

unesp

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

1210001128



Nº 40

ALGORITMO DE BUSCA TABU USADO NO
PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE CAPACITORES
EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL
ALUNO: WENDEL CLEBER SOARES
ORIENTADOR: RUBÉN A. ROMERO LÁZARO

Te.1128

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 DE
ALOCÇÃO DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO RADIAL"**

Proc. 17/2000 NRD-004/2000

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCN. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
<i>24/1/2000</i>	<i>31/3/2000</i>
REGISTRADO POR	TOMBO
<i>Alia</i>	<i>1128</i>
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
<i>Deacaf</i> <i>R\$ 10,00</i>	<i>S676a</i>

3040400 - sistemas eléte pdena

1210001128



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).

ALUNO
ORIENTADOR

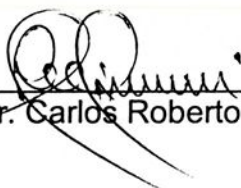
: WENDEL CLEBER SOARES
: RUBÉN AUGUSTO ROMERO LÁZARO

ILHA SOLTEIRA, OUTUBRO DE 1999.

“Algoritmo de Busca Tabu Usado no Problema de Alocação de Capacitores em Sistemas de Distribuição Radial”

Wendel Cleber Soares

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).

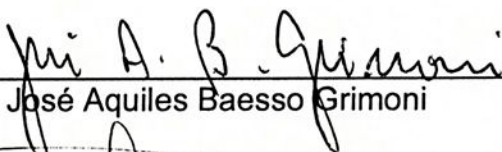


Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi - Coordenador

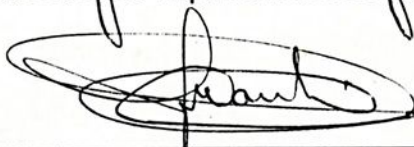
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro - orientador



Prof. Dr. José Aquiles Baesso Grimoni



Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani

Ilha Solteira – SP, outubro de 1999



AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à Deus, por ter me dado a oportunidade de cumprir mais um passo em minha vida

Ao meu orientador Rubén Augusto Romero Lázaro, um agradecimento em especial. Pela sua competência e disposição estando sempre presente em todos os momentos não medindo esforços para que esse trabalho fosse concluído. Também por sua amizade e compreensão.

À minha família, pelo apoio total, sem o qual não seria possível ter chegado a mais uma etapa vencida em minha vida.

Aos professores José Roberto Sanches Mantovani, Antonio Padilha Feltrim e Carlos Roberto Minussi pelo apoio e compreensão.

À todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, que continuam lutando para que o curso melhore a cada dia e não esmorecem diante das dificuldades, formando aqui, não apenas profissionais na especialidade em engenharia, mas pessoas incentivadas ao trabalho em grupo e ao bom relacionamento humano.

À seção de Pós – Graduação que estavam sempre prontos para atender às necessidades.

À todos os colegas em especial ao meu amigo Marco Aparecido Queiroz Duarte pela convivência harmoniosa e prestatividade desde os tempos de graduação.

APOIO FINANCEIRO

Este trabalho contou com o apoio financeiro da FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, através do projeto 97/04061-0.



RESUMO

Neste trabalho é apresentado um algoritmo de Busca Tabu (Tabu Search) para resolver um problema de alocação de capacitores em sistemas de distribuição radial. O modelo matemático é um problema de programação não linear inteiro misto de difícil solução usando técnicas clássicas de otimização. O algoritmo encontra os pontos de localização para a instalação dos capacitores, os tipos e tamanhos dos capacitores e o esquema de controle dos bancos de capacitores para diferentes níveis de carga. O algoritmo é usado para analisar vários sistemas disponíveis na literatura especializada.

O algoritmo desenvolvido foi implementado em linguagem de programação Fortran (Fortran Visual Workbench v 1.0) e apresenta resultados para três sistemas hipotéticos amplamente divulgados e conhecidos na literatura especializada e um sistema real. Os três sistemas hipotéticos são de 10 Barras [3], 34 Barras [16] e 70 Barras [7]. O sistema real é o sistema de distribuição de energia elétrica da cidade de Três Lagoas – MS, do Sistema CESP. Seus dados completos encontram-se no Apêndice – A.

ABSTRACT

In this work it is presented a Tabu Search's algorithm to solve the problem of capacitors placement on radial distribution systems. The mathematic model is non linear programing integer problem, hard to solve using classical aproachs of optmization. The algorithm finds the location points to install the capacitors, the capacitors kinds and sizes and the banks control schem for different load levels. The algorithm is used to analyse several available systems in the specialized literature.

The developed algorithm was implemented in Fortran programming language (Fortran Visual Workbench v 1.0). The results are presented for three hypothetical systems largely known which data are available in specialized literature and a real system. The three hypothetical system are 10-bus [3], 34-bus [16] and 70-bus[7]. The real system is the distribution system of Três Lagoas – MS, from the CESP system all the data are in apendice – A.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de Duração de Carga.

Figura 2 – Diagrama Unifilar de um Alimentador de Distribuição.

Figura 3 – Função de Custo dos Capacitores.

Figura 4.1 – Modelo Básico.

Figura 4.2 – Formulação Matemática.

Figura 5.1 – Funções de Tabu Search.

Figura 5.2 – Transição em Tabu Search.

Figura 5.3 – Execução de um movimento TS com memória de curto prazo.

Figura 5.4 – Implementação simples de Intensificação em TS.

Figura 5.5 – Implementação simples de Diversificação em TS.

Figura 5.6 – Diversificação usando memória de longo prazo baseada em “recencia”.

Figura 5.7 – Path Relinking em TS.

Figura A.1. – Diagrama unifilar do sistema de distribuição de 10 barras.

Figura A.2. – Diagrama unifilar do sistema de distribuição de 34 barras.

Figura A.3. – Diagrama unifilar do sistema de distribuição de 70 barras.

Figura A.4. – Diagrama unifilar do sistema de distribuição de 135 barras.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Alocação de Capacitores fixos.
- Tabela 2 – Configurações quase – ótimas para alocação de capacitores fixos (10 barras).
- Tabela 3 – Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (10 barras).
- Tabela 4 – Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores fixos (34 barras).
- Tabela 5 – Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores fixos (34 barras).
- Tabela 6 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores fixos (34 barras).
- Tabela 7 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (34 barras).
- Tabela 8 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (34 barras).
- Tabela 9 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (34 barras).
- Tabela 10 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (34 barras).
- Tabela 11 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (34 barras).
- Tabela 12 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (34 barras).
- Tabela 13 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (34 barras).
- Tabela 14 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (34 barras).
- Tabela 15 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (34 barras).
- Tabela 16 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores fixos (70 barras- 1 ano).
- Tabela 17 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores fixos (70 barras- 1 ano).
- Tabela 18 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores fixos (70 barras- 1 ano).
- Tabela 19 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 1 ano).
- Tabela 20 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 1 ano).
- Tabela 21 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 1 ano).
- Tabela 22 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 1 ano).

Tabela 23 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 1 ano).
Tabela 24 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 1 ano).
Tabela 25 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 1 ano).
Tabela 26 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 1 ano).
Tabela 27 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 1 ano).
Tabela 28 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores fixos (70 barras- 10 anos).
Tabela 29 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores fixos (70 barras- 10 anos).
Tabela 30 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores fixos (70 barras- 10 anos).
Tabela 31 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 10 anos).
Tabela 32 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 10 anos).
Tabela 33 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 10 anos).
Tabela 34 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 10 anos).
Tabela 35 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 10 anos).
Tabela 36 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 10 anos).
Tabela 37 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 10 anos).
Tabela 38 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 10 anos).
Tabela 39 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (70 barras – 10 anos).
Tabela 40 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores fixos (135 barras).
Tabela 41 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores fixos (135 barras).
Tabela 42 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores fixos (135 barras).
Tabela 43 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (135 barras).
Tabela 44 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (135 barras).
Tabela 45 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (135 barras).
Tabela 46 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (135 barras).
Tabela 47 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (135 barras).
Tabela 48 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (135 barras).
Tabela 49 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (135 barras).
Tabela 50 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (135 barras).
Tabela 51 - Soluções quase – ótimas para alocação de capacitores variáveis (135 barras).
Tabela A1 – Dados da referência [3].

Tabela A2 – Dados da referência [3].

Tabela A3 – Dados da referência [16].

Tabela A4 – Dados da referência [16].

Tabela A5 – Dados da referência [7].

Tabela A6 – Dados da referência [7].

Tabela A7 – Dados do Sistema de 135 Barras.

Tabela A8 – Dados do Sistema de 135 Barras.

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	5
INTRODUÇÃO	5
CAPÍTULO II	8
O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE REATIVOS NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL.....	8
2.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE REATIVOS.....	8
CAPÍTULO III.....	10
TÉCNICAS DE SOLUÇÃO USADAS NO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE CAPACITORES	10
3.1. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO CLÁSSICA	10
3.1.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	10
3.1.2. CURVA DE DURAÇÃO DE CARGA	10
3.1.3. FLUXO DE CARGA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL	11
3.1.4. FLUXO DE CARGA EM ALOCAÇÃO DE CAPACITORES	15
3.1.5. TIPOS DE CAPACITORES USADOS	15
3.1.6. FUNÇÃO OBJETIVO NO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE REATIVOS	16
3.1.7. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA GERAL	17
3.2. ALGORITMOS COMBINATORIAIS	18
3.2.1. SIMULATED ANNEALING: TEORIA	18
3.2.1.1. ALGORITMO DE METRÓPOLIS	18



3.2.1.2. "SIMULATED ANNEALING": USADO NO PROBLEMA GERAL DE ALOCAÇÃO DE CAPACITORES	19
3.2.1.3. CONFIGURAÇÕES E ESPAÇO DE CONFIGURAÇÕES	20
3.2.1.4. ESTRUTURA DE VIZINHANÇA – MECANISMO DE TRANSIÇÃO.....	21
3.2.1.5. PROGRAMA DE ESFRIAMENTO – COOLING SCHEDULE.....	22
3.2.1.6. ALGORITMO SA. PARA O PROBLEMA DE CAPACITORES FIXOS.....	23
3.2.1.7. ALGORITMO SA. PARA O PROBLEMA GERAL DE ALOCAÇÃO DE CAPACITORES VARIÁVEIS	25
3.2.1.8. RESULTADOS NUMÉRICOS OBTIDOS COM O ALGORITMO SA..	29
3.2.2. O ALGORITMO GENÉTICO : TEORIA.....	29
3.2.2.1. ALGORITMO GENÉTICO USADO NO PROBLEMA GERAL DE ALOCAÇÃO DE CAPACITORES.....	31
3.2.2.2. FUNÇÃO OBJETIVO.....	32
3.2.2.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	32
3.2.2.4. ASPECTOS ESPECÍFICO DO ALGORITMO GENÉTICO IMPLEMENTADO.	33
3.2.2.5. ALGORITMO IMPLEMENTADO.	34
3.2.2.6. RESULTADOS OBTIDOS.....	35
3.2.3. ALGORITMO DE BUSCA TABU USADO NO PROBLEMA GERAL DE ALOCAÇÃO DE CAPACITORES.....	36
3.2.3.1. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	36
3.2.3.2. ALGORITMO BUSCA TABU PROPOSTO.....	36
3.2.3.3. ALGORITMO BUSCA TABU IMPLEMENTADO.....	37
CAPÍTULO IV	39
ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA RADIAL	39



4.1. ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL:MÉTODO DE SOMA DE POTÊNCIAS	39
4.1.1. INTRODUÇÃO	39
4.1.2. JUSTIFICATIVA MATEMÁTICA	40
4.1.3. ALGORITMO PROPOSTO	43
4.1.4. COMENTÁRIOS ADICIONAIS SOBRE O ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA.....	43
CAPÍTULO V	44
ALGORITMO DE BUSCA TABU (TS).....	44
5.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE TS.	46
5.1.1. MEMÓRIA DE CURTO PRAZO E SEUS PRINCIPAIS ELEMENTOS	50
5.1.2. MEMÓRIA DE LONGO PRAZO E SUAS ESTRATÉGIAS ASSOCIADAS	52
5.1.3. OSCILAÇÃO ESTRATÉGICA	57
5.1.4. PATH RELINKING.....	60
5.2. ALGORITMO DE BUSCA TABU PARA ALOCAÇÃO DE CAPACITORES FIXOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL.....	62
5.2.1. INTRODUÇÃO	62
5.2.2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO ALGORITMO TABU SEARCH PARA O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE CAPACITORES FIXOS	63
5.2.2.1. TÉCNICA DE REDUÇÃO DE BARRAS CANDIDATAS.....	63
5.2.2.2. DETERMINAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO INICIAL.....	65
5.2.2.3. USO DE INDICADORES DE SENSIBILIDADE..	65
5.2.2.4. ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DE VIZINHOS.....	67
5.2.2.5. ESTRATÉGIA TABU SEARCH.....	67
5.3. ALGORITMO TABU SEARCH IMPLEMENTADO.	68



5.3.1. FASE I: ESTRATÉGIA HEURÍSTICA	68
5.3.2. FASE II: ESTRATÉGIA TABU SEARCH.....	69
5.3.3. ALGORITMO IMPLEMENTADO.....	70
5.3.4. PROCESSO TSM	71
5.4. O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE CAPACITORES VARIÁVEIS.	71
CAPÍTULO VI.....	73
TESTES E RESULTADOS OBTIDOS	73
6.1. SISTEMA DE 10 BARRAS[3].....	73
6.2. SISTEMA DE 34 BARRAS[16].....	77
6.3. SISTEMA DE 70 BARRAS[7].....	90
6.3.1. SISTEMA TESTADO PARA UM HORIZONTE DE UM ANO.....	90
6.3.2. SISTEMA TESTADO PARA UM HORIZONTE DE DEZ ANOS	99
6.4. SISTEMA DE 135 BARRAS	112
CAPÍTULO VII	127
CONCLUSÕES	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
APÊNDICE A.....	133
APÊNDICE B.....	152



CAPÍTULO I

Introdução

Em sistemas de distribuição radial devem ser instalados capacitores para compensar a potência reativa a fim de reduzir a potência e as perdas de energia, melhorar o perfil de tensão e aliviar a capacidade do sistema. Assim, aparece o problema de como alocar capacitores no sistema para que se atinja, da melhor maneira, os benefícios antes mencionados. Este problema é chamado de **problema geral de alocação de capacitores** ou **alocação ótima de capacitores** em sistemas de distribuição radial.

O problema geral de alocação de capacitores consiste em determinar a localização onde devem ser instalados os capacitores, os tipos e capacidades em kVAr dos capacitores que podem ser utilizados e o esquema de controle para os capacitores variáveis de tal maneira que seja minimizada uma função objetivo sujeita a restrições de operação e de carga (tipicamente restrições de módulo de tensão) para os diferentes níveis de carga.

Este problema é interessante porque sua formulação matemática leva a um modelo matemático conhecido como sendo um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM) não diferenciável. A função objetivo do problema é não diferenciável onde os custos dos capacitores variam em forma discreta devido aos bancos de capacitores usados na prática, e a existência de uma função objetivo não diferenciável torna muito difícil a utilização da maioria dos métodos de programação não linear. Como a carga de um sistema de distribuição é variável durante o dia, deve-se discretizar essa variação em um número determinado de intervalos de operação que é chamado



nível de carga. Para cada nível de carga, deve-se determinar o esquema de operação (control settings) dos capacitores variáveis. Assim, o tamanho e o esquema de operação dos capacitores são variáveis discretas. Portanto, a natureza do problema sugere a utilização de algoritmos de uso geral como os algoritmos combinatoriais tais como Simulated Annealing (SA), Algoritmos Genéticos (GA), Busca Tabu (TS), etc.

A solução de um problema de alocação de capacitores deve fornecer a informação das localizações (barras do sistema), onde devem ser instalados os capacitores, os tipos e magnitudes de capacitores que devem ser instalados em cada lugar (barra do sistema) e um esquema de controle (a posição de operação de cada um dos capacitores variáveis) para cada um dos diferentes níveis de carga considerados.

Na presente pesquisa, apresenta-se um algoritmo de busca tabu para resolver o problema de alocação de capacitores em sistemas de distribuição radial. No capítulo I é realizada uma breve introdução do problema de alocação de capacitores.

No capítulo II é apresentada a modelagem matemática do problema de alocação de capacitores em sistemas de distribuição radial. No capítulo III é apresentada a modelagem matemática com maior detalhe, assim como, os problemas correlatos como a resolução de um problema de fluxo de carga radial rápido e robusto. Também é analisado o uso de técnicas de Análise de Sensibilidade que é muito aplicada como elemento auxiliar na resolução do problema de alocação de capacitores, assim como, algumas técnicas propostas na literatura especializada para resolver o problema de alocação de capacitores, especialmente os chamados algoritmos combinatoriais.

No capítulo IV é apresentado um dos algoritmos de fluxo de carga radial usados para resolver o problema do fluxo de carga radial. Este algoritmo, chamado de Método de Soma de Potências, é freqüentemente usado por pesquisadores na área de distribuição de energia elétrica.

No capítulo V é apresentada uma teoria básica do algoritmo de busca tabu (tabu search) e o algoritmo de busca tabu proposto para o problema de alocação de capacitores em sistema de distribuição radial. No capítulo VI são testados três sistemas conhecidos na literatura especializada e um sistema real usando o algoritmo de busca tabu proposto.



No capítulo VII são apresentadas as principais conclusões e no apêndice são apresentados os dados dos sistemas de distribuição analisados.



CAPÍTULO II

O Problema da Alocação de Reativos na Operação de Sistemas de Distribuição Radial.

2.1. Formulação do Problema de Alocação de Reativos.

A formulação matemática do problema de alocação de capacitores em sistemas de distribuição radial assume a seguinte forma:

$$\text{Min } v = \sum_{i=1}^{i=L} C_i(q_i^0) + \sum_{j=1}^{j=L} k_{ej} T_j P_{perdas,j}(x^j, q^j)$$

$$\text{s.a.} \quad P_{fluxo}(z^i, q^i) = 0$$

$$V_i^{\min} \leq V_i^j \leq V_i^{\max}$$

q_i^j discreto :

Para capacitores fixos: $q_i^l = q_i^j = q_i^0 ; l, j \in \{1, 2, 3, \dots, L\}$

Para capacitores variáveis: $0 \leq q_i^j \leq q_i^0 ; i \in \{1, 2, 3, \dots, I\}$



Na formulação acima, a relação $[P_{fluxo}(z^i, q^i)=0]$ representa as restrições de fluxo de carga; $[V_i^{\min} \leq V_i^j \leq V_i^{\max}]$ representa restrições de limites de operação da tensão para cada barra e para cada nível de carga analisado; q^0 é o vetor que determina o tamanho do banco de capacitores e cada elemento de q^0 tem um valor que é múltiplo do tamanho padrão de bancos de capacitores; q^j é o vetor que caracteriza o esquema de controle dos bancos de capacitores em cada nível de carga j e cujos componentes são variáveis discretas; $C_i(q_i^0)$ é uma função não diferenciável e representa o investimento pela instalação do capacitor na barra i ; $P_{perda,j}$ é a perda de potência quando o sistema opera no nível de carga j durante o tempo T_j ; k_{ej} representa os custos de perdas de energia para cada nível de carga; $x_k = [P_k, Q_k, |V_k|^2]$ e $z_k = [P_k, Q_k]$ representam vetores de estado das variáveis P_k (Potência Ativa), Q_k (Potência Reativa) e $|V_k|^2$ magnitude da tensão na barra k ; L é o número de níveis de carga e I é o número de barras candidatas à instalação de capacitores.



CAPÍTULO III

Técnicas de Solução Usadas no Problema de Alocação de Capacitores.

3.1. Métodos de Otimização Clássica.

3.1.1. Formulação do Problema.

Nesta parte é discutida separadamente cada parte importante do problema de alocação de capacitores, obtendo-se, finalmente, a formulação matemática do problema apresentado em [7].

3.1.2. Curva de Duração de Carga.

A perda de energia é um dos parâmetros que deve ser usado na análise e, portanto, deve ser considerado um período de tempo T . Para o período de tempo T , assume-se que as variações de carga podem ser representadas de maneira discretizada como é mostrado na figura 1. Além disso, assume-se que o perfil de carga varia de maneira uniforme. Portanto, assumindo que $S(\tau)$ é a curva de variação de carga comum, nota-se que uma carga qualquer como Q_L pode ser representada da seguinte maneira:

$$Q_L(\tau) = Q_L^p(\tau) s(\tau) \quad (3.1)$$



em que Q_L^0 representa o valor de pico da carga. Assim, o período T de análise pode ser dividido como um conjunto de nt períodos (intervalos) com perfil de carga constante onde nt é o número de níveis de carga em que foi discretizada a curva de carga.

Para cada nível de carga, deve-se satisfazer as seguintes exigências:

- As equações de fluxo de potência.
- Os limites de operação dos módulos de tensão.
- A capacidade e as restrições de operação das variáveis de controle que, neste caso, são os capacitores.

Portanto, é evidente que para conhecer a operação em cada nível de carga, deve-se resolver **um problema de fluxo de carga de sistemas de distribuição radial**.

3.1.3. Fluxo de Carga 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. Para fins ilustrativos, apresenta-se a metodologia de fluxo de carga radial conhecida como **DistFlow (distribuição de fluxo - distribution flow)** apresentada em [7].



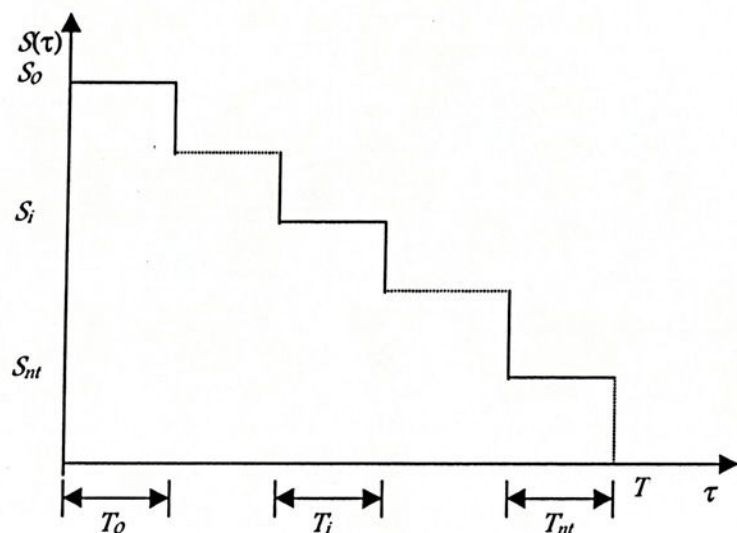


Figura 1: Curva de Duração de Carga

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 de alocação ótima de capacitores, 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 rápidos.

Na figura 2, apresenta-se um diagrama unifilar de um sistema típico de distribuição radial. Pode ser mostrado que o fluxo de potência através de um ramo pode ser representado através das seguintes equações recursivas:

$$P_{k+1} = P_k - r_{k+1} P_k^2 + \left(\frac{Q_k}{V_k}\right)^2 - P_{Lk+1} \quad (3.2)$$

$$Q_{k+1} = Q_k - x_{k+1} P_k^2 + \left(\frac{Q_k}{V_k}\right)^2 - Q_{Lk+1} + Q_{ck+1} \quad (3.3)$$

$$V_{k+1}^2 = V_k^2 - 2(r_{k+1} P_k + x_{k+1} Q_k) + (r_{k+1}^2 + x_{k+1}^2) P_k^2 + \left(\frac{Q_k}{V_k}\right)^2 \quad (3.4)$$

em que P_k e Q_k são 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 $k + 1$.

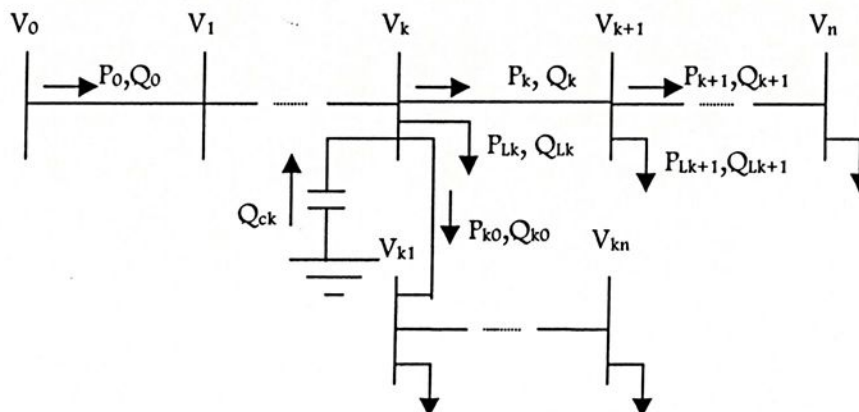


Figura 2: Diagrama Unifilar de um Alimentador de Distribuição

As equações (3.2), (3.3) e (3.4), chamadas de equações de fluxo de ramos, podem ser representadas em forma sintetizada conforme segue:

$$x_{k+1} = f_{k+1}(x_k, u_{k+1}) \quad (3.5)$$

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 (3.5) tem-se que $u_k = 0$. Agora, pode-se usar um vetor u para representar todos os capacitores colocados em nc barras do sistema:

$$u^T = [u_1 \ \dots \ u_{nc}] = [Q_{cn1} \ \dots \ Q_{cnnc}]$$

Adicionalmente às equações (3.5), o sistema deve satisfazer condições de fronteira para cada ramal (ou ramificação), levando em consideração a ramificação principal como ramificação 0. Por exemplo, para a ramificação k mostrada na figura 2, deve-se satisfazer as seguintes condições de fronteira:

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

$$x_{k03} = V_{k0}^2 = V_k = x_{0k3} \quad (3.6)$$

2. No final da ramificação não existe potência transferida através dos ramos, assim tem-se que:

$$x_{kn1} = P_{kn} = 0 ; \quad x_{kn2} = Q_{kn} = 0 \quad (3.7)$$

Portanto, para um sistema genérico como o apresentado na Figura 2 (com n barras e l ramificações além da ramificação principal), existem $3(n + l + 1)$ equações DistFlow correspondentes às equações (3.5), (3.6) e (3.7). Este conjunto de equações pode ser representado na seguinte forma compacta:

$$G(x, u) = 0 \quad (3.8)$$

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 (3.8) simplesmente representam 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 (3.8) são dados do problema os parâmetros nos ramos, as demandas nas barras e o conjunto de capacitores alocados (conhecendo a localização, a capacidade, tipo e ponto de operação). Resolver (3.8) 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, (3.8) 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 (3.8).



3.1.4. Fluxo de Carga em Alocação de Capacitores.

Para o problema de alocação de capacitores com nt diferentes níveis de carga existem nt problemas de fluxo de carga do tipo mostrado em (3.8), assim tem-se o seguinte sistema:

$$G^i(x^i, u^i) = 0 \quad i = 0, 1, \dots, nt \quad (3.9)$$

em que x^i e u^i representam o estado e as variáveis de controle para o perfil de carga i .

As restrições de tensão basicamente se restringem a manter valores mínimo e máximo para o módulo da tensão das barras do sistema para cada tipo de perfil de carga, assim deve-se satisfazer as seguintes restrições:

$$(V^{\min})^2 \leq (V_j^i)^2 = v_j^i(x^i) \leq (V^{\max})^2 \quad j = 1, \dots, n; \quad i = 0, 1, \dots, nt \quad (3.10)$$

As restrições anteriores representam restrições funcionais de desigualdade e podem ser representados na seguinte forma:

$$H^i(x^i) \leq 0 \quad i = 0, 1, \dots, nt \quad (3.11)$$

3.1.5. Tipos de Capacitores Usados.

No problema de alocação de reativos são usados dois tipos de capacitores:

1. Capacitores Fixos:

Os capacitores fixos são tratados simplesmente como fontes de potência reativa de módulo constante para todos os níveis de carga, então é válida a seguinte relação:

$$u^0 = u^1 = \dots = u^{nt} \quad (3.12)$$

2. Capacitores Variáveis (Switched):



Neste caso se assume que podem ser alterados os “taps” dos capacitores para operar de maneira diferente para cada tipo de perfil de carga, portanto, para cada capacitor k existem $nt + 1$ formas de operação, $u_k^i; i=0,1,\dots,nt$ que devem ser determinados, uma para cada tipo de operação ou perfil de carga. É lógico supor que a capacidade instalada para operar na carga pico, u_k^0 é maior que a capacidade em operação para outro nível de carga u_k^i . Portanto, os tamanhos dos capacitores (capacidade instalada) que devem ser determinados u^0 e as capacidades operando (ponto de operação do capacitor variável) para cada perfil de carga devem satisfazer a seguinte restrição:

$$0 \leq u_k^i \leq u_k^0 \quad (3.13)$$

3.1.6. Função Objetivo no Problema de Alocação de Reativos.

A função objetivo apresenta duas parcelas claramente diferenciadas: a redução de perdas de energia e o investimento pela instalação dos capacitores.

