
2.1.1.1. CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS DO MÉTODO DE SOLUÇÃO	11
2.1.1.2. CÁLCULO DA VARIAÇÃO DE PERDAS.....	12
2.1.1.3. CASOS ESPECIAIS	13
2.1.1.4. RESULTADOS	14
2.1.2. ALGORITMO HEURÍSTICO DE GOSWAMI-BASU	15
2.1.2.1. O MÉTODO PROPOSTO	15
2.1.2.2. SELEÇÃO DA CHAVE ABERTA QUE SERÁ FECHADA.....	16
2.1.2.3. DETERMINAÇÃO DO PADRÃO DE FLUXO ÓTIMO	17
2.1.2.4. O ALGORITMO	18
2.1.2.5. TESTE REALIZADO	19
2.1.3. ALGORITMO HEURÍSTICO DE BARAN- WU	19
2.1.3.1. FLUXO DE CARGA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS	19
2.1.3.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	23
2.1.3.3. UM MÉTODO USANDO TROCA DE RAMOS.....	25



2.1.3.4. MÉTODOS DE FLUXO DE POTÊNCIA APROXIMADOS PARA CÁLCULO DE PERDA DE POTÊNCIA.....	27
2.1.3.5. CÁLCULO DE REDUÇÃO DE PERDA DE POTÊNCIA.....	30
2.1.3.6. TROCA DE RAMOS COM BALANÇO DE CARGA	31
2.1.3.7. RESULTADOS.....	31
2.2. ALGORITMOS COMBINATORIAIS.....	32
2.2.1. ALGORITMO DE SIMULATED ANNEALING USADO NO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS	32
2.2.1.1. PARTE 1.....	32
2.2.1.1.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	32
2.2.1.1.2. PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVOS (PMO).....	35
2.2.1.1.3.O MÉTODO ϵ -RESTRITO	36
2.2.1.1.4. SIMULATED ANNEALING PARA PROBLEMAS MULTI-OBJETIVOS	36
2.2.1.1.5. ALGORITMO S.A. BÁSICO.....	38
2.2.1.2 PARTE 2	39
2.2.1.2.1. ALGORITMO DE SOLUÇÃO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS.....	39
2.2.1.2.2 RESULTADOS	41
2.2.2. ALGORITMO GENÉTICO NA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PARA MINIMIZAR PERDAS..	42
2.2.2.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE MINIMIZAÇÃO DE PERDAS.....	42



2.2.2.2. O ALGORITMO DE SOLUÇÃO..	44
2.2.2.3. RESULTADOS.....	48
2.2.3. APLICAÇÃO DE UM ALGORITMO GENÉTICO REFINADO PARA RECONFIGURAÇÃO DE REDES PARA PERDAS..	48
2.2.3.1.EQUAÇÕES SIMPLIFICADAS DE FLUXO.....	48
2.2.3.2.O ALGORITMO GENÉTICO REFINADO.....	50
2.2.3.3. IMPLEMENTAÇÃO.....	51
2.2.3.4. RESULTADOS	55
CAPÍTULO III.....	56
ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA RADIAL.....	56
3.1. ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL: MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIAS.....	56
3.1.1. INTRODUÇÃO	56
3.1.2. JUSTIFICATIVA MATEMÁTICA.....	57
3.1.3. ALGORITMO PROPOSTO.....	60
3.1.4. COMENTÁRIOS ADICIONAIS SOBRE O ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA.....	60
CAPÍTULO IV	62
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE BUSCA TABU (TS).....	62
4.1. INTRODUÇÃO.....	62
4.2. MEMÓRIA DE CURTO PRAZO E SEUS PRINCIPAIS ELEMENTOS	66
4.3. MEMÓRIA DE LONGO PRAZO E SUAS ESTRATÉGIAS ASSOCIADAS	70



4.4. OSCILAÇÃO ESTRATÉGICA.....	75
4.5. PATH RELINKING.....	75
CAPÍTULO V	79
ALGORITMO DE BUSCA TABU USADO NO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS	79
5.1.INTRODUÇÃO	79
5.2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO ALGORITMO TS PARA O PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS.....	81
5.2.1.DETERMINAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO INICIAL.....	81
5.2.2. USO DE INDICADORES DE SENSIBILIDADE.....	84
5.2.3. ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DE VIZINHOS	89
5.2.4. AVALIAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES VIZINHAS.....	90
5.3. ALGORITMO BUSCA TABU PROPOSTO	92
5.3.1. FASE I: ESTRATÉGIA HEURÍSTICA.....	92
5.3.2. FASE II: ESTRATÉGIA BUSCA TABU (TS).....	93
5.3.3.ALGORITMO PROPOSTO.....	93
5.3.4.PROCESSO TSMA	94
CAPÍTULO VI	96
TESTES EXPERIMENTAIS: RECONFIGURAÇÃO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS	96
6.1. INTRODUÇÃO.....	96
6.2. SISTEMA DE 14 BARRAS	96
6.3. SISTEMA DE 32 BARRAS	98
6.4. SISTEMA DE 69 BARRAS	99
6.5. SISTEMA DE 135 BARRAS	101
6.6. COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS	103



CAPÍTULO VII	104
CONCLUSÕES.....	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
APÊNDICE A.....	108



CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O estado normal de operação de um sistema de distribuição é em configuração radial, e numa determinada configuração o sistema tem um conjunto de circuitos que estão energizados e estes formam a configuração radial chamada de árvore do ponto de vista de grafos. Por outro lado, os circuitos que não estão energizados são chamados de ramos de ligação. Uma troca adequada de um ramo de ligação com um ramo da árvore leva a outra configuração radial. Portanto, o problema de reconfiguração ótima de um sistema de distribuição consiste em encontrar aquela configuração radial, do espaço de configurações possíveis, que produz a perda mínima de potência do sistema de distribuição. Uma outra forma equivalente de caracterizar o problema de reconfiguração de redes de distribuição é a seguinte:

Dado um grafo, encontrar uma árvore que minimize uma função objetivo (minimização de perdas e/ou balanço de carga)



$$\min \sum r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (1.1)$$

satisfazendo as seguintes restrições:

- Limite de tensão.
- Capacidade das linhas e transformadores.
- Fluxo de carga (1ª lei de Kirchhoff).
- A configuração deve ser radial.

A restrição de radialidade é um dos fatores complicantes do problema da reconfiguração, pois não é fácil representar esta restrição através de relações algébricas e, portanto, torna-se muito difícil usar algoritmos baseados em técnicas tradicionais de otimização. Além disso, o problema é não linear e apresenta o fenômeno da explosão combinatorial pois quando cresce o número de ramos, o número de candidatos a árvore cresce de maneira exponencial.

Uma outra forma de examinar tal problema seria considerarmos que em cada ramo existe uma chave sendo que nos ramos energizados, as chaves estão fechadas (chaves seccionadoras) e nos ramos de ligação, as chaves estão abertas (chaves de interconexão.) Assim, uma operação de chaveamento será a que envolve a troca de posições de duas chaves, sendo uma seccionadora que deve ser aberta e outra de interconexão que deve ser fechada, de forma a minimizar as perdas de potência e manter a radialidade do sistema. Desta forma, o problema de reconfiguração pode ser considerado como: achar a posição das chaves de interconexão e seccionadoras que minimizam as perdas de potência das linhas e mantêm a radialidade do sistema.

Apresentamos um algoritmo Tabu Search (TS) para o problema da reconfiguração da operação de sistemas de distribuição radiais.

No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica de várias técnicas ou algoritmos propostos na literatura especializada para resolver o problema da reconfiguração de sistemas de distribuição radiais. São analisados de forma mais detalhada os algoritmos combinatoriais propostos para o problema antes mencionados como algoritmos usando Simulated Annealing e várias versões do Algoritmo Genético.

No capítulo 3 é apresentado um algoritmo do fluxo de carga radial que pode ser usado como subrotina no algoritmo TS proposto. Na verdade, pode ser usado qualquer um dos vários algoritmos de fluxo de carga radial existentes na literatura especializada desde que seja rápido e robusto.

No capítulo 4 é apresentada a teoria básica de TS analisando em detalhes as funções de TS mais importantes e que foram usadas no algoritmo TS para o problema da reconfiguração de sistemas de distribuição radiais.

No capítulo 5 é apresentado o algoritmo TS para o problema antes mencionado analisando as diferentes etapas do algoritmo TS proposto e as particularidades do algoritmo para o problema específico.

No capítulo 6 são apresentados testes obtidos usando sistemas elétricos conhecidos na literatura especializada e um sistema real de 135 barras correspondente à rede de distribuição de energia elétrica da cidade de Três Lagoas.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões que obtivemos ao aplicar o algoritmo proposto TS no problema da reconfiguração de sistemas de distribuição radiais.

Finalmente, no apêndice são mostrados os dados dos sistemas testados.



CAPÍTULO II

TÉCNICAS DE SOLUÇÃO USADAS NO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS

Neste capítulo são analisados alguns algoritmos apresentados na literatura especializada para resolver o problema da reconfiguração de sistemas de distribuição radiais. Juntamente com o algoritmo específico é analisado, de forma resumida, o algoritmo de fluxo de carga radial proposto.

2.1. Algoritmos Heurísticos Usados no Problema da Reconfiguração

2.1.1. Algoritmo Heurístico de Civanlar

Apresenta-se, em forma resumida o algoritmo heurístico apresentado em [10] para o problema da reconfiguração da operação de sistemas de distribuição radiais proposto por Civanlar e outros.

O problema em questão é agora ilustrado usando o sistema de distribuição de três alimentadores mostrado na figura 2.1. Os ramos pontilhados 15, 21 e 26 representam chaves de interconexão conectando os alimentadores e as chaves de interconexão normalmente abertas são consideradas presentes nestes ramos.



Por conveniência de notação, estas chaves de interconexão são identificadas pelos números dos nós correspondentes. Sem perda de generalidade, assumiremos para caso de explicação que existem chaves seccionadoras em cada ramo do sistema. Todas as 13 chaves seccionadoras também são identificadas pelos correspondentes números dos nós.

A carga na barra 11 pode ser transferida para o alimentador 1, fechando a chave de interconexão 15 e abrindo a chave seccionadora 19. Da mesma forma, as cargas das barras 9, 11 e 12 podem ser transferidas para o alimentador 1, fechando a chave de interconexão 15 e abrindo a chave seccionadora 18. O método apresentado enfoca a discussão da reconfiguração em redes de distribuição, fechando uma chave de interconexão e abrindo uma chave seccionadora para preservar a radialidade do sistema. O par combinado, consistindo de uma chave de interconexão e uma chave seccionadora, é chamado de opção de chaveamento. Enquanto que a aplicação sucessiva do esquema proposto poderia tratar o caso de múltiplas operações de chaveamento em que várias chaves de interconexão e seccionadoras são simultaneamente fechadas e/ou abertas.

Pode-se verificar facilmente que existem 15 opções de chaveamento viáveis para o sistema do exemplo. Na verdade, o número total de opções de chaveamento é muito maior que 15, mas algumas destas que causam eliminação de parte de um alimentador são excluídas. A melhor opção de chaveamento poderia ser selecionada através dos resultados de 15 estudos de fluxo de carga, simulando todas as 15 possíveis configurações do sistema



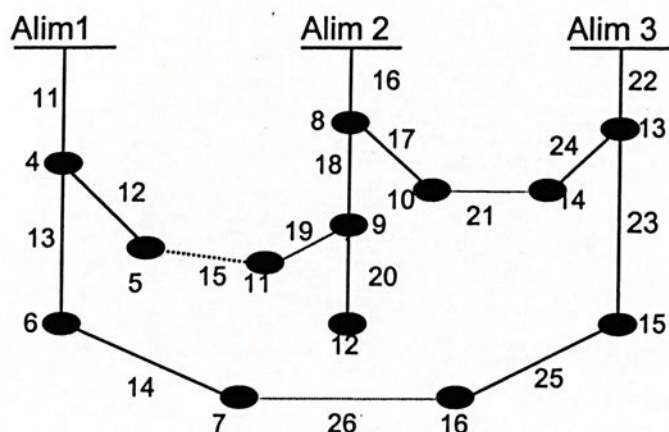


Figura 2.1 . Sistema de Três Alimentadores

2.1.1.1. Características Desejáveis do Método de Solução

Depois de verificar os conceitos dados acima, parece que um método de solução desejável teria as duas seguintes características: (i) Capacidade de estimar com mínimos esforços computacionais a mudança nas perdas resultantes da reconfiguração do sistema e (ii) critérios que podem ser usados para eliminar opções indesejáveis de chaveamento de forma a aliviar o dimensionamento do problema. A fórmula desenvolvida neste método para estimar a mudança de perdas requer pouca informação adicional além da solução do fluxo de carga do caso base (isto é, antes da reconfiguração do sistema). Além disso, a fórmula encontrada sugere um mecanismo de filtragem para eliminar aquelas opções de chaveamento que não produzem redução de perdas.

O objetivo primário em derivar a expressão para a redução de perda de potência através de transferência de carga é para determinar (i) se uma opção de chaveamento especificada resultaria num aumento ou diminuição de perdas e (ii) entre as opções de chaveamento candidatas, qual opção produziria a maior redução de perdas. Em outras palavras, procura-se encontrar a melhor topologia sem necessidade de resolver problemas de fluxo de carga adicionais.

2.1.1.2. Cálculo da Variação de Perdas

A variação de perdas resultante da transferência de um grupo de cargas do alimentador 2 para o alimentador 1 pode ser calculada através da seguinte equação simplificada:

$$\Delta P = \operatorname{Re} \left\{ 2 \left(\sum_{i \in D} I_i \right) (E_m - E_n)^* \right\} + R_{\text{loop}} \left| \sum_{i \in D} I_i \right|^2 \quad (2.1)$$

sendo:

D - conjunto de barras que são desconectadas do alimentador 2 e conectadas ao alimentador 1.

m - barras do alimentador 1 nas quais as cargas do alimentador 2 serão conectadas

n - barras do alimentador 2 que serão conectadas a barra m através de uma chave de interconexão.

I_i - corrente complexa na barra i

R_{loop} - resistência série do ramo de conexão das duas barras de interconexão dos alimentadores 1 e 2 através do fechamento da chave de interconexão especificada.

E_m - Componente de $E = R_{\text{bus}} I_{\text{bus}}$ correspondente à barra m. R_{bus} , é a "matriz de resistência nodal" do alimentador 1 antes da transferência de carga que é encontrada usando a barra da subestação como referência; I_{bus} é o vetor de correntes das barras para o alimentador 1.

E_n - Análogo a E_m , porém definido para a barra n do alimentador 2.

$\operatorname{Re}\{\}, *, |$ - parte real, conjugado complexo e valor absoluto, respectivamente.

Deve-se verificar que E_m e E_n são calculados usando as correntes I_i das barras do caso base antes da transferência de carga. Sugere-se incorporar os



efeitos dos capacitores nas correntes das barras para facilitar a eficiência computacional. ΔP representa uma redução (aumento) em kW quando este é negativo (positivo).

O segundo termo do lado direito da equação (2.1) é sempre positivo. Assim, a redução nas perdas não pode ser obtida a menos que o primeiro termo torne-se significativamente negativo. Como valores complexos são encontrados no primeiro termo, pode não ser simples chegar a quaisquer conclusões definitivas. Entretanto, verificamos que as diferenças dos ângulos de fase de tensão são pequenas em muitos sistemas de distribuição e que a corrente complexa na barra i pode estar na maioria das vezes em fase com o respectivo fasor de tensão devido à compensação VAR do capacitor em sistemas bem projetados. Sob estas circunstâncias, o primeiro termo torna-se negativo se $|E_m| < |E_n|$.

Concluimos então que a redução de perdas pode ser obtida apenas se existe uma diferença de tensão significativa através das chaves de interconexão e se as cargas são transferidas para o outro lado. A observação acima, pode ser usada como um critério interessante para eliminar operações de chaveamento indesejáveis durante o processo de eliminação.

É também importante verificar que na equação (2.1), a informação com relação a E é requerida apenas nas barras terminais onde a chave de interconexão está localizada e que a configuração do grupo de cargas a ser transferido ou a extensão geográfica de todo o sistema de distribuição não interessa ao resultado.

2.1.1.3. Casos Especiais

Para um sistema de distribuição ideal com compensação VAR perfeita, todas as variáveis na equação (2.1) assumem valores reais, como não existe fluxo de corrente reativo. Consequentemente, a equação (2.1) torna-se:



$$\Delta P = 2 \left(\sum_{i \in D} I_i \right) (E_m - E_n) + R_{loop} \left(\sum_{i \in D} I_i \right)^2 \quad (2.2)$$

Quando uma chave é fechada, é obvio que a chave seccionadora a ser aberta deve estar no caminho mais curto entre as barras para as correspondentes subestações. Para um sistema bem compensado, a equação (2.2) revela que a chave a ser aberta para minimizar perdas pode ser encontrada usando as características de ΔP . Para explicar este fato, considere que a chave a ser aberta está a uma distância x da barra n no caminho mais curto. Então a equação (2.2) assume a forma:

$$\Delta P = 2I(x)(E_m - E_n) + R_{loop} [I(x)]^2 \quad (2.3)$$

em que:

$I(x)$ é a distribuição de corrente no caminho mais curto.

Devido à natureza quadrática de ΔP , pode se mostrar que a chave a ser aberta é aquela que faz com que $I(x)$ satisfaça mais adequadamente:

$$I(x_{opt}) = \frac{E_n - E_m}{R_{loop}} \quad (2.4)$$

Para ilustrar, considere novamente a transferência de algumas cargas do alimentador 2 para o alimentador 1. Suponha que a projeção do valor $(E_n - E_m)/R_{loop}$ caia na barra $(n-1)$. A decisão a ser tomada é abrir a seção $(n,n-1)$ ou abrir a seção $(n-1,n-2)$. A estratégia ótima para a redução de perdas é abrir a seção $(n-1,n-2)$ se $\Delta_1 < \Delta_2$ ou abrir a seção $(n,n-1)$ se $\Delta_1 > \Delta_2$. Como ΔP é positivo se $E_m > E_n$, as opções de chaveamento alternativas num alimentador são diretamente eliminadas.

Pode-se mostrar também que o valor mínimo de ΔP obtido ao se fechar a chave de interconexão entre as barras m e n é:

$$\Delta P_{\min} = -\frac{(E_n - E_m)^2}{R_{\text{loop}}} \quad (2.5)$$

e isto, pode ser usado na determinação da chave a ser aberta.

Muito freqüentemente em pesquisa de sistemas de distribuição, supõe-se que a carga é uniformemente distribuída através de um alimentador radial único sem laterais. Em tais casos, a posição ótima para a chave a ser aberta para minimizar perdas é encontrada diretamente através da equação (2.5), com $X_{\text{opt}} = (E_n - E_m)/(dR_{\text{loop}})$ sendo d a densidade de corrente da carga uniformemente distribuída.

2.1.1.4. Resultados

Para este algoritmo [10], os autores não apresentam resultados numéricos, apresentam apenas uma análise da escolha das chaves que poderiam ser abertas, para gerar configurações vizinhas. A metodologia do algoritmo de Civanlar foi apresentada com base no sistema de 14 barras(figura 2.1). Porém, não são apresentados resultados de testes em sistemas conhecidos da literatura especializada.

2.1.2. Algoritmo Heurístico de Goswami-Basu

Analisaremos agora, o algoritmo heurístico apresentado em [12] para o problema da reconfiguração de sistemas de distribuição radiais visando a diminuição de perdas.

2.1.2.1. O Método Proposto

O **padrão de fluxo ótimo (pfo)** de uma rede é o padrão de fluxo do ramo que causará a mínima perda resistiva de linha. Este padrão de fluxo pode ser determinado aplicando as leis Kirchhoff com as impedâncias das linhas substituídas por suas componentes resistivas [2]. Para estabelecer o padrão de fluxo ótimo ou próximo do ótimo, o método da referência [2] começa fechando

todas as chaves da rede, formando assim uma rede de distribuição com laços. Mas as redes de distribuição são operadas radialmente. Assim, no método da referência [2], os laços são abertos um após o outro de tal forma que o pfo varia uma quantia mínima. Uma limitação óbvia de tal método é que o pfo é determinado para uma rede com laços. Assim, neste método [2], a chave a ser aberta (para abrir um laço) pode ser selecionada adequadamente no último passo de solução onde havia apenas um laço na rede e a parte restante era radial. Em todos os outros passos, existia um número de laços da rede, que não correspondiam à condição de operação real. Assim, a configuração obtida por tal método [2] pode não ser a ótima ou próxima da ótima. Uma alternativa imediata então, seria considerar um laço por vez.

O método proposto em [12] utiliza o conceito de pfo, mas num único laço da rede. Assim, em vez de fechar todas as chaves da rede para formar uma rede com laços e abrir as chaves, uma após a outra, para restaurar a configuração radial, este método fecha apenas uma chave por vez para introduzir uma malha no sistema e o torna novamente radial abrindo a mesma chave ou uma chave diferente do laço, dependendo do resultado do pfo nas chaves do mesmo laço.

O pfo através dos ramos do laço formado é determinado resolvendo as equações de Kirchhoff com as impedâncias dos ramos substituídas apenas pelas resistências correspondentes.

2.1.2.2. Seleção da Chave Aberta que será Fechada

O algoritmo de reconfiguração começa com uma solução de fluxo de potência da rede radial. Uma chave normalmente aberta é então fechada para formar o laço. Esta chave pode ser selecionada dependendo da tensão na chave aberta ou então, arbitrariamente. Três opções são dadas: i) Fechar a chave aberta na qual a tensão é máxima (esperando que devido à maior diferença de tensão esta chave produza a máxima redução de perdas); ii) Fechar a chave aberta na



qual a tensão é mínima (esperando que devido à mínima diferença de tensão, uma solução modificada possa ser obtida rapidamente); iii.) Selecionar a chave arbitrariamente uma após a outra. Em qualquer dos esquemas, a configuração final obtida é a mesma.

2.1.2.3. Determinação do Padrão de Fluxo Ótimo

Uma vez escolhida uma chave normalmente aberta que deve ser fechada como mostrado na figura 2.2, deve-se resolver o chamado padrão de fluxo ótimo que consiste em encontrar os fluxos em cada um dos ramos do laço formado. Este problema de padrão de fluxo ótimo, na verdade é um problema de fluxo de carga para um laço e portanto, pode-se usar qualquer algoritmo de fluxo de carga com capacidade de resolver o problema de fluxo de carga de um laço. O ramo que deve ser aberto é aquele que leva o menor fluxo de potência na operação do laço formado.

Em [12], o problema de padrão de fluxo ótimo para um laço é resolvido em forma aproximada e num processo de dois passos:

- 1) Usando os resultados encontrados para o fluxo de carga do sistema radial e através de um processo iterativo simples são encontradas as correntes de carga em cada barra do laço. Essas correntes de carga em cada barra seria a corrente de carga da operação em laço. Em [12] são propostas três formas diferentes para calcular em forma aproximada essas correntes de carga, e todas elas apresentam desempenhos equivalentes.
- 2) Com os resultados conhecidos de corrente de carga em cada barra, deve-se determinar as correntes em cada ramo do laço, isto é, o padrão de fluxo ótimo aproximado. Em [12], esta parte é resolvida usando somente a parte resistiva do laço (as reatâncias não são levadas em conta) com a primeira lei de Kirchhoff em cada barra de carga e uma equação da segunda lei de Kirchhoff para o laço.



Assim, é determinada a corrente em cada ramo do laço, isto é, resolve-se um problema de padrão de fluxo ótimo.

Depois de conhecido o padrão de fluxo ótimo, a configuração radial da rede é restaurada abrindo o ramo no qual o fluxo é mínimo.

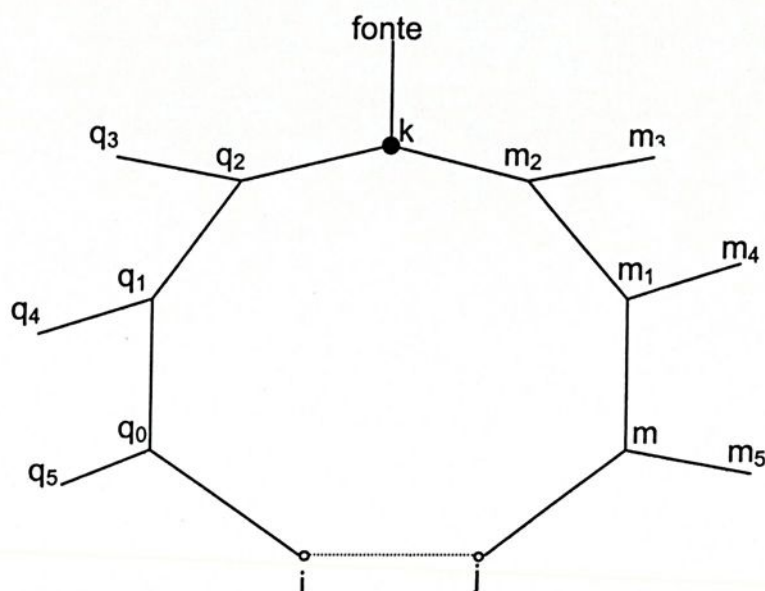


Figura 2.2. Laço formado ao se fechar uma chave normalmente aberta.

2.1.2.4. O Algoritmo

O algoritmo pode ser resumido da seguinte forma:

- 1- Obter a solução do fluxo de potência da rede radial;
- 2- Fechar uma chave para formar um laço. Obter a solução modificada;
- 3- Determinar o pfo do laço;
- 4- Abrir a chave para estabelecer o pfo;
- 5- Se a configuração produzir perdas mínimas, pare. Caso contrário volte ao passo 1.

