

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica

Um Modelo Heurístico para Solução do Problema de
Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica

José Roberto Sanches Mantovani

Ariovaldo Verandio Garcia
Orientador

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP,
como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Elétrica.

Campinas, Fevereiro de 1995.

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por JOSE ROBERTO SANCHES MAN-
TOVANI e aprovada pela Comissão
Julgadora em 15 / 02 / 95.


Orientador



Para:

Deus, de onde tudo deriva ...

Amélia, onde estiver, com muito carinho;

Antônio;

Suely

Felipe e

José Roberto;

Todos que têm um ideal e lutam por ele;

O Brasil, na esperança que se torne uma sociedade mais justa.

AGRADECIMENTOS

- Prof. Ariovaldo Verandio Garcia pela excelente orientação, paciência, amizade, ensinamentos técnicos e científicos ao longo destes anos que trabalhamos juntos.
- Velhos e novos amigos do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica/DSEE, pela convivência amigável e generosa e acima de tudo pelo carinho com que sempre me trataram;
- Professores do Departamento de Sistemas de Energia Elétrica - UNICAMP, pela amizade, colaboração e as excelentes condições de trabalho que fornecem aos estudantes da pós graduação;
- Rubén Romero pela amizade e a colaboração dispensada durante o desenvolvimento da técnica de discretização heurística apresentada neste trabalho;
- Carlos A. F. da Rocha e Sérgio Azevedo de Oliveira pela amizade e colaboração dispensada;
- Professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP pelo incentivo, apoio e amizade;
- A todos que contribuíram para que a realização deste trabalho se tornasse possível;
- PICD/CAPES/UNESP pelo apoio financeiro.

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um modelo para resolver o problema de planejamento de reativos em sistemas de energia elétrica. O método proposto utiliza programação linear inteira mista (PLIM) e é resolvido usando enumeração implícita (busca binária). São adotadas heurísticas especiais para reduzir o conjunto inicial de candidatas e para obter soluções discretas.

Foram realizadas duas implementações do algoritmo, uma seqüencial e outra paralela. A implementação paralela utiliza um modelo de programação assíncrona e é ajustada para computador de memória distribuída.

Definido um conjunto de barras candidatas à alocação de novas fontes reativas o programa desenvolvido fornece a localização e a magnitude das fontes reativas (se necessárias) que devem ser alocadas no sistema, considerando restrições de segurança e de operação. O desempenho da implementação paralela é avaliado para três sistemas reais de 309, 725 e 810 barras.

Apresentam-se resultados para os sistemas testes IEEE30, IEEE118 e os três sistemas reais usados na avaliação da implementação paralela.

Palavras Chaves: Planejamento de Reativos, Despacho Ótimo de Reativos, Métodos Heurísticos, Busca Binária, Processamento Paralelo.

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Formulação Geral do Problema	5
2.1	Fontes de Potência Reativa no Sistema de Energia Elétrica	5
2.1.1	Geradores síncronos	6
2.1.2	Linhas de transmissão de alta tensão	6
2.1.3	Alteração da topologia do sistema	7
2.1.4	Transformadores com mudança de “tap” sob carga	7
2.2	Principais Equipamentos de Compensação Considerados na Etapa de Planejamento de Reativos	8
2.2.1	Capacitores “shunt”	9
2.2.2	Indutores “shunt”	9
2.2.3	Compensadores Estáticos	10
2.2.4	Compensadores Síncronos	11
2.3	Custos dos Investimentos em Fontes Reativas	11
2.4	Condições que Requerem o Planejamento de Reativos	12
2.5	Formulação Geral do Problema	15
2.6	Exemplo - sistema de três barras	18