Para cada nível (perfil) de carga i as perdas de potência no sistema é $p_i(x^i)$ e, portanto, o custo pelas perdas de energia pode ser representado da seguinte forma:

$$k_e \sum_{i=0}^{nt} T_i p_i(x^i) \quad (3.14)$$

em que T_i é a duração da carga no nível i e a constante k_e é o custo de energia por unidade de energia (dólares/kWh). Pode-se adicionar na função objetivo o custo das perdas de potência ativa para o nível de carga pico modificando adequadamente T_0 .

A função de custo do capacitor apresenta a forma escalonada (“step like”) mostrada na figura 3 onde na prática são instalados bancos de capacitores de capacidades discretas. Assim, existe um custo fixo pela infra-estrutura de instalação que deve ser considerado toda vez que é decidida a instalação de capacitores e outra parcela que corresponde à compra dos bancos de capacitores instalados.

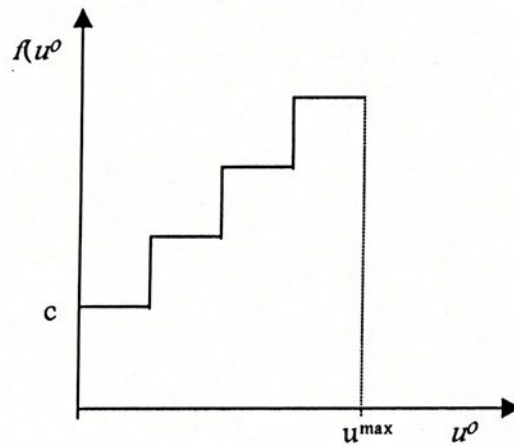


Figura 3: Função de Custo dos Capacitores

3.1.7. Formulação Matemática Geral.

Seja nc o número de barras candidatas a alocação de capacitores, C_1 o conjunto de capacitores fixos e C_2 o conjunto de capacitores variáveis então o problema geral de alocação de capacitores pode ser formulado como o seguinte PNLIM:

$$\min v = k_e \sum_{i=0}^{nt} T_i p_i(x^i) + \sum_{k=1}^{nc} f(u_k^0) \quad (3.15)$$

s.a .

$$G^i(x^i, u^i) = 0; \quad i=0,1,\dots,nt$$

$$H^i(x^i) \leq 0; \quad i=0,1,\dots,nt$$

$$0 \leq u_k^i \leq u_k^0; \quad k \in C_1$$

$$0 \leq u_k^i = u_k^0; \quad k \in C_2$$

3.2. Algoritmos Combinatoriais.

Apresenta-se, em forma resumida, uma análise crítica de três tipos de algoritmos disponíveis na literatura especializada para resolver o problema de alocação de capacitores em sistemas de distribuição radial.

3.2.1. “Simulated Annealing”: Teoria

3.2.1.1. Algoritmo de Metrópolis

A metodologia “simulated annealing” foi definida no início da década de 80, como uma nova ferramenta a ser empregada na solução de grandes problemas combinatoriais. Surgiu do campo da termodinâmica como consequência da comparação de problemas formulados neste campo com os do campo da pesquisa operacional; é uma metodologia simples e de grande potencialidade para ser aplicada a uma grande variedade de problemas.

A idéia original que deu lugar a esta metaheurística é chamada **Algoritmo de Metrópolis**, o que por sua vez está baseado no método de **Monte - Carlo**, com o qual se estudam as propriedades de equilíbrio na análise do comportamento microscópico dos corpos.

O algoritmo de Metrópolis gera uma sequência de estados de um sólido, ou seja: dado um sólido em um estado i e com energia E_i , gera-se o estado seguinte j mediante a aplicação de um mecanismo que transforma para o estado seguinte através de um pequeno distúrbio. A energia do próximo estado é E_j ; se a diferença de energia $E_j - E_i$ é menor ou igual a zero, o estado j é aceito. Se a diferença de energia é maior que zero, o estado j é aceito com certa probabilidade, a qual é dada como:

$$e^{\left\{ \frac{E_i - E_j}{k_b T} \right\}}$$

Em que T denota a temperatura e k_b uma constante física conhecida como constante de Boltzmann. A regra de aceitação descrita é chamada critério de Metrópolis e o algoritmo como algoritmo de Metrópolis.



Se a diminuição da temperatura é feita de maneira paulatina, o sólido poderá alcançar o estado de equilíbrio em cada nível de temperatura. No algoritmo de Metrópolis isto se consegue após gerar um grande número de transições em um dado nível de temperatura.

Para cada valor de temperatura T , o sólido acha um equilíbrio térmico, caracterizado pela probabilidade de estar em um estado i com energia E_i dado pela distribuição de Boltzmann:

$$P_T\{X=i\} = \frac{1}{Z(T)} e^{\left(\frac{-E_i}{k_b T}\right)}$$

Em que:

X denota uma variável estocástica do estado atual do sólido e $Z(T)$ é definida assim:

$$Z(T) = \sum_j e^{\left(\frac{-E_j}{k_b T}\right)}$$

é um fator de normalização, conhecido como função partição:

k_b é a constante de Boltzmann; e

$$e^{\left(\frac{-E_i}{k_b T}\right)}$$

é conhecido como fator de boltzmann.

3.2.1.2. “Simulated Annealing” Usado no Problema Geral de Alocação de Capacitores.

Em [1,2] foi apresentado um algoritmo de simulated annealing (SA) para o problema de alocação de capacitores.

Em [1] são apresentadas, claramente, as principais etapas que devem ser definidas ou caracterizadas para usar um algoritmo SA num problema específico. Essas etapas são separadas em 4 partes: 1) identificação do espaço de configurações factíveis; 2) identificação de um movimento factível ou mecanismo de transição que permite encontrar uma configuração candidata a partir da

configuração corrente; 3) identificação da função objetivo e, 4) formulação do programa de esfriamento (cooling schedule).

A estratégia de busca escolhida determina as características das 3 primeiras etapas do parágrafo anterior. O Algoritmo SA apresentado tem como estratégia fundamental iniciar o processo a partir de uma configuração factível e as novas configurações aceitas devem ser necessariamente factíveis. Assim, o espaço de configurações factíveis é claramente especificado. O mecanismo de transição é modificado para rejeitar sistematicamente configurações candidatas infactíveis e aceitar as configurações factíveis de acordo com os critérios tradicionais de SA. A estratégia apresentada, de aceitar somente configurações factíveis, representa um tipo de filosofia de trabalho para implementar problemas restritos usando os algoritmos combinatoriais; outra estratégia significativamente diferente é aceitar configurações factíveis e infactíveis, penalizando adequadamente a função objetivo das configurações infactíveis. Escolher uma das alternativas representa tomar uma decisão que deve influenciar significativamente no desempenho do algoritmo desenvolvido e essa decisão depende de vários fatores especialmente do tipo do problema que está sendo pesquisado. Provavelmente, o algoritmo apresentado em [1] apresentou resultados satisfatórios porque praticamente todas as configurações candidatas geradas são factíveis devido ao tipo de problema pesquisado mas principalmente devido aos problemas testados. Nos problemas testados, a única fonte de infactibilidade são as violações de módulo de tensão o que, praticamente, não acontecem nos sistemas testados. Estas etapas serão analisadas de maneira separada.

3.2.1.3. Configuração e Espaço de Configurações.

Para caracterizar o espaço de configurações, deve-se especificar uma configuração e o mecanismo de transição. Em [1], para o problema de alocação de capacitores fixos, uma configuração é definida como uma proposta de alocação $\Omega = \{u_1, u_2, \dots, u_c\}$ em que u^i representa a capacidade de geração reativa do capacitor alocado na barra i e permanece fixo para todos os níveis de carga. Para o caso de alocação de capacitores variáveis uma configuração é representada por $\Omega = \{u_1, u_2, \dots, u_c\}$ em que $u_i = \{u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^{nt}\}$ é um vetor de dimensão nt e u_i^j determina a capacidade operativa (ponto de operação - posição de operação) do capacitor alocado na barra i operando no nível de carga j . Assim, uma configuração e o espaço de configurações estão adequadamente



caracterizadas. É possível ainda diminuir o espaço de configurações sem eliminar a configuração ótima incorporando a seguinte restrição:

$$0 \leq u_i^p \leq u_i^0 \leq u_{\max} \quad (3.16)$$

em que u_i^p representa a capacidade de geração de reativos (capacitores alocados) na barra i para o nível de carga mais pesado, u_i^0 representa a capacidade alocada na barra i (tamanho do capacitor) e $u^{\max}$ é a capacidade máxima de alocação permitida em cada barra (tipicamente 4 bancos de capacitores de 300 kVAr cada).

3.2.1.4. Estrutura de Vizinhança - Mecanismo de Transição.

Em SA, deve-se especificar uma estrutura de vizinhança, isto é, deve-se especificar os mecanismos de transição ou movimentos que permitem identificar uma configuração candidata (vizinha) que pode ser encontrada a partir da configuração corrente. A aplicação de cada um de todos os movimentos considerados factíveis permite identificar todas as configurações vizinhas da configuração corrente. SA seleciona aleatoriamente um movimento e identifica a configuração vizinha correspondente como sendo candidata a se transformar em configuração corrente. Em [1] são identificados cinco tipos de movimentos (mecanismos de transição):

1 - Movimento de adição ou retirada:

Selecionar aleatoriamente uma das nc barras candidatas. Decidir também aleatoriamente a decisão de adição ou retirada de capacidade de geração de reativos na barra selecionada. Escolher um tamanho de passo de capacidade de geração de reativos (por exemplo 30 kVAr) e proceder à adição ou retirada de reativos. Por exemplo, se a barra selecionada apresenta na configuração corrente uma capacidade de 240 kVAr, na configuração candidata obtida após implementar este mecanismo de transição a capacidade na barra escolhida deve ser de 210 kVAr ou 270 kVAr.

2 - Movimento multiplicativo de adição ou retirada:



Proceder de maneira similar ao item anterior mas neste caso, pode-se adicionar ou retirar um múltiplo inteiro do tamanho padrão do capacitor escolhido para ser instalado na barra selecionada.

3 - Movimento de troca de capacitores:

Neste caso são selecionadas aleatoriamente duas barras candidatas à alocação e, deve-se fazer uma troca das capacidades instaladas nas barras selecionadas. Assim, por exemplo, se na barra i existem instalados 300 kVAr e na barra j 600 kVAr, após a aplicação do movimento é obtida a configuração candidata com 600 kVAr na barra i e 300 kVAr na barra j .

Os três tipos de movimentos são aplicados de maneira não uniforme para os dois tipos de problemas (capacitores fixos e capacitores variáveis). Assim, por exemplo, para temperaturas elevadas 40% das configurações candidatas são obtidas aplicando a primeira estratégia, 40% aplicando a segunda estratégia e 20% aplicando a terceira. Para o problema de alocação de capacitores variáveis são especificados dois tipos adicionais de movimentos:

1 - Operação síncrona:

Neste caso os controles dos capacitores são mudados para todos os níveis de carga de uma barra de maneira sincronizada em cada iteração.

2 - Operação assíncrona:

Neste caso os controles dos capacitores para a carga pico e para os outros níveis de carga são mudados, independentemente, em cada sub-iteração.

3.2.1.5. Programa de Esfriamento - Cooling Schedule.

No Programa de Esfriamento devem ser especificadas 4 grandezas: 1) a temperatura inicial; 2) a taxa de diminuição de temperatura; 3) o número de tentativas em cada nível de temperatura e, 4) o critério de parada.



Em [1] a temperatura é determinada empiricamente de maneira que no primeiro nível de temperatura sejam aceitas 85% das configurações candidatas para o problema de alocação de capacitores fixos e 55% das configurações candidatas para o problema de alocação de capacitores variáveis. Nestes testes são consideradas as configurações candidatas rejeitadas por serem ineficazes e aquelas rejeitas pelos critérios usuais de SA.

Em [1] é usada uma taxa de diminuição de temperatura β que pode variar no intervalo $\beta \in [0,85-0,98]$ e o valor usado em cada iteração é dependente de dois fatores: 1) taxa de aceitação e, 2) valores médios e a variação da função objetivo para o nível de temperatura considerado. Em cada nível de temperatura é realizado um conjunto de n_k tentativas sem especificar o valor de n_k utilizado. Também é usado um critério misto de parada: se durante 5 níveis consecutivos de temperatura o valor médio da função objetivo não varia significativamente (por exemplo menos de 1%) então o processo é considerado congelado e, deve-se parar.

3.2.1.6. Algoritmo SA para o Problema de Capacitores Fixos.

Em [2] é apresentado o seguinte algoritmo SA para o problema de alocação de reativos com capacitores fixos:

1 - Leitura de dados e dos parâmetros de controle do algoritmo SA:

Ler os dados do sistema e escolher ou determinar os parâmetros de controle do algoritmo SA como a temperatura inicial, o número de tentativas em cada nível de temperatura e o gerador de número aleatório.

2 - Obtenção da configuração factível inicial:

Implementar os seguintes passos para obter uma configuração inicial:

- (a) Escolher uma configuração inicial do espaço de configurações usando um gerador de número aleatório.



(b) Para cada nível de carga, processar um **fluxo de carga** de distribuição radial para checar a factibilidade da configuração para todos os níveis de carga. Se alguma restrição para algum nível de carga é violada então voltar a (a); em caso contrário ir a (c).

(c) Calcular o valor da função objetivo (custo total).

3 - Programa de esfriamento - cooling schedule:

Para cada nível de temperatura T_k realizar n_k tentativas de obtenção de novas configurações. Para $p=1,2,\dots,n_k$, implementar os passos 4 e 5; em caso contrário, se já foram realizadas as n_k tentativas, ir ao passo 6.

4 - Geração de uma configuração candidata factível:

(a) Encontrar uma configuração candidata usando um dos mecanismos de transição propostos.

(b) Para cada nível de carga, processar um **fluxo de carga** de distribuição radial para checar a factibilidade da configuração para todos os níveis de carga. Se alguma restrição para algum nível de carga é violada então voltar a (a); em caso contrário ir a (c).

(c) Calcular o valor da função objetivo (custo total).

5 - Teste de aceitação da configuração candidata:

Aceitar ou rejeitar a configuração candidata de acordo com os critérios de aceitação de SA.

6 - Checar o critério de parada:

Se o critério de parada não é satisfeito voltar ao passo 3; em caso contrário ir ao passo 7.



7 - Imprimir os resultados finais (configuração ótima).

A resposta que fornece o algoritmo anterior é um vetor $u = (u_1, u_2, \dots, u_{nc}) = u^p$ de onde podem ser obtidos os tamanhos adequados do vetor u^0 usando a relação $u_i \leq u_i^0$, $i = 1, 2, \dots, nc$ e u_i^0 seria o menor valor que é um múltiplo inteiro de um banco de capacitores. Assim, por exemplo, se foi usado um tamanho de passo de 30 kVAr na aplicação do mecanismo de perturbação para obter uma configuração candidata o processo pode parar indicando para uma barra i uma capacidade de $u_i = 270$ kVAr e se existem bancos de 300 kVAr então a capacidade que deve ser alocada é $u_i^0 = 300$ kVAr.

O algoritmo anterior, em geral está corretamente formulado. Entretanto existem alguns aspectos que devem ser observados:

- Não utiliza uma estratégia eficiente para encontrar uma boa configuração inicial que pode ser rápida e eficientemente encontrada usando uma heurística eficiente.
- O fato de trabalhar somente com configurações sempre factíveis pode elevar excessivamente o esforço computacional. Este aspecto deve ser observado experimentalmente.
- Não está claro a estratégia usada para encontrar a temperatura inicial.
- Não se comenta a utilização e o armazenamento da incumbente (a melhor configuração factível encontrada).

3.2.1.7. Algoritmo SA para o Problema Geral de Alocação de Capacitores Variáveis.

Em [2] apresenta-se o algoritmo SA para o problema geral de alocação de reativos usando capacitores fixos e variáveis. O algoritmo é parecido ao caso anterior mas como o espaço de configurações foi acrescido significativamente, então existe a proposta de usar dois laços de controle para o algoritmo: um laço externo que controla a posição de controle dos capacitores para a carga



pico e um laço interno que controla as posições de controle dos capacitores para os outros níveis de carga. Esta estratégia precisa da utilização de um programa de esfriamento local para cada nível de carga no laço interno. O algoritmo apresentado em [2] é o seguinte:

1 - Leitura de dados e dos parâmetros de controle do algoritmo SA:

Ler os dados do sistema e escolher ou determinar os parâmetros de controle do algoritmo SA como a temperatura inicial, o número de tentativas em cada nível de temperatura, o gerador de número aleatório e o tamanho do passo de variação de reativos (por exemplo 30 kVAr). Também, deve-se especificar os parâmetros de controle para o laço interno e o número de tentativas em cada laço interno, n_{limite} .

2 - Obtenção da configuração factível inicial:

Implementar os seguintes passos para obter uma configuração inicial:

- (a) Escolher uma configuração inicial do espaço de configurações usando um gerador de número aleatório.
- (b) Para cada nível de carga, processar um **fluxo de carga** de distribuição radial para checar a factibilidade da configuração para todos os níveis de carga. Se alguma restrição para algum nível de carga é violada então voltar a (a); em caso contrário ir a (c).
- (c) Calcular o valor da função objetivo (custo total).

3 - Programa de Esfriamento Global - cooling schedule

Para cada nível de temperatura T_k realizar n_k tentativas de obtenção de novas configurações. Para $p=1,2,...,n_k$, implementar os passos 4 a 7; em caso contrário, se já foram realizadas as n_k tentativas, ir ao passo 8.



4 - Geração de uma configuração candidata factível:

- (a) Encontrar uma configuração candidata usando um dos mecanismos de transição propostos.
- (b) Para a carga pico, processar um **fluxo de carga** de distribuição radial para checar a factibilidade. Se alguma é violada então voltar a (a); em caso contrário ir a (c).
- (c) Calcular as perdas ativas.

Para cada nível de carga, diferente da carga pico, $j=2,...,nt$ implementar o passo 5 onde é usado um algoritmo SA com um programa de esfriamento local para determinar o esquema de controle dos outros níveis de carga.

5 - SA com programa de esfriamento local:

- (a) Especificar os parâmetros de controle local.
- (b) Para cada nível de temperatura realizar n_{limite} tentativas de encontrar configurações candidatas. Para $q=1,2,...,n_{limite}$ implementar os passos 5 (c) e 5 (d); em caso contrário ir ao passo 5(e).
- (c) Gerar uma nova configuração candidata factível.
 - i. Encontrar uma configuração candidata usando um mecanismo de transição já apresentado e levando em conta que o controle usado não deve ser superior ao usado para a carga pico.
 - ii. Processar um fluxo de carga radial para checar a factibilidade da configuração candidata. Se alguma restrição for violada voltar ao passo (i); em caso contrário ir ao passo (iii).
 - iii. Calcular as perdas ativas.
- (d) Teste de aceitação da configuração candidata factível.



Use os critérios de SA para avaliar a aceitação da configuração candidata e as perdas ativas como função objetivo.

(e) Checar o critério de parada.

Se o critério de parada não foi satisfeito então voltar ao passo 5(a); em caso contrário ir ao passo 6.

6 - Checar a factibilidade global da configuração candidata e calcular a função objetivo global:

(a) Se todos os esquemas de controle obtidos no passo 5 para $j=2,3,...,nt$ são factíveis então a configuração candidata global é factível e deve ser armazenada para testar sua aceitação no passo 7; em caso contrário eliminar a configuração candidata e voltar ao passo 3; em caso contrário ir ao passo (ii).

(b) Calcular a função objetivo global para a configuração candidata factível.

7 - Teste de aceitação da configuração candidata global:

Aceitar ou rejeitar a configuração candidata global de acordo com os critérios de aceitação de SA.

8 - Checar o critério de parada:

Se o critério de parada não é satisfeito voltar ao passo 3; em caso contrário ir ao passo 9.

9 - Imprimir os resultados finais (configuração ótima).

A resposta que fornece o algoritmo anterior é um vetor $u = (u_1, u_2, ..., u_{nc}) = u^p$ onde $u_i = (u_i^1, u_i^2, ..., u_i^{nt})$ e u_i^j representa o esquema de controle na barra i para o perfil de carga j . Portanto,



o tamanho adequado do vetor u^0 pode ser obtido usando a relação $u_i^p \leq u_i^0; i=1,2,\dots,nc$ e u_i^0 seria o menor valor que é um múltiplo inteiro de um banco de capacitores.

O algoritmo apresentado, aparentemente seria demorado devido aos laços internos de SA, isto é, para estar em condições de tentar uma transição global simples tentando passar da configuração corrente para uma configuração candidata aceita, deve-se implementar nt algoritmos SA internos.

3.2.1.8. Resultados Numéricos Obtidos com o Algoritmo SA.

Em [2] é testado um sistema de 70 barras cujos dados são apresentados em [7]. Aparentemente os resultados encontrados são interessantes mas existem alguns testes que devem ser confirmados. Por exemplo, as perdas encontradas para o sistema com carga média e sem alocação de capacitores não corresponde com os valores obtidos em [5] para o mesmo sistema o que indica que um dos testes está errado pois, trata-se de um mesmo sistema com condições de carga iguais.

Também não é possível avaliar o esforço computacional porque não é mencionado o tempo de computação ou mais importante ainda não é mencionado o número de fluxos de carga que foram resolvidos. Para este tipo de problema o melhor indicador de esforço computacional seria o número de vezes que é acionada a subrotina de fluxo de carga radial, pois esse passo requer o maior esforço computacional.

3.2.2. O Algoritmo Genético: Teoria

O algoritmo genético é uma metodologia usada para resolver problemas de otimização combinatorial que apresentou um grande sucesso na última década na resolução de problemas de grande porte em áreas muito diversas. O algoritmo genético foi inicialmente formulado por Holland [25] baseado no princípio de seleção natural que acontece na natureza e que fornece maiores chances de sobrevivência aos indivíduos melhores dotados. Matematicamente, pode-se considerar o algoritmo genético como uma técnica de otimização combinatorial que tem uma alta probabilidade



de encontrar a solução ótima global de problemas de grandes e complexos e que apresentam muitas soluções ótimas locais.

O algoritmo genético está baseado no princípio de seleção natural. Na natureza os indivíduos melhores dotados tem maiores chance de sobrevivência e a capacidade de adaptação a um meio mutante é fundamental na sobrevivência de indivíduos e espécies. Foi baseada nesta lei natural que as espécies sobreviveram e evoluíram na Terra. As características específicas de um indivíduo determina sua capacidade de sobrevivência e, em última instância, essa capacidade específica é determinada pelo conteúdo genético do indivíduo; isto é, pela unidade elementar chamada gene na biologia. Assim, nas mudanças do material genético das espécies acontece a evolução das mesmas. A seleção natural leva à sobrevivência dos indivíduos melhores dotados e no processo de reprodução estes indivíduos transmitem aos descendentes os melhores genes; por outro lado, os indivíduos menos dotados morrem no processo de competição por espaço, alimentos, etc. Assim, o princípio de seleção natural permite que somente os indivíduos melhores dotados gerem descendentes. Foi assim que aconteceu a evolução das espécies. A evolução acontece quando os cromossomos de dois indivíduos bem dotados se recombina durante a reprodução. Neste processo acontece uma troca de material genético que pode levar à geração de um indivíduo muito bem dotado ao receber o melhor material genético dos pais. Este processo repetido leva à evolução, isto é, uma seleção com a sobrevivência dos indivíduos melhores dotados e a correspondente reprodução (com troca de material genético) entre os mesmos. Adicionalmente, no processo de evolução, existe um fenômeno chamado mutação, que é uma mudança do código genético dos indivíduos como consequência de sua interação com o meio ambiente.

No algoritmo genético o processo de otimização se inicia com a seleção de uma população, isto é, um conjunto de soluções (configurações) candidatas. Cada configuração é qualificada pelo valor da função objetivo que apresenta. Geralmente a codificação de uma configuração é realizada em sistema binário. Todos os elementos da população são classificados pela qualidade de sua correspondente função objetivo. Assim, cada elemento recebe uma determinada probabilidade para gerar os elementos (configurações) na geração seguinte. Os elementos melhores qualificados ("higher fitness") neste processo têm, no sentido probabilístico, maior probabilidade de participar na geração dos elementos da nova população. Essa nova geração é



obtida com as operações de cruzamento (“crossover”) e mutação. Dessa forma, as melhores configurações são cruzadas para gerar os elementos da nova população e, nesse processo, o cruzamento leva a uma transferência de material genético entre as melhores configurações. Neste processo, eventualmente devem aparecer elementos da nova geração (filhos) que recebem o melhor material genético das configurações melhor qualificadas, produzindo novas configurações de excelente qualidade. A mutação termina a formação da nova população. Na natureza, a mutação produz a regeneração da perda de material genético. No algoritmo genético, a mutação produz uma modificação esporádica e aleatória de algum gene de um elemento (configuração) da população. Resumindo, pode-se dizer que os AG são uma técnica de otimização combinatorial que inicia o processo de otimização com uma população inicial, faz um ordenamento seletivo dos elementos da população avaliando a qualidade da função objetivo e gera uma nova população num processo de três etapas: na primeira é realizada a seleção (onde à cada configuração é designada um número determinado de descendentes), na segunda etapa é realizado “o crossover” entre os elementos melhores qualificados e com direito a gerar descendentes; e na etapa final, é realizada uma mutação aleatória para obter a nova população.

O algoritmo genético em sua forma mais simples é composto pelos seguintes componentes:

- População inicial,
- Mecanismo de codificação do problema,
- Parâmetros de controle,
- Avaliação da qualidade da função objetivo,
- Seleção e operadores genéticos do ciclo geracional.

3.2.2.1. Algoritmo Genético Usado no Problema Geral de Alocação de Capacitores.



Em [3] é apresentado um algoritmo genético aplicado ao problema de alocação de capacitores. A seguir, apresenta-se uma análise crítica da metodologia apresentada em [3].

3.2.2.2. Função Objetivo.

A função de adaptação usada (fitness value) em [3] é a própria função objetivo que neste caso tem 3 parcelas: custos relacionados com a redução de consumo de energia; custos relacionados com a diminuição de perdas para a carga pico e os custos devido à instalação dos capacitores. Todas as outras suposições anteriores persistem, tais como: análise para um determinado período T ; discretização da variação da carga em nt níveis de operação; variação uniforme do perfil de carga e escolha de nc barras candidatas a alocação de capacitores.

A função objetivo assume a seguinte forma:

$$\min v = k_e \sum_{i=1}^{nt} T_i p_i + k_p P_0 + k_c \sum_{j=1}^{nc} C_j \quad (3.17)$$

em que k_e , k_p e k_c são constantes de custo de energia, custo de potência pico e custos de capacitores respectivamente. P_i representa as perdas para o nível de carga i operando durante um tempo T_i ; P_0 representa as perdas na carga pico e C_j a magnitude do banco de capacitores alocado na barra j e dado em kVAr. A função objetivo pode ser modificada para diminuir o número de localizações, isto é, para tentar alocar capacitores em um número mínimo de barras. Este objetivo pode ser atingido penalizando o número de localizações na função objetivo da seguinte forma:

$$\min v = k_e \sum_{i=1}^{nt} T_i p_i + k_p P_0 + k_c \sum_{j=1}^{nc} C_j + P_f nc^2 \quad (3.18)$$

em que P_f é um fator de penalidade.