O método de fluxo de potência usado no algoritmo é rápido e eficiente, pois leva em conta de maneira prática a topologia da rede.

O algoritmo proposto tem as seguintes características especiais:

- (1) A configuração final não é dependente da configuração inicial dos alimentadores;
- (2) Como apenas uma chave é aberta por vez, o problema é dimensionalmente pequeno e a solução é rápida.
- (3) O método de fluxo de potência é muito rápido;
- (4) Os métodos de solução aproximada usados para obter a solução modificada após fechar uma chave garante a rapidez do algoritmo.

2.1.2.5. Teste Realizado

O algoritmo proposto em [12] foi testado no sistema 32 barras, cuja configuração inicial apresenta perdas de 203,2 kW. A configuração final, usando este algoritmo, apresentou perdas de 139,3 kW, que mostra sua eficiência, em relação a [3], que testou o mesmo sistema e apresentou desempenho inferior.

2.1.3. Algoritmo Heurístico de Baran-Wu

Em [3], apresenta-se um algoritmo de fluxo de carga radial que se tornou muito popular em pesquisas relacionadas com sistemas de distribuição. Assim, inicialmente, apresenta-se o algoritmo de fluxo de carga radial aproximado.

2.1.3.1 Fluxo de Carga em Sistemas de Distribuição Radial

Passamos a analisar agora o método de fluxo de carga apresentado em [1] que é muito usado pelos especialistas em sistemas de distribuição radial.

Existem muitos métodos para resolver de maneira eficiente o fluxo de carga de um sistema de distribuição radial disponíveis na literatura especializada. Apresenta-se, em forma resumida, a metodologia de fluxo de carga radial conhecida como **DistFlow (distribuição de fluxo - distribution flow)**



apresentada em [1] que é uma das mais usadas em problemas de distribuição radial.

A metodologia DistFlow é usada em fluxo de carga radial em substituição aos métodos convencionais de fluxo de carga **AC** como o método de Newton e suas versões desacopladas. Quando são usados os algoritmos combinatoriais para resolver o problema da reconfiguração de sistemas de distribuição, deve-se resolver em torno de milhares de problemas de fluxo de carga de sistemas radiais e, portanto, é evidente a necessidade de dispor de um algoritmo de fluxo de carga para sistemas radiais extremamente rápido e robusto.

Na Figura 2.3, apresenta-se um diagrama unifilar de um típico sistema de distribuição radial. Pode-se mostrar que o fluxo de potência através de um ramo pode ser representado através das seguintes equações recursivas:

$$P_{i-1} = P_i + r_i \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2} + P_{Li} \quad (2.6)$$

$$Q_{i-1} = Q_i + x_i \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2} + Q_{Li} \quad (2.7)$$

$$V_{i-1}^2 = V_i^2 + 2(r_i P_i' + Q_i') + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2} \quad (2.8)$$

em que P_k e Q_k são, respectivamente os fluxos de potência ativa e reativa chegando à barra $k + 1$ através do ramo que conecta as barras k e $k + 1$; V_k é o módulo da tensão na barra k ; Q_{ck} é a injeção de potência reativa devido ao capacitor alocado na barra k e, r_{k+1} e x_{k+1} são a resistência e a reatância do ramo que conecta as barras k e $k + 1$.

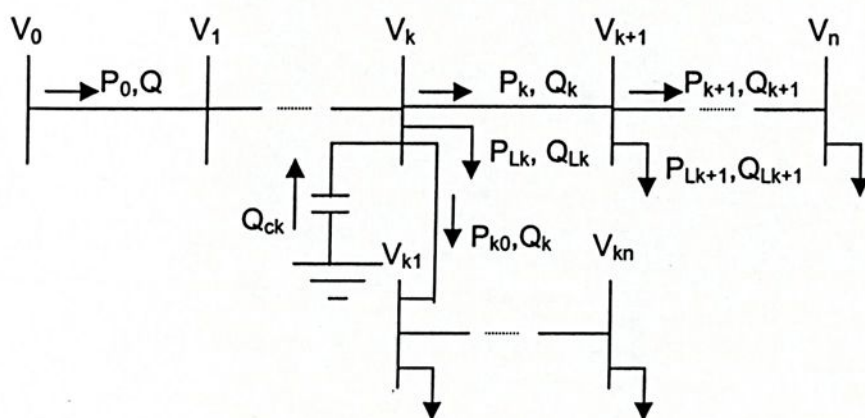


Figura 2.3: Diagrama Unifilar de um Alimentador de Distribuição

As equações (2.6), (2.7) e (2.8), chamadas de equações de fluxo de ramos, podem ser representadas de forma sintetizada da seguinte maneira:

$$x_{k+1} = f_{k+1}(x_k, u_{k+1}) \quad (2.9)$$

em que $x_k = [P_k \ Q_k \ V_k^2]^T$ e $u_{k+1} = Q_{ck+1}$.

Evidentemente, se não existe capacitor na barra k então para uma equação do tipo (2.9) temos $u_k = 0$. Agora, pode-se usar um vetor u para representar todos os capacitores colocados em n_c barras do sistema:

$$u^T = [u_1 \ \dots \ u_{n_c}] = [Q_{cn1} \ \dots \ Q_{cnn_c}]$$

Adicionalmente à equação (2.9), o sistema deve satisfazer condições de fronteira para cada ramal (ou ramificação) e considerando a ramificação principal como ramificação 0. Por exemplo, para a ramificação k mostrada na figura 2.3, deve-se satisfazer as seguintes condições de fronteira:

(a) Na barra de separação (branching) k onde a ramificação é conectada ao alimentador principal, define-se uma variável artificial V_{k0} e seja:

$$x_{k03} = V_{k0}^2 = V_k^2 = x_{0k3} \quad (2.10)$$

(b) No final da ramificação não existe potência transferida através dos ramos, assim temos que:

$$x_{kn1} = P_{kn} = 0; \quad x_{kn2} = Q_{kn} = 0 \quad (2.11)$$

Portanto, para um sistema genérico como o apresentado na Figura 2.3 (com n barras e l ramificações além da ramificação principal), existem $3(n + l + 1)$ equações DistFlow correspondentes às equações (2.9), (2.10) e (2.11). Este conjunto de equações pode ser representado na seguinte forma compacta:

$$G(x, u) = 0 \quad (2.12)$$

em que $x = [x_1^T \dots x_l^T x_0^T]^T$; e $x_k = [x_{k0}^T \dots x_{kn}^T]^T$.

As equações DistFlow mostradas em (2.12) representam simplesmente uma forma equivalente de encontrar o ponto de operação de um sistema de distribuição radial, isto é, representa **equações de fluxo de carga** para sistemas de distribuição radial. No sistema (2.12) são dados do problema, os parâmetros, os ramos, as demandas nas barras e o conjunto de capacitores alocados (conhecendo a localização, tamanho, tipo e ponto de operação). Resolver (2.12) consiste em encontrar os fluxos de potência ativa e reativa em todos os ramos do sistema e o módulo de tensão em todas as barras do sistema. Em outras palavras, (2.12) consiste em encontrar o ponto de operação x do sistema para um determinado perfil de carga P_{Li} , Q_{Li} ($i = 1, \dots, n$) e uma determinada proposta de alocação de capacitores u . É evidente que nos algoritmos combinatoriais, deve-se resolver muitos problemas do tipo (2.12).

2.1.3.2. Formulação do Problema

EQUAÇÕES DE FLUXO DE POTÊNCIA

É usado um conjunto de equações de fluxo de potência que são eficientes para esquemas de solução computacional.

Considere a rede da figura 2.4.

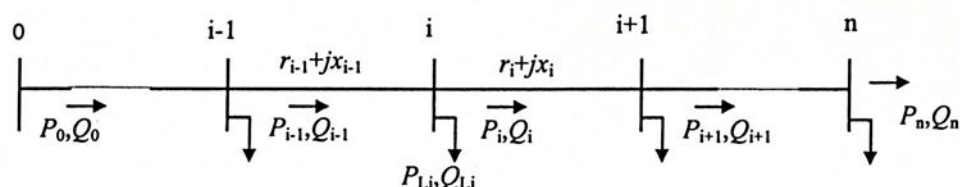


Figura 2.4 . Diagrama unifilar de uma rede radial.

As impedâncias das linhas são $z_i = r_i + jx_i$ e as cargas são modeladas como fontes de potência constantes, $S_L = P_L + jQ_L$.

O fluxo de potência numa rede de distribuição radial pode ser descrito por um conjunto de equações recursivas chamadas equações de ramos DISTFLOW, que usam as potências ativas e reativas, e a magnitude de tensão no nó receptor do ramo:

$$P_{i+1} = P_i - r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{Li+1} \quad (2.13)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{Li+1} \quad (2.14)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 + 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (2.15)$$

Assim, se P_0 , Q_0 e V_0 no primeiro nó da rede são conhecidos ou estimados, então os mesmos valores nos outros nós podem ser calculados usando as equações acima. Consideramos este procedimento como atualização progressiva.

As equações do DISTFLOW podem ser escritas de forma regressiva tomando como base o nó receptor do ramo para expressar os valores no nó emissor do ramo. Estas equações chamaremos de equações de ramo regressivas:

$$P_{i-1} = P_i + r_i \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2} + P_{Li} \quad (2.16)$$

$$Q_{i-1} = Q_i + x_i \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2} + Q_{Li} \quad (2.17)$$

$$V_{i-1}^2 = V_i^2 + 2(r_i P_i' + Q_i') + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2} \quad (2.18)$$

Sendo,

$$P_i' = P_i + P_{Li} \quad \text{e} \quad Q_i' = Q_i + Q_{Li}.$$

Análoga à atualização progressiva, a atualização regressiva pode ser definida como: começar a atualização do último nó da rede assumindo que as variáveis P_n , Q_n e V_n no último nó são dadas e calcular os valores nos outros nós aplicando sucessivamente as equações (2.16), (2.17) e (2.18), fornecendo um novo cálculo de injeções de potência na rede, P_0 e Q_0 .

TERMOS DA FUNÇÃO OBJETIVO

Para a redução de perdas, o objetivo é minimizar as perdas totais no sistema, que podem ser calculadas assim:



$$LP = \sum_{i=0}^{n-1} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad \text{p.u.} \quad (2.19)$$

Este é o termo da função objetivo para reconfiguração para redução de perdas.

Para balanço de carga, é usada a razão de potência complexa no nó emissor de um ramo S_i sobre sua capacidade em kVA ($S_i^{\max}$) como uma medida de quanto tal ramo está carregado. Assim, temos:

$$C_b = \sum \left(\frac{S_i}{S_i^{\max}} \right) = \sum \frac{P_i^2 + Q_i^2}{S_i^{\max}} \quad (2.20)$$

Este é o termo da função objetivo para balanço de carga.

Nota-se que as equações (2.19) e (2.20) requerem os mesmos dados e o cálculo de fluxo de carga para avaliar os objetivos para uma topologia de rede dada.

2.1.3.3. Um Método usando Trocas de Ramos

Passo 1: Dada uma árvore factível T_0 (pai), resolva um fluxo de potência para determinar o ponto de operação .

Passo 2: Examine todos os filhos do pai como segue:

Para cada ramo b aberto:

- Encontre uma nova árvore T candidata,
- identificando o laço;
- decidindo o ramo m a ser removido.

- Para a árvore candidata T ,
- calcule a redução no objetivo, ΔC_{bm} .

Passo 3: Escolha os filhos (árvores examinadas) usando os ΔC_{bm} 's.

Passo 4: Encontre os filhos T^* que têm o maior $\Delta C_{bm} > 0$ e satisfaça as restrições de factibilidade.

Passo 5: Se existe uma árvore T^* , então escolha T^* como T^0 e volte ao passo 1, caso contrário pare.

Observações: - Esta busca não examina todas as árvores possíveis e assim a busca será ótima localmente;

A eficiência computacional deste algoritmo esbarra em duas coisas: A seleção do ramo m a ser aberto, como isto eventualmente afeta o número de buscas executadas e o cálculo dos termos da função objetivo ΔC 's, para cada cálculo requer uma nova solução de fluxo de potência. Embora esta solução de fluxo de potência possa ser eficientemente obtida pelo DISTFLOW, mesmo assim, é desejável calcular os fluxos de potência em forma simplificada e rápida sem executar realmente um DISTFLOW para cada troca de ramo considerada. Isto reduzirá as soluções do DISTFLOW para uma, em cada iteração.

Os fluxos de potência calculados em forma aproximada são usados no ranqueamento dos ramos abertos. Assim, erros de cálculos podem levar a uma busca diferente da que seria obtida usando um fluxo de potência exato.



2.1.3.4. Métodos de Fluxo de Potência Aproximados para Cálculo de Perda de Potência

MÉTODO 1: MÉTODO DISTFLOW SIMPLIFICADO CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA

Podemos simplificar as equações de ramo do DISTFLOW verificando que os termos quadráticos nas equações representam as perdas nos ramos e eles são muito menores que os termos de potência nos ramos P_i e Q_i . Assim, podem ser eliminados do lado direito das equações ficando:

$$P_{i+1} = P_i - P_{Li+1} \quad (2.21)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{Li+1} \quad (2.22)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) \quad (2.23)$$

Assim, para o sistema do tipo da figura (2.4) temos as equações simplificadas do DISTFLOW:

$$P_{i+1} = \sum_{k=i+2}^n P_{LK} \quad (2.24)$$

$$Q_{i+1} = \sum_{k=i+2}^n Q_{LK} \quad (2.25)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) \quad (2.26)$$

A perda de potência num ramo i pode ser aproximada como



$$LP_i = r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \approx r_i (P_i^2 + Q_i^2) \text{ p.u.} \quad (2.27)$$

Sendo $V_i^2 \approx 1$ p.u. , então, a perda total do sistema é simplesmente a soma de todas as perdas dos ramos , isto é:

$$\tilde{LP} = \sum_{i=0}^{n-1} r_i (P_i^2 + Q_i^2) \text{ p.u.} \quad (2.28)$$

CÁLCULO DE PERDA DE POTÊNCIA DEVIDO À TROCA DE RAMO

Considere numa rede a troca de ramos entre os ramos b e m da rede da figura 2.5. O fluxo de potência mudará apenas nos ramos que constituem o laço formado por tal troca. Assim, a redução de perda devido a esta troca de ramos será:

$$\Delta \tilde{LP}_{bm} = 2P_m \left(\sum_{i \in L} r_i P_i - \sum_{i \in R} r_i P_i \right) + 2Q_m \left(\sum_{i \in L} r_i Q_i - \sum_{i \in R} r_i Q_i \right) - (P_m^2 + Q_m^2) \left[\sum_{i \in R \cup L} r_i \right] \quad (2.29)$$

Sendo que os ramos no laço que vão do nó 0,...,k-1 e k são denotados pelo conjunto L e os do outro lado (0,...,n-1,n e k) são denotados pelo conjunto R.

A equação (2.29) é uma função quadrática da transferência de potência P_m , Q_m , isto é,

$$\Delta \tilde{LP}_{bm}(P_m, Q_m) = 2drpP_m + 2drqQ_m - tr(P_m^2 + Q_m^2) \quad (2.30)$$

Sendo que os coeficientes drp, drq e tr são independentes do ramo m considerado e podem ser calculados usando apenas os fluxos originais P_i e Q_i .

MÉTODO 2: ATUALIZAÇÃO PROGRESSIVA E REGRESSIVA DA ATUALIZAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA DO DISTFLOW



Este método usa as atualizações progressiva e regressiva do DISTFLOW para atualizar o fluxo de potência no laço de uma troca de ramos. Considere uma troca entre os ramos b e k do laço apresentado na figura 2.5, assim:

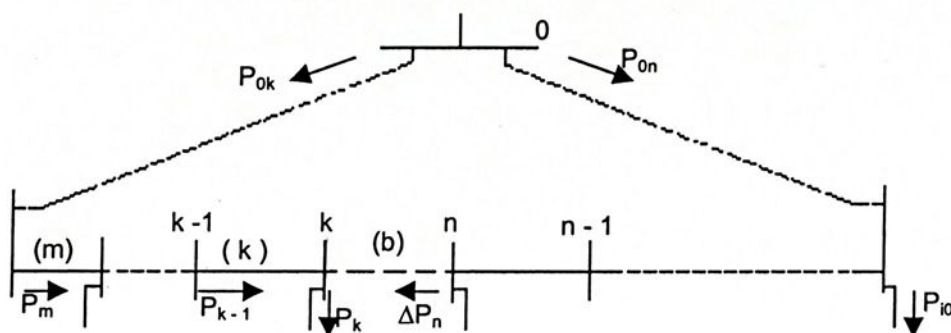


Figura 2.5: Laço associado com o ramo aberto b

Passo 1: Atualização regressiva

Atualize o fluxo de potência no laço de forma regressiva, começando dos nós k e n do laço e considerando as atualizações de potência e tensão separadamente, sendo as potências atualizadas

$$\hat{P}_i', \hat{Q}_i', i=k, \dots, 0k; \hat{P}_i', \hat{Q}_i', i=n, \dots, 0n \quad (2.31)$$

e as atualizações de tensão no nó comum $\hat{V}_{0n}'$ e $\hat{V}_{0k}'$.

Passo 2: Atualização progressiva

Compare as diferenças de tensão no nó 0. Se a diferença de tensão é muito grande, realize uma atualização progressiva para reduzir o erro, sendo as potências atualizadas:

$$\hat{P}_i'', \hat{Q}_i'', i=0k+1, \dots, k; \hat{P}_i''', \hat{Q}_i''', i=0n+1, \dots, n \quad (2.32)$$

Passo 3: Correção do cálculo de potência no nó comum

Use as diferenças entre as atualizações $\hat{P}_k'$, $\hat{P}_n'$ e $\hat{P}_k''$, $\hat{P}_n''$ como desequilíbrios de potências e corrija $\hat{P}_{0n}'$ e $\hat{P}_{0k}'$ adicionando os seguintes desníveis :

$$\hat{P}_{0k}'' = \hat{P}_{0k}' + (\hat{P}_k' + \hat{P}_k''); \hat{P}_{0n}''' = \hat{P}_{0n}' + (\hat{P}_n' - \hat{P}_n'') \quad (2.33)$$

Observações:

- Este método é computacionalmente mais eficiente que um fluxo de potência completo.
- A precisão do método dependerá principalmente da transferência de carga P_k , Q_k .

2.1.3.5. Cálculo de Redução de Perda de Potência

Para cálculo de perda de potência:

$$P_{0k} - P_{0k}''' \approx \Delta \hat{P}_k + \Delta LP_L; P_{0n} - P_{0n}''' \approx -\Delta \hat{P}_k + \Delta LP_R \quad (2.34)$$

Sendo que ΔLP_L e ΔLP_R representam as reduções de perdas de potência nos lados L e R do laço, respectivamente. Desta forma, a redução de perda de potência total pode ser aproximada como:



$$\Delta LP = \Delta L \hat{P}_L + \Delta LP_R = (P_{ok} - \hat{P}_{ok}^m) + (P_{on} - \hat{P}_{on}^m) \quad (2.35)$$

2.1.3.6. Troca de Ramos com Balanço de Carga

Uma vez que o novo fluxo de potência nos ramos P_i'' , Q_i'' é conhecido, então o novo índice de balanço de carga pode ser calculado aplicando a equação (2.20):

$$C_b = \sum \frac{P_i^{m2} + Q_i^{i2}}{(S_i^{max})^2} \quad (2.36)$$

Quando os dois métodos são comparados para balanço de carga, o método DISTFLOW simplificado parece ser mais atrativo devido as seguintes razões:

Como o índice de balanço de carga é relativo, a precisão do DISTFLOW simplificado seria adequada;

O DISTFLOW simplificado proporciona uma estimativa rápida, mas aproximada de fluxos de potência sem requerer dados dos parâmetros da rede.

2.1.3.7. Resultados

O Algoritmo apresentado em [3] foi testado no sistema 32 barras e 5 chaves de interconexão. O sistema de 32 barras, apresenta perdas de 203,2 kW para sua configuração inicial, com a implementação deste algoritmo, o sistema apresentou perdas de 148,85 kW para a melhor configuração encontrada. Apesar de mostrar-se eficiente, o algoritmo apresentado em [3] não é melhor que o apresentado em [12], cujas perdas foram inferiores para o mesmo sistema.



2.2. Algoritmos Combinatoriais

A seguir são apresentados dois algoritmos combinatoriais usados no problema da reconfiguração da operação de sistemas de distribuição radial.

2.2.1. Algoritmo de Simulated Annealing Usado no Problema da Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais

2.2.1.1. PARTE 1

A seguir, discutiremos o algoritmo apresentado em [14].

A modelagem matemática do problema é modificada considerando um problema multi-objetivo para redução de perdas e balanço de carga, levando em conta as restrições de carga e operação. O número de operações de chaveamento envolvido na reconfiguração da rede é considerado como uma restrição. A nova formulação é um problema multi-objetivo e não diferenciável com restrições de igualdade e desigualdade. Desenvolve-se uma metodologia de solução em dois estágios, baseada numa técnica modificada de Simulated Annealing (SA) e no método ϵ -restrito (ϵ -constraint) para problemas multi-objetivos gerais.

2.2.1.1.1. Formulação do Problema

As equações de fluxo nos ramos, bem como os termos da função objetivo obedecem a mesma formulação do artigo de Baran et al [3], sendo que as equações de fluxo dos ramos podem ser escritas em forma compacta:



$$X_{i+1} = f_{i+1}(X_i) \quad (2.37)$$

sendo $X_i = [P_i, Q_i, V_i^2]$.

As equações de fluxo de ramo na ramificação do nó k do principal alimentador podem então ser escritas como:

$$P_{0k} = \hat{P}_{0k}(X_{0k-1}) - P_{0k} \quad (2.38)$$

$$Q_{0k} = \hat{Q}_{0k}(X_{0k-1}) - Q_{0k} \quad (2.39)$$

$$|V_{0k}| = \hat{V}(X_{0k-1}) \quad (2.40)$$

Existem várias condições de fronteira a serem satisfeitas:

1- na subestação, a magnitude de tensão $|V_{00}|$ é especificada.

2- no fim do alimentador principal; $P_{0n} = \hat{P}_{0n}(X_{0n-1}) = 0$ e

$$Q_{0n} = \hat{Q}_{0n}(X_{0n-1}) = 0$$

3- no fim do nó lateral k ; $P_{kn}=0$ e $Q_{kn}=0$.

Assim, podemos escrever as restrições de carga como:

$$P_{0n} = \hat{P}_{0n}(z_{00}, z_{10}, \dots, z_{k0}, |V_{00}|) = 0 \quad (2.41)$$

$$Q_{0n} = \hat{Q}_{0n}(z_{00}, z_{10}, \dots, z_{k0}, |V_{00}|) = 0 \quad (2.42)$$

$$P_{knk} = \hat{P}_{knk}(z_{00}, z_{10}, \dots, z_{k0}, |V_{00}|) = 0 \quad (2.43)$$

$$Q_{knk} = \hat{Q}_{knk}(z_{00}, z_{10}, \dots, z_{k0}, |V_{00}|) = 0 \quad (2.44)$$

$$j \leq k \quad e \quad k = 1, 2, \dots, m$$

Sendo $z_{k0} = [P_{k0}, Q_{k0}]$. Ou ainda podemos escrever estas restrições em forma compacta :

$$F(z) = 0 \quad (2.45)$$

sendo $z = (P_{10}, Q_{10}, \dots, P_{m0}, Q_{m0}, P_{00}, Q_{00})^t$, t operador transposto.

Restrições operacionais

$$V_j^{\min} \leq |V_j| \leq V_j^{\max} \quad (2.46)$$

$$I_{ij}^{\min} \leq |I_{ij}| \leq I_{ij}^{\max} \quad (2.47)$$

ou

$$G(x) \leq 0, j=1, 2, \dots, n \quad (2.48)$$

A restrição no número de operações de chaveamento envolvidas na reconfiguração da rede é:

$$N(g_0, g_i) \leq nd \quad (2.49)$$

Sendo:

nd = número de operações desejadas

g_0 = configuração original da rede

g_i = configuração atual da rede



FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo do problema tem dois termos, balanço de carga e redução de perdas.

Dessa forma:

$$\min \sum r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (\text{redução de perdas})$$

$$\min_{g_i} \max \left(\frac{S_i}{S_i^{\max}}, i = 1, 2, \dots, nb \right) \quad (\text{balanço de carga})$$

Sujeito a:

$$F(z, g_i) = 0 \quad (\text{restrições de carga})$$

$$G(x, g_i) \leq 0 \quad (\text{restrições de operação})$$

$$N(g_0, g_i) \leq nd \quad (\text{restrições do número de chaves})$$

Assim, temos um problema de otimização não diferenciável e multi-objetivo com restrições de operação.

2.2.1.1.2. Problema de Otimização Multi-Objetivo (PMO)

PMO é um problema de otimização que apresenta mais de uma função objetivo. As funções objetivo do PMO formam o conjunto F de funções objetivo. Num PMO, um ponto x onde cada componente do conjunto F alcance seu ótimo global é praticamente inexistente. Isto ocorre especialmente quando algumas componentes de F competem de forma que uma diminui, enquanto a outra aumenta. Quando as soluções competem, não há solução ótima para o PMO. Para resolver este problema, é usado o conceito de ponto não inferior, cuja

definição é apresentada em [14]. Um ponto não inferior local ou global é o ponto que melhor resolve as funções objetivo do conjunto F de forma que as diferenças entre as componentes são amenizadas.