3	Revisão Bibliográfica	20
4	Modelo Proposto	31
4.1	Planejamento de Reativos Sob Vários Cenários	32
4.1.1	Contingências	32
4.1.2	Múltiplos Níveis de Carga	33
4.2	Fluxo de Potência Inicial	34
4.3	O Conjunto de Barras Candidatas (\mathcal{I})	34
4.4	Obtenção do Modelo Linearizado	35
4.5	Solução do Problema de Despacho Reativo	39
4.5.1	Programação linear sucessiva	40
4.6	Refinamento do Conjunto de Barras Candidatas	42
4.6.1	Heurística A	42
4.6.2	Heurística B	43
4.7	Solução do Problema de Investimento	45
4.7.1	Busca Binária	47
4.7.2	Algoritmo de Busca Binária	50
4.7.3	Redução da Árvore	52
4.8	Discretização	54
4.8.1	Algoritmo Heurístico de Discretização	54
4.9	Algoritmo Completo Para Solução do Problema	56
4.10	Exemplo - sistema de três barras	57
5	Solução em Computador Paralelo	62

5.1	Algumas Definições Usuais em Processamento Paralelo	62
5.2	Algoritmo Paralelo de Enumeração Implícita	65
5.3	Implementação	68
5.3.1	Máquina de memória distribuída	68
5.3.2	Aspectos da Implementação Paralela	70
6	Testes e Resultados	71
6.1	Sistema IEEE30	72
6.2	Sistema IEEE118	73
6.3	Sistema real de 309 barras	74
6.4	Sistemas sul725 e sul810	78
6.5	Comentários Sobre os Testes para Obter Propostas de Investimentos .	79
6.6	Análise do Desempenho da Implementação Paralela	80
7	Comentários e Conclusões	86
A	Obtenção do sistema real de 309 barras	90
B	Funções da Biblioteca do nCUBE	93
C	Desenvolvimento das Equações do Jacobiano Reativo - $[L_C]$	95
D	Diagramas de Blocos - PL sucessiva e discretização	100
	Bibliografia	104

Capítulo 1

Introdução

O objetivo do planejamento de reativos é determinar o plano ótimo de expansão de fontes reativas, com vistas a dotar um sistema de energia elétrica da capacidade de operar de maneira viável e segura, considerando diversos cenários de operação (níveis de carga, contingências).

Trata-se de um problema de otimização de grande porte com variáveis reais, inteiras e discretas. Na literatura encontram-se dois tipos de problemas relacionados com o planejamento de reativos:

- Determinação dos ajustes dos dispositivos de controle de tensão e fontes reativas existentes no sistema (bancos de capacitores e reatores, capacidades próprias de geradores, compensadores síncronos e estáticos), com vistas a obter um perfil de tensão dado (normalmente referenciado *despacho de reativos*). Este subproblema é não linear, mal condicionado e de convexidade desconhecida.
- Obtenção da expansão ótima (custo mínimo) de fontes reativas considerando características físicas, econômicas e de operação (*planejamento de reativos* como interpretado neste trabalho).

Nos últimos anos o planejamento de reativos em sistemas de energia elétrica foi tema de várias publicações[1-19]. Grande parte desses trabalhos utilizam técnicas de decomposição (Benders[20]), separando o problema original em um subproblema de operação e outro de investimento. Essa metodologia é bastante flexível e versátil, permitindo que cada um dos subproblemas seja resolvido por técnicas de otimização adequadas e possibilitando a consideração de diferentes cenários. A interface entre

os dois subproblemas é estabelecida através dos multiplicadores de Lagrange das restrições que fazem parte das soluções dos subproblemas de operação em cada cenário e das propostas de investimentos reativas dadas pela solução do subproblema de investimento.

No modelo proposto neste trabalho as restrições de operação do problema reativo são linearizadas em torno de um ponto de operação x^0 (se existir), utilizando-se o modelo CRIC proposto por Carpentier[21]. Obtém-se um problema de programação linear inteira mista (PLIM) de grande porte com função objetivo composta de componentes de custo fixo e de custo variável. Na literatura pertinente esse PLIM é conhecido como problema de carga fixa [22,23], e a técnica de solução adotada também consiste em decompô-lo em dois subproblemas: operação e investimento.

Uma fase de inicialização do problema é necessária através da solução de um problema de despacho reativo via programação linear sucessiva[24,25] – resolvem-se alternadamente problemas de fluxo de potência (FP) e programação linear (PL). Na solução da PL consideram-se todas as restrições do problema reativo, ou seja uma formulação primal. A convergência do procedimento FP-PL é obtida através de heurísticas adequadas.