3.2.2.3. Análise de Sensibilidade.

Na configuração ótima de um problema de alocação de capacitores geralmente são alocados capacitores num número muito reduzido de barras, por exemplo, no sistema teste de 70



barras muito usado na literatura especializada são alocados capacitores no máximo em 3 ou 4 barras. Portanto, não é uma boa estratégia considerar todas as barras como candidatas à alocação de capacitores pois incrementaria desnecessariamente o esforço computacional. O ideal seria escolher um número reduzido de barras candidatas desde que nesse número reduzido se encontrem todas as barras da configuração ótima.

Existem várias estratégias para escolher um número reduzido de barras candidatas à alocação de capacitores e a maioria dessas estratégias está baseada em análise de sensibilidade. Em [3] é usado um indicador de sensibilidade baseado na máxima variação das perdas ativas no sistema devido à variação das potências reativas nas barras.

A seguir são discutidos os aspectos principais do algoritmo genético implementado em [3]. Infelizmente, os autores usam muito espaço para explicar as características gerais do algoritmo genético, mas não explicam detalhadamente como foi implementado o algoritmo genético no algoritmo específico do problema de alocação de capacitores.

3.2.2.4. Aspectos Específicos do Algoritmo Genético Implementado.

Não se menciona explicitamente o tipo de codificação utilizada mas, pode-se imaginar que foi usada a codificação binária.

É mencionada a possibilidade de usar uma população inicial gerada aleatoriamente ou gerada usando regras heurísticas.

O algoritmo genético foi originalmente desenvolvido para um problema de maximização. Embora a transformação para minimização não seja trivial, na pesquisa não é mencionada como foi contornado esse problema.

Na verdade todas as etapas anteriores não foram analisadas em [3], porque essas partes do trabalho são realizadas pelo software GENESIS.



3.2.2.5. Algoritmo Implementado.

Parte I - Determinação das barras candidatas a alocação:

1. Entrar com os dados do sistema (parâmetro da rede, cargas, etc.).
2. Montar a matriz de impedâncias.
3. Encontrar os fatores de sensibilidade.
4. Ordenar as barras baseado nos fatores de sensibilidade.
5. Selecionar as barras com maiores fatores de sensibilidade.

Parte II - Determinação do tamanho ótimo, localização, número e tipo de capacitores:

Uma configuração típica está formada por um vetor de $nc \times nt$ variáveis.

1. Encontrar a população inicial formada por k configurações.
2. Calcular a função objetivo de cada configuração. Os cálculos são obtidos usando o seguinte esquema (onde o nível 0 corresponde à carga pico e nesse nível, deve-se encontrar as perdas P_0):

Procedimento de avaliação:

inicia

nível de carga = 0

nível de carga < n fazer:

inicia



determinar o tamanho dos capacitores

processar fluxo de carga

encontrar as perdas de potência

incrementar o nível de carga

fim

encontrar perdas de energia (P_{en})

encontrar os custos dos capacitores (P_c)

calcular a função objetivo

retornar (fitness)

fim

3. Encontrar a próxima geração usando seleção, crossover e mutação e preservando sempre a melhor configuração encontrada (estratégia elitista - a incumbente participa de crossover e mutação mas também é preservada).
4. Repetir os passos 2 e 3 até que seja gerado um número máximo de gerações.
5. Em qualquer caso, o capacitor de menor capacidade, que é requerido por todos os níveis de carga, pode ser considerado como capacitor fixo que deve ser alocado na barra.

3.2.2.6. Resultados Obtidos.

São testados 2 sistemas conhecidos pela literatura especializada, um sistema de 9 barras e um sistema de 30 barras. Os melhores parâmetros de controle usados, aparentemente, foram: tamanho da população de 50 (para ambos sistemas), taxa de crossover de 0.8 e taxa de mutação de 0.003. Do gráfico apresentado, pode-se concluir que o algoritmo termina de processar após avaliar



100 gerações. Assim, para resolver o sistema de 30 barras foram resolvidos $50(3)(100) = 15000$ problemas de fluxo de carga.

3.2.3. Algoritmo de Busca Tabu Usado no Problema Geral de Alocação de Capacitores.

Em [4] é apresentado um algoritmo de busca tabu aplicado ao problema de alocação de capacitores. A seguir, mostra-se uma análise crítica da metodologia apresentada em [4].

3.2.3.1. Análise de Sensibilidade.

Antes de iniciar o processo TS é realizado um processo de redução de barras candidatas; assim uma análise de sensibilidade elimina a maioria das barras como candidatas, obtendo-se um número reduzido de barras candidatas à alocação de capacitores. São escolhidas como barras candidatas aquelas que apresentam um máximo impacto das perdas ativas com respeito à variação de potência reativa usando a seguinte relação:

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial Q_{ij}} = \sum_{i=0}^b \sum_{j=0}^n r_{i,j+1} \left\{ (2P_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial Q_{ij}} + 2Q_{ij}) / V_{ij}^2 - 2 \frac{V_{ij}}{\partial Q_{ij}} (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) / V_{ij}^3 \right\} \quad (3.19)$$

3.2.3.2. Algoritmo Busca Tabu Proposto.

Em [4] é especificada a chamada **estrutura de solução**, isto é, uma configuração típica e as outras grandezas típicas como valor das perdas, função objetivo, etc. Assim, uma estrutura de solução assume a seguinte forma:

Estrutura de solução: { localizações candidatas, posições(setting) de operação dos capacitores, capacidade instalada, perdas de potência ativa, magnitude de tensão, valor da função objetivo, contador de frequência }

Em [4] também são mencionadas as funções de TS como a lista tabu, o critério de aspiração, intensificação e diversificação. Os autores mencionam que foram usadas listas tabu com

uma duração de 15 movimentos, um critério de aspiração que elimina a proibição se a configuração candidata é a melhor das últimas k configurações aceitas e o uso de intensificação e diversificação baseado em frequência.

3.2.3.3. Algoritmo Busca Tabu Implementado.

É implementado o seguinte algoritmo TS:

1. Inicialização:

Leitura de dados do sistema, restrições de operação (limite inferior e superior de magnitude de tensão), parâmetros TS, etc.

2. Análise de Sensibilidade:

Selecionar as barras candidatas à alocação de capacitores usando a equação (3.19).

3. Geração de uma configuração inicial factível:

(a) Selecionar aleatoriamente uma configuração do espaço de configurações.

(b) Para cada nível de carga **executar um fluxo de carga** para verificar a factibilidade da configuração. Se alguma restrição para algum nível de carga for violado voltar a (a); em caso contrário ir ao passo 4.

4. Avaliação de um passo TS:

(a) Selecionar a melhor configuração candidata ordenada numa lista de acordo com o valor da função objetivo.



(b) Verificar a factibilidade da configuração candidata. Se a configuração candidata é factível ir ao passo 5; em caso contrário voltar a 4(a) após eliminar a configuração candidata da lista.

5. Atualizar a configuração corrente:

Se a melhor configuração candidata factível não é tabu ou se é tabu mas satisfaz o critério de aspiração então aceitar a configuração candidata que se transforma em configuração corrente.

6. Atualizar a lista tabu:

Armazenar o atributo na lista tabu.

7. Verificar o critério de parada:

Se a diminuição da função objetivo de um conjunto de iterações sucessivas é menor que um valor especificado, pare o processo, pois foi atingida a convergência, em caso contrário, voltar ao passo 4.

8. Imprimir resultados finais:

No algoritmo apresentado não aparece a utilização de intensificação nem de diversificação. Entretanto, o problema mais sério é que não aparece a estrutura de vizinhança nem a técnica de obtenção de configurações de elite. Em outras palavras, não se especifica quais são os tipos de movimentos que permitem identificar configurações vizinhas da configuração corrente nem quantos desses vizinhos devem ser analisados.



Algoritmo de Fluxo de Carga Radial.

4.1. Algoritmo de Fluxo de Carga Para Redes de Distribuição Radial: Método de Soma de Potências.

4.1.1. 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.



4.1.2. 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 4.1:

$$V_r^4 + [2(RP + XQ) - V_s^2] V_r^2 + (P^2 + Q^2)(R^2 + X^2) = 0 \quad (4.1)$$

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.

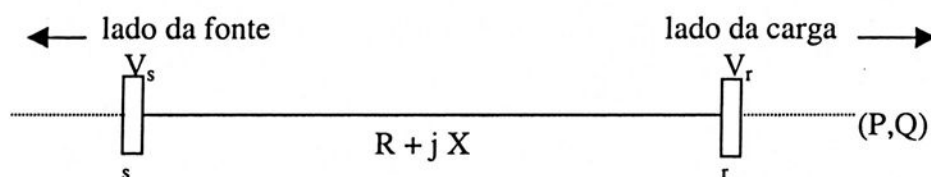


Figura 4.1. : Modelo Básico.

P representa a carga ativa

Q representa a carga reativa

Em outras palavras, conhecidos os valores de R, X, V_s , P e Q é possível encontrar o valor de V_r usando (4.1), pois neste caso, deve-se resolver uma equação algébrica de quarta ordem redutível para uma equação algébrica de segunda ordem.

Demonstração de (4.1) :

A equação (4.1) pode ser facilmente demonstrada usando a figura 4.2.

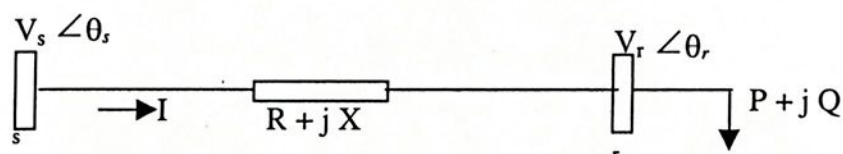


Figura 4.2 : Formulação Matemática.

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

$$I = \frac{V_s \angle \theta_s - V_r \angle \theta_r}{R + jX} \quad (4.2)$$

A potência da carga pode ser representada da seguinte forma:

$$S = V_r I^*$$

e assim

$$I^* = \frac{S}{V_r} = \frac{P + jQ}{V_r \angle \theta_r}$$

$$I = \frac{P - jQ}{V_r \angle -\theta_r} \quad (4.3)$$

Igualando (4.2) e (4.3) 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):

$$V_r V_s \cos(\theta_s - \theta_r) = RP + XQ + V_r^2 \quad (4.4)$$

$$V_r V_s \sin(\theta_s - \theta_r) = XP - RQ \quad (4.5)$$

Elevando ao quadrado (4.4) e (4.5) 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 (4.1).

Na formulação proposta P e Q representam na verdade a carga total na barra r, pois P e Q, 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 são 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 ativas e reativas 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 assim temos:

$$P_e = R \frac{(P^2 + Q^2)}{V_r^2} \quad (4.6)$$

Perdas Reativas:

De maneira similar, pode-se demonstrar que:

$$Q_e = X \frac{(P^2 + Q^2)}{V_r^2} \quad (4.7)$$

4.1.3. 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 as barras fontes.
- 4 - A partir da barra fonte (ou barras fontes) e usando a equação (4.1) calcular a tensão de carga V_r para todas as barras. Esta é uma iteração "para baixo" iniciando da barra fonte (ou barras fontes) para as barras extremas.
- 5 - Com as novas tensões recalculadas, deve-se recalcular as perdas. Se a variação das perdas totais em relação à iteração prévia é maior que uma tolerância especificada $\varepsilon=0,001$, volte ao passo (3). Em caso contrário, calcule todos os outros resultados necessários e pare.

4.1.4. 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 de alocação ótima de capacitores usando um algoritmo Tabu Search. O algoritmo apresenta resultados satisfatórios mas, adicionalmente, foi implementado um outro método de fluxo de carga para sistemas de distribuição radial.



Algoritmo de Busca Tabu (TS).

A implementação do algoritmo de busca tabu para resolver o problema de alocação de capacitores deve levar em conta as seguintes implementações:

1. Algoritmo Básico de Busca Tabu

O algoritmo básico de busca tabu apresenta as seguintes partes:

- Um mecanismo de geração de movimentos, isto é, dada a configuração corrente, deve-se definir e caracterizar a **vizinhança da configuração corrente** e, portanto, de acordo com a lógica de TS, deve-se passar para a melhor configuração vizinha (ou para a menos pior).
- A formação da **Lista Tabu** que armazena as configurações vizinhas que estão proibidas. Este mecanismo evita retornar a configurações já visitadas (ciclagem). A escolha do tamanho da lista tabu é crítica no desenvolvimento do algoritmo TS. Normalmente a lista tabu é montada usando informação de **memória de curto prazo**.
- A definição dos **critérios de aspiração** que tenta contornar as proibições impostas pela lista tabu. Neste contexto, o critério de aspiração levanta a proibição de uma



configuração vizinha se for verificada que essa configuração candidata é altamente atrativa de acordo com os critérios de aspiração definidos.

- Implementação de **estratégias de intensificação e diversificação**. Em [4] estas estratégias são basicamente implementadas usando as **memórias baseadas em frequência**. A implementação tenta explorar, mais intensamente, regiões onde foram previamente encontradas excelentes configurações, e a diversificação tenta levar o processo de otimização a regiões distantes ou pouco exploradas na tentativa de encontrar novas configurações de excelente qualidade. A pesquisa apresentada em [4] desenvolveu todas as funções antes mencionadas para o problema de alocação de capacitores.

2. Algoritmo Avançado de Busca Tabu

Um algoritmo avançado de busca tabu deve levar em conta os seguintes aspectos:

- Montar uma estratégia adequada para gerar uma **configuração inicial de boa qualidade** ou, ainda melhor, um conjunto de configurações de boa qualidade e de composição diversificada. Assim, estariam disponíveis configurações atrativas correspondentes a regiões distantes o que facilita a implementação eficiente das estratégias de intensificação e diversificação. Esta parte pode ser implementada usando algoritmos heurísticos muito rápidos em termos de esforço computacional.
- Armazenamento das chamadas **configurações de elite** que podem ser posteriormente usadas para implementar a intensificação e a diversificação, e também na implementação do chamado “Path Relinking” que é usado para gerar novas configurações de qualidade, “misturando” adequadamente atributos das configurações de elite.
- Montar uma estratégia destinada a reduzir o número de vizinhos candidatos. Em TS, dada uma configuração, existe um número de configurações vizinhas que devem ser analisadas e TS passa para a melhor configuração vizinha. Se o número



de vizinhos é elevado, TS pode precisar de um elevado esforço computacional para realizar um simples movimento. Existem várias propostas que devem ser analisadas no algoritmo TS. para reduzir o número de vizinhos. As principais propostas são o chamado critério de **aspiração plus** e a formação de uma **lista de vizinhos considerados de elite**. Para problemas específicos, pode-se ainda montar uma lista reduzida, aproveitando as características específicas do problema.

5.1. Fundamentos Teóricos de TS.

Busca Tabu foi desenvolvida inventando um conjunto de princípios (funções) que, em forma integrada, permite resolver um problema da maneira mais inteligente. Assim, TS teve sua origem em conceitos que inicialmente faziam parte do campo da inteligência artificial. A moderna teoria sobre Busca Tabu é apresentada em [23]. O princípio filosófico de Busca Tabu pode ser explicado com as próprias palavras de seu inventor F. Glover [18] que transcrevemos com pequenas modificações:

*TS está baseado na premissa de que a resolução de um problema pode ser considerado 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 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 S A 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 5.1 mostra os elementos principais (funções) de TS. Portanto, as pesquisas em TS consistem em usar as funções indicadas na figura 5.1 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 5.1 e/ou encontrar variantes de implementação das funções mostradas na figura 5.1. Um algoritmo TS para um problema específico pode usar algumas ou todas as funções mostradas na figura 5.1 integradas das formas mais variadas. As características específicas de cada problema e a experiência do pesquisador devem determinar a forma e a qualidade do algoritmo TS implementado. É oportuno lembrar que TS nasceu somente com algumas das funções indicadas na figura 5.1.

Apresenta-se, brevemente, a essência da lógica de trabalho de Busca Tabu. TS resolve problemas genéricos do tipo:

$$\text{Min } f(x) \quad (5.1)$$

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

TS resolve (5.1) 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 obtidos 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 produz 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 5.1: 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 na permissão de 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 5.2 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 considerados tabu (proibidos). 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 impede a chamada ciclagem.
- Usando estratégias para diminuir a vizinhança ou a lista de configurações candidatas. Geralmente 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, pode precisar de elevado esforço computacional. TS apresenta 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.



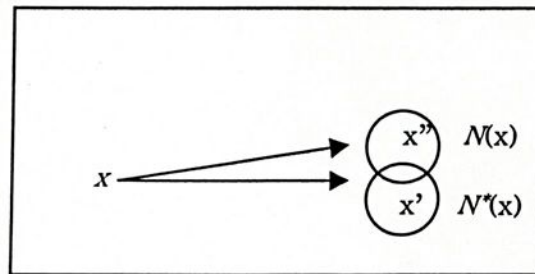


Figura 5.2 : Transição em TS

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

5.1.1. 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 “recencia” (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 um dos atributos proibidos (tabu-ativos) são excluídos na conformação do conjunto $N^*(x) \subseteq N(x)$ de configurações vizinhas para avaliação.

A idéia principal da memória baseada em “recencia” 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 eliminados de $N^*(x)$ configurações muito atrativas. O critério de aspiração contorna em parte esta limitação.

A figura 5.3 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 5.3 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 definir o critério de aspiração da seguinte forma: se uma configuração candidata produz uma função objetivo melhor que a incumbente (melhor configuração já encontrada), deve-se eliminar a proibição e armazenar essa configuração candidata no bloco F.

Na figura 5.3, 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



candidata encontrada, no bloco **G** é verificado 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, conformação de uma lista reduzida de configurações candidatas de elite, filtros sucessivos e estratégia de mudança acotada.

5.1.2. 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.



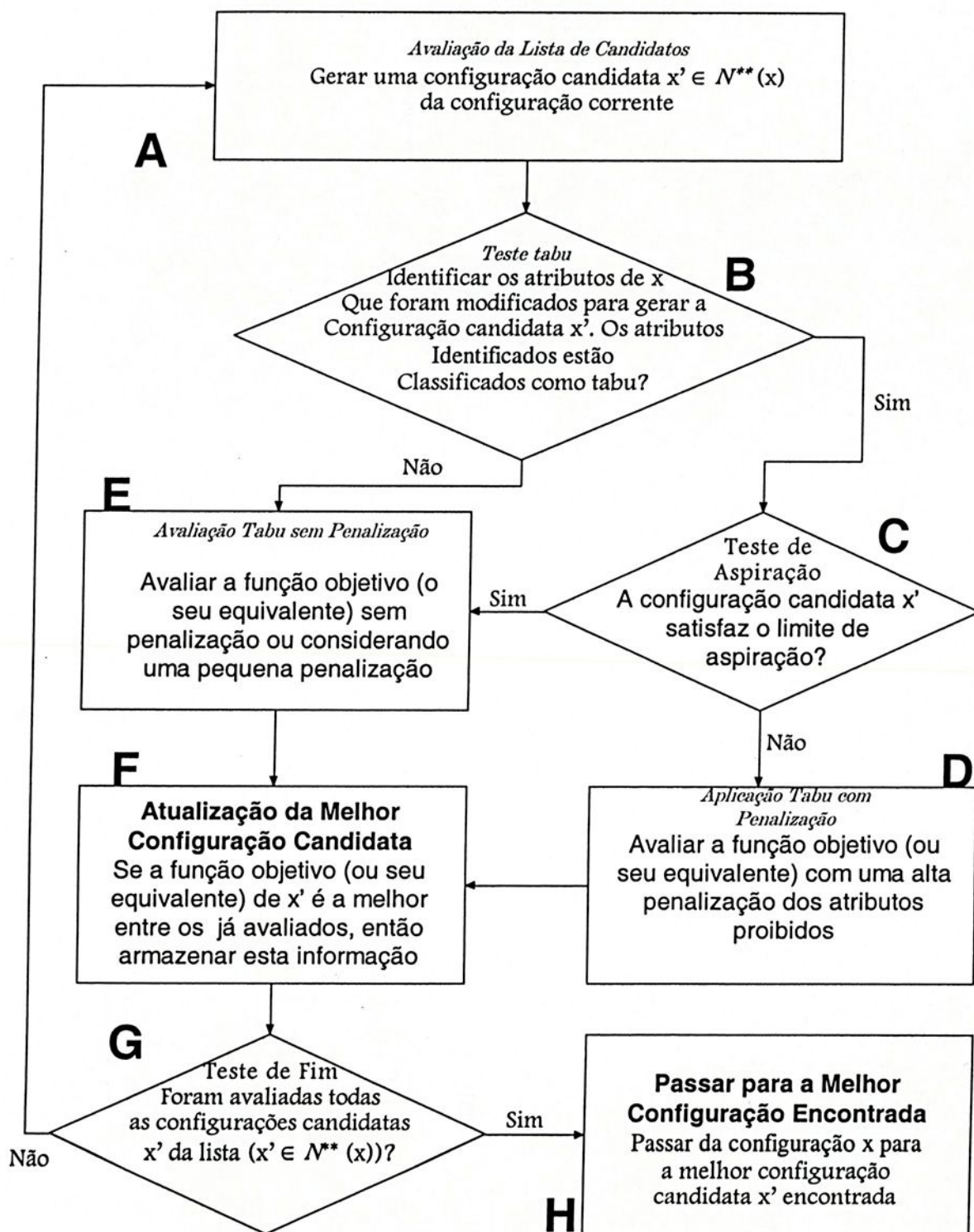


Figura 5.3: Execução de um movimento TS com memória de curto prazo.

Assim existem dois tipos de memória baseados 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 conformadas 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 conformação 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 5.4 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 5.4, 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 no bloco **B** que são mostradas a seguir:

- 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 adicionar 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 necessário armazenar a memória de curto prazo da última configuração armazenada para evitar voltar a visitar 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, com a pior configuração, durante um número de iterações especificado, 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 utilizadas em intensificação ou em memória de curto prazo mas com critérios de duração modificados.



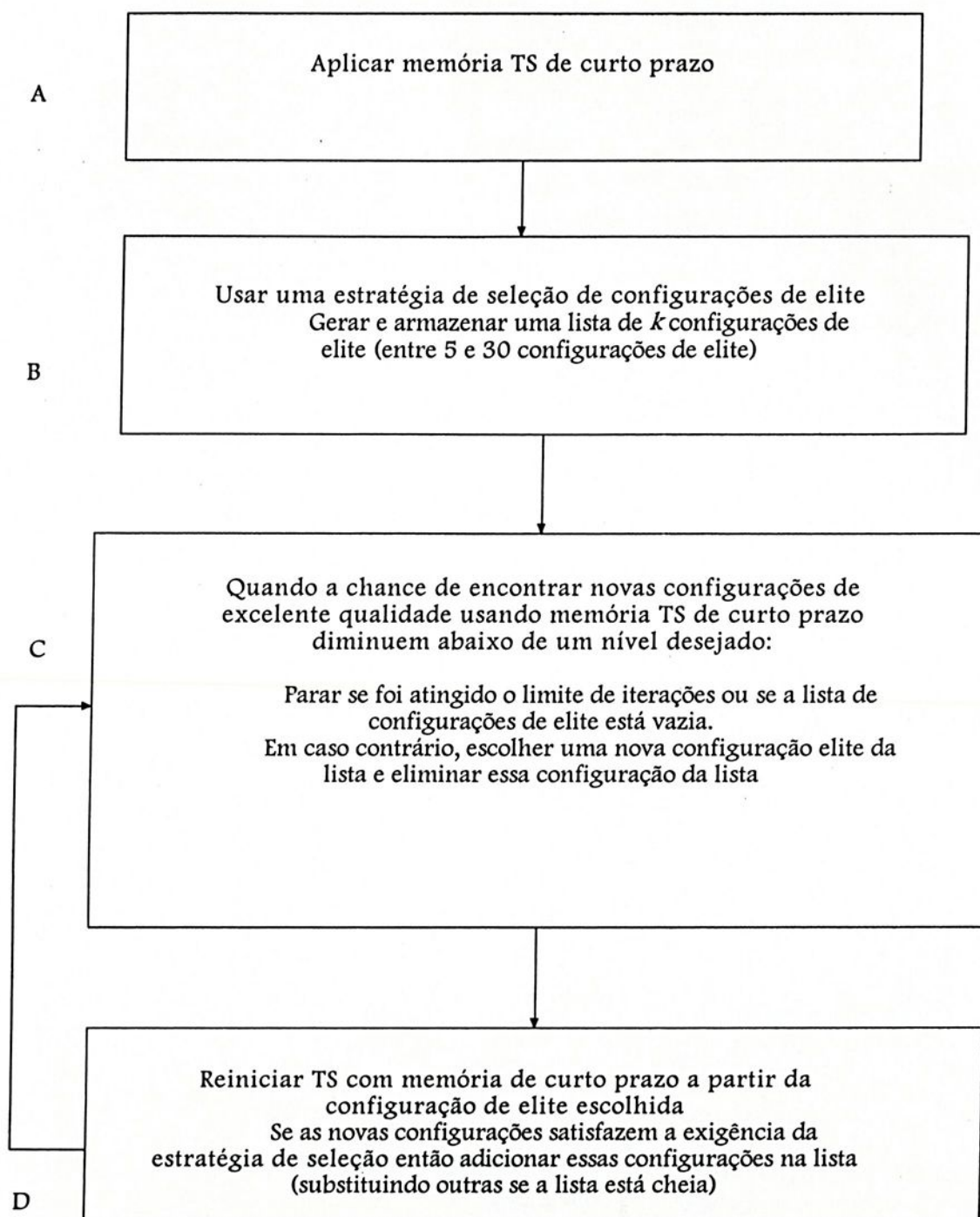


Figura 5.4: Implementação simples de intensificação em TS

A figura 5.5 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 5.5. 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 “recencia”** visando incrementar o estado tabu dos atributos das configurações visitadas. Uma versão simples desta metodologia é apresentada na figura 5.6.

5.1.3. 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 se atinge um nível crítico em que o método TS normalmente pára. 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, mudam-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.

Neste caso as variáveis binárias são modificadas, por exemplo, usando uma estratégia TS com memória de curto prazo, até chegar à fronteira da factibilidade. Nesse momento, pode-se entrar na região infactível, mudando a forma de avaliação da função objetivo (ou seu equivalente) na região infactível. Um processo de afastamento e retorno para a região de fronteira produz uma busca oscilatória que permitirá encontrar configurações factíveis de excelente qualidade.

Neste caso as variáveis binárias são modificadas, por exemplo, usando uma estratégia TS com memória de curto prazo, até chegar à fronteira da factibilidade. Nesse momento, pode-se entrar na região infactível, mudando a forma de avaliação da função objetivo (ou seu equivalente) na região infactível. Um processo de afastamento e retorno para a região de fronteira produz uma busca oscilatória que permitirá encontrar configurações factíveis de excelente qualidade.