Em geral, existe um número infinito de pontos (global) não inferior para um dado PMO. O conjunto que contém tais pontos é chamado de **conjunto não inferior**.

A imagem do conjunto não inferior é chamado de superfície **trade-off**.

2.2.1.1.3. O Método ϵ -Restrito

Neste método uma das funções objetivo do PMO é escolhida como a principal função objetivo e todas as outras são tidas como restrições. Suponha que f_i é a função principal, então o método resolve o seguinte problema de otimização com restrições:

$$\min_x f_i(x)$$

sujeito a:

$$f_j(x) \leq \epsilon_j, j = 1, 2, \dots, m; j \neq i$$

$$F(x) = 0$$

$$G(x) \leq 0$$

Para diferentes valores dos ϵ_j 's. Uma variação sistemática de ϵ_j 's gerará o conjunto não inferior completo.

2.2.1.1.4. Simulated Annealing para Problemas Multi-Objetivos

O problema de reconfiguração de redes de distribuição pode ser enquadrado no seguinte PMO (sem perda de generalidade, apenas duas funções objetivo são consideradas):



$$\min_{x_1} C_1(x_1, x_2)$$

$$\min_{x_1} C_{21}(x_1, x_2)$$

sujeito a:

$$F(x) = 0$$

$$G(x) \leq 0$$

É analisada uma técnica modificada de SA para encontrar um ponto global não inferior para PMO's. O ponto chave para isto é a coordenação de esquema de perturbação e critério de aceitação.

Para trabalhar com estes objetivos os mecanismos de perturbação e critério de aceitação são coordenados da seguinte forma: a cada nível de temperatura, o seguinte procedimento é executado repetidamente:

- 1- Aplique um mecanismo de perturbação $x_1^i \rightarrow x_1^{i+1}$
- 2- Calcule x_2^{i+1} através de $F(x_2^{i+1}, x_2)$
- 3- Verificação de factibilidade:
 - se $G[x_1^{i+1}, x_2^{i+1}] \leq 0$ vá para o passo 4.
 - caso contrário vá para o passo 1.
- 4- faça $x_1^i = x_1^{i+1}$ se uma das seguintes condições é satisfeita:
 - $\Delta C_1(x^i) \leq 0$ e $\Delta C_2(x^i) \leq 0$
 - $\min \left[e^{-\frac{\Delta C_1(x^i)}{T}}, e^{-\frac{\Delta C_2(x^i)}{T}} \right] \geq \text{número aleatório gerado em } [0,1)$

caso contrário, não mude x_1^i .

T representa o nível de temperatura.

2.2.1.1.5. Algoritmo SA Básico

O algoritmo SA básico assume a seguinte forma:

Repita

1- movimento;

2- avalia ΔC (variação de custo na função objetivo);

3- Critério de aceitação/atualização:

Movimentos que diminuem a função objetivo são aceitos diretamente.

Movimentos que aumentam a função objetivo passam pelo critério de aceitação.

Até que um critério de parada seja satisfeito (temperatura final)

O procedimento, acima pode ser aplicado em problemas não diferenciáveis e multi-objetivos.

Uma forma de melhorar o ganho de tempo computacional é:

Repita

1- movimento;

2- avalia ΔC :

- aproximado para alta temperatura;

- exato para baixa temperatura

3- Critério de aceitação/atualização:

Movimentos que diminuem a função objetivo são aceitos diretamente.

Movimentos que aumentam a função objetivo passam pelo critério de aceitação.

Até que um critério de parada seja satisfeito (temperatura final)

2.2.1.2. Parte 2

Esta parte é apresentada em [15], onde é analisado com maiores detalhes o algoritmo SA e são mostrados resultados experimentais na aplicação do algoritmo SA.

O algoritmo que será apresentado produz uma diminuição do esforço computacional mostrado na primeira parte deste trabalho. Esta proposta vem para acelerar o tempo computacional requerido.

2.2.1.2.1. Algoritmo de Solução para Reconfiguração de Sistemas De Distribuição Radiais

Passo 1: Dados de entrada da rede.

São os dados de entrada do sistema e da rede, os parâmetros de controle tais como: a temperatura inicial, número inicial de movimentos, gerador de números aleatórios, fatores de esfriamento, razão de aceitação γ e o número máximo de movimentos a cada nível de temperatura η_{limite} .

Passo 2: Projete um programa de esfriamento global próprio.

A cada nível de temperatura T_k , execute um número de movimentos n_k . Para $\text{nov} = 1, 2, \dots, n_k$, execute os passos de 3 a 6. Caso contrário, vá para o passo 7.

Passo 3: Gerar uma nova configuração factível.

(i) Gere uma nova configuração g_{i+1} através da perturbação do sistema atual, g_i usando um mecanismo de perturbação.

(II) Execute uma distribuição de fluxo de carga para averiguar a factibilidade. Se alguma restrição é violada então desfça a perturbação (troca de ramo) e vá para o passo 5. Caso contrário, vá para (iii).



(iii) Calcular $\Delta C_1(x, g_i) = C_1(x, g_{i+1}) - C_1(x, g_i)$ e

$$\Delta C_2(x, g_i) = C_2(x, g_{i+1}) - C_2(x, g_i).$$

Passo 4: Atualização da configuração do sistema

Se $\Delta C_1(x^i) \leq 0$ e $\Delta C_2(x^i) \leq 0$ ou $-\min \left[e^{-\frac{\Delta C_1(x^i)}{T}}, e^{-\frac{\Delta C_2(x^i)}{T}} \right] \geq \text{número aleatório gerado}$

em $[0,1)$, então retenha a nova configuração g_{i+1} (isto é, aceite a configuração). Caso contrário, restaure a configuração anterior g_i (isto é, descarte a nova configuração).

Passo 5: Verificar critério de parada para cada nível de temperatura

Se o número de perturbações não é menor que η_{limite} ou o número de transições não é menor que γ_{limite} , então vá para o próximo passo, caso contrário, vá para o passo 3.

Passo 6: Verificar o critério de parada

Se o critério de parada não é satisfeito, então o sistema ainda não está congelado. Continue o processo retornando ao passo 2. Caso contrário, vá para o passo 7.

Passo 7: Imprima a melhor configuração encontrada.

Para melhorar a velocidade de processamento, é usado um método de fluxo de carga simplificado para verificar a factibilidade de configurações do sistema e para avaliar as funções de custo quando o sistema está em alta temperatura. É usado um método desacoplado rápido de fluxo de potência quando o sistema está em baixa temperatura.

Consideraremos o caso em que existe uma restrição no número de operações de chaveamento. O algoritmo de solução para tal caso é similar ao apresentado acima, com as seguintes modificações.

Passo 4': Gerar uma nova configuração factível

1- Gerar uma nova configuração g_{i+1} perturbando o sistema inicial g_0 , usando o mecanismo de perturbação multiplicativo restrito.

2- Execute uma solução de fluxo de potência para verificar se alguma restrição é violada. Se afirmativo, descarte a perturbação e vá para o passo 1. Caso contrário vá para o passo 3.

3- Calcule $\Delta C_1(x, g_i) = C_1(x, g_{i+1}) - C_1(x, g_i)$ e $\Delta C_2(x, g_i) = C_2(x, g_{i+1}) - C_2(x, g_i)$.

Os mecanismos de perturbação acima citados, nada mais são do que técnicas diferentes de trocas entre ramos.

2.2.1.2.2. Resultados

O algoritmo de solução proposto foi testado num sistema de 12,66 kV, com 69 barras e 7 laterais. A configuração inicial apresenta perdas de 20,85 kW. Após aplicação do algoritmo SA, a redução de perdas é de 49,46% em relação à configuração inicial.



2.2.2. Algoritmo Genético na Reconfiguração de Sistemas de Distribuição para Minimizar Perdas

Analisaremos detalhadamente o algoritmo apresentado em [9].

2.2.2.1. Formulação de um Problema de Minimização de Perdas

Em [9] é apresentada a seguinte formulação matemática:

FUNÇÃO OBJETIVO:

$$\min \sum_t \sum_i \sum_j \{ I_{ji}^2 + (1/3) I_{jt}^2 \} r_j x_{ij} \quad (2.50)$$

RESTRIÇÕES:

Capacidade das linhas:

$$\sum_{j \in J_{ik}} I_{jt} x_{ij} \leq b_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, I), (t = 1, 2, \dots, T), (k = 1, 2, \dots, K) \quad (2.51)$$

Capacidade dos transformadores:

$$\sum_{i \in TI} \sum_{j \in Ji} I_{jt} x_{ij} \leq b_r \quad (r = 1, 2, \dots, R), (t = 1, 2, \dots, T) \quad (2.52)$$

Queda de tensão:

$$\sum_{m \in T_{il}} \left(\sum_{q \in J_{il}} U_{qt} x_{iq} \right) Z_m \leq V_{il} \quad (i = 1, 2, \dots, I), (l = 1, 2, \dots, E_i), (t = 1, 2, \dots, T) \quad (2.53)$$

Suprimento de potência;

$$\sum_i x_{ij} = 1 \quad (2.54)$$

Conexão de alimentador:

$$x_{ik} \leq x_{i,(k-1)} \quad (2.55)$$

[A seção (k-1) está localizada do lado do nó fonte da seção k no alimentador i]

Sendo:

$X_{ij} = 1$, se a seção de carga j pertence ao alimentador i;

$X_{ij} = 0$, caso contrário;

r_j : resistência na seção j;

I_{jt} : carga da seção j no tempo t;

I_{jt} : fluxo de corrente na seção j no tempo t;

b_{ik} : capacidade da linha do k-ésimo ponto de supervisão do alimentador i;

b_r : capacidade do transformador r;

Z_l : impedância da linha l;

U_{qt} : $U_{qt} = I_{qt}(q \neq 1)$, $U_{qt} = I_{qt}/2(q = 1)$;

V_{il} : limite de queda de tensão da seção l do alimentador i;

J_{ik} : conjunto das seções que existem entre a seção k e o extremo do alimentador i;

T_l : conjunto de alimentadores conectados ao transformador r;

J_i : conjunto de todas as seções de carga do alimentador i;

T_{il} : conjunto de seções que existem no caminho da raiz para a seção l do alimentador i.

Nesta formulação tem-se o seguinte:

- i) A carga de seção é a corrente de carga constante balanceada uniformemente distribuída;

- ii) O fator de potência da carga da seção é 1.0;
- iii) A mudança de fase de corrente causada pela impedância da linha é significativamente pequena;
- iv) A queda de tensão máxima ocorre no extremo do alimentador porque nenhum capacitor está ordinariamente instalado em sistemas de distribuição urbanos;
- v) As violações de capacidades das linhas são observadas apenas na raiz dos ramos onde os diâmetros dos fios mudam.

Sendo que os itens (ii) e (iii) fazem uma análise inexata. Embora existam métodos mais exatos [3], estas simplificações são usadas para reduzir o tempo computacional. O cálculo do erro esperado é aceitável se este for comparado com o erro de cálculo de carga da seção.

A equação (2.54) mostra que cada carga de seção deve ser suprida. A equação (2.55) indica que cada seção de carga deve estar conectada a um dos alimentadores e cada seção deve estar conectada da raiz ao extremo.

2.2.2.2. O Algoritmo de Solução

Para implementar o Algoritmo Genético na formulação matemática dada anteriormente, primeiro, deve-se determinar uma estrutura de configuração e uma função de adaptação.

CONFIGURAÇÃO GENÉTICA

O único parâmetro que determina a configuração de perda mínima é a posição das chaves seccionadoras abertas normais. O número de posições de chaves seccionadoras abertas é idêntico para manter o sistema radial uma vez que a topologia do sistema de distribuição é fixa, mesmo se as posições das chaves abertas são mudadas. Assim, para memorizar a configuração radial, é suficiente numerar a posição de cada chave aberta e memorizar que chave está aberta



correspondendo a cada posição numerada. Como o sistema de distribuição radial pode ser transformado num grafo, onde várias chaves seccionadoras estão localizadas num arco entre os pontos de ramificação, as posições das chaves abertas podem ser lembradas memorizando os números dos arcos e as posições das chaves abertas em cada arco. Assim, temos a seguinte estrutura de configuração genética:

Arc.n ⁰ (1)	Ch. n ⁰ (1)	Arc.n ⁰ (2)	Ch. n ⁰ (2)	...	Arc.n ⁰ (i)	Ch. n ⁰ (i)	...	Ch.n ⁰ (n)
------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	-----	------------------------	------------------------	-----	-----------------------

Figura 2.6: Estrutura das configurações genéticas.

i representa a posição em que arco/chave está aberto/aberta, $arc.$ indica o arco e $ch.$ indica a chave. O termo arco significa ramo entre dois nós.

Ao aplicar o operador recombinação neste tipo de configuração, pode-se obter configurações com laços ou desenergizadas. Neste caso, estas configurações são descartadas e outras são selecionadas para nova recombinação.

FUNÇÃO DE ADAPTAÇÃO

Embora as restrições das equações (2.54) e (2.55) sejam consideradas ao construir-se novas gerações, as restrições das equações (2.51) e (2.53) não podem ser incluídas. Assim, estas restrições são forçadas a serem satisfeitas incluindo-as na função de adaptação:

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_t \sum_i \sum_j \left\{ I_{ji}^2 + (1/3) I_{jt}^2 \right\} x_{ij} + \alpha_1 \left[\sum_t \sum_i \sum_k \max \left\{ 0, \left(\sum_{j \in J_{ik}} I_{jt} x_{ij} - b_{ik} \right) \right\} \right] + \\
 & \alpha_2 \left[\sum_t \sum_r \max \left\{ 0, \left(\sum_{i \in I_r} \sum_{j \in J_i} I_{jt} x_{ij} - b_r \right) \right\} \right] + \alpha_3 \left[\sum_t \sum_i \sum_l \max \left\{ 0, \sum_{m \in T_{il}} \left(\sum_{q \in J_{il}} U_q x_{iq} \right) Z_m - V_i \right\} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.56}$$

sendo α_1 , α_2 e α_3 coeficientes constantes grandes. Como a função de adaptação é maximizada em AG, a recíproca ($1/f$) da equação (2.56) corresponde a f_i na equação que calcula o valor de cada configuração na seleção. O primeiro termo da equação (2.56), após a mudança na posição das chaves abertas, pode ser facilmente calculado pela equação (2.57) se as perdas da configuração do sistema inicial são conhecidas, assume-se que t é um valor fixo.

$$\Delta L = \Delta I^2 \left(\sum_j r_j + \sum_k r_k \right) + 2\Delta I \left(\sum_j I_{ji} r_j - \sum_k I_{ki} r_k \right) + \sum_i (\Delta I - I_i)(\Delta I - I_i + 2I_{ii}) r_i \quad (2.57)$$

sendo:

ΔL : mudança de perda;

ΔI : carga transferida;

r_j : resistência da seção j do alimentador onde a carga aumentou;

I_{ij} : corrente que passa na seção j do alimentador onde a carga aumentou;

r_k : resistência da seção k do alimentador onde a carga diminuiu;

I_{ki} : corrente que passa na seção k do alimentador onde a carga diminuiu;

I_i : Carga na seção i entre duas chaves nas quais o estado ligado/desligado mudou;

I_{ii} : corrente que passa na seção i entre as duas chaves nas quais o estado ligado/desligado mudou.

Com a equação (2.57), o primeiro termo da função de adaptação pode ser calculado rapidamente, reduzindo bastante o tempo de cálculo do AG.

O 2º e o 4º termo da equação (2.57), quando as posições abertas das chaves seccionadoras são mudadas, podem ser facilmente calculados uma vez que conhecemos os desvios de corrente e tensão.



Estes valores podem também ser facilmente calculados através do cálculo de transferência de carga (fechando e abrindo um laço). Quando o laço é fechado e aberto, o desvio de corrente é calculado pelas seguintes equações [4]:

- (1) Quando o laço é construído fechando uma chave j , a corrente é calculada assim,

$$\Delta I = (V_a - V_b) / (R_a + R_b) \quad (2.58)$$

sendo:

R_a, R_b Soma das impedâncias das seções que existem no caminho da chave seccionadora para as barras a e b .

m sentido negativo no alimentador conectado à barra b .

- (2) Quando o laço é aberto ao se abrir uma chave j , o desvio de corrente é:

$$\Delta I = x_j \quad (2.59)$$

sendo:

x_j valor da corrente que flui na chave j .

A corrente flui num sentido negativo no alimentador conectado à barra a e num sentido positivo no alimentador conectado à chave b .

- (3) Desvio de tensão:

O desvio de tensão no nó k do alimentador é calculado por:

$$V_{k,novo} = V_{k,velho} + R_k \Delta I \quad (2.60)$$

sendo:



$V_{k,novo}$, $V_{k,velho}$ Tensão no nó k antes e depois da posição da chave aberta ter mudado.

R_k Soma da impedância das seções no caminho do nó k à barra a , onde a corrente muda.

2.2.2.3. Resultados

O algoritmo foi testado em dois sistemas, um hipotético de 105 barras e um real de 1961 barras. No sistema de 105 barras, a configuração inicial apresenta perdas 341,13 kW, após a implementação do algoritmo AG, as perdas são de 288,54 kW. No sistema de 1961 barras, a configuração inicial apresenta perdas 980,13 kW, após a implementação ao algoritmo AG, as perdas são de 790,39 kW.

2.2.3. Aplicação de um Algoritmo Genético Refinado para Reconfiguração de Redes para Perdas.

Nesta seção, apresentamos a discussão do algoritmo apresentado em [8].

2.2.3.1. Equações Simplificadas de Fluxo

Para calcular rapidamente as perdas das linhas, equações simplificadas de fluxo são utilizadas para eliminar completamente o processo de iteração na análise exata de fluxo. Assim, tem-se o cálculo aproximado de perdas, que porém, não comprometerá a qualidade da solução do problema. A idéia é apresentada usando o alimentador simples da figura 2.7. O sistema é assumido como trifásico e balanceado. As potências ativa e reativa saindo da barra $i+1$, são representadas



por P_{i+1} e Q_{i+1} , respectivamente, e $|V_{i+1}|$ representa a magnitude de tensão da mesma barra. As equações de fluxo simplificadas são:

$$P_i = P_{i+1} + P_{Li+1} + r_i \left[(P_{i+1} + P_{Li+1})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1})^2 \right] \quad (2.61)$$

$$Q_i = Q_{i+1} + Q_{Li+1} + x_i \left[(P_{i+1} + P_{Li+1})^2 + (Q_{i+1} + Q_{Li+1})^2 \right] \quad (2.62)$$

sendo:

P_i, Q_i : Potência ativa e reativa no terminal emissor da barra i ;

P_{Li}, Q_{Li} : Potência ativa e reativa de carga na barra i ;

r_i, x_i : Resistência e reactância entre as barras i e $i+1$.

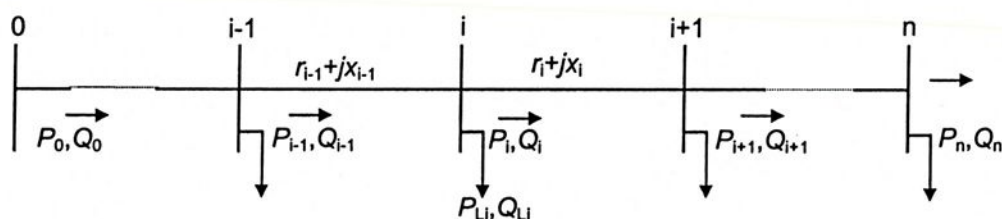


Figura 2.7 . Diagrama unifilar de uma rede radial.

As equações (2.61) e (2.62) não envolvem nenhum processo iterativo no cálculo de perdas nas linhas. As perdas do sistema podem ser calculadas em um único passo de maneira regressiva da última para a primeira barra.

2.2.3.2. O Algoritmo Genético Refinado

Em [8] são comentadas as dificuldades freqüentemente encontradas ao aplicar o AG convencional em problemas de otimização como é o caso da convergência prematura. Isto é tipicamente o resultado da extrema confiança na recombinação. A dominância da recombinação pode resultar em estagnação conforme a população torna-se homogênea e a taxa de mutação é também muito baixa para levar a busca a outras regiões. Outra desvantagem está no caso de ótimos locais, pois o AG tem dificuldades para sair deles.

Para evitar estas desvantagens do AG, é apresentado em [8] um AG refinado para a reconfiguração de redes que, combina as vantagens de AG e SA usando as idéias apresentadas em [5]. A principal característica deste método é substituir o operador mutação por um operador mutação controlado por SA. Este operador trabalha como um operador mutação normal, a diferença é que internamente, o operador mutação SA pode chamar a função adaptação e usar o resultado para decidir se aceita ou rejeita a solução mutada. Novas gerações evoluem com o decréscimo no parâmetro de controle de temperatura do SA, fazendo assim o operador SA mais seletivo sobre as mutações que ele aceita.

O operador mutação SA, embora seja muito simples de implementar, oferece algumas importantes melhorias sobre o AG normal. Primeiro, estes operadores trabalham melhor com ótimos locais. Como a temperatura decresce, os operadores inevitavelmente só passarão por uma pequena mudança adversa enquanto aceitam livremente as melhorias. Por isso, podemos usar a taxa de mutação do SA alta. Não há necessidade de fazê-la tão baixa quanto no AG normal.



2.2.3.3. Implementação

ESTRUTURA DO VETOR GENÉTICO

O número de chaves de interconexão é fixo durante a reconfiguração, independentemente da mudança na topologia da rede ou na posição das chaves de interconexão. O parâmetro que determina a configuração de perda mínima é a posição da chave de interconexão. Entretanto, é necessário numerar todas as chaves (seccionadoras e de interconexão) e armazenar o número correspondente da chave de interconexão. A estrutura do vetor que representa o número da chave de interconexão é representada na figura 2.8, em que n representa o número de chaves de interconexão num sistema de distribuição radial. Devido ao número de chaves de interconexão ser pequeno com relação ao número total de chaves do sistema, este é um modo eficiente de representar a estrutura do vetor para reconfiguração de alimentador em vez da codificação binária, usa-se a codificação inteira.

Ch.inter.n ^o (1)	Ch.inter.n ^o (2)	. . .	Ch.inter.n ^o (n)
-----------------------------	-----------------------------	-------	-----------------------------

Figura 2.8. Estrutura do Vetor Genético

FUNÇÃO DE ADAPTAÇÃO

A função de adaptação do AG refinado é a seguinte:

$$\text{Adaptação}(S) = C - \text{Perda}(S) \quad (2.63)$$

Sendo:

S configuração

C constante

$\text{Perda}(\bullet)$ função das perdas totais na linha

Para converter o problema de minimização de reconfiguração para o problema de maximização usado no AG refinado, a constante C na equação (2.63) é fixada em 10^6 nos testes realizados em [8].

RECOMBINAÇÃO

Para manter a melhor configuração em cada geração e melhorar a qualidade da próxima geração, reserva-se os quatro melhores pais diretamente para a próxima geração. Então usa-se o método da roleta com setores dimensionados de acordo com o valor da função adaptação (2.63) para a seleção dos pais. Primeiro, os filhos herdam os genes comuns dos pais. Depois, os genes diferentes são distribuídos aleatoriamente. Por exemplo, considere um sistema radial com 16 chaves codificadas com os números de 1 a 16. Três delas devem ser de interconexão para manter a estrutura radial. Na figura 2.9 temos o processo de recombinação. Verifique que os pais 1 e 2 têm o gene 15 em comum e consequentemente os filhos 1 e 2 herdam o gene 15 de seus pais. E os genes 14, 16, 6 e 9 são distribuídos de forma aleatória para os filhos 1 e 2.

Pai 1:	6	9	15
Pai 2:	14	15	16
Filho 1:	15	9	16
Filho 2:	15	14	6

Figura 2.9. Processo de recombinação em codificação inteira.

Esta técnica de recombinação tem as mesmas características do método da recombinação de multi-ponto. Na figura 2.10 temos a representação binária da figura 2.9. Sendo que "1" representa a chave seccionadora e "0"

representa a chave de interconexão. Os filhos 1 e 2 herdam os genes dos pais que estão marcados com “#” e “*” respectivamente.

Pai 1:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
#	#	#	#	#	#	#	#	*	*	*	*	*	*	*	#
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Pai 2:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
*	*	*	*	*	*	*	*	*	#	#	#	#	#	#	*
1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1

Filho 1 (#):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0

Filho 2 (*):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1

Figura 2.10.: Processo de recombinação em codificação binária.

Por aplicar a estrutura de vetor da figura 2.8, é esperado que um ou ambos os filhos possam apresentar uma configuração com laço ou seções desenergizadas. Em tal situação, os vetores inactíveis são descartados e, é selecionado um novo companheiro para a recombinação até que o número de filhos seja igual ao tamanho da população.

MUTAÇÃO

Propõe-se uma técnica de mutação eficiente para gerar um novo estado que conserve a estrutura radial.

Primeiro seleciona-se aleatoriamente uma chave de interconexão de uma configuração e então fecha-se esta chave. O sistema torna-se um laço que abrange os dois principais alimentadores que estão ligados pela chave de interconexão. Depois, escolhe-se uma das chaves de interconexão que formam o laço e abre-se esta chave.