Se a solução do problema de despacho inicial indicar necessidade de suporte reativo no cenário de estudo, então deve-se resolver um problema de planejamento de reativos, o que é feito decompondo-o, como mencionado anteriormente, em um subproblema de investimento e um de operação. O subproblema de investimento é resolvido através de busca binária[26,27] e o subproblema de operação é uma PL que realimenta o problema de investimento com informações sobre a viabilidade e sobre o custo de soluções geradas. Esse modelo permite a inclusão de heurísticas para efetuar cortes na árvore de decisão e, como será descrito neste trabalho, é adequado para ser implementado em computadores paralelos[28-31].

Obtidas a (s) proposta (s) de investimento adotou-se um procedimento heurístico baseado na referência [32] (Balas-Martin) para discretizar a solução, quando as fontes reativas tiverem essa característica (bancos de capacitores/reatores).

Foram desenvolvidas duas implementações do modelo proposto, uma para ser executada em computadores de arquitetura convencional (seqüencial) e outra que é adequada para ser implementada em arquiteturas distribuídas. Essa última versão paralela foi implementada em um computador nCUBE2 de 64 nós e foi empregado um modelo de programação assíncrono. Um processador (mestre) tem por tarefa tanto o gerenciamento da busca binária como também a alocação de tarefas aos demais processadores (escravos). Esses últimos resolvem subproblemas de operação, informando ao mestre se os mesmos são viáveis ou inviáveis e ainda o custo de cada

proposta (caso seja viável).

Organização do texto

No Capítulo 2 descrevem-se as principais fontes de geração e controle de reativos existentes no sistema, as características físicas e econômicas dos principais dispositivos de compensação de reativos utilizados na fase de planejamento. O problema de planejamento é formulado como um problema não linear de grande porte com descrição das variáveis e equações envolvidas.

No Capítulo 3, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica onde aspectos de formulação e solução de alguns dos principais trabalhos que abordam o tema planejamento de reativos são discutidos.

No Capítulo 4, apresentam-se a formulação linearizada do problema de planejamento e os algoritmos de PL sucessiva, busca binária e discretização das variáveis de investimentos propostos para sua solução. Aspectos relacionados com a escolha do conjunto de barras candidatas à alocação de novas fontes reativas e refinamento do mesmo, planejamento sob diferentes cenários de operação também são discutidos nesse capítulo. Finalmente, apresenta-se o algoritmo proposto e implementado neste trabalho para solução do problema de planejamento de reativos.

No Capítulo 5, apresenta-se a partir do modelo proposto neste trabalho, um algoritmo paralelo para solução do problema. Descreve-se também nesse capítulo as características da máquina de memória distribuída utilizada, bem como alguns conceitos envolvendo a elaboração e avaliação de algoritmos paralelos.

No Capítulo 6 apresentam-se resultados de simulações com alguns sistemas testes que aparecem na literatura e sistemas reais brasileiros, sendo que com esses últimos apresentam-se também as medidas de desempenho com a versão paralela do algoritmo desenvolvido.

No Capítulo 7 estão as principais conclusões sobre o trabalho desenvolvido, assim como sugestões para futuros trabalhos.

No Apêndice A descreve-se a forma como o sistema real de 309 barras foi obtido através dos cálculos de equivalentes estáticos do sistema planejado para a região Sul-Sudeste.

No Apêndice B apresenta-se uma descrição resumida das funções da biblioteca do nCUBE2 usadas na implementação da versão paralela do algoritmo.

No Apêndice C estão alguns conceitos envolvidos no cálculo do fluxo de potência

CRIC proposto por Carpentier e a dedução das equações que permitem o cálculo do jacobiano reativo [L_C].

No Apêndice D estão os diagramas de blocos detalhados que ilustram a implementação computacional dos algoritmos de programação linear sucessiva e discretização heurística das variáveis de investimentos (bancos reativos).