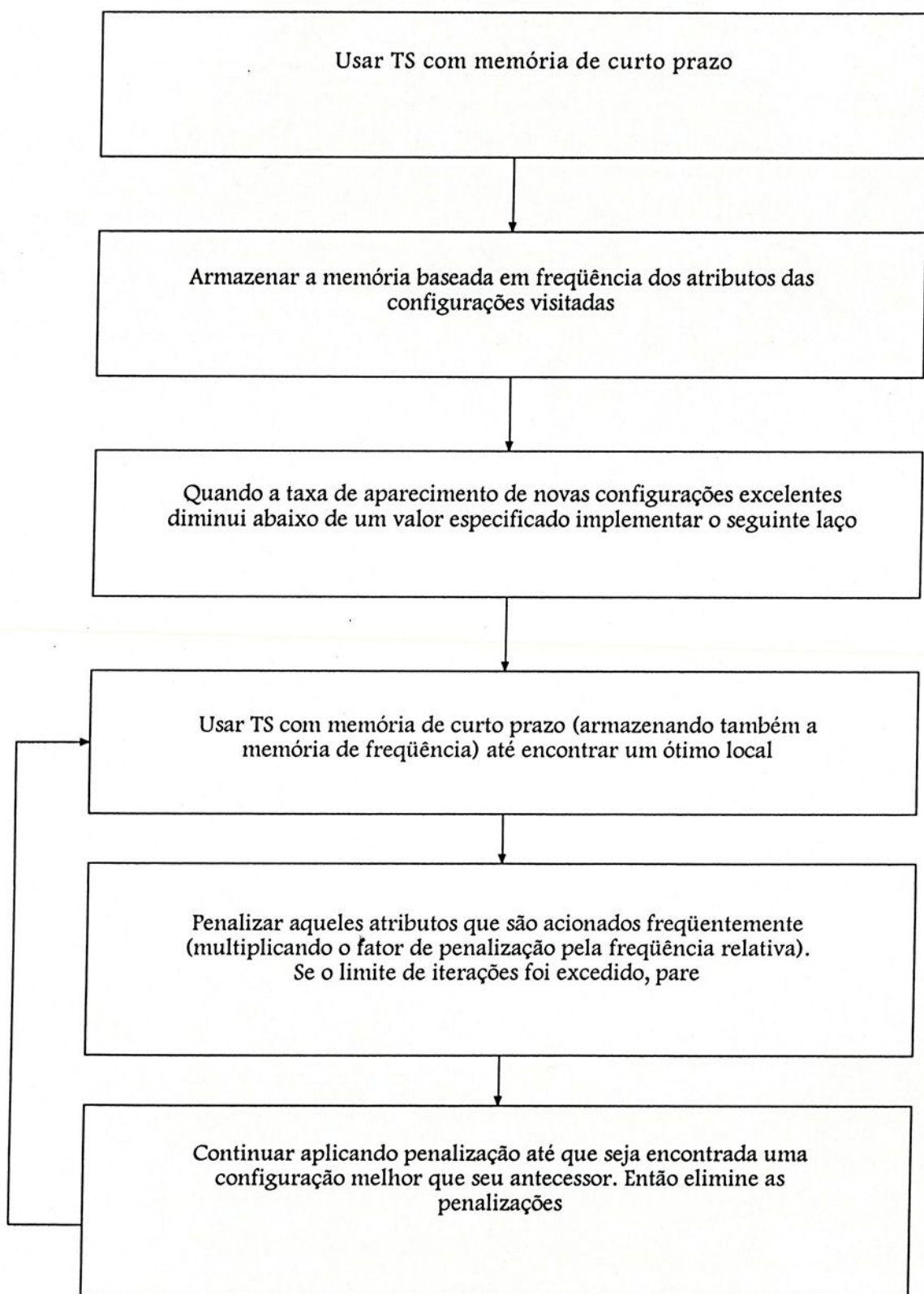


Figura 5.5: Implementação simples de diversificação em TS

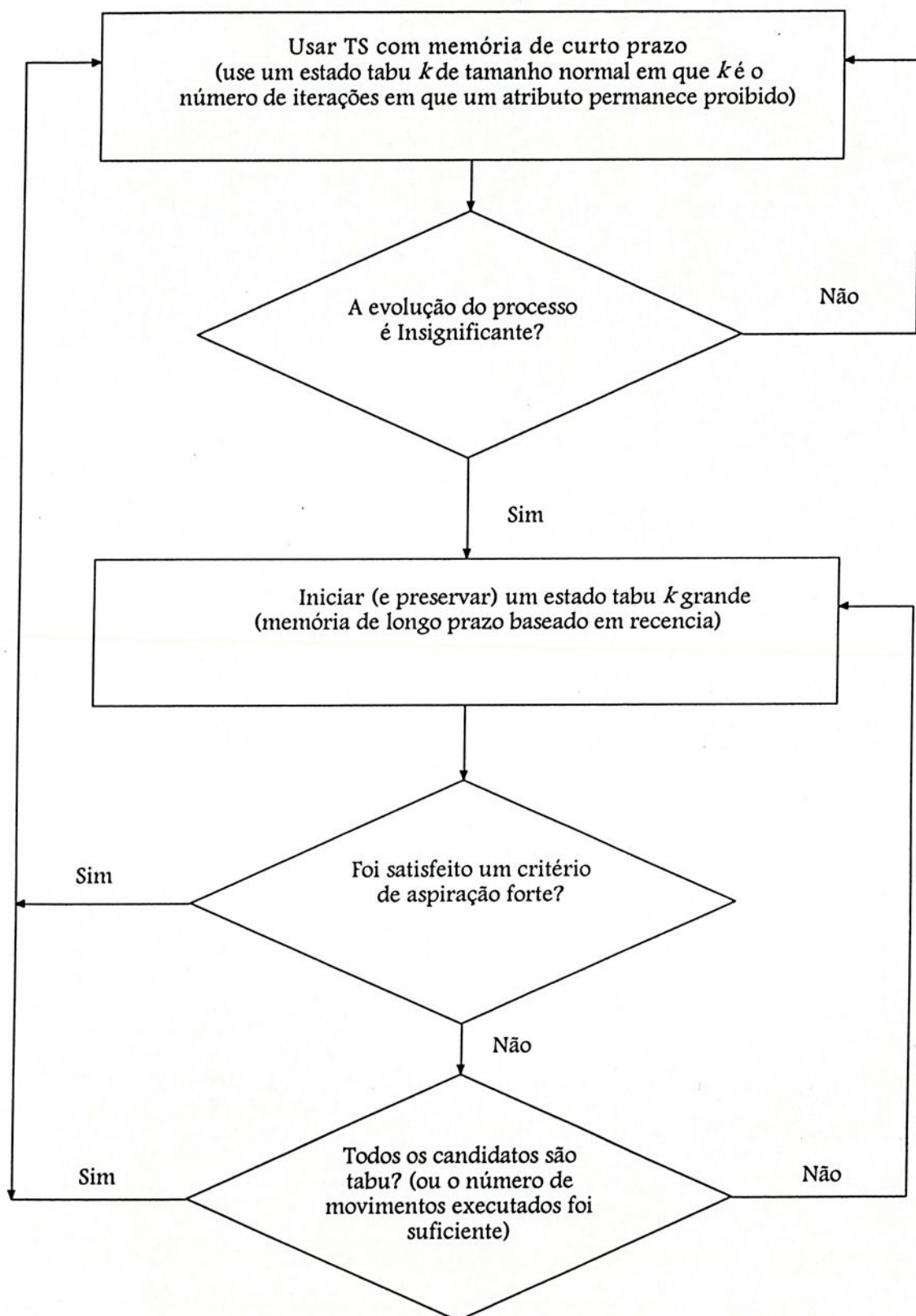


Figura 5.6: Diversificação usando memória de longo prazo baseada em "recencia".

5.1.4. 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 e incorporando atributos presentes nas configurações guia. As configurações, assim obtidas, podem ser usadas para intensificação ou diversificação dependendo da quantidade de atributos incorporadas na configuração base.

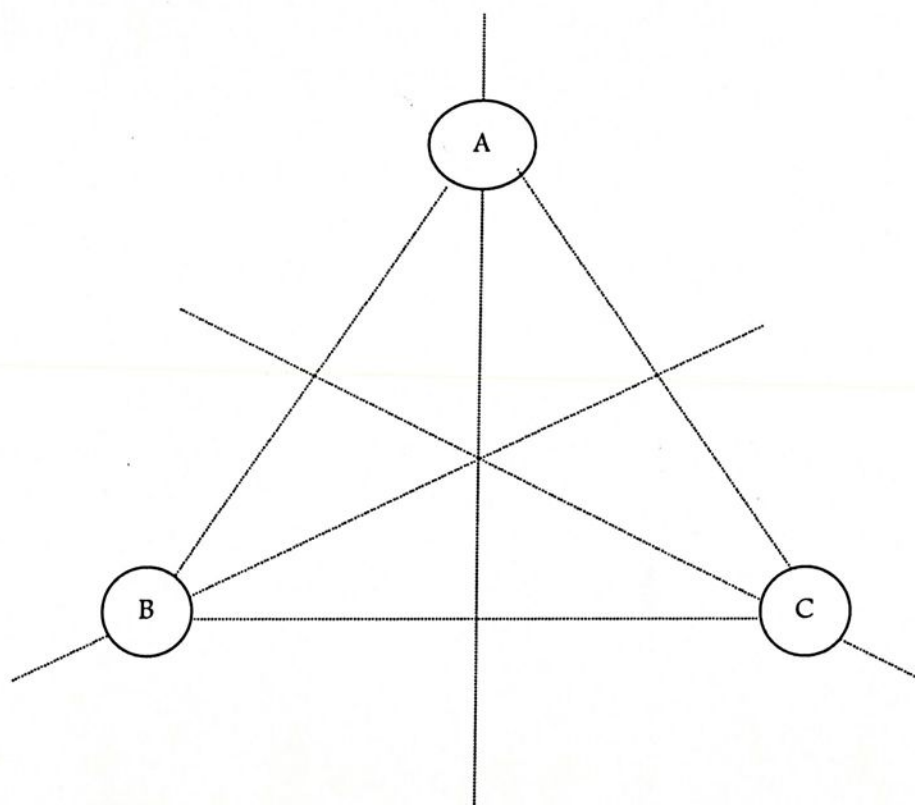
A idéia de path relinking é obter configurações constituídas por atributos de alta qualidade pertencentes a configurações de alta qualidade. Assim, na implementação de path relinking para encontrar uma configuração atrativa para continuar o processo, em cada passo é escolhido, de maneira preferencial, 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 a 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. 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.

A função da configuração base e da configuração guia pode ser trocada nas configurações de elite e, portanto, as configurações de elite que participam em path relinking são denominadas simplesmente de **configurações referenciais**. A figura 5.7 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 trajetória geralmente devem ser mais complexas.



Path relinking 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 5.7: Path Relinking em TS.

5.2. Algoritmo de Busca Tabu para Alocação de Capacitores Fixos em Sistemas de Distribuição Radial.

5.2.1. Introdução.

Nesta parte é apresentado um algoritmo tabu search para o problema de alocação de capacitores fixos. Inicialmente são discutidas as características básicas do algoritmo tabu search proposto e suas diferenças em relação a outras propostas que usam algoritmos combinatoriais (simulated annealing, algoritmo genético, tabu search) para este tipo de problema e que foram analisados no capítulo 3. Também são apresentadas propostas diferentes em outras partes importantes do algoritmo, tais como; na técnica de redução de barras candidatas, na determinação da configuração inicial e no uso dos chamados indicadores de sensibilidade. Posteriormente, é apresentada a proposta do algoritmo tabu search com suas principais características e o algoritmo tabu search em forma simplificada.

Para analisar o desempenho do algoritmo tabu search proposto são usados 4 sistemas de distribuição: 3 sistemas conhecidos na literatura especializada (sistema de 10 barras [3], sistemas de 34 barras [16] e sistema de 70 barras [7]) e um sistema real da CESP 135 barras correspondente à cidade de Três Lagoas - MS. Os dados destes sistemas são apresentados no apêndice A.

O modelo matemático do problema da alocação ótima de capacitores é um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM) com função objetivo não diferenciável e adicionalmente apresenta o fenômeno da explosão combinatorial. A resolução desse problema é muito difícil usando as técnicas tradicionais de otimização matemática. Entretanto, se existe uma proposta de solução (uma topologia proposta, isto é, uma proposta de alocação de capacitores em barras especificadas e com número de bancos especificados), simplesmente através de resoluções de problemas de fluxo de carga radial, é possível conhecer se essa proposta de solução é factível (não apresenta violações das restrições de operação) e a **qualidade** dessa proposta de solução pode ser facilmente calculada conhecendo as perdas em cada nível de carga. Essa é a filosofia básica dos algoritmos combinatoriais antes citados. Assim, tabu search inicia o processo a partir de uma proposta de solução (topologia ou configuração) e a partir dela realiza um processo de transição



visitando em cada passo uma nova proposta de solução. O algoritmo 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 deve existir uma estratégia adequada para visitar as configurações mais atrativas. Nesta parte é apresentada uma proposta do algoritmo tabu search.

5.2.2. Características Básicas do Algoritmo Tabu Search para o Problema de Alocação de Capacitores Fixos.

Apresentam-se, em forma separada, as principais características do algoritmo TS implementado e em cada caso é realizada uma análise comparativa com outras pesquisas que usam algoritmos combinatoriais para o problema de alocação de capacitores fixos.

5.2.2.1. Técnica de Redução de Barras Candidatas.

A maioria dos algoritmos apresentados para resolver o problema de alocação de capacitores, especialmente aqueles baseados em algoritmos combinatoriais, apresenta uma proposta para reduzir o número de barras candidatas à adição de bancos de capacitores. A idéia de reduzir o número de barras candidatas é, logicamente, atenuar a explosão combinatorial do problema. Assim, reduzindo o número de barras candidatas, é reduzido o espaço de configurações facilitando a resolução do problema. Entretanto, este processo de redução do espaço das configurações (soluções) pode eliminar a solução ótima global do problema. Portanto, uma técnica de redução de barras candidata à alocação de bancos de capacitores eficiente deve reduzir, adequadamente, o espaço de configurações candidatas sem eliminar as configurações mais atrativas.

Em [3,4] são usados indicadores de sensibilidade para eliminar a maioria das barras do sistema como candidatas à adição de bancos de capacitores restando apenas um número reduzido de barras candidatas à adição de bancos de capacitores. Na verdade, praticamente todos os trabalhos sobre alocação de capacitores utilizam indicadores de sensibilidade para reduzir o número de barras candidatas. O indicador de sensibilidade é tipicamente uma relação matemática, exata ou



aproximada, da variação das perdas do sistema com a variação de potência reativa em cada barra do sistema.

Assim, para a configuração inicial, isto é, para a configuração sem alocação de capacitores é processado um fluxo de carga radial (geralmente para um nível de carga) e os resultados obtidos são usados para determinar um ranking das barras mais atrativas como sendo aquelas barras que produzem uma maior diminuição das perdas do sistema quando são colocados reativos (bancos de capacitores) nestas barras.

Essas barras atrativas são identificadas pelos indicadores de sensibilidade que são relações matemáticas do tipo $\partial P_L / \partial Q_i$.

Uma das limitações da estratégia anterior de seleção de um número reduzido de barras candidatas é que a seleção é realizada levando em conta apenas a configuração inicial sem nenhuma alocação de bancos de capacitores e geralmente avaliando somente um nível de carga. Além disso, os indicadores de sensibilidade são relações matemáticas que fornecem apenas tendências aproximadas. Os resultados obtidos por testes realizados pelo algoritmo tabu search mostram que essa estratégia pode eliminar barras potencialmente atrativas da lista de barras candidatas à adição de bancos de capacitores e, como consequência, elimina a configuração ótima do espaço reduzido de configurações candidatas.

Na presente pesquisa foi implementada uma estratégia um pouco diferente e incorporando um número maior de barras como candidatas à adição de bancos de capacitores e essas barras são obtidas num processo dinâmico usando um algoritmo heurístico construtivo, chamado de fase I, cujo objetivo é determinar as barras potencialmente atrativas e um número de configurações candidatas potencialmente atrativas e diferentes que depois são usadas pelo algoritmo tabu search na fase II do algoritmo. Este processo é apresentado depois como parte da fase I do algoritmo implementado.



5.2.2.2. Determinação da Configuração Inicial.

Os algoritmos combinatoriais (genético e tabu search) apresentados em [3,4] 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 somente 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.

Na presente pesquisa é determinado um conjunto de configurações iniciais usando um algoritmo heurístico construtivo muito rápido. Essas configurações são geralmente atrativas e relativamente diferentes entre elas, devido à maneira em que elas são geradas. A mais atrativa é considerada como sendo a configuração inicial de partida e as outras fazem parte das configurações iniciais de elite que o algoritmo tabu search usa e atualiza adequadamente durante o processo de otimização. Esta estratégia faz parte do processo de fase I do algoritmo tabu search apresentado depois.

5.2.2.3. Uso de Indicadores de Sensibilidade.

Os indicadores de sensibilidade, isto é, a variação das perdas ativas do sistema com respeito à variação da potência reativa numa barra, $\frac{\partial P_L}{\partial Q_i}$, são muito usados em problemas de sistemas de distribuição. Existem várias formas de encontrar esses indicadores de sensibilidade e no problema de alocação de capacitores são usados basicamente para reduzir o número de barras candidatas à alocação de capacitores diminuindo, portanto, o número de variáveis do problema. Assim, por exemplo, em [3] e [4] são usados diferentes indicadores de sensibilidade para reduzir o número de barras candidatas à alocação de capacitores utilizando como base a configuração sem alocação de capacitores e o nível de carga elevado. A estratégia tem a vantagem de reduzir o número de barras candidatas mas apresenta a limitação de que freqüentemente pode excluir barras que fazem



parte da configuração ótima especialmente quando esses indicadores são obtidos num único passo usando a configuração base e um único nível de carga.

Na presente pesquisa são usados indicadores de sensibilidade mas com estratégias diferentes. Assim, os indicadores de sensibilidade são usados para guiar o processo de alocação de capacitores num processo heurístico de fase I que consiste em obter um conjunto de configurações factíveis atrativas e significativamente diferentes e depois, na fase II, no processo TS são usados para encontrar um conjunto reduzido de configurações vizinhas altamente atrativas da configuração corrente o que é conhecido como estratégia de obtenção de um número reduzido de vizinhos candidatos como será explicado depois. Além dos indicadores de sensibilidade usados em [3,4] podem ser usados outros tais como o seguinte [24] :

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q_i} = 2\alpha_{ii} Q_i + 2 \sum_{j \neq i}^n (\alpha_{ij} Q_j + \beta_{ij} P_j) \quad (5.2)$$

em que

$$\alpha_{ij} = r_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) / V_i V_j$$

$$\beta_{ij} = r_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) / V_i V_j$$

A relação (5.2) pode ser deduzida usando os mesmos critérios e simplificações usados em [24] (ver capítulo 8.3.3), na dedução da relação $\frac{\partial P_L}{\partial P_i}$.

Na presente pesquisa foram usados os indicadores de sensibilidade mostrados acima, mas também podem ser usados outros indicadores de sensibilidade, separadamente ou em forma integrada, como os indicadores de sensibilidade usados em [3,4] e outros que eventualmente sejam identificados usando-os em forma integrada. Também na presente pesquisa, as transições são realizadas entre configurações factíveis, isto é, configurações infactíveis são rejeitadas. O motivo principal para realizar este tipo de implementação (transições entre configurações factíveis) é devido que nos problemas reais de alocação de capacitores a grande maioria de configurações obtidas é

factível, ao contrário do que ocorreu em outros problemas de engenharia elétrica onde acontece exatamente o contrário [20].

5.2.2.4. 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 [18,22,23] 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. Na presente pesquisa foram usados indicadores de sensibilidade para identificar um número reduzido de configurações vizinhas altamente atrativas.

5.2.2.5. Estratégia Tabu Search.

É implementado um algoritmo tabu search levando em conta os aspectos teóricos de tabu search apresentados anteriormente e um conjunto de aspectos práticos de implementação do algoritmo tabu search para problemas de engenharia. Esta parte é mais amplamente apresentada no algoritmo integrado apresentado a seguir.



5.3. Algoritmo Tabu Search Implementado.

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 tabu search. Na continuação são apresentadas as duas estratégias separadamente e depois o algoritmo integrado proposto.

5.3.1. Fase I: Estratégia Heurística.

A idéia básica é encontrar um conjunto de configurações factíveis, atrativas e significativamente diferentes que permita iniciar a estratégia TS a partir de configurações atrativas, nunca usando configurações geradas aleatoriamente. Esta idéia apresentou excelentes resultados num outro problema complexo de sistemas de potência [20].

Usando vários indicadores de sensibilidade, pode-se gerar as n_p configurações iniciais num processo heurístico construtivo de adicionar um banco de capacitores por vez (ou melhor ainda um múltiplo, 30 kVAr nos sistemas testados) até encontrar uma configuração factível, a qual apresente o menor valor da função objetivo. Em outras palavras, pode-se obter uma configuração atrativa adicionando, em cada passo, um banco de 30 kVAr na barra considerada mais atrativa pelo indicador de sensibilidade, calculando em cada passo a função objetivo correspondente à adição dos capacitores e às perdas para todos os níveis de carga. Ao terminar o processo, quando já não é mais possível melhorar a função objetivo, significa que foi encontrado um ótimo local. Pode-se repetir o processo anterior obtendo um conjunto de configurações iniciais atrativas e diferentes, proibindo em cada implementação uma barra que teve alocação de capacitores na implementação inicial. Outra alternativa pode ser o uso de vários indicadores de sensibilidade e/ou escolher várias propostas de cada indicador de sensibilidade para encontrar um conjunto de configurações diferentes. Eventualmente, pode-se encontrar configurações iniciais usando uma espécie de path relinking entre as configurações geradas.

A fase I termina com um conjunto de configurações iniciais atrativas geradas pelo processo heurístico e com uma lista de barras candidatas a alocação de capacitores. Ao contrário da maioria das estratégias de redução de barras candidatas apresentadas na literatura especializada que



usam indicadores de sensibilidade utilizando a configuração base para encontrar um número reduzido de barras candidatas, na presente proposta as barras candidatas a alocação são todas aquelas barras que foram acionadas (usadas) na fase I e que aparecem em alguma das configurações iniciais.

Deve-se observar que as duas estratégias não são equivalentes, pois, na presente proposta as barras escolhidas foram obtidas dentro de um processo dinâmico de geração de configurações.

A melhor configuração encontrada é considerada como a configuração inicial e as outras fazem parte das configurações de elite. Uma fase superior do algoritmo TS consiste em desenvolver um algoritmo TS partindo de um conjunto de configurações iniciais em lugar de partir de uma única configuração e nesse caso a estratégia proposta nesta Fase I é ainda melhor aproveitada. Esta extensão pode ser facilmente implementada, pois a realizamos para implementar os testes computacionais.

5.3.2. Fase II: Estratégia Tabu Search.

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 utilizando configurações de elite visando a diversificação.

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 para cada nível de carga. A seguir é mostrado o algoritmo implementado.



5.3.3. Algoritmo Implementado.

Fase I : Estratégia heurística:

1. Realizar uma busca heurística usando indicadores de sensibilidade e o nível de carga mais elevado. Em cada passo, deve-se adicionar um banco de capacitores (300 kVAr) ou um múltiplo (30 kVAr) até que a função objetivo não melhore (ótimo local). Supor que a configuração obtida possui k_n barras com alocação de capacitores.
2. Repetir o passo anterior realizando k_n buscas heurísticas e proibindo em cada busca a alocação de capacitores numa das barras usadas no passo (1).
3. Se o número de configurações candidatas n_p já foi encontrada então termina a Fase I. Em caso contrário encontrar as configurações restantes usando path relinking.
4. Armazenar as n_e configurações de elite como sendo um subconjunto da população inicial, $n_e < n_p$.

Fase II : Estratégia Tabu Search:

1. Para cada configuração da população, implementar um processo TS com memória de curto prazo, usando um critério de aspiração. Este processo, chamado TSM, é apresentado em separado.
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 em um número especificado de gerações, pare. Em caso contrário ir ao 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 TSM.

Para cada configuração de partida fazer o seguinte:

1. Processar um fluxo de carga para o nível de carga elevado e usar análise de sensibilidade para encontrar as melhores propostas de adição e retirada de capacitores.
2. Montar a lista de vizinhos candidatos usando as alternativas de adição e retirada obtidas no passo (1) e trocas (adição/retirada) dessas propostas até obter um conjunto de n_v vizinhos candidatos.
3. Para cada vizinho candidato identificado no passo anterior fazer o seguinte:

Para o problema de alocação de capacitores fixos resolver um fluxo de carga para cada nível de carga inferior. Se algum dos problemas de fluxo de carga produz violação de limites do problema, elimina-se a configuração candidata. Se a configuração candidata é factível para todos os níveis de carga, calcula-se a função objetivo do problema integral.

4. Escolher o melhor vizinho factível não proibido ou que satisfaça o critério de aspiração como a nova configuração corrente e armazenar os atributos proibidos.
5. Se o número de fluxos de carga foi excedido ou se a incumbente do processo TSM corrente não melhora durante n_t transições, pare o processo TSM retornando a informação da incumbente deste processo e atualizando as outras informações como a lista de configurações de elite. Em caso contrário volte ao passo (1).

5.4.O Problema de Alocação de Capacitores Variáveis.

O caso de alocação de capacitores variáveis é uma generalização do problema de alocação de capacitores fixos e representa a resolução de um problema mais complexo do ponto de vista do esforço computacional.

Definida uma configuração para o nível de carga elevado, deve-se encontrar a configuração (posição dos “taps” de capacitores variáveis) dos outros níveis de carga. Na presente



pesquisa esta parte deve ser implementada através de uma estratégia heurística realizando um número de tentativas n_1 para cada nível de carga. Este processo consiste em realizar basicamente adição, troca ou retirada de bancos a partir da configuração corrente, observando o tipo de perturbação ocorrido no nível de carga elevada e os limites nela permitidos.

Entretanto, é importante mencionar que é possível resolver esta parte do problema por métodos de otimização exata como foi realizado em [7] ou usando enumeração explícita para o caso em que a configuração analisada apresente poucas barras com alocação de capacitores. Este problema é conhecido na literatura como "sizing problem", assim está se propondo resolver esta parte do problema através de uma estratégia de "sizing problem" heurístico.



Testes e Resultados Obtidos

Usando o algoritmo de tabu search e o fluxo de carga implementado foram realizados testes com três sistemas conhecidos na literatura especializada e um sistema real para avaliar o desempenho do algoritmo proposto. O algoritmo desenvolvido foi implementado em linguagem de programação Fortran (Fortran Visual Workbench v 1.0). O sistema real é o sistema de distribuição de energia elétrica da cidade de Três Lagoas – MS e região da concessionária CESP. Os dados do sistema foram adquiridos na Gerência Geral de Atendimentos da CESP, de Andradina. Os testes foram feitos já com a implementação do algoritmo tabu search de duas fases proposta no capítulo anterior.

6.1 – Sistema de 10 barras [3]

O primeiro sistema tem 10 barras, tensão 23 KV, potência base 100 MVA. Seus dados completos foram obtidos na referência [3] e encontram-se no Apêndice A. São realizados testes utilizando os mesmos parâmetros e critérios usados no algoritmo genético proposto em [3].

A função objetivo é a seguinte $v = \min K_e \sum_{i=0}^2 T_i P_i + K_p P_0 + K_c \sum_{j=1}^{nc} C_j$ para o caso de 3 níveis de carga, onde o nível de carga alto é levado em conta duas vezes. Os parâmetros usados são $K_e = 0,06\$ /kWh$, $K_p = 168\$ /kW/ano$, $K_c = 4,9\$ /kVAr$, $S_0 = 1,1$, $S_1 = 0,6$, $S_2 = 0,3$, $T_0 = 1000$, $T_1 = 6760$, $T_2 = 1000$ e $\sum C_j$ é a capacidade total instalada (kVAr) no sistema.



Foram realizados testes para o caso de capacitores fixos e em cada barra candidata podem ser alocados até 5 bancos de 300 kVAr. Os cálculos são realizados para um horizonte de operação de um ano. Para o caso de operação sem compensação (sem alocação de capacitores) a função objetivo representa um custo de US\$ $v = 329039$ (ligeiramente diferente ao valor de 328922 obtido em [3])

Para o caso de alocação de capacitores fixos (que não foi testado em [3]) o algoritmo implementado encontrou a configuração mostrada na Tabela 1 com US\$ $v^* = 308909,1$. É importante ainda observar que o algoritmo implementado encontra um conjunto de configurações interessantes com valores de função objetivo muito próximas da melhor configuração encontrada como pode ser observado na Tabela 2 em que são mostradas 6 configurações com Δv menores a US\$ 141,1 dólares (menos de 0.1% de v^*).