GERAÇÃO INICIAL E TEMPERATURA INICIAL

Para determinar a geração inicial e a temperatura inicial, a técnica de mutação descrita acima é aplicada para a configuração original. A geração inicial é determinada depois de k testes de mutação, em que k é o tamanho da população. Durante cada teste a diferença nos valores da função adaptação entre os dois testes sucessivos é acumulada assim:

$$\Delta Aptidão_{total} = \sum_{i=2}^k |Adaptação_i - Adaptação_{i-1}| \quad (2.64)$$

Calcular o valor médio da diferença da função adaptação $E(\Delta Adaptação_{total})$

$$E(\Delta Adaptação) = \frac{\Delta Adaptação_{total}}{k-1} \quad (2.65)$$

Para ter 0.95 de probabilidade de aceitação no início, seja

$$0.95 = \exp\left(\frac{E(\Delta Adaptação)}{T_{inicial}}\right) \quad (2.66)$$

$$\text{então, } \ln(0.95) = \frac{E(\Delta Adaptação)}{T_{inicial}} \quad (2.67)$$

Finalmente,

$$T_{inicial} \approx 20 \times E(\Delta Adaptação) \quad (2.68)$$

sendo

T_{inicial} : temperatura inicial

Para cada nova geração, a temperatura do operador mutação SA é reduzido de acordo com :

$$T_{i+1} = \alpha T_i \quad (2.69)$$

Sendo:

T_i a Temperatura da geração i

α a Taxa de esfriamento do operador mutação S A

CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA

Se, em 30 gerações consecutivas, a melhor configuração não muda, então o processo do AG refinado é considerado convergido e o processo é finalizado.

2.2.3.4. Resultados

Para testar o algoritmo, foram usados os sistemas de 14, 32 e 69 barras, ambos sistemas conhecidos na literatura especializada.

Para o sistema de 14 barras cuja configuração inicial apresenta perdas de 511kW, o algoritmo apresentou, para a melhor configuração encontrada, perdas de 466,1 kW.

Para o sistema de 32 barras, a configuração inicial apresenta perdas de 203,2 kW, o algoritmo apresentou, para a melhor configuração encontrada, perdas de 139,7 kW.

No sistema de 69 barras, as perdas da configuração inicial são de 20,85 kw, o algoritmo apresentou perdas de 9,42 kW para a melhor configuração encontrada.

Os resultados obtidos com a aplicação deste algoritmo, para os 3 sistemas, são melhores que os resultados apresentados pelas outras referências que usaram estes sistemas para teste.



ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA RADIAL

3.1 Algoritmo de Fluxo de Carga para Redes de Distribuição Radiais: Método de Soma de Potências

3.1.1. Introdução

Neste capítulo é analisado de maneira crítica o algoritmo de fluxo de carga para redes de distribuição radial desenvolvido por Cespedes e apresentado em [21]. A metodologia proposta é relativamente simples de implementar e foi usada na forma original ou com algumas modificações em muitos trabalhos de pesquisa que usam algoritmos de fluxo de carga para sistemas de distribuição radial.

Nos últimos anos foram desenvolvidos vários algoritmos especializados de fluxo de carga para sistemas de distribuição radial. Em sistemas de transmissão os algoritmos mais usados são os métodos de Newton e suas versões desacopladas. Entretanto, para sistemas de distribuição que normalmente operam em configuração radial foram desenvolvidos algoritmos rápidos aproveitando a estrutura radial, isto é, ausência de laços ou malhas no sistema elétrico.



3.1.2. Justificativa Matemática

A metodologia consiste basicamente em eliminar as variáveis θ da formulação convencional. A idéia básica consiste em resolver para cada ramo do sistema elétrico a seguinte equação básica que está relacionada com a figura 3.1:

$$V_r^4 + [2(RP + XQ) - V_s^2] V_r^2 + (P^2 + Q^2)(R^2 + X^2) = 0 \quad (3.1)$$

onde:

s representa o nó do lado da fonte

r representa o nó do lado da carga

V_s é o módulo da tensão do nó s.

V_r é o módulo da tensão do nó r.

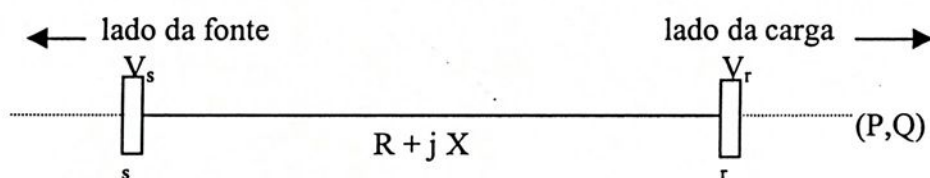


Figura 3.1. : Modelo Básico.

P representa a carga ativa

Q representa a carga reativa

Em outras palavras, conhecidos os valores de R , X , V_s , P e Q então é possível encontrar o valor de V_r usando (3.1), pois neste caso, deve-se resolver uma equação algébrica de quarta ordem redutível para uma equação algébrica de segunda ordem.

Demonstração de (3.1) :

A equação (3.1) pode ser facilmente demonstrada usando a figura 3.2.

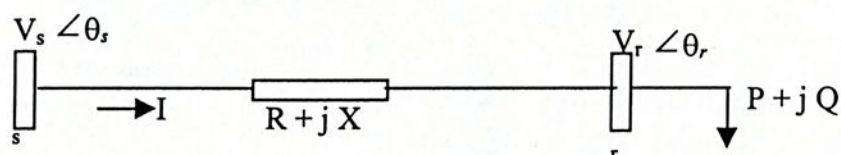


Figura 3.2 : Formulação Matemática.

A corrente elétrica no ramo pode ser representada pela seguinte relação:

$$I = \frac{V_s \angle \theta_s - V_r \angle \theta_r}{R + jX} \quad (3.2)$$

A potência da carga pode ser representada da seguinte forma:

$$S = V_r I^*$$

e assim

$$\begin{aligned} I^* &= \frac{S}{V_r} = \frac{P + jQ}{V_r \angle \theta_r} \\ I &= \frac{P - jQ}{V_r \angle -\theta_r} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Igualando (3.2) e (3.3) temos o seguinte:

$$\frac{V_s \angle \theta_s - V_r \angle \theta_r}{R + jX} = \frac{P - jQ}{V_r \angle -\theta_r}$$

$$V_s V_r \angle \theta_s - \theta_r - V_r^2 = (P - jQ)(R + jX)$$

$$V_r V_s \cos(\theta_s - \theta_r) - V_r^2 + j V_r V_s \sin(\theta_s - \theta_r) = (RP + XQ) + j(XP - RQ)$$

de onde temos as seguintes relações (igualando partes reais e imaginárias):

$$V_r V_s \cos(\theta_s - \theta_r) = RP + XQ + V_r^2 \quad (3.4)$$

$$V_r V_s \sin(\theta_s - \theta_r) = XP - RQ \quad (3.5)$$

Elevando ao quadrado (3.4) e (3.5) e somando é possível eliminar as funções trigonométricas e reagrupando os termos, temos o seguinte:

$$V_r^4 + [2(RP + XQ) - V_s^2] V_r^2 + (P^2 + Q^2)(R^2 + X^2) = 0$$

que é a equação (3.1).

Na formulação proposta P e Q representam na verdade a carga total na barra r que geralmente estão constituídos pela carga da própria barra r, as cargas de todas as barras que estão "na frente" da barra r e as perdas de todos os ramos que estão na direção da carga a partir da barra r. Em outras palavras, P e Q correspondem a valores de um equivalente exato da rede conectada à barra r.

Na formulação do algoritmo também é necessário calcular as perdas ativas e reativas em cada ramo. As perdas ativa e reativa em cada ramo são facilmente deduzidas na seguinte forma:

Perdas Ativas:

$$P_e = I^2 R$$

$$\text{mas como } I^* = \frac{P + jQ}{V_r \angle \theta_r}, \text{ então } I^2 = \frac{(P^2 + Q^2)}{V_r^2}$$

e:

$$P_e = R \frac{(P^2 + Q^2)}{V_r^2} \quad (3.6)$$

Perdas Reativas:

De maneira similar, pode-se demonstrar que:

$$Q_e = X \frac{(P^2 + Q^2)}{V_r^2} \quad (3.7)$$

3.1.3. Algoritmo Proposto

O algoritmo proposto em [21] é o seguinte:

- 1 - Ler os dados da rede incluindo os parâmetros, descrição topológica, módulo de tensão nas barras fonte e as cargas para tensão nominal.
- 2 - Assumir um módulo de tensão para cada barra que será a primeira estimativa dos módulos de tensão de barra que se deseja calcular.
- 3 - Calcular o equivalente para cada barra somando todas as cargas da parte da rede que são alimentadas através da barra que está sendo analisada incluindo as perdas. Assim, está sendo implementada uma iteração "para cima", a partir das barras extremas para a barra fonte.
- 4 - A partir da barra fonte e usando a equação (3.1), calcular a tensão de carga V_r para todas as barras. Esta é uma iteração "para baixo" iniciando da barra fonte para as barras extremas.
- 5 - Com as novas tensões recalculadas, deve-se recalculas as perdas. Se a variação das perdas totais em relação à iteração prévia é maior que uma tolerância especificada, então voltar ao passo (3). Caso contrário, calcular todos os outros resultados necessários e parar.

3.1.4. Comentários Adicionais sobre o Algoritmo de Fluxo de Carga

Pode-se verificar que o algoritmo analisado é relativamente simples na sua formulação matemática. Entretanto, a implementação computacional exige uma enumeração adequada das barras e dos ramos como é proposto por Cespedes em [21].

Este algoritmo, conhecido também como método de soma de potência, foi implementado computacionalmente e está sendo usado como uma subrotina



na resolução do problema da reconfiguração da operação de sistemas de distribuição radial usando um algoritmo de Busca Tabu.



CAPÍTULO IV

Fundamentos Teóricos de Busca Tabu

4.1. Introdução

Busca Tabu (Tabu Search, TS) foi desenvolvido através de um conjunto de princípios (funções) que, em forma integrada, permitem resolver um problema da maneira mais inteligente. Assim, TS teve sua origem em conceitos que originalmente faziam parte do campo da inteligência artificial. O princípio filosófico de Busca Tabu pode ser explicado com as próprias palavras de seu inventor F. Glover [7] que transcrevemos com pequenas modificações:

*TS está baseado na premissa de que a resolução de um problema pode ser considerada inteligente se esse processo incorpora a **memória adaptativa** e a **exploração sensível**. O uso de **memória adaptativa** contrasta com as técnicas sem memória (como Simulated Annealing (SA) e o Algoritmo Genético) e com as técnicas de memória rígida (como as técnicas de inteligência artificial e de branch and bound). De igual maneira, a idéia de **exploração sensível** em TS está inspirada na suposição de que uma escolha ruim realizada por uma estratégia produz mais informação que uma boa escolha aleatória (numa crítica evidente, por exemplo, a SA que faz escolhas aleatórias). Assim, se a estratégia que guia um algoritmo que usa memória (como TS) faz uma escolha ruim (passa a uma configuração de baixa qualidade) então, pode-se aproveitar essa informação (escolha ruim) para evitar voltar a visitar essa configuração (ruim) e, ainda melhor, para modificar (melhorar) a própria estratégia que guia o*

processo de busca para ter capacidade de encontrar ou escolher configurações de melhor qualidade.

A figura 4.1 mostra os elementos principais (funções) de TS. Portanto, as pesquisas em TS consistem em usar as funções indicadas na figura 4.1 de maneira integrada e eficiente para resolver cada problema específico levando em conta que cada uma das funções podem ser implementadas de várias formas diferentes dependendo das características do problema e do nível de sofisticação da implementação do algoritmo TS. Outra linha de pesquisa muito ativa consiste em inventar outras funções para que sejam incorporadas como parte da estrutura de TS da figura 4.1 e/ou encontrar variantes de implementação das funções mostradas na figura 4.1. Um algoritmo TS para um problema específico pode usar algumas ou todas as funções mostradas na figura 4.1 integradas das formas mais variadas. As características específicas de cada problema e a experiência do pesquisador deve determinar a forma e a qualidade do algoritmo TS implementado. É oportuno lembrar que TS nasceu somente com algumas das funções indicadas na figura 4.1.

Apresentamos brevemente a essência da lógica de trabalho de Busca Tabu. TS resolve problemas genéricos do tipo:

$$\text{Min } f(x) \quad (4.1)$$

$$\text{s.a. } x \in X$$

TS resolve (4.1) iniciando com um processo similar a qualquer algoritmo heurístico de busca local. Na busca local, de uma configuração x (solução), define-se uma vizinhança de x como sendo o conjunto de todas as configurações $x' \in N(x)$ que podem ser obtidas pela aplicação de um mecanismo de transição a partir de x . A estrutura de vizinhança define as condições para que x' seja vizinho de x . No **algoritmo de busca local**, a partir da configuração corrente, passa-se para a configuração vizinha que apresenta uma maior diminuição da função objetivo. Um procedimento repetitivo desta estratégia leva o algoritmo de busca local a parar no momento em que não existe nenhuma configuração vizinha que produza uma diminuição da função objetivo o que significa que foi encontrado um ótimo local.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE BUSCA TABU.

Memória Adaptativa

Seletividade (incluindo esquecimento estratégico)

Abstração e decomposição (usando memória explícita e por atributos)

Tempo:

Recência de eventos

Frequência de eventos

Diferenciação entre curto e longo prazo

Qualidade e impacto:

Atração relativa quanto a escolhas alternativas

Impacto de mudanças de relações em estrutura ou restrições

Contexto:

Interdependência regional

Interdependência estrutural

Interdependência seqüencial

Exploração Sensível

Imposição estratégica de proibições e induções

(condições tabu e níveis de aspiração)

Enfoque concentrado em boas regiões e em boas características das soluções

(processos de intensificação)

Caracterização e exploração de novas regiões promissoras

(processo de diversificação)

Padrões de busca não monótonos

(oscilação estratégica)

Integração e geração de novas soluções

(path relinking)

Figura 4.1: Funções de TS

TS é diferente de um algoritmo de busca local em dois aspectos fundamentais:

1. A partir da configuração corrente, passa-se à melhor configuração vizinha ou à menos pior que implica que é permitida uma degradação da qualidade da função objetivo.
2. O conjunto de vizinhos de x não se caracteriza de maneira estática. Assim, TS define uma nova estrutura de vizinhança, $N^*(x)$ que varia **dinamicamente em estrutura e tamanho** durante todo o processo de otimização. Esta estratégia permite a TS realizar uma busca eficiente e inteligente. A Figura 4.2 mostra uma relação entre $N(x)$ e $N^*(x)$.

Os elementos de $N^*(x)$ são determinados de várias formas. Como ilustração, pode-se indicar as seguintes formas:

- Usando uma lista tabu que armazena atributos de configurações consideradas tabu (proibidas). Neste caso $N^*(x) \subset N(x)$ pois alguns vizinhos definidos pela estrutura de vizinhança e cujos atributos fazem parte da lista tabu estão proibidos. Esta estratégia evita retornar a configurações já visitadas e evita a chamada ciclagem.
- Usando estratégias para diminuir a vizinhança ou a lista de configurações candidatas. Considerando que o número de configurações $x' \in N(x)$ pode ser muito grande, avaliar a função objetivo de todas essas configurações para encontrar aquela que apresenta melhor desempenho requererá elevado esforço computacional. TS contempla pelo menos 4 métodos diferentes para encontrar uma vizinhança de tamanho reduzido tal que $N^*(x) \subset N(x)$. Esta estratégia visa diminuir o esforço computacional necessário em cada transição.
- Usando configurações de elite e *path relinking* para caracterizar e encontrar novas configurações candidatas. Esta estratégia visa encontrar novas configurações de alta qualidade que dificilmente



seriam encontradas a partir da definição de $N^*(x)$. É fácil verificar que neste caso a relação $N^*(x) \subset N(x)$ já não é mais verdadeira.

- Redefinir o conjunto $N(x)$ durante o processo de otimização.

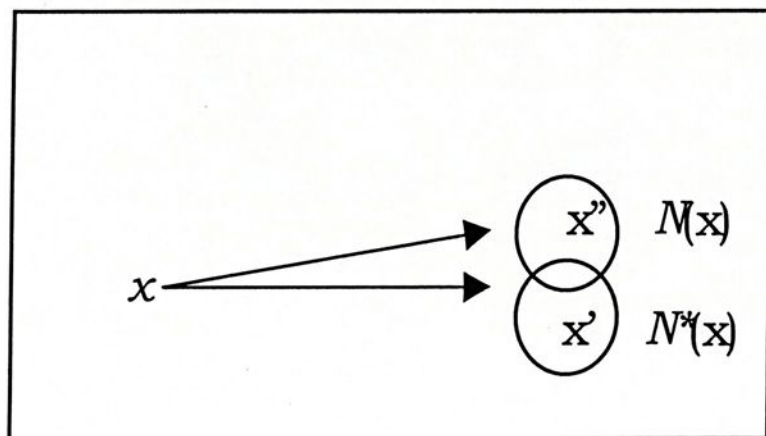


Figura 4.2 : Transição em TS

Apresentamos a seguir, as quatro principais estratégias de TS: memória de curto prazo, memória de longo prazo, oscilação estratégica e *path relinking*.

4.2. Memória de Curto Prazo e seus Principais Elementos

Um algoritmo TS pode ser implementado simplesmente usando a estratégia de curto prazo e muitas das pesquisas iniciais foram implementadas desta forma. A memória de curto prazo usa basicamente a informação de atributos de configurações que foram modificados no passado recente.

Esta informação é conhecida como memória baseada em recência (recency) ou em fatos recentes. A idéia desta estratégia é considerar todos os atributos selecionados no passado recente como sendo proibidos, portanto, todas as configurações candidatas que possuem algum dos atributos proibidos (tabu-ativos) são excluídos na conformação do conjunto $N^*(x) \subseteq N(x)$ de configurações vizinhas para avaliação.

A idéia básica da memória baseada em recência é evitar revisitar configurações já visitadas e aquelas configurações que compartilhem os atributos tabu-ativos. Esta última parte pode representar um problema, pois podem ser eliminadas de $N^*(x)$ configurações muito atrativas. O critério de aspiração contorna em parte esta limitação.

A figura 4.3 mostra uma iteração do algoritmo TS que usa memória de curto prazo sendo que uma iteração significa que, a partir da configuração corrente, deve-se avaliar todas as configurações candidatas $x' \in N^*(x)$ e escolher a melhor como sendo a nova configuração corrente.

Na parte **A** da figura 4.3 são geradas todas as configurações candidatas $x' \in N(x)$. Na parte **B** é acionada a lista tabu. Podem ser criadas uma ou várias listas tabu dependendo do tipo do problema e do nível de sofisticação do algoritmo. A lista tabu pode ser operada de duas formas: 1) uma implementação contínua que não elimina automaticamente uma configuração candidata que possui atributos proibidos; assim configurações deste tipo são penalizadas na função objetivo (ou seu equivalente) em **C** para que se tornem pouco atrativas, e 2) uma implementação discreta em que toda configuração com atributos proibidos é eliminada automaticamente. Neste último caso, deve-se eliminar o bloco **D** e da saída de **C** voltar diretamente ao bloco **A** . O número k de iterações que um atributo permanece proibido é chamado de status tabu (tabu tenure) e o tamanho de k pode variar em cada lista e durante o processo, produzindo algoritmos TS com diferentes tipos de desempenho.

No bloco **C** é implementado o chamado **critério de aspiração** cuja finalidade é fornecer maior flexibilidade ao processo. Neste caso, uma configuração que possui atributo(s) proibido(s) pode ter a proibição descartada se essa configuração satisfaz um critério de aspiração. Na verdade aqui se tenta contornar a "rigidez" da lista tabu que armazena atributos proibidos. Uma configuração candidata de excelente qualidade pode ter um atributo proibido porque comparte esse atributo com uma configuração já visitada no passado recente, assim a lista tabu pode também proibir visitar configurações novas de excelente qualidade. Este fato é contornado pelo critério de aspiração que elimina



a proibição de uma configuração candidata se ela produz uma função objetivo de boa qualidade.

Existem várias formas de definir o critério de aspiração. Obviamente, o critério mais rígido é defini-lo da seguinte forma: se uma configuração candidata produz uma função objetivo melhor que a incumbente (melhor configuração já encontrada), então deve-se eliminar a proibição e armazenar essa configuração candidata no bloco **F**.

No bloco **E** é realizada a avaliação da função objetivo (ou seu equivalente) para cada configuração candidata; no bloco **F** é armazenada a melhor configuração candidata encontrada; no bloco **G** é verificada se todas as configurações candidatas já foram analisadas e em **H** é realizada a transição em que a configuração corrente é substituída pela melhor configuração candidata, isto é, a configuração corrente é substituída pela melhor configuração candidata encontrada.

Existe um último aspecto importante no algoritmo TS com memória de curto prazo: **a diminuição do tamanho de configurações candidatas que devem ser analisadas**. Para ilustrar este fato, sejam: $N(x)$ as configurações candidatas definidas pelo critério ou a estrutura de vizinhança, $N''(x)$ um subconjunto reduzido de $N(x)$ obtido usando algum critério de redução de configurações candidatas e $N'(x)$ os elementos de $N''(x)$ que não estão proibidos pela lista tabu.

TS contorna o problema anterior de uma forma mais eficiente encontrando um subconjunto reduzido $N''(x)$ de $N(x)$. TS possui quatro estratégias para realizar este processo de redução de configurações candidatas: aspiração plus; formação de uma lista reduzida de configurações candidatas de elite; filtros sucessivos e estratégia de mudança acotada.



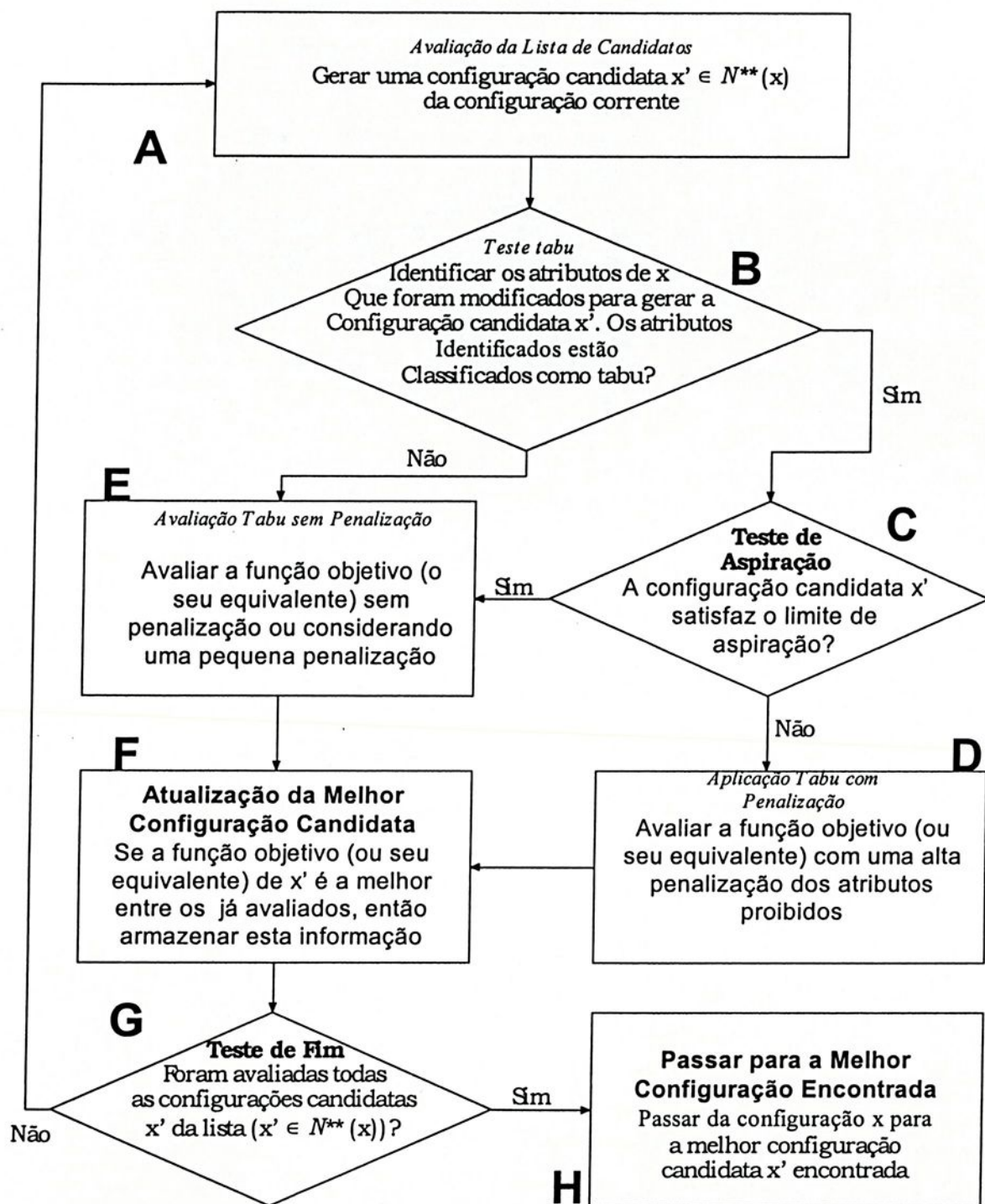


Figura 4.3: Execução de um movimento TS com memória de curto prazo.