Nº. das Barras	tamanho do capacitor (kVAr)
1	300
2	300
5	600
6	1200

Tabela 1 : Alocação de capacitores fixos

É interessante ainda observar que as barras 5 e 6 são as que ficam com o maior suporte de reativos e aquelas barras foram eliminadas pelo processo de redução de barras candidatas usando um indicador de sensibilidade apresentado em [3] o que mostra as dificuldades de usar indicadores de sensibilidade para reduzir o número de barras candidatas usando somente a configuração base.



Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores fixos de 300 kVAr cada					
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
8	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
6	3	4	4	4	4	4
5	2	3	2	2	2	1
4	1	0	0	1	1	2
3	0	0	1	0	0	0
2	0	0	0	1	0	0
1	1	1	1	0	1	1
Função Objetivo	309080,6	309042,4	308964,9	309050,2	308909,1	309036,0

Tabela 2: Configurações quase-ótimas para alocação de capacitores fixos.

Como pode ser visto na Tabela 2, a melhor configuração encontrada para a alocação de capacitores fixos utilizando o algoritmo implementado foi a configuração C₅, gerando 8.505 fluxos de carga, onde denota-se a seguir, as barras candidatas com os respectivos bancos a serem alocados e a sua função objetivo:

n₆ = 4 bancos

n₅ = 2 bancos

n₄ = 1 banco

n₁ = 1 banco

Função Objetivo = 308909,1

Portanto, a alocação de capacitores produz um ganho de US\$ 20.129,9 em relação à operação sem alocação de capacitores (sem compensação).

Os resultados para o caso da alocação de capacitores variáveis são apresentados na Tabela 3.

Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada					
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
Capacitores para o nível de carga elevada						
8	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
6	4	5	4	4	4	5
5	2	2	3	2	1	1
4	1	1	1	2	2	2
3	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
Capacitores para o nível de carga média						
8	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
6	4	5	4	4	4	5
5	2	2	2	2	1	1
4	0	0	0	0	1	1
3	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0
Capacitores para o nível de carga baixa						
8	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
6	3	3	3	3	3	3
5	0	0	0	0	0	0
4	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	307586,5	307600,1	307607,8	307633,8	307634,5	307648,6

Tabela 3: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis

Como pode ser visto na Tabela 3, a melhor configuração encontrada para a alocação de capacitores variáveis para os três níveis de carga utilizando o algoritmo implementado foi a configuração C₁, gerando 72.393 fluxos de carga, onde denota-se a seguir, as barras candidatas com os respectivos bancos a serem alocados nos três níveis de carga e a sua função objetivo:



Para o nível de carga elevada:

$n_6 = 4$ bancos

$n_5 = 2$ bancos

$n_4 = 1$ banco

$n_2 = 1$ banco

$n_1 = 1$ banco

Para o nível de carga média:

$n_6 = 4$ bancos

$n_5 = 2$ bancos

$n_2 = 1$ banco

Para o nível de carga baixa:

$n_6 = 3$ bancos

$n_4 = 1$ banco

Função Objetivo = 307586,5

Portanto, a alocação de capacitores variáveis produz um ganho de US\$ 21.452,5 em relação à operação sem alocação de capacitores (sem compensação).

6.2 – Sistema de 34 barras [16].

O segundo sistema têm 34 barras, tensão 11 KV, potência base 100 MVA. Seus dados completos foram obtidos na referência [16] e encontram-se no Apêndice A.

Os parâmetros usados foram os mesmos usados em [2], isto é, custo fixo de instalação de capacitores de US\$ 1000 dólares em cada barra usada e custo de US\$ 900 dólares por cada banco de 300 kVAR instalado, Os outros dados são : $K_e = 0,06$ US\$ /kWh, $S_0 = 1,8$, $S_1 = 1,0$, $S_2 = 0,5$, $T_0 = 1000$, $T_1 = 6760$, $T_2 = 1000$ horas e um horizonte de um ano.

Para o caso da operação sem compensação (sem alocação de capacitores) a função objetivo representa um custo de US\$ 140.376,8.

Foram realizados testes para o caso de capacitores fixos e variáveis. Em cada barra candidata podem ser alocados até 5 bancos de 300 kVAR. Para o caso de alocação de capacitores fixos foram encontradas 20 configurações quase-ótimas. Essas configurações estão dispostas nas tabelas 4,5, e 6, estando elas representadas por C_n .



Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores fixos de 300 kVAr cada							
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	3	3	3	2	2	2	3	4
21	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0
10	2	3	0	0	3	3	0	2
31	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0
25	2	0	2	2	2	0	0	2
33	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	3	3	0	0	2	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	2	0	0	0	2	2	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	114523,8	115010,1	115068,3	115176,7	114925,7	115118,7	114765,3	115082,0

Tabela 4: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores fixos



Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores fixos de 300 kVAr cada							
	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2	4	2	3	3	2	2	3
21	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0
10	3	0	2	2	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	2	0	2
24	0	0	0	0	2	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0
25	3	2	3	0	0	3	3	2
33	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	2	0	0	2	0	2	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	2	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	115086,2	115130,7	114792,6	114716,5	114699,1	114927,6	114841,4	114658,9

Tabela 5: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores fixos



Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores fixos de 300 kVAr cada			
	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	2
19	0	0	0	0
20	3	3	3	0
21	0	0	0	0
8	0	0	0	0
22	0	0	0	0
9	0	0	0	0
23	0	0	0	0
10	0	3	0	3
31	0	0	0	0
24	0	0	0	0
28	0	0	0	0
25	2	2	0	3
33	0	0	0	0
26	0	0	0	0
15	0	0	0	0
11	2	0	0	0
30	0	0	0	0
27	0	0	2	0
12	0	0	2	0
Função Objetivo	114572,6	114817,8	114899,5	115158,5

Tabela 6: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores fixos

Comparando as Tabelas 4,5 e 6, observa-se que a melhor configuração encontrada para a alocação de capacitores fixos utilizando o algoritmo implementado foi a configuração C₁, gerando 35.103 fluxos de carga, onde denota-se a seguir, as barras candidatas com os respectivos bancos a serem alocados e a sua função objetivo:

$$\begin{aligned}
 n_{20} &= 3 \text{ bancos} \\
 n_{10} &= 2 \text{ bancos} \\
 n_{25} &= 2 \text{ bancos} \\
 \text{Função Objetivo} &= 114523,8
 \end{aligned}$$

Portanto, a alocação de capacitores produz um ganho de US\$ 25.853 em relação à operação sem alocação de capacitores (sem compensação).



Para o caso de alocação de capacitores variáveis foram encontradas 20 configurações quase-ótimas. Essas configurações estão dispostas nas Tabelas 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15 estando elas representadas por C_n .

Nas Tabelas 7, 8 e 9 estão as configurações quase – ótimas para o nível de carga elevada. Nas Tabelas 10, 11 e 12 estão as configurações quase – ótimas para o nível de carga média, enquanto nas Tabelas 13, 14 e 15, estão as configurações quase – ótimas para o nível de carga baixa. A seguir estão as respectivas tabelas com as configurações quase – ótimas para os três níveis de carga.

Capacitores variáveis para o nível de carga elevada.
Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	3	3	3	3	0	3	0	0
21	0	0	0	0	3	0	3	3
8	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	3	3	0	3
23	0	0	0	0	0	0	0	0
10	3	2	3	3	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0
25	2	0	3	0	0	0	3	2
33	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	3	0	3	2	2	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	2	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	113899,2	113882,8	113848,8	113904,3	113878,5	113887,5	113934,5	113843,2

Tabela 7: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga elevada.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	3	3	3	3	0	3	0
21	3	0	0	0	0	3	0	3
8	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	3	0	3	3	3
23	0	0	0	0	0	0	0	0
10	2	0	2	0	3	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0
25	3	3	3	2	0	3	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	2	0	3	3
15	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	2	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	113899,4	113862,1	113827,2	113852,2	113934,5	113864,0	113898,4	113919,4

Tabela 8: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga elevada.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr
cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	3	3
21	3	3	0	0
8	0	0	0	0
22	0	0	0	0
9	0	0	0	3
23	0	0	0	0
10	3	3	0	0
31	0	0	0	0
24	0	0	0	0
28	0	0	0	0
25	3	2	0	3
33	0	0	0	0
26	0	0	3	0
15	0	0	0	0
11	0	0	2	0
30	0	0	0	0
27	0	0	0	0
12	0	0	0	0
Função Objetivo	113920,9	113899,9	113917,8	113801,7

Tabela 9: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga média.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	3	3	3	3	0	3	0	0
21	0	0	0	0	3	0	3	3
8	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	3	3	0	3
23	0	0	0	0	0	0	0	0
10	3	2	3	3	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0
25	2	0	2	0	0	0	2	2
33	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	2	0	2	2	2	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	2	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	113899,2	113882,8	113848,8	113904,3	113878,5	113887,5	113934,5	113843,2

Tabela 10: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga média.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	3	3	3	3	0	3	0
21	3	0	0	0	0	3	0	3
8	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	3	0	3	3	3
23	0	0	0	0	0	0	0	0
10	2	0	2	0	3	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0
25	2	2	2	2	0	2	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	2	0	2	2
15	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	2	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	113899,4	113862,1	113827,2	113852,2	113934,5	113864,0	113898,4	113919,4

Tabela 11 Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga média.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr
cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	3	3
21	3	3	0	0
8	0	0	0	0
22	0	0	0	0
9	0	0	0	3
23	0	0	0	0
10	3	3	0	0
31	0	0	0	0
24	0	0	0	0
28	0	0	0	0
25	2	2	0	2
33	0	0	0	0
26	0	0	2	0
15	0	0	0	0
11	0	0	2	0
30	0	0	0	0
27	0	0	0	0
12	0	0	0	0
Função Objetivo	113920,9	113899,9	113917,8	113801,7

Tabela 12: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga baixa.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2	2	2	2	0	2	0	0
21	0	0	0	0	1	0	2	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	2	1	0	2
23	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	1	1	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0
25	1	0	1	0	0	0	1	1
33	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	1	0	1	1	1	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	1	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	113899,2	113882,8	113848,8	113904,3	113878,5	113887,5	113934,5	113843,2

Tabela 13: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga baixa.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	2	2	2	2	0	2	0
21	2	0	0	0	0	1	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	0	2	2	2
23	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	1	0	1	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0
25	1	1	1	1	0	1	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	1	0	1	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	1	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	113899,4	113862,1	113827,2	113852,2	113934,5	113864,0	113898,4	113919,4

Tabela 14: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga baixa.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr

cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	2	2
21	2	2	0	0
8	0	0	0	0
22	0	0	0	0
9	0	0	0	1
23	0	0	0	0
10	1	1	0	0
31	0	0	0	0
24	0	0	0	0
28	0	0	0	0
25	1	1	0	1
33	0	0	0	0
26	0	0	1	0
15	0	0	0	0
11	0	0	1	0
30	0	0	0	0
27	0	0	0	0
12	0	0	0	0
Função Objetivo	113920,9	113899,9	113917,8	113801,7

Tabela 15: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores variáveis

Comparando as Tabelas 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15 observa-se que a melhor configuração encontrada para a alocação de capacitores variáveis para os três níveis de carga utilizando o algoritmo implementado foi a configuração C₂₀, gerando 173.554 fluxos de carga, onde denota-se a seguir, as barras candidatas com os respectivos bancos a serem alocados nos três níveis de carga e a sua função objetivo:



Para o nível de carga elevada:

$n_{20} = 3$ bancos

$n_9 = 3$ bancos

$n_{25} = 3$ bancos

Para o nível de carga média:

$n_{20} = 3$ bancos

$n_9 = 3$ bancos

$n_{25} = 2$ bancos

Para o nível de carga baixa:

$n_{20} = 2$ bancos

$n_9 = 1$ banco

$n_{25} = 1$ banco

Função Objetivo = 113801,7

Portanto, a alocação de capacitores variáveis produz um ganho de US\$ 26.575,1 em relação à operação sem alocação de capacitores.

6.3 – Sistema de 70 barras [7].

O terceiro sistema tem 70 barras, tensão 12,66 KV, potência base 100 MVA. Seus dados completos foram obtidos na referência [7] e encontram-se no Apêndice A.

Para o caso do sistema de 70 barras foram feitos dois testes:

6.3.1 – Sistema testado para um horizonte de um ano.

Para este teste foi utilizado a função objetivo que se encontra na referência [2]. Foi usado um custo fixo de US\$ 1000 dólares pela instalação dos bancos de capacitores em cada barra usada e um custo US\$ 900 dólares por cada banco de 300 kVAr instalado. Os outros dados são : $K_e = 0,06\$ / \text{kWh}$, $S_0 = 1,8$, $S_1 = 1,0$, $S_2 = 0,5$, $T_0 = 1000$, $T_1 = 6760$, $T_2 = 1000$.

Para o caso da operação sem compensação (sem alocação de capacitores) a função objetivo representa um custo de US\$ 146.407.



Foram encontradas 20 configurações quase - ótimas para o sistema de 70 barras usando tabu search na alocação de capacitores fixos para o horizonte de um ano, que estão dispostas nas Tabelas 16, 17 e 18.

Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores fixos de 300 kVAr cada							
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	2	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	1	0	0	0
17	1	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	1	1	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	1	0	0	0	0	0
50	4	4	4	4	4	5	4	4
22	0	1	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	105696,4	105775,5	105736,3	106294,6	105696,6	106292,2	105718,4	106214,4

Tabela 16: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores fixos

Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores fixos de 300 kVAr cada							
	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	1	0
16	0	0	0	0	0	1	0	0
17	0	0	0	0	1	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	1	1	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
50	5	4	5	4	5	5	4	4
22	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0	0
23	1	1	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	106434,2	105860,8	106306,8	105732,9	106270,3	106270,5	105744,3	106444,7

Tabela 17: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores fixos



Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores fixos de 300 kVAr cada			
	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
15	0	0	1	0
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	1
50	4	5	5	5
22	0	1	0	0
51	0	0	0	0
23	0	0	0	0
52	0	0	0	0
57	0	0	0	0
55	0	0	0	0
53	0	0	0	0
58	0	0	0	0
56	0	0	0	0
54	0	0	0	0
26	1	0	0	0
Função Objetivo	106227,0	106349,1	106317,9	106310,1

Tabela 18: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores fixos

Comparando as Tabelas 16, 17 e 18, observa-se que a melhor configuração encontrada para a alocação de capacitores fixos para o horizonte de um ano utilizando o algoritmo implementado foi a configuração C₁, gerando 110.937 fluxos de carga, onde denota-se a seguir, as barras candidatas com os respectivos bancos a serem alocados e a sua função objetivo:

n₁₇ = 1 banco

n₅₀ = 4 bancos

Função Objetivo = 105.696,4



Portanto, a alocação de capacitores produz um ganho de US\$ 40.710,6 em relação à operação sem alocação de capacitores (sem compensação).

Para o caso de alocação de capacitores variáveis para o período de um ano, foram encontradas 20 configurações quase-ótimas. Essas configurações estão dispostas nas Tabelas 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27 estando elas representadas por C_n .

Nas Tabelas 19, 20, e 21, estão as configurações quase – ótimas para o nível de carga elevada. Nas Tabelas 22, 23 e 24, estão as configurações quase – ótimas para o nível de carga média, enquanto nas Tabelas 25, 26 e 27, estão as configurações quase – ótimas para o nível de carga baixa. A seguir estão as respectivas tabelas com as configurações quase – ótimas para os três níveis de carga.

Capacitores variáveis para o nível de carga elevada.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
14	0	0	0	0	1	0	0	0
16	0	1	0	0	0	0	0	1
17	1	0	0	0	0	0	1	0
18	0	0	1	0	0	0	0	0
20	0	0	0	1	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
50	6	6	6	6	6	6	5	5
51	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	1	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	103519,3	103519,5	103532,8	103556,1	103605,9	103683,9	103952,7	103952,9

Tabela 19: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga elevada.

Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada							
	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
14	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	2	0	0
17	0	0	0	0	1	0	0	0
18	1	0	0	0	0	0	0	0
20	0	1	0	0	0	0	0	0
21	0	0	1	2	0	0	0	1
50	5	5	5	6	7	6	6	6
51	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	1	0
Função Objetivo	103966,2	103989,5	103992,8	104010,0	103622,2	103909,8	103973,6	103559,5

Tabela 20: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga elevada.

Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada			
	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
14	0	0	2	0
16	0	0	0	1
17	2	0	0	0
18	0	2	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
50	6	6	6	7
51	0	0	0	0
23	0	0	0	0
25	0	0	0	0
Função Objetivo	103909,8	103945,0	103982,3	103622,4

Tabela 21: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga média.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada								
Nº. das Barras Candidatas	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
14	0	0	0	0	1	0	0	0
16	0	1	0	0	0	0	0	1
17	1	0	0	0	0	0	1	0
18	0	0	1	0	0	0	0	0
20	0	0	0	1	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
50	4	4	4	4	4	4	4	4
51	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	1	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	103519,3	103519,5	103532,8	103556,1	103605,9	103683,9	103952,7	103952,9

Tabela 22: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga média.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada								
Nº. das Barras Candidatas	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
14	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	1	0	0
17	0	0	0	0	1	0	0	0
18	1	0	0	0	0	0	0	0
20	0	1	0	0	0	0	0	0
21	0	0	1	1	0	0	0	1
50	4	4	4	4	4	4	4	4
51	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	1	0
Função Objetivo	103966,2	103989,5	103992,8	104010,0	103622,2	103909,8	103973,6	103559,5

Tabela 23: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga média.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr

cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
14	0	0	1	0
16	0	0	0	1
17	1	0	0	0
18	0	1	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
50	4	4	4	4
51	0	0	0	0
23	0	0	0	0
25	0	0	0	0
Função Objetivo	103909,8	103945,0	103982,3	103622,4

Tabela 24: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga baixa.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
14	0	0	0	0	1	0	0	0
16	0	1	0	0	0	0	0	1
17	1	0	0	0	0	0	1	0
18	0	0	1	0	0	0	0	0
20	0	0	0	1	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
50	2	2	2	2	2	2	2	2
51	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	1	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	103519,3	103519,5	103532,8	103556,1	103605,9	103683,9	103952,7	103952,9

Tabela 25: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga baixa.

Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada							
	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
14	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	1	0	0
17	0	0	0	0	1	0	0	0
18	1	0	0	0	0	0	0	0
20	0	1	0	0	0	0	0	0
21	0	0	1	1	0	0	0	1
50	2	2	2	2	2	2	2	2
51	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	103966,2	103989,5	103992,8	104010,0	103622,2	103909,8	103973,6	103559,5

Tabela 26: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga baixa.

Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada			
	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
14	0	0	1	0
16	0	0	0	1
17	1	0	0	0
18	0	1	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
50	2	2	2	2
51	0	0	0	0
23	0	0	0	0
25	0	0	0	0
Função Objetivo	103909,8	103945,0	103982,3	103622,4

Tabela 27: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis

Comparando as Tabelas 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27 observa-se que a melhor configuração encontrada para a alocação de capacitores variáveis para os três níveis de carga utilizando o algoritmo implementado foi a configuração C_1 , gerando 1.121.096 fluxos de carga, onde denota-se a seguir, as barras candidatas com os respectivos bancos a serem alocados nos três níveis de carga e a sua função objetivo:

Para o nível de carga elevada:

$n_{17} = 1$ banco

$n_{50} = 6$ bancos

Para o nível de carga média:

$n_{17} = 1$ banco

$n_{50} = 4$ bancos

Para o nível de carga baixa:

$n_{17} = 1$ banco

$n_{50} = 2$ bancos

Função Objetivo = 103519,3

Portanto, a alocação de capacitores variáveis produz um ganho de US\$ 42.887,7 em relação à operação sem alocação de capacitores.

6.3.2 – Sistema testado para um horizonte de dez anos.

Neste teste a função objetivo encontra-se na referência [4] e os outros dados são: $K_{e0} = 2,95$ NT\$/kWh, $K_{e1} = 1,78$ NT\$/kWh, $K_{e2} = 0,7$ NT\$/kWh, $S_0 = 1,0$, $S_1 = 0,8$, $S_2 = 0,5$, $T_0 = 1000$, $T_1 = 6760$, $T_2 = 1000$.

Para o caso da operação sem compensação (sem alocação de capacitores) a função objetivo representa um custo de NT\$ 38.948.030.

Foram encontradas 20 configurações quase - ótimas para o sistema de 70 barras usando tabu search na alocação de capacitores fixos para o horizonte de dez anos, que estão dispostas nas Tabelas 28, 29 e 30.



Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores fixos de 300 kVAr cada							
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
7	0	1	0	0	1	1	1	1
10	0	1	1	1	0	1	0	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	1	1	1	0	1
17	1	0	1	0	0	0	1	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	1	0	0	0	0	0	0
50	3	3	3	3	3	2	3	3
22	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	1	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0	0
55	1	0	0	0	1	0	1	0
53	1	1	1	1	1	1	1	1
40	1	0	1	1	0	0	0	0
37	0	0	1	0	1	0	0	1
54	0	0	0	0	0	0	0	0
38	1	1	0	1	0	1	1	0
90	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	25642322	25631784	25632952	25626478	25642038	25635932	25635462	25626148

Tabela 28: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores fixos



Nº. de bancos de capacitores fixos de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
7	0	0	1	1	1	1	0	1
10	1	1	1	1	1	1	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	1	1
17	0	1	1	0	1	1	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	0	0	1	0	0	0	0
50	3	3	3	3	3	2	3	3
22	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	1	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	1
53	1	1	1	1	1	1	1	1
40	1	0	0	0	0	0	1	0
37	0	0	0	1	1	0	1	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0
38	1	1	1	0	0	1	0	1
90	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	25638648	25636074	25619570	25638312	25626098	25635880	25633004	25635512

Tabela 29: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores fixos



Nº. de bancos de capacitores fixos de 300 kVAr cada				
Nº. das Barras Candidatas	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
7	0	1	1	0
10	1	1	0	1
11	0	0	0	0
16	0	1	0	1
17	1	0	1	0
27	0	0	0	0
28	0	0	0	0
20	0	0	0	0
50	3	3	3	3
22	0	0	0	0
51	0	0	0	0
52	0	0	0	0
36	0	0	0	0
57	0	0	0	0
55	0	0	1	0
53	1	1	1	1
40	1	0	0	0
37	0	0	1	0
54	0	0	0	0
38	1	1	0	1
90	0	0	0	0
Função	25626428	25619622	25641990	25636124
Objetivo				

Tabela 30: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores fixos

Comparando as Tabelas 28, 29 e 30, observa-se que a melhor configuração encontrada para a alocação de capacitores fixos para o horizonte de dez anos utilizando o algoritmo implementado foi a configuração C₁₁, gerando 120.935 fluxos de carga, onde denota-se a seguir, as barras candidatas com os respectivos bancos a serem alocados e a sua função objetivo:

n₇ = 1 banco
n₁₀ = 1 banco
n₁₇ = 1 banco
n₅₀ = 3 bancos
n₅₃ = 1 banco
n₃₈ = 1 banco
Função Objetivo = 25619570



Portanto, a alocação de capacitores produz um ganho de NT\$ 13.328.460 em relação à operação sem alocação de capacitores (sem compensação).

Para o caso de alocação de capacitores variáveis para o período de dez anos, foram encontradas 14 configurações quase-ótimas. Essas configurações estão dispostas nas Tabelas 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 e 39 estando elas representadas por C_n .

Nas Tabelas 31, 32 e 33 estão as configurações quase – ótimas para o nível de carga elevada. Nas Tabelas 34, 35 e 36 estão as configurações quase – ótimas para o nível de carga média, enquanto nas Tabelas 37, 38 e 39 estão as configurações quase – ótimas para o nível de carga baixa. A seguir estão as respectivas tabelas com as configurações quase – ótimas para os três níveis de carga.

Capacitores variáveis para o nível de carga elevada.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
6	1	0	0	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	1	1	0
11	0	0	1	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
16	1	1	1	1	1	1
27	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	1	1	1
50	4	3	4	3	3	3
22	0	0	0	0	0	0
51	0	1	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0
53	1	1	1	1	1	1
37	0	1	0	0	0	0
89	0	0	0	0	0	0
56	0	1	0	0	0	1
54	0	0	0	0	0	0
38	1	0	1	1	1	1
Função Objetivo	25626450,0	25631600,0	25626944,0	25630240,0	25610740,0	25626330,0

Tabela 31: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga elevada.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	1	1	0
10	1	0	1	1	1	1
11	0	1	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
16	1	1	1	1	1	1
27	0	0	0	0	0	0
49	1	1	0	1	0	0
50	3	3	4	3	4	4
22	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0
53	1	1	1	1	1	1
37	1	0	0	0	1	1
89	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0
38	0	1	1	1	0	0
Função Objetivo	25617270,0	25630746,0	25606936,0	25627024,0	25629730,0	25613468,0

Tabela 32: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga elevada.

Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada	
	C ₁₃	C ₁₄
6	0	0
7	0	1
10	0	1
11	0	0
12	0	0
13	0	0
16	1	1
27	0	0
49	0	0
50	4	4
22	0	0
51	0	0
52	0	0
36	0	0
57	0	0
53	1	1
37	0	0
89	0	0
56	1	0
54	0	0
38	1	1
Função Objetivo	25622524,0	25623238,0

Tabela 33: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga média.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
6	1	0	0	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	1	1	0
11	0	0	1	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
16	1	1	1	1	1	1
27	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0
50	3	3	3	3	3	3
22	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0
53	1	1	1	1	1	1
37	0	1	0	0	0	0
89	0	0	0	0	0	0
56	0	1	0	0	0	1
54	0	0	0	0	0	0
38	1	0	1	1	1	1
Função Objetivo	25626450,0	25631600,0	25626944,0	25630240,0	25610740,0	25626330,0

Tabela 34: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga média.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	1	1	0
10	1	0	1	1	1	1
11	0	1	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
16	1	1	1	1	1	1
27	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0
50	3	3	3	3	3	3
22	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0
53	1	1	1	1	1	1
37	1	0	0	0	1	1
89	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0
38	0	1	1	1	0	0
Função Objetivo	25617270,0	25630746,0	25606936,0	25627024,0	25629730,0	25613468,0

Tabela 35: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga média.

Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada	
	C ₁₃	C ₁₄
6	0	0
7	0	1
10	0	1
11	0	0
12	0	0
13	0	0
16	1	1
27	0	0
49	0	0
50	3	3
22	0	0
51	0	0
52	0	0
36	0	0
57	0	0
53	1	1
37	0	0
89	0	0
56	1	0
54	0	0
38	1	1
Função Objetivo	25622524,0	25623238,0

Tabela 36: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga baixa.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	1	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
16	1	1	0	1	1	1
27	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	1	1	1
50	3	3	3	2	2	2
22	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0
37	0	1	0	0	0	0
89	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0
38	1	0	1	1	1	1
Função Objetivo	25626450,0	25631600,0	25626944,0	25630240,0	25610740,0	25626330,0

Tabela 37: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga baixa.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	1	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	1	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
16	1	0	1	1	1	1
27	0	0	0	0	0	0
49	1	1	0	1	0	0
50	2	2	3	2	2	3
22	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0
37	1	0	0	0	1	1
89	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0
38	0	1	1	1	0	0
Função Objetivo	25617270,0	25630746,0	25606936,0	25627024,0	25629730,0	25613468,0

Tabela 38: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga baixa.

Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada	
	C ₁₃	C ₁₄
6	0	0
7	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
16	1	1
27	0	0
49	0	0
50	3	3
22	0	0
51	0	0
52	0	0
36	0	0
57	0	0
53	0	0
37	0	0
89	0	0
56	0	0
54	0	0
38	1	1
Função Objetivo	25622524,0	25623238,0

Tabela 39: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis

Comparando as Tabelas 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 e 39 observa-se que a melhor configuração encontrada para a alocação de capacitores variáveis para os três níveis de carga utilizando o algoritmo implementado foi a configuração C₉ , gerando 3.543.411 fluxos de carga, onde denota-se a seguir, as barras candidatas com os respectivos bancos a serem alocados nos três níveis de carga e a sua função objetivo:

Para o nível de carga elevada:

n₁₀ = 1 banco

n₁₆ = 1 banco



$n_{50} = 4$ bancos
 $n_{53} = 1$ banco
 $n_{38} = 1$ banco

Para o nível de carga média:

$n_{10} = 1$ banco
 $n_{16} = 1$ banco
 $n_{50} = 3$ bancos
 $n_{53} = 1$ banco
 $n_{38} = 1$ banco

Para o nível de carga baixa:

$n_{16} = 1$ banco
 $n_{50} = 3$ bancos
 $n_{38} = 1$ banco

Função Objetivo = 25606936,0

Portanto, a alocação de capacitores variáveis produz um ganho de NT\$ 13.341.094, em relação à operação sem alocação de capacitores.

6.4 – Sistema de 135 barras

O sistema real tem 135 barras, tensão 13,8 KV, potência base de 100 MVA. Seus dados completos foram obtidos junto à Gerência Central de Atendimentos da CESP de Andradina – SP e encontram – se no apêndice A.

Para o sistema real de 135 barras a função objetivo encontra-se na referência [2] e os dados usados são: $K_e = 0,06\$ /kWh$, $S_0 = 1,8$, $S_1 = 1,0$, $S_2 = 0,5$, $T_0 = 1000$, $T_1 = 6760$, $T_2 = 1000$.

Para o caso da operação sem compensação (sem alocação de capacitores) a função objetivo representa um custo de US\$ 201.625,6.

Foram realizados testes para o caso de capacitores fixos e variáveis. Em cada barra candidata podem ser alocados até 5 bancos de 300 kVAr. Para o caso de alocação de capacitores fixos foram encontradas 20 configurações quase-ótimas. Essas configurações estão dispostas nas Tabelas 40, 41 e 42, estando elas representadas por C_n .



Nº. de bancos de capacitores fixos de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
155	4	4	4	4	4	4	4	4
156	0	0	0	0	0	0	0	0
157	0	0	0	0	0	0	0	0
141	0	0	0	0	0	0	0	0
220	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0
158	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	0
221	0	0	0	0	1	0	0	0
162	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
222	0	0	0	0	0	0	1	0
202	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0
163	0	0	0	0	0	0	0	0
144	0	0	0	0	0	0	0	0
130	0	1	0	1	0	0	0	0
71	0	0	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	2	0	2	0	0	2
41	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2	2	1	2	2	2	2	2
145	0	0	0	0	0	0	0	0
131	1	0	0	0	0	0	0	1
129	0	0	0	0	0	0	0	0
87	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0
42	2	2	0	1	0	0	2	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	192614,1	192573,0	192625,5	192651,1	192538,4	192558,0	192633,9	192534,7

Tabela 40: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores fixos

Nº. de bancos de capacitores fixos de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
155	4	4	4	4	4	4	4	4
156	0	0	0	0	0	0	0	0
157	0	0	0	0	0	0	0	0
141	0	0	0	0	0	0	0	0
220	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0
158	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	0
221	1	0	2	0	0	0	0	0
162	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	2	0	0
222	0	0	0	0	0	0	0	0
202	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0
163	0	0	0	0	0	0	0	0
144	0	0	0	0	0	0	0	0
130	0	1	0	0	0	1	1	0
71	0	0	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	1	0	0	1	0	2	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2	2	2	2	2	0	2	2
145	0	0	0	0	0	0	0	0
131	0	0	0	0	0	0	0	0
129	0	0	0	0	0	0	0	0
87	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	1
42	2	0	2	2	0	1	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	192617,8	192659,4	192663,7	192451,7	192538,1	192625,1	192493,6	192550,6

Tabela 41: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores fixos



Nº. de bancos de capacitores fixos de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
155	4	4	4	4
156	0	0	0	0
157	0	0	0	0
141	0	0	0	0
220	0	0	0	0
160	0	0	0	0
158	0	0	0	0
69	0	0	0	0
221	0	0	0	0
162	0	0	0	0
70	0	0	0	0
63	0	0	0	0
17	0	0	0	0
222	0	0	0	0
202	0	0	0	0
200	0	0	0	0
163	0	0	0	0
144	0	0	0	0
130	0	1	0	0
71	0	0	0	0
64	0	0	0	0
44	2	0	0	0
41	0	1	0	1
20	2	2	2	2
145	0	0	0	0
131	0	0	0	0
129	0	0	0	0
87	0	0	0	0
59	0	0	0	0
45	0	0	0	0
42	0	0	1	0
38	0	0	0	0
21	0	0	0	0
18	0	0	0	0
15	0	0	0	0
Função	192372,2	192661,9	192529,8	192540,5
Objetivo				

Tabela 42: Soluções quase - ótimas para alocação de capacitores fixos

Comparando as Tabelas 40, 41 e 42, observa-se que a melhor configuração encontrada para a alocação de capacitores fixos utilizando o algoritmo implementado foi a configuração C_{17} , gerando 65.817 fluxos de carga, onde denota-se a seguir, as barras candidatas com os respectivos bancos a serem alocados e a sua função objetivo:

$n_{155} = 4$ bancos

$n_{44} = 2$ bancos

$n_{20} = 2$ bancos

Função Objetivo = 192372,2

Portanto, a alocação de capacitores produz um ganho de US\$ 9.253,4 em relação à operação sem alocação de capacitores (sem compensação).

Para o caso de alocação de capacitores variáveis foram encontradas 20 configurações quase-ótimas. Essas configurações estão dispostas nas Tabelas 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50 e 51 estando elas representadas por C_n .

Nas Tabelas 43, 44, e 45, estão as configurações quase – ótimas para o nível de carga elevada. Nas Tabelas 46, 47, e 48, estão as configurações quase – ótimas para o nível de carga média e nas Tabelas 49, 50 e 51, estão as configurações quase – ótimas para o nível de carga baixa. A seguir estão as respectivas Tabelas com as configurações quase – ótimas para os três níveis de carga.



Capacitores variáveis para o nível de carga elevada.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
155	4	4	4	4	4	5	4	4
156	0	0	0	0	0	0	0	0
157	0	0	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	0
221	0	0	0	0	0	0	0	0
162	0	0	0	0	0	0	0	0
159	0	0	0	0	0	0	0	0
143	0	0	0	0	0	0	0	0
128	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0
222	0	0	0	0	0	0	0	0
202	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0
144	0	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	1	0
71	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	2	0	0	2	1	0	0
41	2	0	0	0	0	0	2	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2	1	2	2	0	2	2	2
203	0	0	0	0	0	0	0	0
164	0	0	0	0	0	0	0	0
145	0	0	0	0	0	0	0	0
131	1	0	0	0	0	0	0	0
129	0	0	0	0	0	0	0	0
87	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	1
42	0	0	1	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	192391,6	192427,6	192346,6	192374,9	192415,9	192436,8	192327,4	192367,5

Tabela 43: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga elevada.

Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada							
	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
155	4	4	4	5	4	4	5	4
156	0	0	0	0	0	0	0	0
157	0	0	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	0
221	0	0	0	0	0	0	0	0
162	0	0	0	0	0	0	0	0
159	0	0	0	0	0	0	0	0
143	0	0	0	0	0	0	0	0
128	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0
222	0	0	0	0	0	0	0	0
202	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0
144	0	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	1	0	0	0	0	1
71	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	2	0	0	2	0	0
41	0	1	0	0	2	0	1	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2	2	2	2	0	2	2	2
203	0	0	0	0	0	0	0	0
164	0	0	0	0	0	0	0	0
145	0	0	0	0	0	0	0	0
131	0	0	0	0	0	0	0	0
129	0	0	0	0	0	0	0	0
87	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0
45	2	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	1	0	0	0	2
21	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	192317,1	192357,4	192292,3	192428,5	192432,9	192171,0	192439,2	192389,8

Tabela 44: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga elevada.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
155	5	4	4	4
156	0	0	0	0
157	0	0	0	0
68	0	0	0	0
160	0	0	0	0
69	0	0	0	0
221	0	0	0	0
162	0	0	0	0
159	0	0	0	0
143	0	0	0	0
128	0	0	0	0
70	0	0	0	0
222	0	0	0	0
202	0	0	0	0
200	0	0	0	0
144	0	0	0	0
130	0	0	0	0
71	0	0	0	0
44	0	1	0	0
41	0	0	0	2
37	0	0	0	0
20	2	2	2	2
203	0	0	0	0
164	0	0	0	0
145	0	0	0	0
131	0	0	0	0
129	0	0	0	0
87	0	0	0	0
65	0	0	0	0
59	0	0	0	0
45	2	0	0	0
42	0	0	2	0
21	0	0	0	0
18	0	0	0	0
15	0	0	0	0
Função Objetivo	192437,0	192354,9	192237,7	192206,0

Tabela 45: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga média.

Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada							
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
155	4	4	4	4	4	5	4	4
156	0	0	0	0	0	0	0	0
157	0	0	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	0
221	0	0	0	0	0	0	0	0
162	0	0	0	0	0	0	0	0
159	0	0	0	0	0	0	0	0
143	0	0	0	0	0	0	0	0
128	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0
222	0	0	0	0	0	0	0	0
202	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0
144	0	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	1	0
71	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	2	0	0	2	1	0	0
41	2	0	0	0	0	0	2	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2	1	2	2	0	2	2	2
203	0	0	0	0	0	0	0	0
164	0	0	0	0	0	0	0	0
145	0	0	0	0	0	0	0	0
131	1	0	0	0	0	0	0	0
129	0	0	0	0	0	0	0	0
87	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	1
42	0	0	1	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	192391,6	192427,6	192346,6	192374,9	192415,9	192436,8	192327,4	192367,5

Tabela 46: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga média.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
155	4	4	4	5	4	4	5	4
156	0	0	0	0	0	0	0	0
157	0	0	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	0
221	0	0	0	0	0	0	0	0
162	0	0	0	0	0	0	0	0
159	0	0	0	0	0	0	0	0
143	0	0	0	0	0	0	0	0
128	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0
222	0	0	0	0	0	0	0	0
202	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0
144	0	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	1	0	0	0	0	1
71	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	2	0	0	2	0	0
41	0	1	0	0	2	0	1	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2	2	2	2	0	2	2	2
203	0	0	0	0	0	0	0	0
164	0	0	0	0	0	0	0	0
145	0	0	0	0	0	0	0	0
131	0	0	0	0	0	0	0	0
129	0	0	0	0	0	0	0	0
87	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0
45	2	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	1	0	0	0	2
21	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	192317,1	192357,4	192292,3	192428,5	192432,9	192171,0	192439,2	192389,8

Tabela 47: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga média.

Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada			
	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
155	5	4	4	4
156	0	0	0	0
157	0	0	0	0
68	0	0	0	0
160	0	0	0	0
69	0	0	0	0
221	0	0	0	0
162	0	0	0	0
159	0	0	0	0
143	0	0	0	0
128	0	0	0	0
70	0	0	0	0
222	0	0	0	0
202	0	0	0	0
200	0	0	0	0
144	0	0	0	0
130	0	0	0	0
71	0	0	0	0
44	0	1	0	0
41	0	0	0	2
37	0	0	0	0
20	2	2	2	2
203	0	0	0	0
164	0	0	0	0
145	0	0	0	0
131	0	0	0	0
129	0	0	0	0
87	0	0	0	0
65	0	0	0	0
59	0	0	0	0
45	2	0	0	0
42	0	0	2	0
21	0	0	0	0
18	0	0	0	0
15	0	0	0	0
Função	192437,0	192354,9	192237,7	192206,0
Objetivo				

Tabela 48: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga baixa.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
155	2	2	2	2	2	2	2	2
156	0	0	0	0	0	0	0	0
157	0	0	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	0
221	0	0	0	0	0	0	0	0
162	0	0	0	0	0	0	0	0
159	0	0	0	0	0	0	0	0
143	0	0	0	0	0	0	0	0
128	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0
222	0	0	0	0	0	0	0	0
202	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0
144	0	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	1	0
71	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	1	0	0	2	1	0	0
41	2	0	0	0	0	0	1	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	1	1	1	0	1	1	1
203	0	0	0	0	0	0	0	0
164	0	0	0	0	0	0	0	0
145	0	0	0	0	0	0	0	0
131	1	0	0	0	0	0	0	0
129	0	0	0	0	0	0	0	0
87	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	1
42	0	0	1	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	192391,6	192427,6	192346,6	192374,9	192415,9	192436,8	192327,4	192367,5

Tabela 49: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Capacitores variáveis para o nível de carga baixa.

Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada

Nº. das Barras Candidatas	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
155	2	2	2	2	2	2	2	2
156	0	0	0	0	0	0	0	0
157	0	0	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	0
221	0	0	0	0	0	0	0	0
162	0	0	0	0	0	0	0	0
159	0	0	0	0	0	0	0	0
143	0	0	0	0	0	0	0	0
128	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0
222	0	0	0	0	0	0	0	0
202	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0
144	0	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	1	0	0	0	0	1
71	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	1	0	0	1	0	0
41	0	1	0	0	1	0	1	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	1	1	1	0	1	1	1
203	0	0	0	0	0	0	0	0
164	0	0	0	0	0	0	0	0
145	0	0	0	0	0	0	0	0
131	0	0	0	0	0	0	0	0
129	0	0	0	0	0	0	0	0
87	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0
45	1	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	1	0	0	0	2
21	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
Função Objetivo	192317,1	192357,4	192292,3	192428,5	192432,9	192171,0	192439,2	192389,8

Tabela 50: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis

Capacitores variáveis para o nível de carga baixa.

Nº. das Barras Candidatas	Nº. de bancos de capacitores variáveis de 300 kVAr cada			
	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
155	2	2	2	2
156	0	0	0	0
157	0	0	0	0
68	0	0	0	0
160	0	0	0	0
69	0	0	0	0
221	0	0	0	0
162	0	0	0	0
159	0	0	0	0
143	0	0	0	0
128	0	0	0	0
70	0	0	0	0
222	0	0	0	0
202	0	0	0	0
200	0	0	0	0
144	0	0	0	0
130	0	0	0	0
71	0	0	0	0
44	0	1	0	0
41	0	0	0	1
37	0	0	0	0
20	1	1	1	1
203	0	0	0	0
164	0	0	0	0
145	0	0	0	0
131	0	0	0	0
129	0	0	0	0
87	0	0	0	0
65	0	0	0	0
59	0	0	0	0
45	2	0	0	0
42	0	0	1	0
21	0	0	0	0
18	0	0	0	0
15	0	0	0	0
Função	192437,0	192354,9	192237,7	192206,0
Objetivo				

Tabela 51: Soluções quase- ótimas para alocação de capacitores variáveis



Comparando as Tabelas 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50 e 51 observa-se que a melhor configuração encontrada para a alocação de capacitores variáveis para os três níveis de carga utilizando o algoritmo implementado foi a configuração C_{14} , gerando 5.597.593 fluxos de carga, onde denota-se a seguir, as barras candidatas com os respectivos bancos a serem alocados nos três níveis de carga e a sua função objetivo:

Para o nível de carga elevada:

$n_{155} = 4$ bancos

$n_{44} = 2$ bancos

$n_{20} = 2$ bancos

Para o nível de carga média:

$n_{155} = 4$ bancos

$n_{44} = 2$ bancos

$n_{20} = 2$ bancos

Para o nível de carga baixa:

$n_{155} = 2$ bancos

$n_{44} = 1$ banco

$n_{20} = 1$ banco

Função Objetivo = 192171,0

Portanto, a alocação de capacitores variáveis produz um ganho de US\$ 9.454,6 em relação à operação sem alocação de capacitores.



CAPÍTULO VII

Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um algoritmo Tabu Search para o problema de alocação de capacitores em sistemas de distribuição radial a fim de reduzir as perdas de energia. Adicionalmente, pode-se mencionar as seguintes conclusões:

1. O algoritmo Tabu Search proposto encontra configurações de melhor qualidade para os três sistemas disponíveis na literatura especializada quando comparados com os resultados encontrados por outros algoritmos para esses sistemas elétricos, tais como: Simulated Annealing apresentado em [1,2], algoritmo Genético apresentado em [16] e algoritmo Tabu Search apresentado em [4]. Em relação ao algoritmo apresentado em [16] ainda não foi possível comparar os resultados encontrados porque em [16] os fatores de carga não são uniformes para todas as barras do sistema. Portanto, deve-se codificar o algoritmo Tabu Search para considerar fatores de carga não uniformes para comparar os resultados encontrados com o algoritmo apresentado em [16].
2. O uso diferente dos indicadores de sensibilidade no algoritmo proposto é, provavelmente um dos aspectos responsáveis pelo desempenho do algoritmo Tabu Search. No presente trabalho os indicadores de sensibilidade são usados em duas fases do algoritmo:
 - a) para encontrar um número predeterminado de configurações e as barras candidatas a alocação de capacitores dentro de um processo heurístico dinâmico chamado de fase I.



b) para encontrar um número reduzido de vizinhos candidatos de boa qualidade dentro da estratégia Tabu Search na fase II.

Portanto, a proposta de uso de indicadores de sensibilidade é radicalmente diferente aos propostos por outros pesquisadores como nos trabalhos apresentados em [3] e [4].

3. A redução drástica do número de barras candidatas à alocação de capacitores com a finalidade de reduzir a complexidade do problema pode produzir erros no processo de resolução do problema, eliminando barras que fazem parte da configuração ótima do conjunto de barras candidatas. Foi verificado que este tipo de erro acontece quando são usados indicadores de sensibilidade num único passo e para um único nível de carga mesmo para sistemas pequenos como o sistema de 10 barras.
4. Foi implementado um algoritmo de fluxo de carga radial para ser usado como “subrotina” do algoritmo Tabu Search. Em geral, pode ser usado qualquer algoritmo de fluxo de carga radial desde que seja rápido e robusto pois, geralmente, a subrotina de fluxo de carga é chamada milhares de vezes pelo algoritmo Tabu Search.
5. O algoritmo proposto deve ser modificado em vários aspectos para que seja usado na prática em sistemas de distribuições reais tais como: considerar crescimento de carga não uniforme, considerar fatores de carga diferentes em cada barra, considerar todos os aspectos relacionados com a proteção do sistema, levar em conta os harmônicos em sistemas elétricos, etc.. Alguns destes aspectos podem ser implementados facilmente mas outros requerem maiores trabalhos teórico e de implementação computacional.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *H. D. Chiang, J. C. Wang, O. Cockings, H. D. Shin*: "Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems Part. I: A New Formulation and the Overall Problem", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp. 634-642, April 1990.
- [2] *H. D. Chiang, J. C. Wang, O. Cockings, H. D. Shin*: "Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems Part. II: Solution Algorithms and Numerical Results", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp. 643-649, April 1990.
- [3] *S. Sundhararajan, A. Pahwa*: "Optimal Selection of Capacitors For Radial Distribution Systems Using a Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1499-1505, August 1994.
- [4] *Y. C. Huang, H. T. Yang, C. L. Huang*: "Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 1868-1873, November 1996.
- [5] *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, January 1989.
- [6] *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, April 1989.



- [7] *M. E. Baran, F. F. Wu*: "Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 725-733, January 1989.
- [8] *M. Kaplan*: "Optimization of Number, Location, Size, Control Type, and Control Setting of Shunt Capacitors on Radial Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 9, pp. 2659-2663, September 1984.
- [9] *J. J. Grainger, S. Civanlar*: "Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators Part. I: The Overall Problem", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol., PAS-104, No. 11, pp. 3278-3283, November 1985.
- [10] *J. J. Grainger, S. Civanlar*: "Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators Part. II: The Solution Method", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 11, pp. 3284-3290, November 1985.
- [11] *J. J. Grainger, S. Civanlar*: "Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators Part. III: The Numerical Results", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 11, pp. 3291-3297, November 1985.
- [12] *J. J. Grainger, S. Civanlar, K. N. Clinard, L. J. Gale*: "Optimal Voltage Dependent Continuous-Time Control of Reactive Power on Primary Feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 9, pp. 2714-2722, September 1984.
- [13] *J. J. Grainger, S. H. Lee*: "Capacitor Release by Shunt Capacitor Placement on Distribution Feeders: A New Voltage-Dependent Model", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 15, pp. 1236-1244, May 1982.



- [14] *S. H. Lee, J. J. Grainger*: "Optimum Placement of Fixed and Switched Capacitors on Primary Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 1, pp. 345-352, January 1981.
- [15] *J. L. Bala, P. A. Kuntz, M. J. Pebles*: "Optimal Capacitor Allocation Using a Distribution-Analyzer-Recorder", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No 1, pp. 464-469, January 1997.
- [16] *M. Chis, M. M. A. Salama, S. Jayaram*: "Capacitor Placement in Distribution System Using Heuristic Search Strategies", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 144, No 3, pp. 225-230, May 1997.
- [17] *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.
- [18] *F. Glover*: "Tabu Search Fundamentals and Uses", University of Colorado, Boulder, Colorado, April 1995.
- [19] *A. J. Monticelli*: "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", Editora Edgard Blucher Ltda., 1983.
- [20] *R. A. Gallego, A. J. Monticelli, R. Romero*: "Comparative Studies of Non-Convex Optimization Methods for Transmisson System Expansion Planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 822 -828, August 1998.
- [21] *Renato Cespedes G.*: "New Method for the Analysis of Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No.1, pp. 391-396, January 1990.
- [22] *C.R. Reeves*: "Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems", McGraw-Hill Book Company, 1995.
- [23] *F. Glover, M. Laguna*: "Tabu Search", University of Colorado at Boulder, Kluwer Academic Publishers.



[24] *O. Elgerd*: "Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica", McGraw Hill do Brasil.

[25] *D. E. Goldberg*: "Genetics Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison Wesley, Reading, Mass., 1989.



APÊNDICE A

Sistemas Testados

Este apêndice apresenta os dados dos três sistemas conhecidos na literatura especializada e do sistema real utilizados nos testes realizados para a resolução do algoritmo de busca tabu usado no problema de alocação de capacitores em sistemas de distribuição radial. Os dados das barras e das linhas estão representadas em Tabelas. Em A.1. estão os dados completos do sistema de 10 barras [3], em A.2. estão os dados completos do sistema de 34 barras [16], em A.3. estão os dados do sistema de 70 barras [7] e em A.4. estão os dados do sistema real de 135 barras.



A.1. Dados Completos do Sistema de 10 Barras [3]

O sistema hipotético de 10 barras apresenta uma tensão base de 23 KV, potência base de 100 MVA. Seus dados foram obtidos da referência [3].Abaixo está a Tabela 1 com os dados das barras e a Tabela 2 com os dados das linhas.

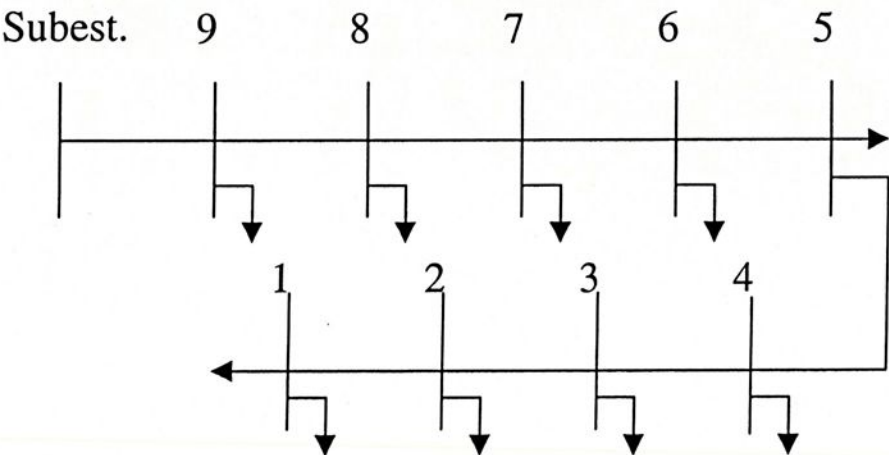


Fig. A.1.: Diagrama Unifilar do Sistema de Distribuição de 10 barras

Tabela A1: Dados da referência [3]

Dados das Barras		
Nº. das Barras	Potência Ativa(kW)	Potência Reativa(kVAr)
1	1640	200
2	980	130
3	1150	60
4	780	110
5	1610	600
6	1598	1840
7	1790	446
8	980	340
9	1840	460
10	0,0	0,0

Tabela A2: Dados da referência [3]

Dados das Linhas

Barra Inicial	Barra Final	Resistência da Seção em (ohms)	Reactância da Seção em (ohms)
1	2	5,3434	3,0264
2	3	4,7953	2,7160
3	4	2,0552	1,1640
4	5	0,9053	0,7886
5	6	1,9831	1,7276
6	7	0,6984	0,6084
7	8	0,7463	1,2050
8	9	0,0140	0,6051
9	Subestação	0,1233	0,4127



A.2. Dados Completos do Sistema de 34 Barras [16]

O sistema hipotético de 34 barras apresenta uma tensão base de 11 KV, potência base de 100 MVA. Seus dados foram obtidos da referência [16]. Abaixo está a Tabela 3 com os dados das barras e a Tabela 4 com os dados das linhas.

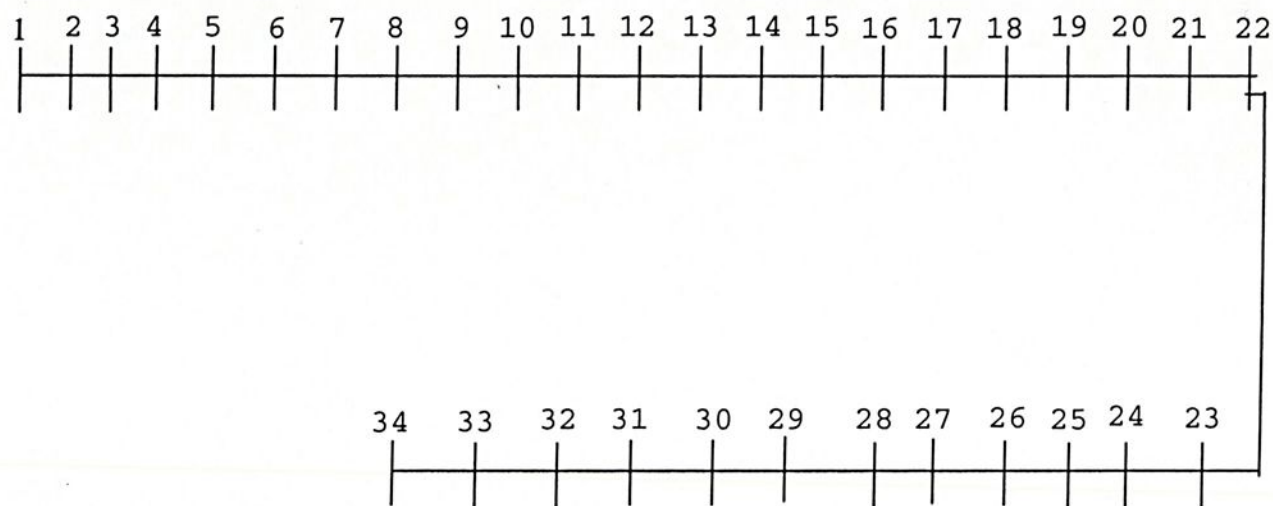


Fig. A.2.: Diagrama Unifilar do Sistema de Distribuição de 34 barras

Tabela A3: Dados da referência [16].

Dados das Barras		
Nº. das Barras	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
1	0,00	0,00
2	230,00	142,50
3	0,00	0,00
4	230,00	142,50
5	230,00	142,50
6	0,00	0,00
7	0,00	0,00
8	230,00	142,50
9	230,00	142,50
10	0,00	0,00
11	230,00	142,50

Nº. das Barras	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
12	137,00	84,00
13	72,00	45,00
14	72,00	45,00
15	72,00	45,00
16	13,50	7,50
17	230,00	142,50
18	230,00	142,50
19	230,00	142,50
20	230,00	142,50
21	230,00	142,50
22	230,00	142,50
23	230,00	142,50
24	230,00	142,50
25	230,00	142,50
26	230,00	142,50
27	137,00	85,00
28	75,00	48,00
29	75,00	48,00
30	75,00	48,00
31	57,00	34,50
32	57,00	34,50
33	57,00	34,50
34	57,00	34,50

Tabela A4: Dados da referência [16].