4.3. Memória de Longo Prazo e suas Estratégias Associadas

A incorporação de uma estratégia de longo prazo fornece ao algoritmo TS uma sofisticação adicional e um desempenho melhor na maioria das aplicações. Isto significa que além da memória de curto prazo (estratégia de todo algoritmo TS básico) é incorporada uma estratégia adicional chamada de estratégia de longo prazo no algoritmo TS.

Existem três aspectos fundamentais relacionados com a memória de longo prazo: 1) a memória baseada em frequência, 2) a estratégia de intensificação, e 3) a estratégia de diversificação.

MEMÓRIA BASEADA EM FREQUÊNCIA.

A **memória baseada em frequência** consiste basicamente em armazenar a informação do número de vezes em que um atributo foi escolhido para gerar ou participar na conformação das configurações durante o processo TS. Assim existem dois tipos de memória baseadas em frequência: a **frequência de transição** que armazena o número de vezes em que um atributo é retirado ou adicionado para formar novas configurações, e a **frequência de residência ou permanência** que armazena a informação do número de vezes em que um atributo permanece nas novas configurações ou em todas as configurações geradas durante o processo TS. Esta informação baseada em frequência pode ser utilizada para penalizar ou incentivar configurações conformados com determinados atributos.

ESTRATÉGIA DE INTENSIFICAÇÃO.

A **estratégia de intensificação** consiste em mudar os critérios de seleção das novas configurações candidatas, isto é, mudar $N^{**}(x)$ (ou $N^*(x)$) para incentivar a formação de novas configurações aproveitando a informação acumulada no processo TS. Intensificação pode ser implementada de várias formas diferentes tais como:



- Eliminando vizinhos ou incorporando novos vizinhos x' para a configuração corrente x , tipicamente considerando configurações de elite ou configurações com esses atributos como sendo “vizinhos” de x .
- Modificando a caracterização de configuração vizinha, isto é, redefinindo o conjunto $N(x)$.
- Retornando a regiões atrativas para realizar uma busca mais intensa na vizinhança dessas regiões atrativas. A figura 4.4 mostra uma estratégia para esta alternativa.
- Realizando intensificação por decomposição.

As duas primeiras alternativas dispensam comentários adicionais. Na intensificação retornando a regiões atrativas, mostrada na Figura 4.4, a parte mais importante é o bloco **B** identificado como **estratégia de seleção de configurações de elite**. Este bloco identifica a estratégia que deve ser implementada para encontrar um conjunto de configurações de elite em que cada uma delas identifica uma região promissora. Assim, a partir de cada uma das configurações de elite armazenadas na lista, deve-se implementar um novo processo de busca de excelentes configurações guiado por uma estratégia TS de memória de curto prazo como mostra o bloco **D**.

Existem três estratégias para encontrar as k configurações de elite que devem ser armazenadas na lista do bloco **B**:

- Introduzir alguma forma de diversificação para encontrar e armazenar configurações significativamente diferentes; apagar toda a memória de curto prazo e reiniciar o processo a partir da última configuração armazenada.
- Formar e manter uma lista de tamanho especificado, e adicionando uma nova configuração como último elemento da lista somente se ela é melhor que alguma configuração já armazenada. O último elemento da lista sempre é o primeiro escolhido para reiniciar a busca. Neste caso, é



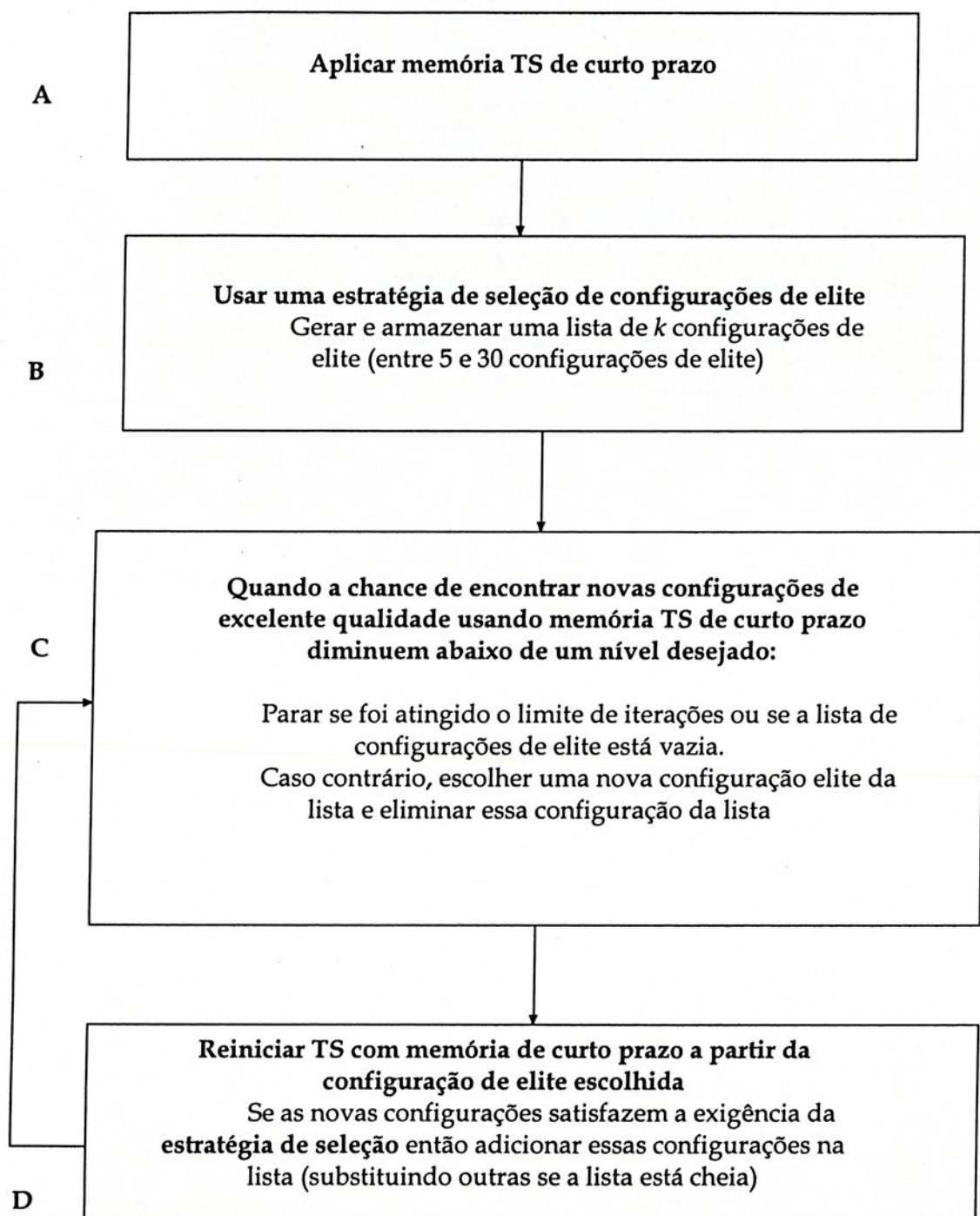


Figura 4.4: Implementação simples de intensificação em TS

necessário armazenar a memória de curto prazo da última configuração armazenada para evitar retorno a essa configuração.

- Uma terceira variante consiste em construir e manter em forma ordenada, uma lista com as k melhores configurações encontradas durante um número determinado de iterações. Depois o processo é reiniciado, durante um número de iterações especificado, com a pior configuração e usando busca tabu probabilística para evitar retornar à mesma configuração. Durante este processo, qualquer configuração que seja melhor que a pior da lista deve ser incorporada na lista substituindo a pior configuração e colocada em forma ordenada na lista de acordo com o valor de sua função objetivo.

Outro tipo de intensificação é a técnica de **intensificação por decomposição** que consiste em impor novas restrições sobre atributos, estruturas ou partes do problema visando diminuir o espaço de configurações do problema.

ESTRATÉGIA DE DIVERSIFICAÇÃO.

A estratégia de diversificação foi projetada para levar o processo de busca para regiões novas e atrativas. Esta estratégia é implementada mudando a definição de vizinhança ou de configurações candidatas $N(x)$, incorporando "vizinhos" constituídos por atributos que foram pouco usados. Nesta parte podem ser usadas as estruturas de memória usadas em intensificação ou em memória de curto prazo, mas com critérios de duração modificados. A Figura 4.5 mostra uma estratégia simples de **diversificação** que mantém uma **memória baseada em frequência** sobre todo o passado do processo.

São obtidas melhorias significativas com a aplicação de TS com memória de curto prazo da figura 4.5. Os ótimos locais obtidos com esta técnica podem ser usados depois para uma seqüência de diversificação.

As estratégias de diversificação podem também usar uma forma de **memória de longo prazo baseada em recência** visando incrementar o estado tabu dos atributos das configurações visitadas. Uma versão simples desta metodologia é apresentada na Figura 4.6.



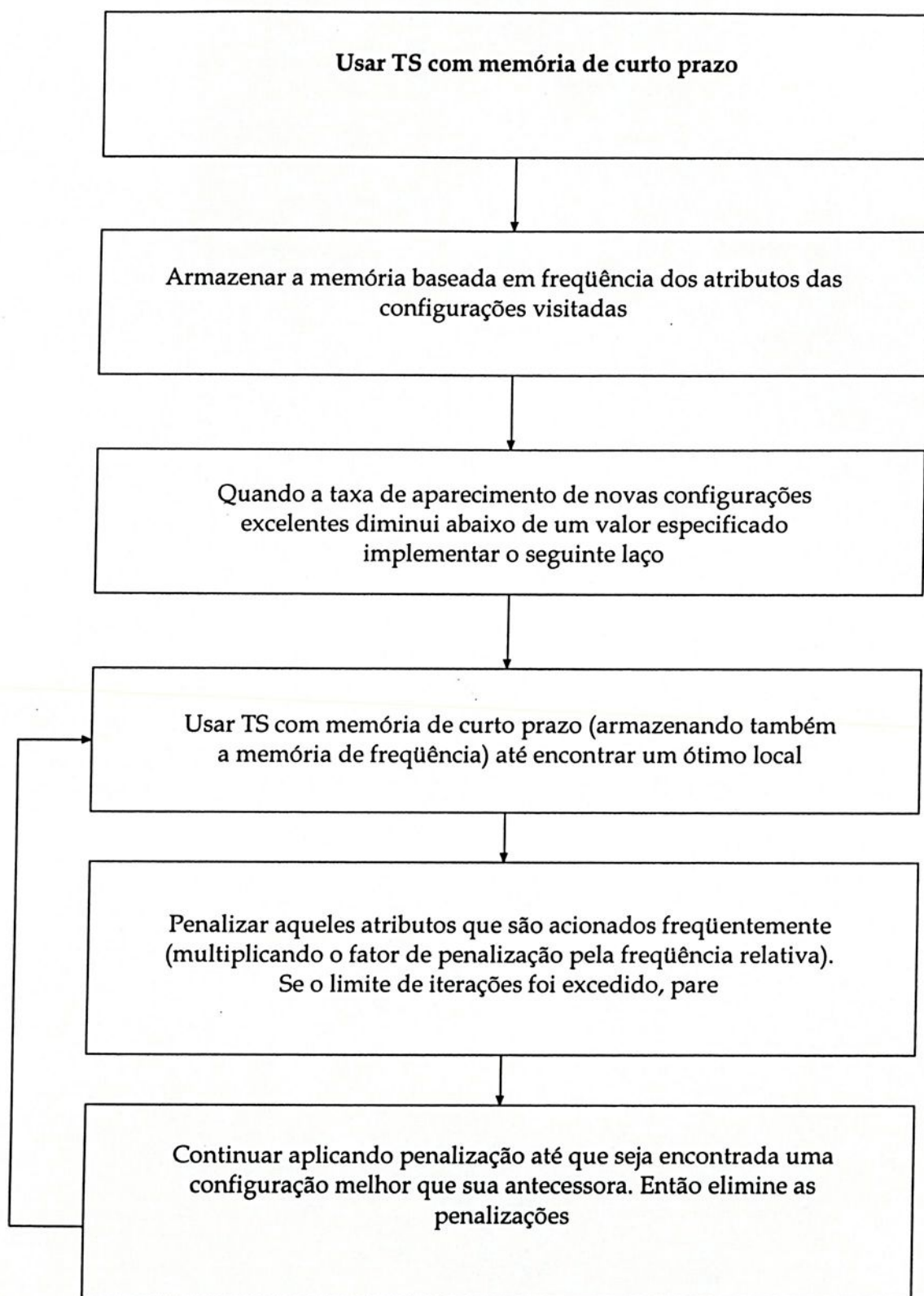


Figura 4.5: Implementação simples de diversificação em TS

4.4 Oscilação Estratégica

Oscilação estratégica fornece um excelente mecanismo para realizar uma interação entre intensificação e diversificação a médio ou longo prazo. Esta técnica opera quando é atingido um nível crítico em que o método TS normalmente pararia. Assim, antes de parar após atingido o nível crítico, pode-se mudar as regras de escolha de novas configurações candidatas (mudar $N(x)$) para ficar fora do limite do nível crítico. Uma vez passado o nível crítico, muda-se novamente as regras de escolha de configurações candidatas tanto no afastamento como no retorno ao nível crítico. Um processo repetitivo desta estratégia produz um movimento oscilatório em torno do nível crítico.

4.5 Path Relinking

Path Relinking permite uma interessante integração entre intensificação e diversificação. Esta estratégia permite encontrar novas configurações usando as trajetórias que “unem” configurações de elite. Nesta estratégia é escolhida uma configuração de elite chamada de configuração base e uma ou várias configurações de elite chamadas de configurações guia. Assim, pode-se obter novas configurações a partir da configuração base, incorporando atributos presentes nas configurações guia. As configurações, assim obtidas, podem ser usadas para intensificação ou diversificação dependendo da quantidade de atributos incorporados na configuração base.

A idéia de *path relinking* é obter configurações constituídas por atributos de excelente qualidade pertencentes a configurações de alta qualidade. Assim, na implementação de *path relinking* para encontrar uma configuração atrativa para continuar o processo, em cada passo é escolhido, de maneira preferencial, o atributo mais atrativo presente nas configurações guia e usando os critérios usuais de TS.

Na implementação de *path relinking*, uma vez definida a configuração base (inicial) e as configurações guia de elite, deve-se continuar o processo TS na forma usual, mas induzindo à escolha de atributos presentes nas configurações de elite. Este efeito é obtido tipicamente dando uma ponderação especial aos



atributos presentes nas configurações de elite “forçando” sua escolha em relação aos atributos que não se encontram presentes nas configurações guia.

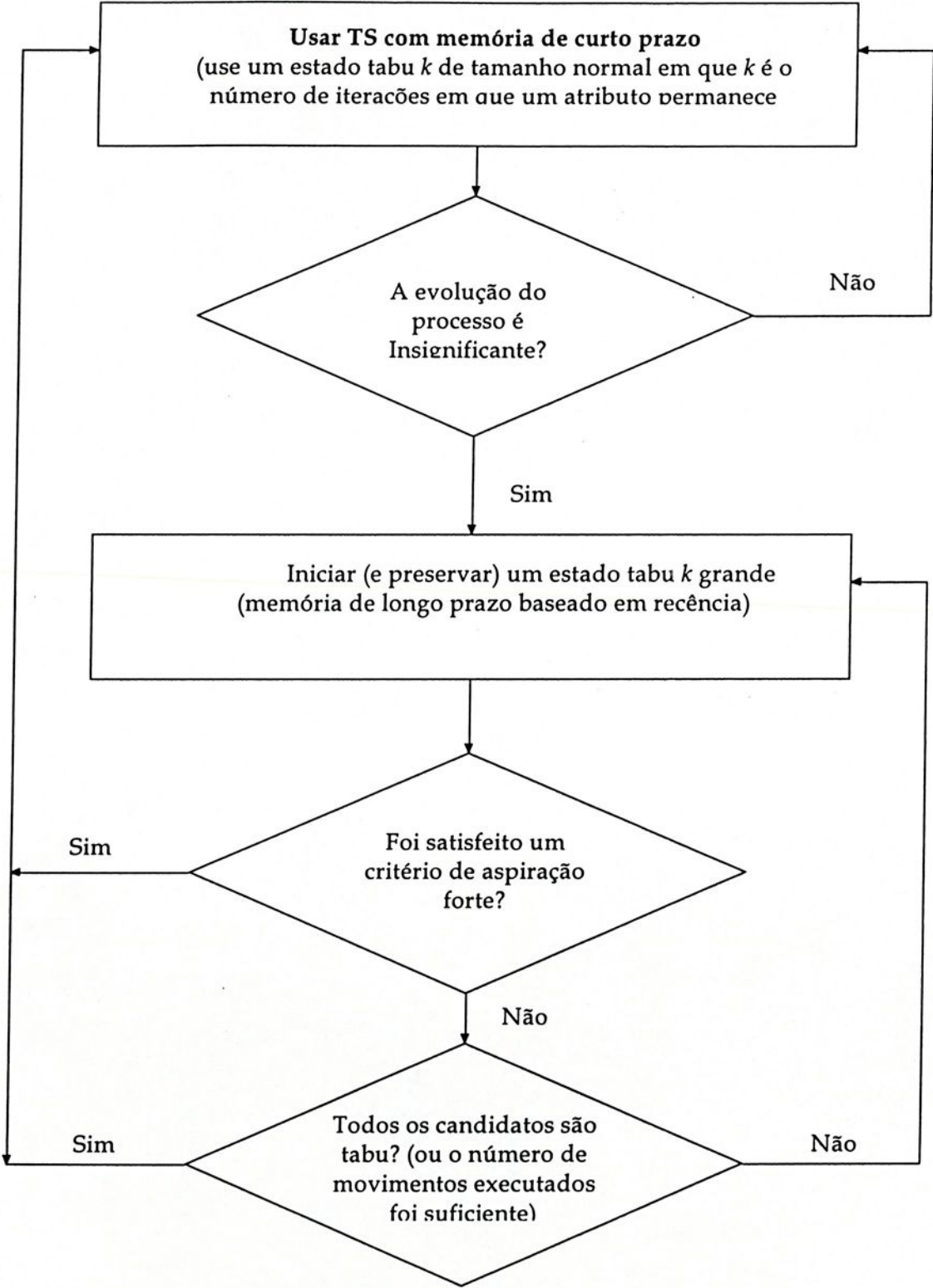


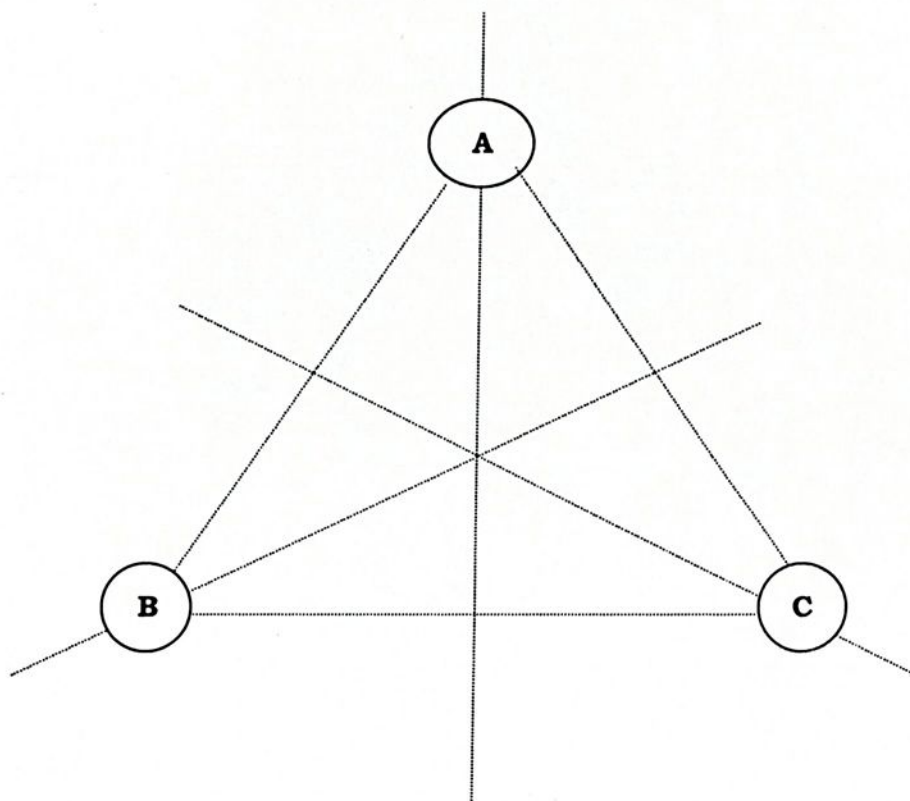
Figura 4.6: Diversificação usando memória de longo prazo baseado em recência.

Neste contexto, implementar *path relinking* significa fazer uma mudança na caracterização da vizinhança $N(x)$ onde as configurações candidatas que possuem atributos presentes nas configurações guia recebem ponderação especial, por exemplo, incentivando sua função objetivo.

As funções da configuração base e da configuração guia podem ser trocadas nas configurações de elite e, portanto, as configurações de elite que participam em *path relinking* são denominadas simplesmente de **configurações referenciais**. A Figura 4.7 mostra uma forma de implementar *path relinking* onde são mostradas três configurações de elite e uma delas pode ser usada como configuração guia. As trajetórias que podem ser formadas pelas configurações geradas não são mostradas na figura, mas essas trajetórias geralmente devem ser mais complexas.

Path relinking também pode ser usada para gerar novas configurações de uma maneira mais rápida. Assim, pode-se incorporar na configuração base e numa única operação todos os atributos considerados atrativos e presentes nas configurações guia. Dependendo da quantidade de atributos incorporados, a configuração assim obtida pode ser usada para intensificação ou diversificação. Outra estratégia é produzir uma configuração para realizar intensificação usando configurações de elite que possuem muitos atributos parecidos ou então produzir uma configuração para diversificação usando configurações de elite que possuem atributos significativamente diferentes.





Intensificação : Gera trajetórias a partir de configurações similares

Diversificação: Gera trajetórias a partir de configurações muito diferentes

Aspiração: Gera desvios através de trajetórias em vizinhos atrativos

Figura 4.7: Path Relinking em TS.

CAPÍTULO V

ALGORITMO BUSCA TABU USADO NO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS

5.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o algoritmo busca tabu para o problema da reconfiguração sistemas de distribuição. Inicialmente são discutidas as características básicas do algoritmo busca tabu proposto e suas diferenças em relação a outras propostas que usam algoritmos combinatoriais (simulated annealing e algoritmo genético) para este tipo de problema. Também são apresentadas propostas específicas em outras partes importantes do algoritmo tais como na determinação de uma configuração inicial de excelente qualidade na versão preliminar assim como na determinação de um conjunto de configurações iniciais para serem usadas em versões mais sofisticadas do algoritmo TS. Outras propostas estão relacionadas com o uso de indicadores de sensibilidade e/ou estratégias heurísticas para identificar topologias (configurações) atrativas e este fato está relacionado com a identificação de vizinhos de grande qualidade.

Sabe-se que um dos principais problemas dos algoritmos TS de caráter geral é o tamanho da vizinhança, isto é, o número relativamente elevado de vizinhos da configuração corrente. Assim, em cada passo do algoritmo TS , deve-se analisar (encontrar) a função objetivo de cada um dos vizinhos da configuração corrente. No problema da reconfiguração, analisar um vizinho significa resolver um problema de fluxo de carga radial, portanto, o número de vizinhos da



configuração corrente não deve ser muito grande, pois cada um deles deve ser analisado resolvendo um problema de fluxo de carga radial. A bibliografia de TS apresenta várias propostas para contornar este problema, mas todas elas apresentam desempenho limitado para problemas aplicados a engenharia. Portanto, apresentamos uma forma diferente de definir e encontrar vizinhos de grande qualidade e de tamanho reduzido. Esta proposta de encontrar vizinhos altamente atrativos, aproveita o uso de indicadores de sensibilidade usados por métodos heurísticos aplicados ao problema da reconfiguração no passado. Na verdade, tenta-se aproveitar as melhores propostas dos métodos aproximados em diferentes partes do algoritmo TS.

Para analisar o desempenho da versão do algoritmo TS proposto a função objetivo considerada é a redução de perdas da operação do sistema.

O modelo matemático da reconfiguração de sistemas de distribuição é um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM) e que adicionalmente apresenta o fenômeno da explosão combinatorial. A resolução deste problema é muito difícil usando as técnicas tradicionais de otimização matemática sendo um dos problemas complicantes a restrição de radialidade. Entretanto, se existe uma proposta de solução (uma topologia, isto é, uma proposta que especifica os ramos que devem estar em operação e os ramos que devem permanecer inativos) então, simplesmente através da resolução de um problema de fluxo de carga radial é possível saber se esta proposta de solução é factível (não apresenta violações das restrições de operação) e a qualidade dessa proposta de solução, pois a função objetivo (as perdas) pode ser facilmente calculada. Essa é a filosofia básica de praticamente todos os algoritmos combinatoriais. Assim, TS inicia o processo a partir de uma proposta de solução (uma topologia radial e que satisfaz as outras restrições de operação tais como os limites de corrente e de tensão elétrica) e a partir dela realiza um processo de transição visitando em cada passo uma nova proposta de solução que deve ser necessariamente uma topologia radial.

No processo de transições existem duas estratégias diferentes: 1) realizar transições somente entre configurações factíveis e, 2) realizar transições entre configurações factíveis e/ou infactíveis e neste caso, deve-se penalizar



adequadamente as infactibilidades na função objetivo. Para o caso do problema da reconfiguração em ambas propostas, deve-se satisfazer a restrição de radialidade e as infactibilidades estariam relacionadas apenas com as outras restrições (limites sobre correntes e tensões elétricas). Na presente pesquisa, deve-se implementar a estratégia de transições entre configurações factíveis. Esta decisão está baseada na experiência prática que mostra que na maioria dos sistemas de distribuição radial analisados, praticamente a grande maioria das topologias analisadas são infactíveis e as poucas factíveis que aparecem são pouco atrativas.

O algoritmo TS se torna eficiente se nesse processo de transições são visitadas as configurações de melhor qualidade e, eventualmente, nesse processo de transições pode ser visitada a solução (configuração) ótima global. Em outras palavras, um algoritmo TS deve visitar um número muito reduzido de configurações do espaço de configurações e, logicamente, deve existir uma estratégia adequada para visitar as configurações mais atrativas. Neste capítulo é apresentada uma proposta de um algoritmo TS aplicado ao problema da reconfiguração da operação de sistemas de distribuição.

5.2 Características Básicas do Algoritmo TS para o Problema da Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais

Apresenta-se, em forma separada, as principais características do algoritmo TS implementado para o problema em questão e, em cada caso, é realizada a análise comparativa com outras pesquisas que usam algoritmos combinatoriais e com propostas genéricas apresentadas na teoria de TS.

5.2.1 Determinação da Configuração Inicial

Os algoritmos combinatoriais (simulated annealing, algoritmo genético e TS) apresentados em [7,19] geram a configuração inicial (ou o conjunto de configurações iniciais) de maneira aleatória. Esta estratégia, de gerar configurações iniciais aleatoriamente, está baseada em análises teóricas desses algoritmos que estipulam que “a qualidade da configuração final ou a melhor configuração encontrada não depende da configuração inicial de partida”. Mas, a



premissa anterior é verdadeira em testes experimentais de problemas reais para um número proibitivo de configurações que devem ser visitadas. Este fato foi verificado em várias aplicações de algoritmos combinatoriais aplicados a problemas de engenharia e especialmente em engenharia elétrica.

Para determinar a configuração inicial foi usado um dos algoritmos heurísticos mais interessantes, de fácil implementação e muito rápido. Esse algoritmo apresentado em [10] e amplamente analisado no capítulo 2 é conhecido como o algoritmo de Civanlar.

O algoritmo de Civanlar, usando um pouco os conceitos de TS, consiste num processo de transições a partir de uma configuração inicial que se transforma na chamada configuração corrente. Em cada transição, identifica-se as configurações vizinhas da configuração corrente. Configuração vizinha, segundo Civanlar, é toda configuração que pode ser obtida quando é executada uma das opções de chaveamento. Uma opção de chaveamento consiste na entrada de um ramo inativo do sistema e na saída de um ramo do laço correspondente ao ramo inativo. Assim, para um laço identificado por um ramo inativo existem várias configurações vizinhas, geralmente um número de configurações vizinhas igual ao número de ramos inativos nesse laço. Assim, por exemplo, para a configuração mostrada na figura 2.1, existem 3 ramos inativos e 15 configurações vizinhas.

Uma primeira proposta de Civanlar seria diminuir o número de configurações vizinhas que devem ser analisadas. Assim, se num laço identificado pelo ramo inativo que está entre as barras m e n , e após resolver o fluxo de carga para a configuração corrente foi verificado que $|E_m| < |E_n|$, então todas as configurações geradas com ramos que estão para o lado de $|E_m|$ são eliminadas porque são consideradas pouco atrativas. Esta proposta reduz o número de configurações vizinhas de 15 para 8, no caso da configuração mostrada na figura 2.1.

A Segunda proposta de Civanlar é encontrar as perdas para as configurações vizinhas que ainda permanecem como candidatas após a redução do número de configurações vizinhas. Calcular as perdas exatas de cada configuração candidata implica em resolver um fluxo de carga radial para cada



configuração candidata. Civanlar sugere calcular a redução de perdas de cada configuração candidata em relação à configuração corrente simplesmente em forma aproximada e usando o resultado de fluxo de carga da configuração corrente. Assim, estas reduções de perdas aproximadas são calculadas usando a equação (2.8). Portanto, para a configuração mostrada na figura 2.1, deve-se usar (2.8) oito vezes para calcular a redução de perdas de cada uma das 8 configurações candidatas. Aquela configuração candidata factível que apresenta uma máxima redução de perdas é a melhor configuração vizinha, portanto, deve-se passar para essa melhor configuração vizinha que se transforma na nova configuração corrente e foi completada uma transição. O processo de transições é repetido até que se encontre uma configuração corrente em que todas as configurações vizinhas são de pior qualidade o que identifica uma configuração de ótimo local (ou ocasionalmente de ótimo global). Resumindo, em cada passo do algoritmo de Civanlar é resolvido um fluxo de carga radial exato e um número reduzido de cálculos de perdas obtidas em forma aproximada usando a equação (2.8), portanto, é um algoritmo muito rápido e relativamente simples de ser implementado.

O algoritmo de Civanlar, que aqui é usado para encontrar uma boa configuração inicial factível, pode ser resumido na seguinte forma:

1. Iniciar o processo com uma configuração inicial radial e factível que é transformada em configuração corrente;
2. Processar um fluxo de carga radial exato para a configuração;
3. Usando cada uma das opções de chaveamento, identificar todas as configurações vizinhas da configuração corrente;
4. Usando os resultados do fluxo de carga exato (os módulos de tensão), reduzir o número de configurações vizinhas;
5. Usando a fórmula simplificada, encontrar a redução de perdas de cada uma das configurações do conjunto reduzido de configurações vizinhas;



6. Identificar a configuração vizinha factível que apresenta a maior redução de perdas (calculadas em forma aproximada) e transformar essa configuração na nova configuração corrente implementando a correspondente opção de chaveamento e voltar a (2). Caso contrário, isto é, se todas as configurações candidatas produzem um incremento das perdas, então pare o processo porque foi identificado um ótimo local (ou global).

Em versões mais sofisticadas de algoritmo TS, pode-se ainda usar um conjunto de configurações iniciais. Entretanto, pode-se comentar que é possível obter um conjunto de configurações iniciais usando um algoritmo aproximado como o de Civanlar incorporando algumas estratégias adicionais para encontrar um conjunto de configurações atrativas e diferentes e/ou usando outros algoritmos aproximados rápidos.

5.2.2. Uso de Indicadores de Sensibilidade

Os indicadores de sensibilidade, isto é, a obtenção de determinados parâmetros que quantificam o desempenho do sistema quando realizadas pequenas modificações no sistema são amplamente usados na resolução de problemas convexos usando algoritmos aproximados. Tradicionalmente um indicador de sensibilidade identifica o vizinho mais atrativo da configuração corrente e o algoritmo aproximado sugere transformar em configuração corrente aquela configuração vizinha mais atrativa.

Na presente pesquisa, os indicadores de sensibilidade são amplamente usados em várias partes do algoritmo TS proposto e, a principal utilização está na determinação de um número reduzido de configurações vizinhas. Assim, ao contrário de outros algoritmos combinatoriais que usam uma estrutura de vizinhança tradicional, sugere-se uma forma mais eficiente de determinação de configurações vizinhas, isto é, um número reduzido de configurações vizinhas, mas de excelente qualidade. Nesta seção, são analisados os indicadores de sensibilidade de três algoritmos aproximados e que são reconhecidos como



eficientes em problemas de reconfiguração da operação de sistemas de distribuição radial. Esses algoritmos foram apresentados em [3,10,12].

No algoritmo de Civanlar é usado um indicador de sensibilidade para reduzir o número de vizinhos candidatos. Esta estratégia usa os módulos de tensão entre os extremos de um ramo inativo para eliminar várias configurações que são obtidas ativando esse ramo inativo e retirando algum ramo do correspondente laço identificado pelo inativo. Finalmente, é usado outro indicador de sensibilidade, isto é, a redução de perdas aproximadas correspondentes a cada configuração vizinha para identificar a melhor configuração vizinha candidata. Assim, uma transição no algoritmo de Civanlar, isto é, a passagem de uma configuração corrente para a nova configuração corrente é gerenciada por dois indicadores de sensibilidade.

O algoritmo de Baran-Wu [3] também usa indicadores de sensibilidade. Este algoritmo é reconhecido como sendo um algoritmo heurístico eficiente. O algoritmo de Baran-Wu, para um sistema com k ramos abertos e usando um pouco a terminologia TS assume a seguinte forma:

1. Iniciar o processo com uma configuração inicial radial e factível que é transformada em configuração corrente;
2. Processar um fluxo de carga radial exato para a configuração corrente;
3. Usando cada uma das opções de chaveamento, identificar todas as configurações vizinhas da configuração corrente e avaliar o desempenho dessas configurações vizinhas da seguinte forma:

Para cada ramo aberto b fazer o seguinte:

- (a) Identificar a melhor configuração que pode ser obtida usando a troca de ramos no laço identificado pelo ramo aberto b , isto é, a melhor configuração obtida quando o ramo b é ativado e um ramo desse laço é aberto;

(b) Calcular a redução de perdas da melhor configuração identificada em (a).

4. Das k configurações, cuja redução de perdas foi obtida em (3), escolher a melhor configuração que é aquela configuração factível que produz a maior redução de perdas que passa a ser a nova configuração corrente e voltar ao passo 2. Caso contrário, isto é, se nenhuma das configurações vizinhas produz uma redução de perdas (diminuição na função objetivo), então pare o processo porque foi identificada uma configuração local (ou global).

Pode-se comentar uma iteração do algoritmo de Baran-Wu usando a figura 2.1. O passo 2 exige processar um fluxo de carga radial exato. No passo 3, deve-se avaliar o desempenho de 15 configurações candidatas. O ramo aberto 15 identifica 5 configurações vizinhas, mas um indicador de sensibilidade elimina 4 dessas configurações e somente a mais atrativa é preservada para análise posterior. De maneira similar são eliminadas 3 das 4 configurações obtidas pelo ramo aberto 21 e cinco das 6 configurações obtidas no laço identificado pelo ramo aberto 26. Em outras palavras, um indicador de sensibilidade elimina 12 das 15 configurações vizinhas (candidatas) e somente $k = 3$ configurações permanecem candidatas. Um outro indicador de sensibilidade, um fluxo de carga aproximado, permite identificar a melhor das 3 configurações vizinhas remanescentes. Assim, o passo 3 exige um esforço computacional correspondente a $k = 3$ fluxos de carga aproximados. Portanto, a melhor configuração vizinha identificada se transforma na nova configuração corrente e foi terminada uma transição.

O indicador de sensibilidade do algoritmo de Baran-Wu aparece no passo 3 em que um fluxo de carga aproximado simplificado (muito rápido) encontra a melhor configuração vizinha do laço identificado por um laço aberto. Assim, para um sistema com k ramos abertos, identifica k configurações vizinhas altamente atrativas. Finalmente, um outro indicador de sensibilidade, que é outro fluxo de carga aproximado (ou exato) identifica a melhor configuração vizinha da configuração corrente dentre as k configurações atrativas. Assim, por exemplo, para a configuração da figura 2.1, a configuração corrente possui 15 configurações vizinhas e um primeiro indicador de sensibilidade muito rápido



elimina 12 dessas configurações vizinhas e outro indicador de sensibilidade mais exato escolhe (identifica) a melhor configuração dentre as três configurações vizinhas remanescentes. Pode-se verificar que a diferença fundamental entre os algoritmos de Civanlar e Bara-Wu está no tipo de indicador de sensibilidade. Logicamente, em geral, ambos algoritmos podem identificar configurações diferentes como sendo "a melhor configuração vizinha", pois os indicadores de sensibilidade são de natureza heurística.

O algoritmo de Goswami-Basu [12] é outro algoritmo heurístico reconhecido como eficiente na reconfiguração da operação de sistemas de distribuição radial. Este algoritmo também usa um indicador de sensibilidade chamado de "padrão de fluxo ótimo". O algoritmo de Goswami-Basu, para um sistema com k ramos abertos e usando um pouco a terminologia de TS assume a seguinte forma:

1. Iniciar o processo com uma configuração inicial radial e factível que é transformada em configuração corrente;
2. Processar um fluxo de carga radial exato para a configuração corrente;
3. Identificar uma opção de chaveamento atrativa:

Ordenar os ramos abertos formando uma lista ordenada e usando algum critério, por exemplo, escolhendo primeiro o ramo aberto que apresenta maior diferença de potencial na solução do fluxo de carga da configuração corrente. Para os ramos da lista, fazer o seguinte:

- (a) Identificar o ramo aberto da lista que deve ser analisado. Se todos os ramos abertos da lista já foram analisados, então pare o processo porque não existe uma melhor configuração vizinha da configuração corrente. Caso contrário, vá para (b).
- (b) Ativar o ramo aberto selecionado para fazer um laço. Analisar o laço calculando os valores de tensão nos nós do laço formado e os fluxos de corrente nos ramos laterais do laço. Estes novos

valores de tensão e corrente são calculados no processo iterativo.

- (c) Usando os resultados obtidos em (b), resolver o problema de padrão de fluxo ótimo para o laço em questão e identificar o ramo que leva o menor fluxo de corrente. Se o ramo identificado pelo padrão de fluxo ótimo for diferente do ramo aberto que foi fechado para construir o laço, então foi identificada uma configuração vizinha altamente atrativa e, deve-se aceitar essa opção de chaveamento para obter a nova configuração corrente e voltar ao passo 2. Caso contrário, isto é, se o ramo identificado pelo padrão de fluxo ótimo e o ramo que estava inicialmente aberto for o mesmo, então essa proposta de configuração é rejeitada e, deve-se voltar a (a) para analisar o próximo laço.

O algoritmo de Goswami-Basu também usa os indicadores de sensibilidade para identificar uma configuração vizinha atrativa. A diferença fundamental com os outros dois algoritmos heurísticos é que este, não necessariamente analisa todas as configurações vizinhas, isto é, se o algoritmo encontra uma configuração melhor que a corrente, então executa a transição.

O algoritmo de Goswami-Basu analisa as configurações vizinhas por grupos. Todas as configurações obtidas fechando um ramo aberto e abrindo cada um dos ramos do laço são analisadas simultaneamente identificando a melhor configuração desse conjunto. Se essa configuração é melhor que a corrente, então é implementada a transição sem analisar outras configurações obtidas fechando, separadamente, os outros ramos abertos. A melhor configuração vizinha é encontrada usando um indicador de sensibilidade chamado de "padrão de fluxo ótimo".

s indicadores de sensibilidade usados nos três algoritmos analisados anteriormente são usados pelo algoritmo TS para identificar um número reduzido, mas de grande qualidade, de configurações vizinhas da configuração corrente. Esta estratégia é apresentada na próxima seção .



5.2.3. Estratégia de Redução de Vizinhos

Em TS, uma configuração corrente possui um conjunto de vizinhos candidatos e TS deve passar ao melhor vizinho não proibido. Na formulação básica, TS deve analisar todos os vizinhos para identificar a melhor configuração vizinha não proibida; assim, realizar um passo TS seria excessivamente trabalhoso. Portanto, um algoritmo TS eficiente deve encontrar uma estratégia para reduzir o número de vizinhos e analisar somente uma parcela de vizinhos preferencialmente, os vizinhos mais interessantes. Para determinados problemas pode ser muito difícil encontrar uma estratégia adequada para identificar e analisar vizinhos altamente atrativos. Pesquisas recentes sobre teoria em TS [7,19,20] apresentam propostas de caráter geral para reduzir o número de vizinhos candidatos. Entretanto, as propostas de caráter geral ainda são pouco eficientes e para problemas específicos é muito mais eficiente a implementação de formas especializadas de redução de vizinhos candidatos. No algoritmo TS proposto aplicamos indicadores de sensibilidade usados por algoritmos heurísticos que mostram desempenho satisfatório na solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição radial, tipicamente os três algoritmos analisados na seção anterior, para identificar um número reduzido de configurações vizinhas altamente atrativas.

Usamos uma estratégia específica aplicando adequadamente os indicadores de sensibilidade dos três algoritmos heurísticos analisados anteriormente para determinar as configurações vizinhas da configuração corrente. Assim, são consideradas vizinhas da configuração corrente as seguintes configurações:

- Todas as configurações que satisfazem o primeiro indicador de sensibilidade do algoritmo de Civanlar, isto é, para cada laço analisado todas as configurações obtidas com os ramos que estão para o extremo do nó aberto com maior módulo de tensão (primeiro critério de sensibilidade de Civanlar);



- As k configurações identificadas pelo primeiro indicador de sensibilidade do algoritmo de Baran-Wu que identifica a melhor configuração de cada laço identificado por cada um dos k ramos abertos;
- As k configurações que poderiam ser identificadas usando um indicador de sensibilidade do algoritmo de Goswami-Basu, isto é, usando o padrão de fluxo ótimo para cada um dos laços identificados pelos k ramos aberto.

A estratégia anterior garante a escolha de um conjunto de configurações pequeno e potencialmente muito atrativas. É evidente que esta estratégia de determinação de um número reduzido de vizinhos candidatos é muito mais eficiente que todas as propostas de redução de vizinhos apresentadas na teoria de TS [9]. Esta estratégia de determinação de um número reduzido de vizinhos candidatos usando indicadores de sensibilidade de algoritmos heurísticos consagrados foi usada com sucesso em outro problema complexo de engenharia elétrica [18].

É evidente também que a estratégia de obtenção de um número reduzido de vizinhos candidatos usando indicadores de sensibilidade dos três algoritmos mencionados anteriormente deve produzir um algoritmo superior a cada um dos três algoritmos em termos de qualidade final da configuração encontrada, mas, logicamente, com um esforço computacional maior.

Em cada transição, o algoritmo TS deve analisar cada uma das configurações vizinhas (um número reduzido na proposta apresentada) e passar para a melhor configuração vizinha não proibida ou que satisfaz o critério de aspiração. Esta parte do algoritmo é analisada na seção posterior.

5.2.4. Avaliação das Configurações Vizinhas

Uma vez determinado o número reduzido de vizinhos candidatos, deve-se encontrar a função objetivo (perdas) de cada uma dessas configurações e implementar a transição passando para a melhor configuração, desde que essa



configuração não possua um atributo proibido ou estando proibida, satisfaça o critério de aspiração. Entretanto, calcular a variação exata de perdas entre a configuração corrente e uma configuração candidata implica em resolver um fluxo de carga radial exato para a configuração vizinha. Outra alternativa é encontrar a variação de perdas usando fórmulas aproximadas ou um fluxo de carga aproximado muito rápido na tentativa de diminuir o esforço computacional. Analisamos o desempenho de duas estratégias para calcular a variação de perdas (variação da função objetivo) entre a configuração corrente e uma configuração vizinha. Essas duas estratégias são as seguintes:

- Calcular a variação das perdas em forma aproximada usando o segundo indicador de sensibilidade do algoritmo de Civanlar (usando uma fórmula aproximada para calcular a variação das perdas) ou o segundo indicador de sensibilidade do algoritmo de Baran-Wu (um algoritmo de fluxo de carga simplificado muito rápido).
- Usando um algoritmo de fluxo da carga radial exato.

A escolha de uma das alternativas como sendo a mais adequada está vinculada ao esforço computacional. A primeira proposta é muito mais rápida, mas pode levar a decisões não adequadas decorrentes das aproximações no cálculo aproximado das perdas e a segunda proposta pode elevar de maneira significativa o esforço computacional do processo. Na presente pesquisa, deve-se analisar ambas propostas para identificar aquela que apresenta melhor desempenho. Com todas as propostas mostradas já é possível apresentar o algoritmo TS para o problema da reconfiguração da operação de sistemas de distribuição radial.

Levando em conta os aspectos teóricos de TS e um conjunto de aspectos práticos de implementação de TS para problemas de engenharia como os apresentados anteriormente, é proposto um algoritmo TS para o problema da reconfiguração da operação de sistemas de distribuição radial. Esta parte do algoritmo é mais amplamente apresentada na próxima seção.



5.3. Algoritmo Busca Tabu Proposto

Foi implementado um algoritmo de duas fases em que a primeira fase corresponde a uma estratégia heurística e a segunda fase corresponde a uma estratégia de TS. A seguir, são apresentadas as duas estratégias separadamente e depois o algoritmo integrado proposto.

5.3.1. Fase I: Estratégia Heurística

A idéia básica é encontrar uma configuração inicial factível e de boa qualidade (ou um conjunto de configurações iniciais factíveis atrativas e significativamente diferentes) que permita iniciar a estratégia TS que é melhor do que partir de uma configuração gerada aleatoriamente. Esta idéia apresentou excelentes resultados num outro problema complexo de sistemas de potência [18].

Esta parte do algoritmo é realizada implementando o algoritmo de Civanlar como já foi mencionado anteriormente. Entretanto, em versões mais sofisticadas, pode-se usar um conjunto de configurações (por exemplo na implementação paralela de um algoritmo TS) e nesse caso é possível encontrar um conjunto de configurações diferentes e de excelente qualidade implementando uma variante do algoritmo heurístico de Civanlar e/ou implementando vários algoritmos heurísticos na fase I. Assim, por exemplo, pode-se encontrar várias configurações usando o algoritmo padrão de Civanlar e depois, repete-se o processo, mas proibindo em cada teste o fechamento de um ramo que foi fechado no algoritmo padrão de Civanlar. Obviamente, o esforço computacional deve aumentar e esse aspecto deve ser levado em conta.

A fase I termina com uma configuração inicial atrativa ou um conjunto de configurações iniciais atrativas geradas usando um ou vários algoritmos heurísticos.



5.3.2. Fase II: Estratégia Busca Tabu (TS)

A fase II realiza uma estratégia TS usando a melhor configuração candidata encontrada na fase I. Para essa configuração é realizada uma busca TS com memória de curto prazo e um critério de aspiração. Depois de analisada essa configuração, pode-se repetir o processo de busca gerando uma nova configuração de partida. Para gerar esta nova configuração é usado path relinking usando configurações de elite visando a diversificação. Pode-se ainda implementar a intensificação a partir das configurações de elite.

Cada processo de busca TS com memória de curto prazo e uso de critério de aspiração deve realizar um número determinado de transições através de configurações factíveis. Em cada transição, deve-se avaliar um conjunto reduzido de vizinhos candidatos e para cada vizinho candidato, deve-se processar um fluxo de carga exato ou aproximado. O algoritmo TS proposto é apresentado a seguir.

5.3.3. Algoritmo Proposto

Fase I: Estratégia heurística:

1. Realizar uma busca heurística usando o algoritmo de Civanlar;
2. Repetir o passo anterior realizando k_n buscas heurísticas e proibindo em cada busca um atributo que foi acionado no passo anterior (um ramo aberto que foi fechado deve permanecer aberto nesta busca)
3. Se o número de configurações candidatas n_p já foi encontrado, então termina a fase I. Caso contrário, encontrar as configurações restantes usando path relinking;
4. Armazenar as n_e configurações de elite como sendo um subconjunto das configurações iniciais encontradas, isto é, $n_e < n_p$.



Essas n_p configurações iniciais também podem ser chamadas de população inicial, usando a terminologia dos algoritmos genéticos [6,7].

Fase II: Estratégia TS:

1. Para cada configuração inicial (elemento da população), implementar um processo TS com memória de curto prazo e usando um critério de aspiração. Este processo, chamado TSMA, é apresentado separadamente.
2. Atualizar a lista de configurações de elite usando as incumbentes do passo 1. Se o critério de parada for satisfeito, isto é, se o número de fluxos de carga ultrapassou o número permitido ou a incumbente não melhorou num número especificado de gerações, pare. Caso contrário, vá para o passo 3.
3. Encontrar a nova configuração de partida realizando path relinking visando a diversificação e verificando a factibilidade da configuração obtida. Voltar ao passo 1.

5.3.4. Processo TSMA

Para cada configuração de partida fazer o seguinte:

1. Processar um fluxo de carga exato para a configuração corrente.
2. Usar análise de sensibilidade para encontrar um número reduzido de configurações vizinhas da configuração corrente. Nesta parte são usados os três indicadores de sensibilidade mencionados anteriormente.
3. Para cada vizinho candidato identificado no passo anterior fazer o seguinte:



- (a) Encontrar a redução de perdas entre a configuração corrente e a configuração candidata. Esta parte implica na utilização de um fluxo de carga exato ou aproximado para calcular as perdas exatas (ou aproximadas) da configuração candidata;
 - (b) Se a configuração analisada é a melhor configuração factível não proibida ou que estando proibida satisfaz o critério de aspiração, então armazenar esta configuração como sendo a melhor configuração encontrada. Caso contrário, isto é, se a configuração vizinha armazenada não é factível ou é de pior qualidade que uma configuração factível já analisada, então a configuração analisada é descartada.
4. Escolher a melhor configuração vizinha armazenada no passo anterior que se transforma na nova configuração corrente. Armazenar os atributos proibidos decorrentes da transição executada. Existem duas listas de atributos proibidos devido a uma transição: (1) o ramo aberto que foi fechado fica proibido de ser aberto durante k_t transições e, (2) o ramo que foi aberto fica proibido de ser fechado também durante k_t transições;
5. Se o número de fluxos de carga foi excedido ou se a incumbente do processo TSMA corrente não melhora durante n_t transições, então parar o processo TSMA retornando a informação da incumbente deste processo e atualizando as outras informações como a lista de configurações de elite. Caso contrário, voltar ao passo 1.