Dados das Linhas

Barra Inicial	Barra Final	Resistência da Seção em (ohms)	Reactância da Seção em (ohms)
1	2	0,195	0,080
2	3	0,195	0,080
3	4	0,299	0,083
4	5	0,299	0,083
5	6	0,299	0,083
6	7	0,524	0,090
7	8	0,524	0,090
8	9	0,524	0,090
9	10	0,524	0,090
10	11	0,524	0,090
11	12	0,524	0,090
12	13	0,524	0,090
13	14	0,524	0,090
14	15	0,524	0,090



Barra Inicial	Barra Final	Resistência da Seção em (ohms)	Reactância da Seção em (ohms)
15	16	0,524	0,090
16	17	0,299	0,083
17	18	0,299	0,083
18	19	0,378	0,086
19	20	0,378	0,086
20	21	0,378	0,086
21	22	0,524	0,090
22	23	0,524	0,090
23	24	0,524	0,090
24	25	0,524	0,090
25	26	0,524	0,090
26	27	0,524	0,090
27	28	0,524	0,090
28	29	0,524	0,090
29	30	0,524	0,090
30	31	0,524	0,090
31	32	0,524	0,090
32	33	0,524	0,090
33	34	0,524	0,090



A.3. Dados Completos do Sistema de 70 Barras [7]

O sistema hipotético de 70 barras apresenta uma tensão base de 12,66 KV, potência base de 100 MVA. Seus dados foram obtidos da referência [7]. Abaixo está a Tabela 5 com os dados das barras e a Tabela 6 com os dados das linhas.

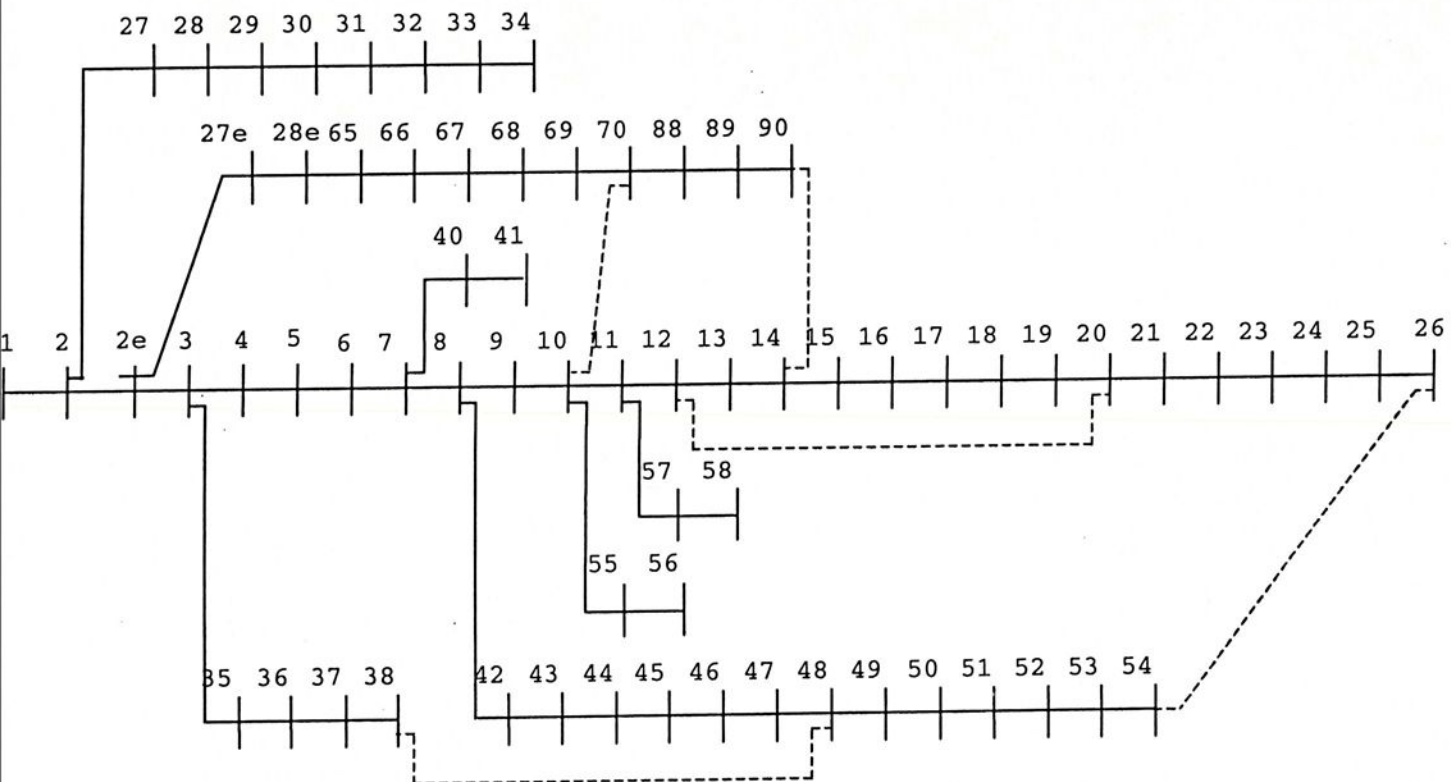


Fig. A.3.: Diagrama Unifilar do Sistema de Distribuição de 70 barras

Tabela A5: Dados da referência [7].

Dados das Barras

Nº. das Barras	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,00	0,00
4	0,00	0,00
5	0,00	0,00
6	0,00	0,00
7	2,60	2,20
8	40,40	30,00
9	75,00	54,00
10	30,00	22,00
11	28,00	19,00
12	145,00	104,00
13	145,00	104,00
14	8,00	5,50
15	8,00	5,50
16	0,00	0,00
17	45,50	30,00
18	60,00	35,00
19	60,00	35,00
20	0,00	0,00
21	1,00	0,60
22	114,00	81,00
23	5,30	3,50
24	0,00	0,00
25	28,00	20,00
26	0,00	0,00
27	14,00	10,00
28	14,00	10,00
29	26,00	18,60
30	26,00	18,60
31	0,00	0,00
32	0,00	0,00
33	0,00	0,00
34	14,00	10,00
35	19,50	14,00
36	6,00	4,00
37	26,00	18,55
38	26,00	18,55
39	0,00	0,00
40	24,00	17,00

Nº. das Barras	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
41	24,00	17,00
42	1,20	1,00
43	0,00	0,00
44	6,00	4,30
45	0,00	0,00
46	39,22	26,30
47	39,22	26,30
48	0,00	0,00
49	79,00	56,40
50	384,70	274,50
51	384,70	274,50
52	40,50	28,30
53	3,60	2,70
54	4,35	3,50
55	26,40	19,00
56	24,00	17,20
57	0,00	0,00
58	0,00	0,00
59	0,00	0,00
60	100,00	72,00
61	0,00	0,00
62	1244,00	888,00
63	32,00	23,00
64	0,00	0,00
65	227,00	162,00
66	59,00	42,00
67	18,00	13,00
68	18,00	13,00
69	28,00	20,00
70	28,00	20,00



Tabela A6: Dados da referência [7].

Dados das Linhas

Barra Inicial	Barra Final	Resistência da Seção em (ohms)	Reactância da Seção em (ohms)
1	2	0,0005	0,0012
2	3	0,0005	0,0012
3	4	0,0001	0,0001
4	5	0,0015	0,0036
5	6	0,0251	0,0294
6	7	0,3660	0,1864
7	8	0,3811	0,1941
8	9	0,0922	0,0470
9	10	0,0493	0,0251
10	11	0,8190	0,2707
11	12	0,1872	0,0619
12	13	0,7114	0,2351
13	14	1,0300	0,3400
14	15	1,0440	0,3450
15	16	1,0580	0,3496
16	17	0,1966	0,0650
17	18	0,3744	0,1238
18	19	0,0047	0,0016
19	20	0,3276	0,1083
20	21	0,2106	0,0696
21	22	0,3416	0,1129
22	23	0,0140	0,0046
23	24	0,1591	0,0526
24	25	0,3463	0,1145
25	26	0,7488	0,2475
26	27	0,3089	0,1021
27	28	0,1732	0,0572
3	29	0,0044	0,0108
29	30	0,0640	0,1565
30	31	0,3978	0,1315
31	32	0,0702	0,0232
32	33	0,3510	0,1160
33	34	0,8390	0,2816
34	35	1,7080	0,5646
35	36	1,4740	0,4873
4	37	0,0044	0,0108
37	38	0,0640	0,1565
38	39	0,1053	0,1230



Barra Inicial	Barra Final	Resistência da Seção em (ohms)	Reactância da Seção em (ohms)
39	40	0,0304	0,0305
40	41	0,0018	0,0021
41	42	0,7283	0,8509
42	43	0,3100	0,3623
43	44	0,0410	0,0478
44	45	0,0092	0,0116
45	46	0,1089	0,1373
46	47	0,0009	0,0012
5	48	0,0034	0,0084
48	49	0,0851	0,2083
49	50	0,2898	0,7091
50	51	0,0822	0,2011
9	52	0,0928	0,0473
52	53	0,3319	0,1114
10	54	0,1740	0,0886
54	55	0,2030	0,1034
55	56	0,2842	0,1447
56	57	0,2813	0,1433
57	58	1,5900	0,5337
58	59	0,7837	0,2630
59	60	0,3042	0,1006
60	61	0,3861	0,1172
61	62	0,5075	0,2585
62	63	0,0974	0,0496
63	64	0,1450	0,0738
64	65	0,7105	0,3619
65	66	1,0410	0,5302
12	67	0,2012	0,0611
67	68	0,0047	0,0014
13	69	0,7394	0,2444
69	70	0,0047	0,0016



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 7 com os dados das barras e a Tabela 8 com os dados das linhas.

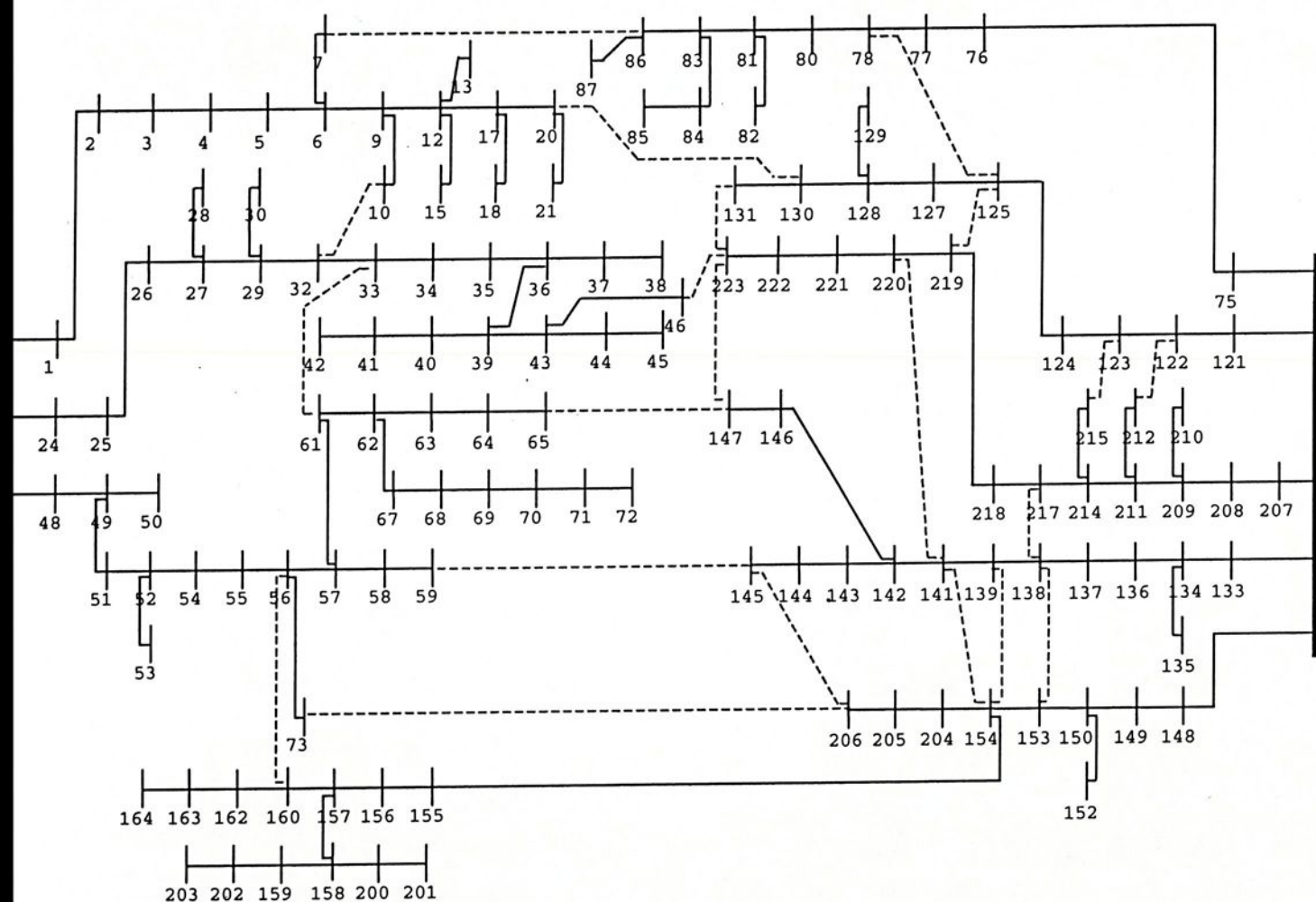


Fig. A.4: Diagrama Unifilar do Sistema de Distribuição de 135 Barras

Tabela A7: Dados do Sistema de 135 Barras.

Dados das Barras

Nº. das Barras	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
1	0,000	0,000
2	47,780	19,009
3	42,551	16,929
4	87,022	34,622
5	311,310	123,855
6	148,869	59,228
7	238,672	94,956
8	62,299	24,786
9	124,598	49,571
10	140,175	55,768
11	116,813	46,474
12	249,203	99,145
13	291,447	115,952
14	303,720	120,835
15	215,396	85,695
16	198,586	79,007
17	0,000	0,000
18	0,000	0,000
19	0,000	0,000
20	30,127	14,729
21	230,972	112,920
22	60,256	29,458
23	230,972	112,920
24	120,507	58,915
25	0,000	0,000
26	56,981	27,857
27	364,665	178,281
28	0,000	0,000
29	124,647	60,939
30	56,981	27,857
31	0,000	0,000
32	85,473	41,787
33	0,000	0,000
34	396,735	193,960
35	0,000	0,000
36	181,152	88,563
37	242,172	118,395
38	75,136	36,821
39	0,000	0,000
40	1,254	0,531



Nº. das Barras	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
41	6,274	2,660
42	0,000	0,000
43	117,880	49,971
44	62,668	26,566
45	172,285	73,034
46	458,556	194,388
47	262,962	111,473
48	235,761	99,942
49	0,000	0,000
50	109,215	46,298
51	0,000	0,000
52	72,809	30,865
53	258,473	109,570
54	69,169	29,322
55	21,843	9,260
56	0,000	0,000
57	20,527	8,702
58	150,548	63,819
59	220,687	93,552
60	92,384	39,163
61	0,000	0,000
62	226,693	96,098
63	0,000	0,000
64	294,016	116,974
65	83,015	33,028
66	83,015	33,028
67	103,770	41,285
68	176,408	70,184
69	83,015	33,028
70	217,917	86,698
71	23,294	9,267
72	5,075	2,019
73	72,638	28,899
74	405,990	161,523
75	0,000	0,000
76	100,182	42,468
77	142,523	60,417
78	96,042	40,713
79	300,454	127,366
80	141,238	59,873
81	279,847	118,631
82	87,312	37,013
83	243,849	103,371
84	247,750	105,025



Nº. das Barras	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
85	0,000	0,000
86	89,878	38,101
87	1137,280	482,108
88	458,339	194,296
89	385,197	163,290
90	0,000	0,000
91	79,608	33,747
92	87,312	37,013
93	0,000	0,000
94	74,001	31,370
95	232,050	98,369
96	141,819	60,119
97	0,000	0,000
98	76,449	32,408
99	0,000	0,000
100	51,322	21,756
101	59,874	25,381
102	9,065	3,843
103	2,092	0,887
104	16,735	7,094
105	1506,522	638,634
106	313,023	132,694
107	79,831	33,842
108	51,322	21,756
109	0,000	0,000
110	202,435	85,815
111	60,823	25,784
112	45,618	19,338
113	0,000	0,000
114	157,070	66,584
115	0,000	0,000
116	250,148	106,041
117	0,000	0,000
118	69,809	29,593
119	32,072	13,596
120	61,084	25,894
121	0,000	0,000
122	94,622	46,260
123	49,858	24,375
124	123,164	60,214
125	78,350	38,304
126	145,475	71,121
127	21,369	10,447
128	74,789	36,564



Nº. das Barras	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
129	227,926	111,431
130	35,614	17,411
131	249,295	121,877
132	316,722	154,842
133	333,817	163,199
134	249,295	121,877
135	0,000	0,000

Tabela A8: Dados do Sistema de 135 Barras.

Dados das Linhas

Barra Inicial	Barra Final	Resistência da Seção em (ohms)	Reactância da Seção em (ohms)
0	1	0,33205	0,76653
1	2	0,00188	0,00433
2	3	0,22324	0,51535
3	4	0,09943	0,22953
4	5	0,15571	0,35945
5	6	0,16321	0,37677
6	7	0,11444	0,26417
6	9	0,05675	0,05666
9	10	0,52124	0,27418
9	12	0,10877	0,10860
12	13	0,39803	0,20937
12	15	0,91744	0,31469
12	17	0,11823	0,11805
17	18	0,50228	0,26421
17	20	0,05675	0,05666
20	21	0,29379	0,15454
0	24	0,33205	0,76653
24	25	0,00188	0,00433
25	26	0,22324	0,51535
26	27	0,10881	0,25118
27	28	0,71078	0,37388
27	29	0,18197	0,42008
29	30	0,30326	0,15952
29	32	0,02439	0,05630
32	33	0,04502	0,10394
33	34	0,01876	0,04331
34	35	0,11823	0,11805
35	36	0,02365	0,02361
36	37	0,18954	0,09970



Barra Inicial	Barra Final	Resistência da Seção em (ohms)	Reactância da Seção em (ohms)
37	38	0,39803	0,20937
36	39	0,05675	0,05666
39	40	0,09477	0,4985
40	41	0,41699	0,21934
41	42	0,11372	0,05982
39	43	0,07566	0,07555
43	44	0,36960	0,19442
44	45	0,26536	0,13958
43	46	0,05675	0,05666
0	48	0,33205	0,76653
48	49	0,11819	0,27283
49	50	2,96288	1,01628
49	51	0,00188	0,00433
51	52	0,06941	0,16024
52	53	0,81502	0,42872
52	54	0,06378	0,14724
54	55	0,13132	0,30315
55	56	0,06191	0,14291
56	57	0,11444	0,26417
57	58	0,28374	0,28331
58	59	0,28374	0,28331
57	61	0,04502	0,10394
61	62	0,02626	0,06063
62	63	0,06003	0,13858
63	64	0,03002	0,06929
64	65	0,02064	0,04764
62	67	0,10881	0,25118
67	68	0,25588	0,13460
68	69	0,41699	0,21934
69	70	0,50228	0,26421
70	71	0,33170	0,17448
71	72	0,20849	0,10967
56	73	0,13882	0,32047
0	75	0,00750	0,01732
75	76	0,27014	0,62362
76	77	0,38270	0,88346
77	78	0,33018	0,76220
78	80	0,32830	0,75787
80	81	0,17072	0,39409
81	82	0,55914	0,29412
81	83	0,05816	0,13425
83	84	0,70130	0,36890
84	85	1,02352	0,53839



Barra Inicial	Barra Final	Resistência da Seção em (ohms)	Reactância da Seção em (ohms)
83	86	0,06754	0,15591
86	87	1,32352	0,45397
0	121	0,01126	0,02598
121	122	0,72976	1,68464
122	123	0,22512	0,51968
123	124	0,20824	0,48071
124	125	0,04690	0,10827
125	127	0,61950	0,61857
127	128	0,34049	0,33998
128	129	0,56862	0,29911
128	130	0,10877	0,10860
130	131	0,56862	0,29911
0	133	0,01126	0,02598
133	134	0,41835	0,96575
134	135	0,10499	0,13641
134	136	0,43898	1,01338
136	137	0,07520	0,02579
137	138	0,07692	0,17756
138	139	0,33205	0,76653
139	141	0,08442	0,19488
141	142	0,13320	0,30748
142	143	0,29320	0,29276
143	144	0,21753	0,21721
144	145	0,26482	0,26443
142	146	0,10318	0,23819
146	147	0,13507	0,31181
0	148	0,00938	0,02165
148	149	0,16884	0,38976
149	150	0,11819	0,27283
150	152	2,28608	0,78414
150	153	0,45587	1,05236
153	154	0,69600	1,60669
154	155	0,45774	1,05669
155	156	0,20298	0,26373
156	157	0,21348	0,27737
157	158	0,54967	0,28914
158	159	0,54019	0,28415
157	160	0,04550	0,05911
160	162	0,47385	0,24926
162	163	0,86241	0,45364
163	164	0,56862	0,29911
158	200	0,77711	0,40878
200	201	1,08038	0,56830



Barra Inicial	Barra Final	Resistência da Seção em (ohms)	Reactância da Seção em (ohms)
159	202	1,09933	0,57827
202	203	0,47385	0,24926
154	204	0,32267	0,74488
204	205	0,14633	0,33779
205	206	0,12382	0,28583
0	207	0,01126	0,02598
207	208	0,64910	1,49842
208	209	0,04502	0,10394
209	210	0,52640	0,18056
209	211	0,2064	0,04764
211	212	0,53071	0,27917
211	214	0,09755	0,22520
214	215	0,11819	0,27283
214	217	0,13882	0,32047
217	218	0,04315	0,09961
218	219	0,09192	0,21220
219	220	0,16134	0,37244
220	221	0,37832	0,37775
221	222	0,39724	0,39664
222	223	0,29320	0,29276



APÊNDICE B

Artigos Publicados

1 – R. Romero – W. Soares – R. A. Gallego:

“Algoritmo de Búsqueda Tabú Usado en la Localización de Bancos de Condensadores en Sistemas de Distribución Radial”, aceito para apresentação no XIII Congresso Chileno de Ingeniería Eléctrica, 8-12 de Novembro de 1999.



Algoritmo de Búsqueda Tabú Usado en la Localización de Bancos de Condensadores en Sistemas de Distribución Radial

R. Romero - W. Soares
FEIS-UNESP-Ilha Solteira - Brasil
15385.000 Ilha Solteira-SP
ruben@dee.feis.unesp.br

R.A. Gallego
UTP-Pereira-Colombia
Pereira-Risaralda
ralfonso@utp.edu.co

Resumen:

Es presentado un algoritmo de Búsqueda Tabú (Tabu Search) para resolver el problema de localización de bancos de condensadores en sistemas de distribución radial. El modelo matemático es un problema de programación no lineal entero mixto (PNLEM) de difícil solución usando técnicas clásicas de optimización. El algoritmo encuentra los puntos de localización para la instalación de los condensadores, los tipos y tamaños de esos condensadores y el esquema de control de los bancos de condensadores para diferentes niveles de carga. El algoritmo es usado para analizar varios sistemas disponibles en la literatura especializada. Los resultados encontrados permiten identificar soluciones de excelente calidad.

Keywords: Localización de condensadores, búsqueda tabú, algoritmos combinatoriales.

1. INTRODUCCION

En los sistemas de distribución radial deben ser instalados bancos de condensadores para compensar la potencia reactiva de las cargas con la finalidad de reducir la potencia entregada al sistema, las pérdidas de energía, mejorar el perfil de tensión y aliviar la capacidad del sistema. Todos los aspectos mencionados están relacionados con la reducción de las pérdidas del sistema. Así, aparece el problema de instalar bancos de condensadores en el sistema de distribución con la finalidad de alcanzar los objetivos antes mencionados. Este problema es llamado problema de localización óptima de bancos de condensadores en sistemas de distribución radial. Por lo tanto, este problema consiste en determinar la **localización** donde deben ser instalados los bancos de condensadores, los **tipos** y **tamaños** de esos bancos y el **esquema de control** para el caso de bancos de condensadores variables para diferentes niveles de carga de tal manera que sea minimizada una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones de operación, típicamente restricciones de módulo de las tensiones de barra.

Este problema es interesante porque su modelo matemático es un problema PNLEM con función objetivo no diferenciable, debido a que los costos de los bancos de condensadores varía en forma discreta, y por eso el problema es muy complicado de resolver usando técnicas de optimización clásica.

Es conocido que la carga de un sistema varía continuamente durante un día. Sin embargo, para poder resolver este problema con las técnicas de optimización disponibles, los especialistas discretizan esta variación de la carga en un número determinado de niveles de carga. Por lo tanto, para cada nivel de carga se debe determinar el esquema de control de los bancos de condensadores variables. Así, el tamaño y el punto de operación de los bancos de condensadores son variables discretas. Problemas de este tipo son analizados adecuadamente usando algoritmos combinatoriales tales como "simulated annealing" (SA), algoritmos genéticos (GA) y "tabu search" (TS) como los presentados en [1, 2, 3, 4].

El problema de localización óptima de bancos de condensadores es estudiado desde la década del 60. Inicialmente fueron formulados modelos matemáticos relajados y técnicas heurísticas de solución. En la década del 80 fueron formulados los modelos matemáticos actualmente usados donde Grainger [11] y Baran-Wu [10] formularon el problema en la forma de un PNLEM. Sin embargo, para resolver ese modelo, Baran-Wu [10] aproximó la función objetivo no diferenciable por una función lineal y así fue posible resolver el problema usando descomposición de Benders con variables continuas.

En la década del 90 aparecen los algoritmos combinatoriales para resolver el problema de localización óptima de bancos de condensadores en sistemas radiales y fueron presentados algoritmos de simulated annealing [1, 2], genético [3] y tabu search [4]. En este trabajo es presentado un algoritmo de búsqueda tabú mas con estrategias y funciones diferentes al algoritmo presentado en [4]. Los resultados encontrados son comparados con los encontrados en [3, 4]. El algoritmo propuesto presenta un excelente desempeño, encontrando configuraciones de excelente calidad. También es necesario mencionar que los algoritmos de localización de bancos de condensadores resuelven muchos problemas de flujo de carga radial como parte de la estrategia de solución. Así, varios autores presentan algoritmos especializados y rápidos para resolver problemas de flujo de carga radial siendo el más popular el algoritmo presentado en [8].

2. FORMULACION DEL PROBLEMA

El problema de localización óptima de bancos de condensadores debe encontrar la localización, tipos, número y tamaño de los bancos que deben ser instalados en el sistema



de distribución radial y, además, el esquema de control de los bancos de condensadores para los diferentes niveles de carga. El objetivo es minimizar los costos relacionados con las pérdidas de energía y de inversión con la instalación de los bancos de condensadores para un horizonte de operación de T años garantizando adecuadas condiciones de operación que en este caso se restringe a mantener los módulos de tensión de barras dentro de límites especificados para todos los niveles de carga. El modelo matemático asume la siguiente forma [10]:

$$\min v = k_e \sum_{i=0}^{nt} T_i p_i(x^i) + \sum_{k=1}^{nc} f(u_k^o) \quad (1)$$

s.a.

$$\begin{aligned} G^i(x^i, u^i) &= 0; \quad i = 0, 1, \dots, nt \\ H^i(x^i) &\leq 0; \quad i = 0, 1, \dots, nt \\ 0 \leq u_k^i &\leq u_k^o; \quad k \in C_1 \\ 0 \leq u_k^i &= u_k^o; \quad k \in C_2 \end{aligned}$$

El sistema (1) es un PNLEM con una función objetivo no diferenciable donde nt representa el número de niveles de carga en que fue discretizada la curva de duración de carga. También se asume que la carga varía en forma uniforme. Así, una carga Q_L puede ser representada de la siguiente forma:

$$Q_L(\tau) = Q_L^o(\tau) s(\tau) \quad (2)$$

donde Q_L^o representa el valor pico de la carga, nc representa el número de barras candidatas a localización de bancos de condensadores, $G^i(x^i, u^i) = 0$ representa las ecuaciones de flujo de carga para el nivel de carga i donde los x^i son las variables de estado y los u^i variables de control, o sea, la potencia reactiva de los bancos de condensadores; $H^i(x^i) \leq 0$ representa restricciones de operación para el nivel de carga i que en este caso son simplemente límites de operación de los módulos de tensión de las barras; u_k^o representa el tamaño de los bancos de condensadores que deben ser instalados en la barra k ; u_k^i representa el punto de operación del banco de condensadores instalado en la barra k y operando en el nivel de carga i .