Como critério de aspiração para eliminar a proibição de uma configuração vizinha pode ser considerado a evolução da função objetivo durante as últimas k_m transições. Assim, se a função objetivo da configuração vizinha proibida for melhor que todas as funções objetivo (perdas) encontrada, nas últimas k_m transições, então o critério de aspiração foi satisfeito e, deve-se eliminar a proibição da configuração candidata proibida e armazenar essa informação como sendo a melhor configuração vizinha encontrada.



CAPÍTULO VI

TESTES EXPERIMENTAIS: RECONFIGURAÇÃO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

6.1 Introdução

Usando a proposta de algoritmo de busca tabu apresentada no capítulo anterior, foi realizada a implementação computacional usando linguagem de programação FORTRAN. São apresentados testes experimentais com os sistemas de 14 barras [10], 32 barras [3] e 69 barras [15], sistemas estes que são bastante conhecidos na literatura especializada e um sistema real de 135 barras correspondente a cidade de Três Lagoas (MS) da concessão da CESP. Os dados destes sistemas são apresentados no Apêndice, nas tabelas A1, A2, A3 e A4, respectivamente.

6.2 Sistema de 14 Barras

O sistema de 14 barras é mostrado na figura 2.1 do capítulo 3. O sistema apresenta 14 nós (barras), 16 circuitos e carga total de 28,9 MW. Os ramos inativos da configuração inicial são: {15, 21,26}. Com esta configuração, o sistema apresenta 511kW de perdas.

Após a reconfiguração, usando o algoritmo apresentado no capítulo 5, as perdas diminuíram para 466,11 kW. O que representa uma redução de 8,79% com relação a configuração inicial.



6.3 Sistema de 32 Barras

O sistema de 32 nós (barras) é mostrado na referência [12] e seus dados são apresentados em [3] e [12]. O sistema tem 32 barras e 37 circuitos e uma carga total de 3715 kW. A configuração inicial apresenta como ramos inativos os ramos {33, 34, 35, 36, 37}, com perdas de 203,2 kW.

Após a reconfiguração do sistema, usando o algoritmo apresentado no capítulo 5, o sistema apresenta perdas de 139,3 kW. O Que representa uma redução de 31,4% nas perdas com relação a configuração inicial.

As 6 melhores configurações encontradas são as seguintes: {7, 9, 14, 32, 37}, {7, 9, 14, 28, 32}, {7, 11, 14, 32, 37}, {7, 9, 14, 28, 36}, {7, 9, 14, 36, 37}, {7, 11, 32, 34, 37}, com perdas de 139,3 kW, 139,7 kW, 140,8 kW, 141,7 kW, 141,9 kW e 142,5 kW, respectivamente.

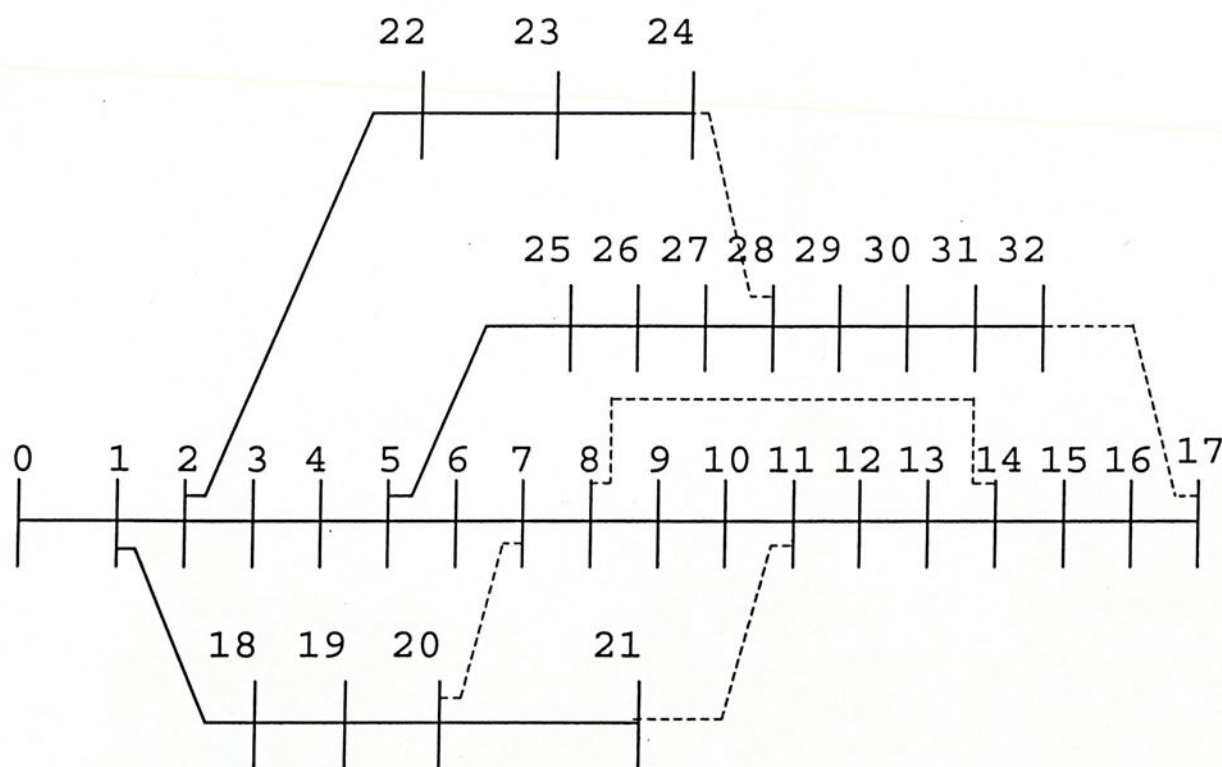


Figura 6.3 – Configuração inicial do sistema de 32 barras

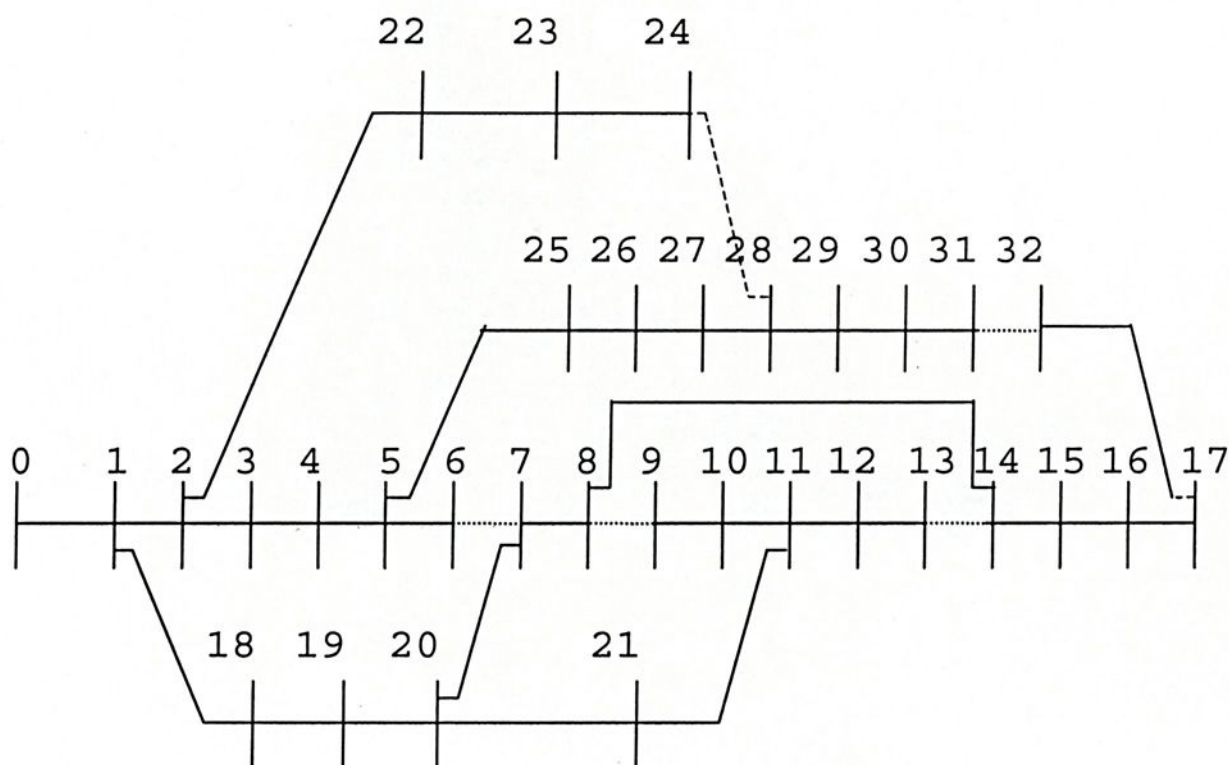


Figura 6.4 – Configuração final do sistema de 32 barras

6.4 Sistema de 69 Barras

O sistema de 69 barras e seus dados são mostrados na referência [15]. Este sistema tem 69 barras e 74 circuitos (ramos), sendo que 5 deles são inativos, apresentando uma carga total de 1108 kW. A configuração inicial deste sistema apresenta os ramos {70, 71, 72, 73, 74} como ramos inativos com perdas de 20,85 kW.

Após a reconfiguração do sistema, usando o algoritmo proposto no capítulo 5, o sistema apresenta perdas de 9,42 kW. O que representa uma redução de 54,8% nas perdas com relação a configuração inicial.

As 5 melhores configurações encontradas são as seguintes: { 15, 56, 62, 70, 71}, { 15, 57, 62, 70, 71}, { 15, 59, 62, 70, 71}, { 13, 57, 62, 70, 71}, { 13, 59, 62, 70, 71}, apresentando perdas de 9,42 kW, 9,42 kW, 9,42 kW, 9,44 kW e 9,44 kW, respectivamente.

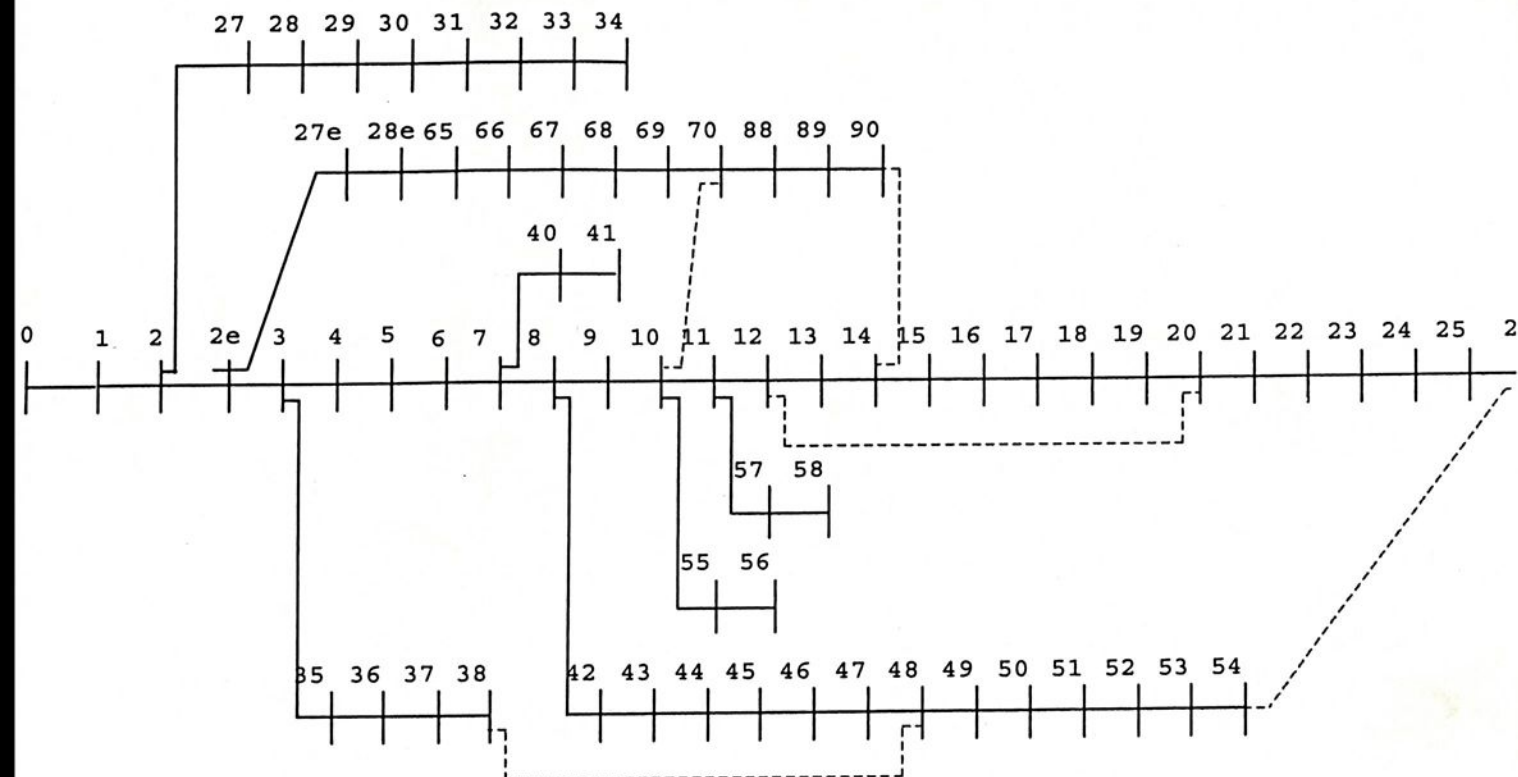


Figura 6.5 – Configuração inicial do sistema de 69 barras

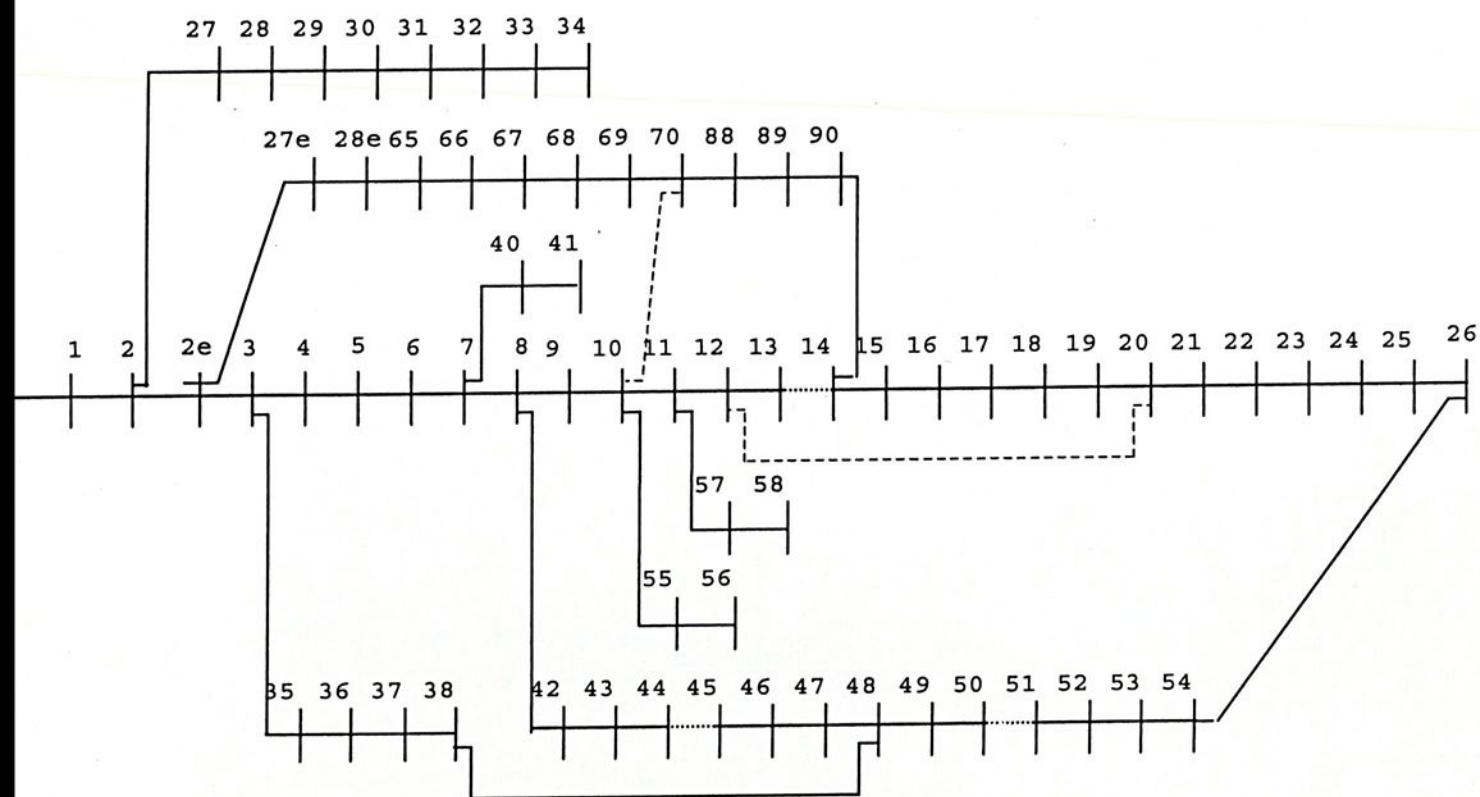


Figura 6.6 – Configuração final do sistema de 69 barras

6.5 Sistema de 135 Barras

O sistema de 135 barras e seus dados são mostrados em [22]. Trata-se de um sistema real da cidade de Três Lagoas (MS) da concessão CESP. Este sistema tem 135 barras e 156 circuitos (ramos), sendo que 21 são ramos abertos. Apresenta uma tensão base de 13,8 kV, potência base 100 MVA e uma carga de 18313,81 kW. A configuração inicial tem os seguintes ramos abertos: 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155 e 156 com perdas de 320,5 kW.

Abaixo, temos as 10 melhores configurações após aplicar o algoritmo proposto nesta pesquisa.

- 1) 7, 51, 53, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 137, 138, 139, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 152, 156 : **Perdas:** 280,33 kW
- 2) 7, 38, 51, 54, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151: **Perdas:** 280,35 kW
- 3) 7, 38, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 126, 137, 138, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 152, 155, 156 : **Perdas:** 280,40 kW
- 4) 7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 152, 155 : **Perdas:** 280,3 kW
- 5) 7, 38, 51, 53, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 156 : **Perdas:** 280,31 kW
- 6) 7, 51, 53, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 137, 138, 139, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 156 : **Perdas:** 280,20 kW
- 7) 7, 38, 51, 53, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 137, 138, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 152, 156 : **Perdas:** 280,74 kW
- 8) 7, 38, 51, 54, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 152, 155 : **Perdas:** 280,27 kW



9) 7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155: **Perdas: 280,17 kW**

10) 7, 38, 51, 54, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 155 : **Perdas: 280,38 kW**

Sendo que a melhor configuração encontrada apresenta perdas de 280.17kW. Representando uma redução de 12,6% nas perdas com relação a configuração inicial.

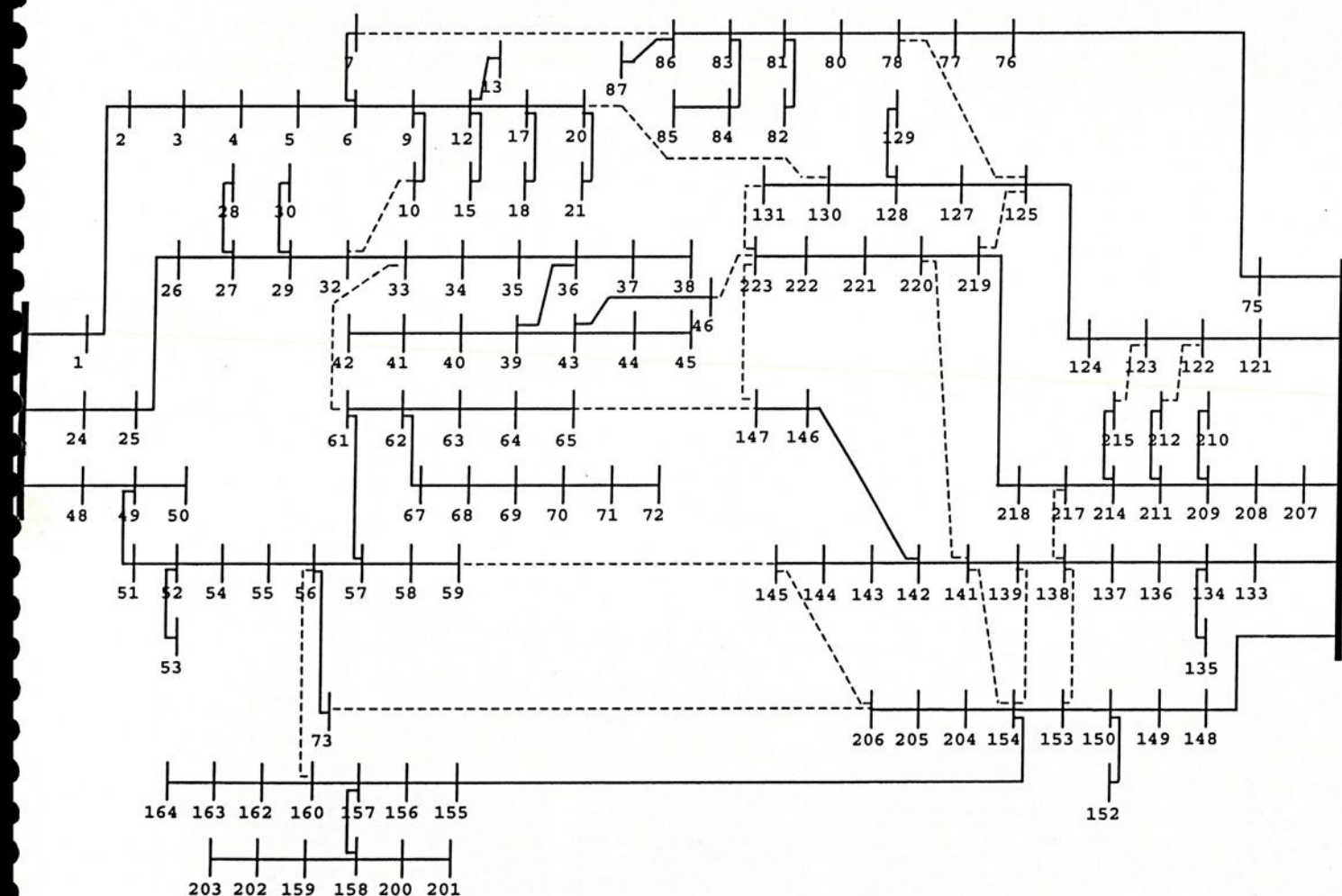


Figura 6.7 – Configuração inicial do sistema de 135 barras

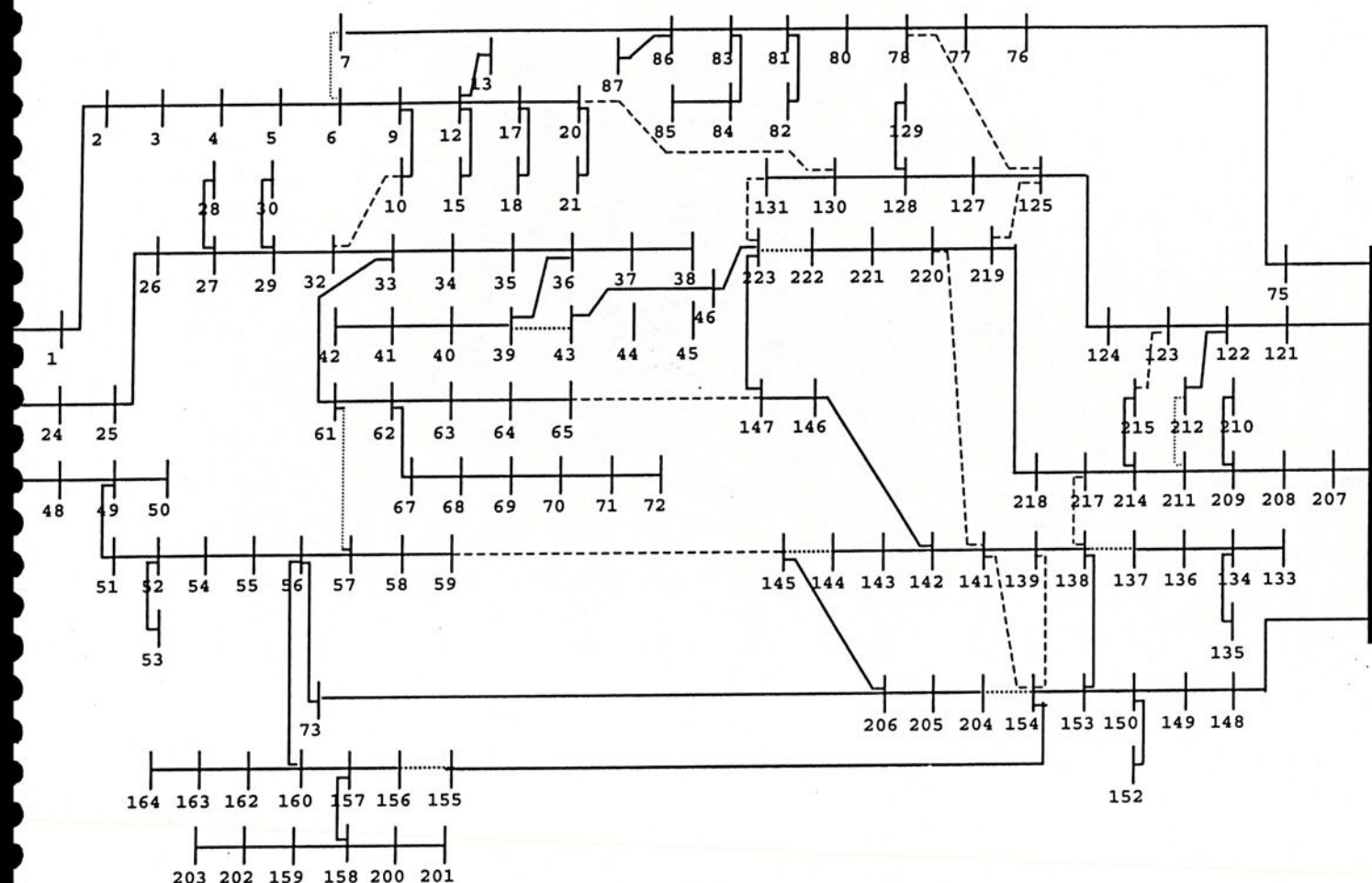


Figura 6.8 – Configuração final do sistema de 135 barras

6.6 Comentários Sobre os Resultados

Os resultados obtidos em todos os sistemas mostraram-se satisfatórios. Sendo que com relação aos três sistemas hipotéticos conhecidos na literatura, os resultados foram iguais aos já conhecidos da literatura especializada. Para o sistema real de 135 barras, foram encontradas configurações melhores que os resultados apresentados em [22].

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

Da pesquisa desenvolvida, pode-se mencionar as seguintes conclusões:

- Os resultados encontrados são iguais ou melhores que os encontrados na literatura especializada para os três sistemas conhecidos.
- Foram encontrados resultados de excelente qualidade para o sistema real de 135 barras.
- O algoritmo tem capacidade de encontrar muitas configurações de excelente qualidade, além da melhor configuração encontrada.
- O algoritmo de Busca Tabu desenvolvido apresenta um bom desempenho para os sistemas testados.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *M. E. Baran, F. F. Wu* "Optimal Sizing of Capacitors Placed on a Radial Distribution System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 735-743, Janeiro 1989.
- [2] *D. Shirmohamomadi, H. W. Hong*, "Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No 2, pp. 1492-1498, Abril 1984.
- [3] *M. E. Baran, F. F. Wu*, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4 No. 2, pp. 1401-1407, Abril 1989.
- [4] *K. Nara, T. Satoh, K. Aoki and M. Kitagawa*, "A First Expansion Planning Algorithm for Large Scale Distribution Systems", Proceedings of the 8 Th CEPST, Singapore, Novembro 1990.
- [5] *D. Adler*: "Genetic Algorithms and Simulated Annealing: A Marriage Proposal", IEEE International Conference on Neural Networks, Vol. 2, pp. 1104-1109, 1993.
- [6] *D. E. Goldberg*: "Genetic Algorithms in Search Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing, New York, Chap 1, pp. 11, 1989.



- [7] *F. Glover* "Tabu Search Fundamentals and Uses", Graduate School of Business, University of Colorado , Abril 1995.
- [8] *C. C. Kuo, H. C. Chan*: "Applying a Refined Genetic Algorithms to Network Reconfiguration for Loss Reduction", IEEE of Japan Power & Energy, pp. 37 –42, 1994.
- [9] *K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa and T. Ishihara*: " Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems Loss Minimum Reconfiguration", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, pp. 1044-1051, 1992.
- [10] *S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, S. S. H. Lee*: "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, Julho 1988.
- [11] *M. Laguna*, "A Guide To Implementing Tabu Search", Investigación Operativa, Vol. 4, No. 1, pp. 5-24, Abril 1994.
- [12] *S. K. Goswami, S. K. Basu*: "A New Algorithm for the Reconfiguration of Distributions Feeders for Loss Minimization", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, Julho 1992.
- [13] *R. A. Gallego, A. Monticelli, R. Romero*: "Um Método Aproximado de Otimização Usado na Reconfiguração de Redes de Distribuição", XI Congresso Chileno de Ingenieria Elétrica, Punta Arenas, Chile, Novembro de 1995.
- [14] *H. Chiang, R. J. Jumeau*: "Optimal Network Reconfiguration in Distributions Systems. Part 1: A New Formulation and a Solution Methodology", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, 1990.
- [15] *H. Chiang, R. J. Jumeau*: "Optimal Network Reconfiguration in Distributions Systems. Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, 1990.



- [16] *D. Das, D. P. Kothari, A. Kalan*: "Simple and Efficient Method for Load Flow Solution of Radial Distribution Networks", IEEE Electrical Power & Energy Systems, Vol. 17, No. 5, pp. 335-346, 1995.
- [17] *A. Diaz, F. Glover, H. M. Ghaziri, J. L. Gonzalez, M. Laguna, P. Moscato, F. T. Tseng*: "Optimización Heurística y Redes Neuronales", Editorial Paraninfo, Madrid, 1996.
- [18] *R. A. Gallego, A. Monticelli, R. Romero*: "Comparative Studies of Non-Convex Optimization Methods for Transmission Network Expansion Planning", annals of IEEE Power Industry Computer Application Conference, PICA, Columbus, Ohio, Maio 1997.
- [19] *C. R. Reeves*: "Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems", McGraw-Hill Book Company, 1995.
- [20] *F. Glover, M. Laguna*: "Tabu Search ", Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [21] *C. G. Renato*: "New Method for the Analysis of Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, pp. 391-396, Janeiro 1990.
- [22] *F. Casari* : "Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para Planejamento da Operação", Dissertação de Mestrado, UNESP 1998.



APÊNDICE

A.1 Dados Completos do Sistema de 14 Barras

O sistema hipotético de 14 barras tem 3 chaves de interconexão(ramos inativos), tensão base de 23kV, potência base de 100 MVA. Os dados foram obtidos na referência [10] e estão na tabela A1. As últimas 3 linhas são as linhas abertas da configuração inicial.

Tabela A1 – Dados do sistema de 14 barras

Linha	Barra para Barra	Resistência da seção(pu)	Reatância da seção(pu)	Carga na barra final (MW)	Carga na barra final (MVAR)	Capacitor na barra final (MVAR)
11	1 – 4	0,075	0,1	2,0	1,6	
12	4 – 5	0,08	0,11	3,0	1,5	1,1
13	4 – 6	0,09	0,18	2,0	0,8	1,2
14	6 – 7	0,04	0,04	1,5	1,2	
16	2 – 8	0,11	0,11	4,0	2,7	
18	8 – 9	0,08	0,11	5,0	3,0	1,2
17	8 – 10	0,11	0,11	1,0	0,9	
19	9 – 11	0,11	0,11	0,6	0,1	0,6
20	9 – 12	0,08	0,11	4,5	2,0	3,7
22	3 – 13	0,11	0,11	1,0	0,9	
24	13 – 14	0,09	0,12	1,0	0,7	1,8
23	13 – 15	0,08	0,11	1,0	0,9	
25	15 – 16	0,04	0,04	2,1	1,0	1,0
15	5 – 11	0,04	0,04			
21	10 – 14	0,04	0,04			
26	7 – 15	0,09	0,12			



A.2 Dados Completos do Sistema de 32 Barras

O sistema hipotético de 32 barras tem 5 chaves de interconexão(ramos inativos), tensão base de 12,66 kV, potência base de 100 MVA. Os dados foram obtidos na referência [3] e estão na tabela A2. As últimas 5 linhas são as linhas abertas da configuração inicial.

Tabela A2 – Dados do sistema de 32 barras

Linha	Barra para Barra	Resistência da seção(pu)	Reatância da seção(pu)	Carga na barra final (kW)	Carga na barra final (kVAR)
1	0 – 1	0,0922	0,0470	100,00	60,00
2	1 – 2	0,4930	0,2511	90,00	40,00
3	2 – 3	0,3660	0,1864	120,00	80,00
4	3 – 4	0,3811	0,1941	60,00	30,00
5	4 – 5	0,8190	0,7070	60,00	20,00
6	5 – 6	0,1872	0,6188	200,00	100,00
7	6 – 7	0,7114	0,2351	200,00	100,00
8	7 – 8	1,0300	0,7400	60,00	20,00
9	8 – 9	1,0440	0,7400	60,00	20,00
10	9 – 10	0,1966	0,0650	45,00	30,00
11	10 – 11	0,3744	0,1238	60,00	35,00
12	11 – 12	1,4680	1,1550	60,00	35,00
13	12 – 13	0,5416	0,7129	120,00	80,00
14	13 – 14	0,5910	0,5260	60,00	10,00
15	14 – 15	0,7463	0,5450	60,00	20,00
16	15 – 16	1,2890	1,7210	60,00	20,00
17	16 – 17	0,7320	0,5740	90,00	40,00
18	1 – 18	0,1640	0,1565	90,00	40,00
19	18 – 19	1,5042	1,3554	90,00	40,00
20	19 – 20	0,4095	0,4784	90,00	40,00
21	20 – 21	0,7089	0,9373	90,00	40,00
22	2 – 22	0,4512	0,3083	90,00	50,00
23	22 – 23	0,8980	0,7091	420,00	200,00
24	23 – 24	0,8960	0,7011	420,00	200,00
25	5 – 25	0,2030	0,1034	60,00	25,00
26	25 – 26	0,2842	0,1447	60,00	25,00
27	26 – 27	1,0590	0,9337	60,00	20,00
28	27 – 28	0,8042	0,7006	120,00	70,00
29	28 – 29	0,5075	0,2585	200,00	600,00
30	29 – 30	0,9744	0,9630	150,00	70,00
31	30 – 31	0,3105	0,3619	210,00	100,00
32	31 – 32	0,3410	0,5301	60,00	40,00
33	7 – 20	2,0000	2,0000		
34	8 – 14	2,0000	2,0000		
35	11 – 21	2,0000	2,0000		
36	17 – 32	0,5000	0,5000		
37	24 – 28	0,5000	0,5000		



A.3 Dados Completos do Sistema de 69 Barras

O sistema hipotético de 69 barras tem 5 chaves de interconexão(ramos inativos), tensão base de 12,66 kV, potência base de 100 MVA. Os dados foram obtidos na referência [15]e estão na tabela A3. As últimas 5 linhas são as linhas abertas da configuração inicial.

Tabela A3 – Dados do sistema de 69 barras

Linha	Barra para Barra	Resistência da seção(pu)	Reatância da seção(pu)	Carga barra (kW)	Carga na barra final (kVAR)
1	0 – 1	0,0005	0,0012	0,0000	0,0000
2	1 – 2	0,0005	0,0012	0,0000	0,0000
3	2 – 2e	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	2e – 3	0,0015	0,0036	0,0000	0,0000
5	3 – 4	0,0251	0,0294	0,0000	0,0000
6	4 – 5	0,3660	0,1864	0,8780	0,7200
7	5 – 6	0,3811	0,1941	13,4550	0,7200
8	6 – 7	0,0922	0,0470	24,8870	17,8100
9	7 – 8	0,0493	0,0251	10,0000	7,2080
10	8 – 9	0,8190	0,2707	9,3330	6,6660
11	9 – 10	0,1872	0,0619	48,5000	34,6090
12	10 – 11	0,7114	0,2351	48,5000	34,6090
13	11 – 12	1,0300	0,3400	2,7100	1,8210
14	12 – 13	1,0440	0,3450	2,7100	1,5210
15	13 – 14	1,0580	0,3496	0,0000	0,0000
16	14 – 15	0,1966	0,0650	15,1760	10,1980
17	15 – 16	0,3744	0,1238	16,5000	11,7750
18	16 – 17	0,0047	0,0016	16,5000	11,7750
19	17 – 18	0,3276	0,1083	0,0000	0,0000
20	18 – 19	0,2106	0,0696	0,3160	0,2120
21	19 – 20	0,3416	0,1129	37,9830	27,1000
22	20 – 21	0,0140	0,0046	1,7620	1,1840
23	21 – 22	0,1591	0,0526	0,0000	0,0000
24	22 – 23	0,3463	0,1145	9,3900	6,6700
25	23 – 24	0,7488	0,2475	0,0000	0,0000
26	24 – 25	0,3089	0,1021	4,6670	3,3300
27	25 – 26	0,1732	0,0572	4,6670	3,3300
28	2 – 27	0,0044	0,0108	8,6670	6,1850
29	27 – 28	0,0640	0,1565	8,6670	6,1850
30	28 – 29	0,3978	0,1315	0,0000	0,0000
31	29 – 30	0,0702	0,0232	0,0000	0,0000
32	30 – 31	0,3510	0,1160	0,0000	0,0000
33	31 – 32	0,8390	0,2816	4,5820	3,2600
34	32 – 33	1,7080	0,5646	6,5010	5,5490
35	33 – 34	1,4740	0,4873	1,9200	1,2900



36	2e – 27e	0,0044	0,0108	8,6670	6,1850
37	27e – 28e	0,0640	0,1565	8,6670	6,1850
38	28e – 65	0,1053	0,1230	0,0000	0,0000
39	65 – 66	0,0304	0,0355	8,0000	5,7090
40	66 – 67	0,0018	0,0021	8,0000	5,7090
41	67 – 68	0,7283	0,8509	0,3920	0,3250
42	68 – 69	0,3100	0,3623	0,0000	0,0000
43	69 – 70	0,0410	0,0478	2,0000	1,4270
44	70 – 88	0,0092	0,0116	0,0000	0,0000
45	88 – 89	0,1089	0,1373	3,0760	8,7870
46	89 – 90	0,0009	0,0012	3,0760	8,7870
47	3 – 35	0,0034	0,0084	0,0000	0,0000
48	35 – 36	0,0851	0,2083	26,3500	18,8000
49	36 – 37	0,2898	0,7091	28,2260	91,4920
50	37 – 38	0,0822	0,2011	128,2260	91,4920
51	7 – 40	0,0928	0,0473	13,5120	9,4420
52	40 – 41	0,3319	0,1114	1,2020	0,8940
53	8 – 42	0,1740	0,0886	1,4490	1,1620
54	42 – 43	0,2030	0,1034	8,7870	6,3220
55	43 – 44	0,2842	0,1447	8,0000	5,7080
56	44 – 45	0,2813	0,1433	0,0000	0,0000
57	45 – 46	1,5900	0,5337	0,0000	0,0000
58	46 – 47	0,7837	0,2630	0,0000	0,0000
59	47 – 48	0,3042	0,1006	0,6670	24,0250
60	48 – 49	0,3861	0,1172	0,0000	0,0000
61	49 – 50	0,5075	0,2585	414,6670	295,9100
62	50 – 51	0,974	0,0496	10,6670	7,6120
63	51 – 52	0,1450	0,0738	0,0000	0,0000
64	52 – 53	0,7105	0,3619	75,6700	53,8730
65	53 – 54	1,0410	0,5302	19,6700	13,9120
66	10 – 55	0,2012	0,0611	6,0000	4,2820
67	55 – 56	0,0047	0,0014	6,0000	4,2820
68	11 – 57	0,7394	0,2444	9,3330	6,6600
69	57 – 58	0,0047	0,0016	9,3330	6,6600
70	10 – 70	0,5000	0,5000		
71	12 – 20	0,5000	0,5000		
72	14 – 90	1,0000	1,0000		
73	38 – 48	2,0000	2,0000		
74	26 – 54	1,0000	1,0000		



A.4. Dados Completos do Sistema de 135 Barras

O sistema real da cidade de Três Lagoas – Sistema CESP de 135 barras, apresenta uma tensão base de 13,8 kV, potência base de 100 MVA. Os dados do sistema foram adquiridos na gerência Geral de Atendimentos da CESP de Andradina. Abaixo está a Tabela A4 com os respectivos dados. As últimas 21 linhas são as linhas abertas da configuração inicial.

Tabela A4 – Dados do sistema de 135 barras

Linha	Barra para Barra	Resistência da seção(pu)	Reatância da seção(pu)	Carga na barra final (kW)	Carga na barra final (kVAR)
1	0 – 1	0,33205	0,76653	0,000	0,000
2	1 – 2	0,00188	0,00433	47,780	19,009
3	2 – 3	0,22324	0,51535	42,551	16,929
4	3 – 4	0,09943	0,22953	87,022	34,622
5	4 – 5	0,15571	0,35945	311,310	123,855
6	5 – 6	0,16321	0,37677	148,869	59,228
7	6 – 7	0,11444	0,26417	238,672	94,956
8	6 – 9	0,5675	0,5666	62,299	24,786
9	9 – 10	0,52124	0,7418	124,598	49,571
10	9 – 12	0,10877	0,10860	140,175	55,768
11	12 – 13	0,39803	0,20937	116,813	46,474
12	12 – 15	0,91744	0,31469	249,203	99,145
13	12 – 17	0,11823	0,11805	291,447	115,592
14	17 – 18	0,50228	0,26421	303,720	120,835
15	17 – 20	0,5675	0,5666	215,396	85,695
16	20 – 21	0,29379	0,15454	198,586	79,007



17	0 – 24	0,33205	0,76653	0,00	0,00
18	24 – 25	0,00188	0,00433	0,00	0,00
19	25 – 26	0,22324	0,51535	0,00	0,00
20	26 – 27	0,10881	0,25118	30,127	14,729
21	27 – 28	0,71078	0,37388	230,972	112,920
22	27 – 29	0,18197	0,42008	60,256	29,459
23	29 – 30	0,30326	0,15952	230,972	112,920
24	29 – 32	0,02439	0,05630	120,507	58,915
25	32 – 33	0,04502	0,10394	0,00	0,00
26	33 – 34	0,01876	0,04331	56,981	27,857
27	34 – 35	0,11823	0,11805	364,665	178,281
28	35 – 36	0,02365	0,02361	0,00	0,00
29	36 – 37	0,18954	0,09970	124,647	60,939
30	37 – 38	0,39803	0,20937	56,981	27,857
31	36 – 39	0,05675	0,05666	0,00	0,00
32	39 – 40	0,09477	0,04985	85,473	41,787
33	40 – 41	0,41699	0,21934	0,00	0,00
34	41 – 42	0,11372	0,05982	396,735	193,960
35	39 – 43	0,07566	0,07555	0,00	0,00
36	43 – 44	0,36960	0,19442	181,152	88,563
37	44 – 45	0,26536	0,13958	75,316	36,821
38	43 – 46	0,05675	0,0566	75,316	36,821
39	0 – 48	0,33205	0,76653	0,00	0,00
40	48 – 49	0,11819	0,27283	1,254	0,531
41	49 – 50	2,96288	1,01628	6,274	2,660
42	49 – 51	0,00188	0,00433	0,00	0,00



43	51 – 52	0,06941	0,16024	117,880	49,971
44	52 – 53	0,81502	0,42872	62,668	25,566
45	52 – 54	0,06378	0,14724	172,285	73,034
46	54 – 55	0,13132	0,30315	458,556	194,388
47	55 – 56	0,06191	0,14291	262,962	111,473
48	56 – 57	0,11444	0,26417	235,761	99,942
49	57 – 58	0,28374	0,28331	0,00	0,00
50	58 – 59	0,28374	0,28331	109,215	46,298
51	57 – 61	0,04502	0,10394	0,00	0,00
52	61 – 62	0,02626	0,06063	72,809	30,865
53	62 – 63	0,06003	0,13858	258,473	109,570
54	63 – 64	0,03002	0,06929	69,169	29,322
55	64 – 65	0,02064	0,04764	21,843	9,260
56	62 – 67	0,10881	0,25118	0,00	0,00
57	67 – 68	0,25588	0,13460	20,527	8,702
58	68 – 69	0,41699	0,21934	150,548	63,819
59	69 – 70	0,50228	0,26421	220,687	93,552
60	70 – 71	0,20849	0,10967	0,00	0,00
61	71 – 72	0,20849	0,10967	0,00	0,00
62	56 – 73	0,13882	0,32047	226,693	96,098
63	0 – 75	0,00750	0,01732	0,00	0,00
64	75 – 76	0,27014	0,62362	294,016	116,974
65	76 – 77	0,38270	0,88346	83,015	33,028
66	77 – 78	0,33018	0,76220	83,015	33,028
67	78 – 80	0,32830	0,75787	103,770	41,285
68	80 – 81	0,17072	0,39409	176,408	70,184



69	81 – 82	0,55914	0,29412	83,015	33,028
70	81 – 83	0,05816	0,13425	217,917	86,698
71	83 – 84	0,70130	0,36890	23,294	9,267
72	84 – 85	1,02352	0,53839	5,075	2,019
73	83 – 86	0,06754	0,15591	72,638	28,899
74	86 – 87	1,32352	0,45397	405,990	161,523
75	0 – 121	0,01126	0,02598	0,00	0,00
76	121 – 122	0,72976	1,68464	100,182	42,468
77	122 – 123	0,22512	0,51968	142,523	60,417
78	123 – 124	0,20824	0,48071	96,042	40,713
79	124 – 125	0,04690	0,10827	300,454	127,366
80	125 – 127	0,61950	0,61857	141,238	59,873
81	127 – 128	0,34049	0,33998	279,847	118,631
82	128 – 129	0,56862	0,29911	87,312	37,013
83	128 – 130	0,10877	0,10860	243,849	103,371
84	130 – 131	0,56862	0,29911	247,750	105,025
85	0 – 133	0,01126	0,02598	0,00	0,00
86	133 – 134	0,41835	0,96575	89,878	38,101
87	134 – 135	0,10499	0,13641	1137,280	482,108
88	134 – 136	0,43898	1,01338	458,339	194,296
89	136 – 137	0,07520	0,02579	385,197	163,290
90	137 – 138	0,07692	0,17756	0,00	0,00
91	138 – 139	0,33205	0,76653	79,608	33,747
92	139 – 141	0,08442	0,19488	87,312	37,013
93	141 – 142	0,13320	0,30748	0,00	0,00
94	142 – 143	0,29320	0,29276	74,001	31,370



95	143 – 144	0,21753	0,21721	232,050	98,369
96	144 – 145	0,23482	0,26443	141,819	60,119
97	142 – 146	0,10318	0,23819	0,00	0,00
98	146 – 147	0,13507	0,31181	76,449	32,408
99	0 – 148	0,00938	0,02165	0,00	0,00
100	148 – 149	0,16884	0,38976	51,322	21,756
101	149 – 150	0,11819	0,27283	59,874	25,381
102	150 – 152	2,28608	0,78414	9,065	3,843
103	150 – 153	0,45587	1,05236	2,092	0,887
104	153 – 154	0,69600	1,60669	16,735	7,094
105	154 – 155	0,45774	1,05669	1506,522	638,634
106	155 – 156	0,20298	0,26373	313,023	132,694
107	156 – 157	0,21348	0,27737	79,831	33,842
108	157 – 158	0,54967	0,28914	51,322	21,756
109	158 – 159	0,54019	0,28415	0,00	0,00
110	157 – 160	0,04550	0,05911	202,435	85,815
111	160 – 162	0,47385	0,24926	60,823	25,874
112	162 – 163	0,86241	0,45364	45,618	19,338
113	163 – 164	0,56862	0,29911	0,00	0,00
114	158 – 200	0,77711	0,40878	1572070	66,584
115	200 – 201	1,08038	0,56830	0,00	0,00
116	159 – 202	1,06633	0,57827	250,148	106,041
117	202 – 203	0,47385	0,24926	0,00	0,00
118	154 – 204	0,32267	0,74488	68,809	28,593
119	204 – 205	0,14633	0,33779	32,072	13,596
120	205 – 206	0,12382	0,28583	61,084	25,894



121	0 – 207	0,01126	0,02598	0,00	0,00
122	207 – 208	0,64910	1,49842	94,622	46,260
123	208 – 209	0,04502	0,10394	49,858	24,375
124	209 – 210	0,52640	0,18056	123,164	60,214
125	209 – 211	0,02064	0,04764	78,350	38,304
126	211 – 212	0,53071	0,27917	1452475	71,121
127	211 – 214	0,09755	0,22520	21,369	10,447
128	214 – 215	0,11819	0,27283	74,789	36,564
129	214 – 217	0,13882	0,32047	227,926	111,431
130	217 – 218	0,04315	0,09961	35,614	17,411
131	218 – 219	0,09192	0,21220	249,295	121,877
132	219 – 220	0,16134	0,37244	316,722	154,842
133	220 – 221	0,37832	0,37775	333,817	163,199
134	221 – 222	0,39724	0,39664	249,295	121,877
135	222 – 223	0,29320	0,29276	0,00	0,00
136	7 – 86	0,13132	0,30315		
137	10 – 32	0,26536	0,13958		
138	20 – 130	0,14187	0,14166		
139	46 – 223	0,08512	0,08499		
140	33 – 61	0,04502	0,10394		
141	59 – 145	0,14187	0,14166		
142	65 – 147	0,14187	0,14166		
143	73 – 206	0,03940	0,09094		
144	78 – 125	0,12944	0,29882		
145	125 – 219	0,01688	0,03898		
146	121 – 223	0,33170	0,17448		



147	139 – 154	0,14187	0,17166		
148	138 – 217	0,07692	0,17756		
149	138 – 153	0,07692	0,17756		
150	141 – 154	0,07692	0,17756		
151	141 – 220	0,07692	0,17756		
152	145 – 206	0,26482	0,26443		
153	160 – 56	0,49696	0,64567		
154	212 – 122	0,17059	0,08973		
155	215 – 123	0,05253	0,12126		
156	223 – 147	0,29320	0,29276		



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
AV. BRASIL, 56 - CAIXA POSTAL 31
15385-000 - ILHA SOLTEIRA - SP**