En (1) también aparece una función objetivo con dos partes. La primera representa los costos debido a pérdidas de energía donde T_i representa la fracción del período T en que el sistema opera en el nivel de carga i y con pérdidas $p_i(x^i)$ y k_e es un parámetro que representa costos de energía (\$ US/KWh). La segunda parte son los costos debido a la instalación de los bancos de condensadores siendo $f(u_k^o)$ una función discreta no diferenciable.

El sistema (1) es difícil de resolver porque la función objetivo es no diferenciable, presenta restricciones no lineales, existen variables discretas y continuas y, adicionalmente, presenta el fenómeno de la explosión combinatorial. También, se acostumbra resolver este tipo de problema para dos tipos de bancos de condensadores: (1) usando bancos fijos y, (2) usando bancos de condensadores variables que representa un problema mucho más difícil de resolver. Para el

primer caso, los condensadores son tratados como fuentes de potencia reactiva constante y se usa la siguiente relación:

$$u^o = u^1 = \dots = u^{nt} \quad (3)$$

Para el caso de condensadores variables (switched) se supone que pueden ser modificados los taps de los condensadores para operar de manera diferente para cada nivel de carga, por lo tanto, para cada condensador k existen $nt + 1$ formas de operación, u_k^i ; $i = 0, 1, \dots, nt$ que deben ser determinados, una para cada nivel de carga. Los tamaños de los condensadores (capacidad instalada) que deben ser encontrados u^o y las capacidades de operación (punto de operación del condensador variable) para cada nivel de carga deben cumplir con la siguiente restricción:

$$0 \leq u_k^i \leq u_k^o \quad (4)$$

El sistema (1) puede resolverse adecuadamente usando los algoritmos combinatoriales (SA, GA, TS). En estos casos, un problema como (1) debe ser caracterizada a través de una configuración o propuesta de solución. Así, por ejemplo, una configuración para el problema (1) con condensadores fijos puede ser un vector de tamaño nc , $\Omega = \{u_1, u_2, \dots, u_{nc}\}$, donde u_i representa la capacidad de generación reactiva del condensador localizado en la barra i permaneciendo fijo para todos los niveles de carga. Para el problema (1) con localización de condensadores variables, una configuración sería representado por $\bar{\Omega} = \{u_1, u_2, \dots, u_{nc}\}$ donde $u_i = \{u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^{nt}\}$ es un vector de dimensión nt y u_i^j determina el punto de operación del condensador localizado en la barra i operando con el nivel de carga j . De esta manera, una configuración y el espacio de configuraciones del problema está adecuadamente caracterizada. Por lo tanto, una vez escogida (o encontrada) una configuración, se puede encontrar fácilmente las otras variables del problema (1) a través de los siguientes pasos: 1) se debe resolver $nt + 1$ problemas de flujo de carga radial, verificar si existe violación de límites de tensión en algún de los $nt + 1$ problemas de flujo de carga y encontrar las pérdidas para cada problema de flujo de carga, 2) si en el paso anterior no existe violación de límites de tensión en ningún de los $nt + 1$ problemas de flujo de carga entonces la configuración analizada es factible, y 3) si la configuración es factible, se puede encontrar el valor de la función objetivo en forma trivial.

Los algoritmos combinatoriales encuentran una configuración inicial (o un conjunto de configuraciones iniciales) factible(s) (y/o infactible(s)) con la lógica de cada algoritmo hasta que se cumple un criterio de parada para el algoritmo. Por lo tanto, el mayor esfuerzo computacional en este tipo de algoritmos, para el caso del problema de localización de condensadores, es dedicado a la solución de problemas de flujo de carga radial.

3. FUNDAMENTOS DE BUSQUEDA TABU

La metodología búsqueda tabú (TS) está adecuadamente presentada en [5]. Presentamos un resumen de las principales características de TS en forma resumida. TS fue



proyectado para encontrar configuraciones óptimas o casi-óptimas de problemas complejos (problemas no convexos, no diferenciables, con variables mixtas, etc.) y con características combinatoriales (problemas cuyo espacio de soluciones crece de manera exponencial con el tamaño del problema) como es el caso del problema de localización de condensadores. En general, TS, resuelve problemas de la forma: $\min f(x)$ s.a. $x \in X$.

TS realiza una transición de manera similar a una heurística de búsqueda local. Así, dada una configuración x , se define una vecindad de x como siendo las configuraciones $x' \in N(x)$ que pueden ser encontrados a partir de x a través de un mecanismo de transición. TS es diferente de una heurística de búsqueda local en dos aspectos fundamentales: (1) a partir de la configuración actual se pasa al mejor vecino o al menos peor lo que significa que es permitida una degradación de la función objetivo, y (2) el conjunto de vecinos de x no es identificada de manera estática y, por lo tanto, después de cada transición, se debe definir una nueva vecindad que varía dinámicamente en estructura y tamaño durante todo el proceso de optimización. Esta estrategia permite a TS realizar una búsqueda eficiente e inteligente. Para facilitar el resumen, la metodología TS es separada en 3 partes: (1) algoritmo TS con memoria de corto plazo, (2) funciones avanzadas de TS, y (3) estrategia de reducción de vecinos candidatos.

3.1 TS con Memoria de Corto Plazo:

El algoritmo TS más elemental es el llamado algoritmo TS con memoria de corto plazo. En este caso, el proceso es iniciado de una configuración inicial (que puede ser encontrada aleatoriamente) y se realiza un número determinado de transiciones hasta satisfacer un criterio de parada. En cada paso, este algoritmo TS analiza un conjunto de vecinos (todos los vecinos o un conjunto reducido) y se pasa para el mejor vecino, desde que no se encuentre prohibida, que se transforma en la nueva configuración actual. El carácter agresivo de la estrategia TS de pasar siempre para la mejor configuración vecina (o la menos peor) permite a TS salir de configuraciones óptimas locales mas también exige mantener una lista tabú que evita retornar a configuraciones ya visitadas. La lista tabú generalmente almacena atributos de las configuraciones visitadas.

Una lista tabú que almacena atributos prohibidos reduce bastante las necesidades de memoria mas incorpora un problema: el atributo prohibido, que corresponde a una configuración ya visitada, es compartido por otras configuraciones de la región de búsqueda, algunas de las cuales pueden ser muy atractivas mas que no pueden ser visitadas porque tienen un atributo prohibido. Este problema es contornado usando una función de TS llamado **criterio de aspiración**. Así, se puede eliminar la prohibición de una configuración candidata si su función objetivo satisface un criterio de aspiración especificado, por ejemplo, si la función objetivo de la configuración prohibida es la mejor de las últimas k_p transiciones visitadas o si es mejor de todas las configuraciones visitadas (incumbente). En este último caso el criterio es muy exigente y raramente será usada por el proceso de optimización.

Una estrategia TS que realiza un conjunto de transiciones usando una lista tabú de atributos prohibidos para evitar visitar configuraciones ya visitadas y usa un criterio de aspiración para eliminar la prohibición de configuraciones vecinas atractivas es conocido como algoritmo TS con memoria de corto plazo y constituye el algoritmo TS más elemental. Algoritmos TS más sofisticados deben incorporar estrategias adicionales como son las funciones avanzadas de TS.

3.2 Funciones Avanzadas de TS:

Otras funciones avanzadas de TS usados en el algoritmo propuesto son los siguientes: intensificación, diversificación, path relinking y uso de configuraciones de élite.

Intensificación (I) es una función avanzada de TS, o sea puede ser incorporado al algoritmo TS con memoria de corto plazo mencionado anteriormente. En otras palabras, una vez usado un algoritmo TS básico, en lugar de parar el proceso se puede usar intensificación para encontrar mejores soluciones.

Existen varias formas de implementar intensificación. Así, por ejemplo, se puede realizar intensificación a partir de configuraciones de élite almacenadas durante el proceso TS básico permitiendo la posibilidad de encontrar mejores configuraciones. También se puede implementar intensificación modificando en proceso TS básico, de tiempo en tiempo, la estructura de vecindad y los parámetros de control del proceso restringiendo la búsqueda en torno de una configuración de alta calidad.

Diversificación (D) también puede ser incorporado al algoritmo TS básico. En este caso se intenta llevar el proceso de búsqueda a regiones distantes del analizado por el algoritmo TS básico. También puede ser implementado de varias formas y dos de ellas son las siguientes: 1) usando memoria de largo plazo basado en frecuencia donde los atributos poco usados son incentivados durante un intervalo del proceso encontrando configuraciones con la presencia de esos atributos, y 2) usando path relinking donde se encuentran nuevas configuraciones de partida intercambiando una parte de los atributos de configuraciones de élite.

Path relinking (PR) es una función de TS inventada recientemente y es usada para encontrar configuraciones potencialmente atractivas para iniciar un proceso de intensificación o de diversificación. Durante el proceso TS son almacenadas las mejores configuraciones, llamadas de configuraciones de élite. Dos o más de estas configuraciones pueden ser usadas para encontrar una nueva configuración atractiva copiando una parte de los atributos existentes en una configuración en la otra. Esta nueva configuración puede ser usada para intensificación o diversificación dependiendo de la cantidad de atributos copiados y de la estrategia adoptada.

Configuraciones de Elite (CE) en TS es un conjunto reducido de configuraciones de excelente calidad que fueron encontrados durante el proceso TS y ellas pueden ser usadas en varias formas tales como reiniciar el proceso de intensificación o en path relinking para generar nuevas configuraciones de calidad para iniciar la intensificación o la

diversificación como fue mencionado anteriormente. También, al final del proceso, esta estrategia nos permite tener disponible un conjunto de soluciones de alta calidad además de la mejor solución encontrada. Una configuración es considerada de élite y almacenada durante el proceso TS si cumple las siguientes condiciones: 1) si su función objetivo es mejor de alguna de las configuraciones de élite ya almacenadas y, 2) si tiene por lo menos un número mínimo de atributos diferentes de cada una de las configuraciones de élite ya almacenadas.

El uso de las funciones TS mencionadas anteriormente, en forma integrada y trabajando cooperativamente, constituye un algoritmo TS para un problema específico. Existen otras funciones TS que no son comentadas porque no fueron usados en el algoritmo. Sin embargo, existe una estrategia TS cuya implementación eficiente generalmente depende del tipo específico de problema que se desea resolver, o sea, la estrategia de reducción de configuraciones vecinas candidatas.

3.3 Estrategia de Reducción de Vecinos:

En TS, la configuración actual tiene un conjunto de vecinos definido por la estructura de vecindad y el algoritmo TS debe pasar al mejor vecino no prohibido. Este punto es uno de los más críticos en TS porque puede comprometer la eficiencia computacional. Con la definición tradicional de vecindad ese número de vecinos generalmente es muy alto y TS debe analizar todos ellos. La teoría de TS menciona varios métodos para reducir el número de vecinos mas ellos no son analizados porque todavía son poco eficientes y no son usados en este trabajo. En este trabajo es encontrado un número de vecinos pequeño y de grande calidad usando los indicadores de sensibilidad de algoritmos heurísticos usados para el problema de localización de condensadores. Esta estrategia es analizada en la próxima sección.

4. ASPECTOS PRACTICOS DEL ALGORITMO

A continuación son analizados 3 estrategias prácticas implementadas en el algoritmos TS: el uso de indicadores de sensibilidad y los procesos de solución del problema en 2 fases.

4.1 Uso de Indicadores de Sensibilidad

Los indicadores de sensibilidad, o sea, la variación de las pérdidas activas del sistema con la variación de la potencia reactiva en una barra, $\frac{\partial P_L}{\partial Q_i}$, es bastante usado en problemas de distribución y con varias finalidades. Existen varias formas para encontrar esos indicadores y en el problema de localización de condensadores ellos son generalmente usados para reducir el número de barras candidatas a localización de condensadores, o sea, para reducir el número de variables del problema. Por ejemplo, en [3] y [4] son usados esos indicadores para reducir el número de barras candidatas y los indicadores de sensibilidad son encontrados usando como base la configuración inicial, sin ninguna adición de condensadores, y el nivel de carga más elevado. Esta propuesta tiene la ventaja de reducir el número de variables del problema mas existe grande riesgo de eliminar barras que pueden

formar parte de la configuración óptima porque esos indicadores fueron calculados en un único paso y usando un único nivel de carga.

En este trabajo los indicadores de sensibilidad son usados de manera diferente, controlando el proceso de localización de condensadores en un proceso heurístico de fase I, que consiste en encontrar un conjunto de configuraciones factibles, de buena calidad y significativamente diferentes entre ellas para después, en la fase II, implementar un algoritmo TS que usa ese conjunto reducido de configuraciones almacenadas en la fase I. Los indicadores de sensibilidad también son usados en la fase II para identificar el conjunto reducido de configuraciones vecinas, de alta calidad, de la configuración actual. Además de los indicadores de sensibilidad usados en [3, 4] pueden ser usados otros tales como el siguiente:

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q_i} = 2\alpha_{ii}Q_i + 2 \sum_{j \neq i}^n (\alpha_{ij}Q_j - \beta_{ij}P_j) \quad (5)$$

donde

$$\alpha_{ij} = r_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) / V_i V_j \quad \beta_{ij} = r_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) / V_i V_j$$

En este trabajo las transiciones entre configuraciones son realizados solamente entre configuraciones factibles, eliminando las infactibles. Esta estrategia se debe a que raramente aparecen configuraciones infactibles en el problema de localización de condensadores de sistemas reales.

4.2 Fase I: Estrategia Heurística

Esta fase consiste de un algoritmo heurístico constructivo usado repetidamente para encontrar un conjunto de soluciones factibles, de calidad y diferentes entre ellas. El proceso es equivalente para el caso de condensadores fijos y variables. Estas configuraciones son usadas por el algoritmo TS en la fase II.

Usando indicadores de sensibilidad se puede generar un conjunto de n_p configuraciones iniciales repitiendo n_p veces el algoritmo heurístico constructivo. En cada paso del algoritmo se adiciona un banco de condensadores en aquella barra más atractiva identificado por los indicadores de sensibilidad. Este proceso es repetido mientras sea posible mejorar la función objetivo y lógicamente el proceso debe parar identificando un óptimo local. Para encontrar otras configuraciones simplemente se repite el algoritmo heurístico constructivo mas prohibiendo en cada caso la utilización de una barra ya usada en las búsquedas anteriores. Adicionalmente se puede encontrar otras configuraciones usando path relinking entre las configuraciones ya encontradas.

Cuando la fase I termina existe disponible un conjunto de configuraciones atractivas y, con esa información, se encuentra el conjunto reducido de barras candidatas a localización de condensadores. Así, son barras candidatas a localización de condensadores todas as barras que fueron usadas en la fase I y que aparecen en alguna de las configuraciones encontradas. Esta propuesta es muy diferente a los usados en [3, 4], donde se usa simplemente la configuración base, porque las barras son identificadas dentro de un proceso

dinámico de generación de configuraciones.

4.3 Fase II: Estrategia de Búsqueda Tabú - TS

En la fase II se implementa una estrategia TS usando el conjunto de configuraciones encontrado en la fase I. Para cada configuración se realiza un proceso TS con memoria de corto plazo y un criterio de aspiración (que llamamos de TS básico). Una vez analizado todas las configuraciones se puede repetir el ciclo de búsqueda generando un nuevo conjunto de configuraciones usando path relinking para usar diversificación.

Cada proceso TS básico debe realizar un número especificado de transiciones a través de configuraciones factibles y en cada transición se debe analizar un conjunto reducido de configuraciones vecinas y, para cada vecino, se debe encontrar un punto de operación de los condensadores variables para cada nivel de carga. A continuación es mostrado el algoritmo.

5. ALGORITMO IMPLEMENTADO

Fase I: Estrategia Heurística:

1. Realizar una búsqueda heurística usando indicadores de sensibilidad y el nivel de carga más elevado. En cada paso se debe adicionar un banco de condensadores y el proceso termina cuando no es posible mejorar la función objetivo. Suponer que en la configuración encontrada fueron instalados bancos en k_n barras.
2. Repetir el paso anterior realizando k_n búsquedas heurísticas y prohibiendo en cada proceso el uso de una de las barras usadas en el paso (1).
3. Si se quiere tener n_p configuraciones y $k_n + 1 \leq n_p$, encontrar las configuraciones restantes usando path relinking entre las configuraciones ya encontradas.
4. Almacenar las $n_e \leq n_p$ configuraciones de élite.

Fase II: Estrategia de Búsqueda Tabú - TS:

1. Para cada configuración implementar un TS básico (TS con memoria de corto plazo y con criterio de aspiración) que es presentado separado. Actualizar la lista de configuraciones de élite usando las mejores configuraciones almacenadas en cada proceso TS básico.
2. Si el criterio de parada fue cumplido, o sea, si fue ultrapasado un número especificado de flujos de carga o no fue encontrada una configuración de mejor calidad (incumbente) durante un número especificado de procesos TS básico entonces parar el proceso. En caso contrario ir al paso (3).
3. Encontrar el nuevo conjunto de configuraciones n_p usando path relinking con fines de diversificación y verificando la factibilidad de las configuraciones encontradas. Volver al paso (1).

Proceso TS Básico:

Para cada una de las n_p configuraciones realizar:

1. Procesar un flujo de carga para el nivel de carga más elevado y usar los indicadores de sensibilidad para encontrar las mejores propuestas para adicionar o retirar bancos de condensadores.
2. Montar la lista de vecinos usando las propuestas de adición o retirada del paso (1) y de intercambios (adición y retirada) de esas propuestas hasta encontrar un conjunto de n_v vecinos candidatos.
3. Para cada vecino candidato hacer lo siguiente:
Para el problema de localización de condensadores fijar resolver un problema de flujo de carga para cada nivel de carga inferior. Si algún de estos problemas produce violación de los límites de operación entonces eliminar la configuración candidata; en caso contrario calcular la función objetivo integral correspondiente a esa configuración vecina.
Para el problema de condensadores variables se debe resolver un sizing problem, o sea, determinar las posiciones óptimas de los taps de los condensadores para los otros niveles de carga. Es posible resolver este problema en forma óptima como en [8] o usando enumeración explícita mas se propone usar una estrategia heurística mostrado después.
4. Escoger el mejor vecino factible no prohibido o que cumpla con el criterio de aspiración para ser la nueva configuración actual y almacenar los atributos prohibidos.
5. Si un número máximo de flujos de carga fue superado o si la mejor solución encontrada en este proceso TS básico no fue mejorado durante n_t transiciones entonces parar esta parte del proceso, actualizar las informaciones secundarias y retornar al paso (1).

Sizing Problem Heurístico:

Definida una configuración para el nivel de carga más elevado se debe encontrar la configuración (taps de los condensadores variables) para los otros niveles de carga. Esta parte es implementada usando una estrategia heurística que consiste en realizar n_t intentos de mejorar la topología actual para cada nivel de carga. Básicamente es un proceso que consiste en adicionar, intercambiar y retirar condensadores a partir de la topología actual llevando en cuenta el tipo de perturbación realizado en el nivel de carga elevado y los límites permitidos en ese nivel de carga.

6. PRUEBAS EXPERIMENTALES

6.1 Sistema de 9 Barras:

Los datos de este sistema están en [11] y fue usado en [3] para el problema de localización de condensadores. Para poder comparar, usamos los mismos criterios usados en [3] donde la función objetivo tiene la siguiente forma: $v = \min K_e \sum_{i=0}^2 T_i P_i + K_p P_o + K_c \sum_{j=1}^{n_c} C_j$ para 3 niveles de carga y el nivel de carga elevado aparece dos veces. Los parámetros usados son $K_e = 0.06 \$/kWh$, $K_p = 168 \$/kW/año$, $K_c = 4.9 \$/kVar$, $S_o = 1.1$, $S_1 = 0.6$, $S_2 = 0.3$,



$T_o = 1000, T_1 = 6760, T_2 = 1000$ y $\sum C_j$ es la capacidad total instalada (kVar) en el sistema donde se usa bancos de 300 kVar. Fueron realizadas pruebas para el caso de localización de condensadores fijos y variables y en cada barra puede ser colocada hasta 5 bancos de 300 kVar. Los cálculos son realizados para un horizonte de operación de un año. Para la operación sin compensación la función objetivo presenta un costo de \$ $v = 329039$ por pérdidas de energía.

Para el caso de localización de condensadores fijos (este caso no fue realizado en [3]) el algoritmo encuentra la solución mostrada en la Tabla 1 con \$ $v^* = 308909$. Es importante observar que una característica importante del algoritmo es la de encontrar un conjunto de excelentes configuraciones además de la mejor encontrada. Así, como ilustración, en la Tabla 2 se muestra 8 configuraciones con Δv menores a \$ 238 dólares (menos de 0.1% de v^*).

Tabla 1: Localización de condensadores fijos.

Barra	Condensador (kVar)
1	300
4	300
5	600
6	1200

Tabla 2: Configuraciones sub-óptimas.

No.	Número de bancos					v
	n_1	n_3	n_4	n_5	n_6	
1	1	0	1	2	4	308909
2	1	1	0	2	4	308965
3	1	0	2	1	4	309036
4	1	0	0	3	4	309042
5	1	0	1	2	3	309080
6	1	1	1	1	4	309092
7	1	1	0	2	3	309135
8	1	0	1	2	5	309147

Para el caso de condensadores variables, la mejor solución encontrada con \$ $v^* = 307586$ es mostrada en la Tabla 3 donde son localizados 9 bancos de condensadores. También se debe observar que las barras 5 y 6 son las que quedan con el mayor soporte de reactivos y, curiosamente, esas barras fueron eliminadas de la lista de candidatos en [3] cuando es usado indicadores de sensibilidad para reducir en número de barras candidatas.

6.2 Sistema de 69 Barras

Los datos de este sistema está en [9] y fueron usados en [2] y [4] y realizamos pruebas usando los mismos criterios usados en [4].

En [4] fue analizado el sistema de 69 barras mas, en este caso, la parte de la función objetivo correspondiente a pérdidas de energía tiene la forma: $\sum_{j=0}^2 K_{ej}T_jp_j(.)$.

Barra	Condensador (kVar)		
	Nivel de carga		
	S_o	S_1	S_2
	1.1	0.6	0.3
1	300	0	0
2	300	300	0
4	300	0	300
5	600	600	0
6	1200	1200	900

Tabla 3: Localización de condensadores variables.

Barra	Condensador (kVar)		
	Nivel de carga		
	S_o	S_1	S_2
	1.8	1.0	0.5
17	300	300	300
50	1800	1200	600

Tabela 3: Localización de condensadores variables.

Los otros datos son: $K_{eo} = 2.95NT\$/kW/h$, $K_{e1} = 1.78NT\$/kW/h$, $K_{e2} = 0.7NT\$/kW/h$, $S_o = 1.0$, $S_1 = 0.8$, $S_2 = 0.5$, $T_o = 1000$, $T_1 = 6760$, $T_2 = 1000$ y un horizonte de 10 años con crecimiento anual uniforme de la carga de 9.55% hasta llegar al límite de 5000 KW en el cuarto año y después permanece constante. El costo de un banco de condensadores de 300 kVar es de NT\$ 56300 para los fijos y de NT\$ 74900 para los variables, y no se puede colocar más de 4 bancos por barra. Para operación sin compensación la función objetivo es igual a NT\$ $v = 38948030$.

Para el caso de localización de condensadores fijos fue encontrada la solución mostrada en la tabla 6 con NT\$ $v^* = 25616536$, instalando 8 bancos y produciendo un ahorro de NT\$ $\Delta v = 13331494$. En el caso de condensadores variables fue encontrada la solución mostrada en la tabla 7 con \$ NT $v^* = 25609480$, instalando 8 bancos y produciendo un ahorro de NT\$ $\Delta v = 13338550$.

Es interesante observar que, en [4], las barras 16 y 51 son eliminadas como barras candidatas a localización de condensadores por los indicadores de sensibilidad usados. Sin embargo, la mejor solución encontrada por el algoritmo TS coloca bancos en esas barras (ver tabla 7).

7. CONCLUSIONES

El algoritmo TS presentado encuentra soluciones de mejor calidad en todos los sistemas analizados cuando son comparados con los algoritmos mencionados anteriormente para las mismas condiciones de trabajo. Este hecho muestra que mismo en sistemas ya ampliamente analizados todavia no se han encontrado las soluciones óptimas. En realidad, se puede verificar que el problema de localización óptima de condensadores en sistema de distribución radial es bastante



Barra	Condensador (kVar)
7	300
10	300
16	300
38	300
50	900
53	300

Tabla 6: Localización de condensadores fijos.

Barra	Condensador (kVar)		
	Nivel de carga		
	S_0	S_1	S_2
	1.0	0.8	0.5
10	300	300	0
16	300	300	300
38	300	300	300
50	900	900	900
51	300	0	0
53	300	300	0

Tabla 7: Localización de condensadores variables.

complejo y que el uso de indicadores de sensibilidad para reducir el número de barras candidatas debe ser usada con mayores precauciones.

Referencias

- [1] H.D. Chiang, J.C. Wang, O. Cockings, H.D. Shin: "Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems Part I: A New Formulation and the Overall Problem", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No 2, pp 634-642, April 1990.
- [2] H.D. Chiang, J.C. Wang, O. Cockings, H.D. Shin: "Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems Part II: Solution Algorithms and Numerical Results", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No 2, pp 643-649, April 1990.
- [3] S. Sundhararajan, A. Pahwa: "Optimal Selection of Capacitors For Radial Distribution Systems Using a Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No 3, pp 1499-1505, August 1994.
- [4] Y.C. Huang, H.T. Yang, C.L. Huang: "Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No 4, pp 1868-1873, November 1996.
- [5] F. Glover, M. Laguna: "Tabu Search", Kluwer Academic Publishers, 1997.

- [6] C.R. Reeves: "Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems", McGraw-Hill Book Company, 1995.
- [7] R.A. Gallego, A. Monticelli, R. Romero: "Comparative Studies of Non-Convex Optimization Methods for Transmission Network Expansion Planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998.
- [8] 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, January 1989.
- [9] 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, April 1989.
- [10] M.E. Baran, F.F. Wu: "Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No 1, pp 725-733, January 1989.
- [11] J.J. Grainger, S.H. Lee: "Capacitor Release by Shunt Capacitor Placement on Distribution Feeders: A New Voltage-Dependent Model", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 15, pp 1236-1244, May 1982.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación tiene el apoyo financiero de FAPESP a través del proyecto 97/04061-0.

RESEÑAS BIOGRAFICAS

RUBEN ROMERO

Bachiller e Ingeniero Electricista, Universidad Nacional de Ingeniería, UNI, Lima-Perú en 1978 y 1984, Magister y Doctor en Ingeniería Eléctrica, UNICAMP, Campinas-Brasil en 1990 y 1993. Profesor del DEE-FEIS-UNESP, Ilha Solteira - Brasil.

WENDEL SOARES

Matemático, UFMS, en 1995 y actualmente cursando Magister en la FEIS-UNESP.

RAMON GALLEGO

Ingeniero Electricista, UTP-Colombia, en 1981, Magister en Ingeniería Eléctrica, UN-Bogota, en 1985 y Doctor en Ingeniería Eléctrica, UNICAMP, Campinas-Brasil en 1997. Profesor de la UTP, Pereira - Colombia.



**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**