Capítulo 2

Formulação Geral do Problema

De maneira geral, o planejamento de reativos pode ser formulado como o problema de se determinar, a partir de cenários de operação definidos, a alocação de fontes reativas em um sistema de energia elétrica, a um custo mínimo, considerando restrições de segurança e de atendimento da demanda. As características físicas, econômicas e de operação dos controles de reativos das fontes existentes e das novas fontes que serão instaladas no sistema devem estar completamente definidas para a obtenção de uma proposta adequada de planejamento.

Neste capítulo são apresentadas de maneira resumida algumas das principais fontes reativas que são utilizadas no despacho reativo. Também são ressaltadas as características das principais fontes reativas usadas na etapa de planejamento e os custos envolvidos na instalação e operação das mesmas. Apresenta-se, na parte final do Capítulo, a formulação geral do planejamento de reativos como um problema de programação matemática não linear de grande porte com variáveis reais, binárias e discretas.

O texto da descrição das fontes reativas é praticamente o mesmo que aparece na referência [1].

2.1 Fontes de Potência Reativa no Sistema de Energia Elétrica

O conjunto dos equipamentos que constitui um sistema de energia elétrica, geralmente é capaz de suprir toda a demanda ativa e reativa necessária para manter o

sistema operando em condições normais de projeto – carga e topologia da rede.

O suprimento de demanda reativa necessária é feito pelas capacidades de geração de reativos das máquinas geradoras, linhas de transmissão de alta tensão (longas) entre as principais fontes. Os transformadores com “taps” variáveis sob carga apesar de não serem fontes geradoras de reativos têm um importante papel no despacho reativo, eliminando problemas de violações de tensões que seriam resolvidos com a alocação, na maioria das vezes desnecessária, de novas fontes reativas. Uma estratégia de alterar a topologia do sistema retirando componentes (por exemplo linhas de transmissão longas), em determinadas condições de operação, pode ser analisada.

2.1.1 Geradores síncronos

Os geradores síncronos, principal fonte de potência ativa nos sistemas de energia elétrica, são também grandes fornecedores e consumidores de potência reativa. Suas capacidades de consumo/fornecimento estão vinculadas a limites físicos de projeto tais como limites da capacidade térmica da máquina e a problemas dinâmicos de operação do sistema de energia elétrica, associados a limites de estabilidade transitória. Uma importante característica dos geradores síncronos é sua capacidade de responder rapidamente a perturbações no sistema. Os geradores síncronos representam na maioria das vezes a única reserva reativa disponível na operação do sistema que pode ser usada na ocorrência de um distúrbio que necessita de resposta rápida. Dado esse aspecto, no planejamento da operação o fornecimento de reativos dos geradores deve estar ajustado em níveis que proporcionem uma capacidade reativa de reserva que possa suprir o suporte reativo necessário na ocorrência de uma perturbação.

2.1.2 Linhas de transmissão de alta tensão

As linhas de transmissão de alta tensão são altamente capacitivas o que as torna elementos reativos normais do sistema, fornecendo capacidades reativas proporcionais ao quadrado das magnitudes das tensões de barras onde estão ligadas. O efeito capacitivo dessas linhas é bastante benéfico para o sistema operando em condições de carga nominal ou pesada, uma vez que a linha se comporta como uma fonte distribuída para compensação de perdas reativas. Em condições de carga leve este efeito capacitivo pode causar problemas de sobretensões nos terminais das linhas.

Há casos de carregamento no sistema em que mesmo o efeito capacitivo das linhas não é suficiente para evitar problemas de baixas tensões. Esse problema po-

deria ser resolvido através da adição de uma nova linha que adicionaria capacitância ao sistema e reduziria as perdas reativas. Porém, do ponto de vista reativo, economicamente é difícil de justificar a construção de uma nova linha, pois existem outras alternativas de compensação de reativos que podem resolver os problemas de baixas tensões a custos menores. É evidente que quando a construção de uma linha trouxer outros benefícios para o sistema – melhoria da confiabilidade, observabilidade, etc, então todos estes fatores devem ser ponderados e tomada a decisão que contemple uma relação adequada custo/benefício.

A capacidade reativa das linhas de transmissão é automaticamente considerada no planejamento ótimo de reativos através da solução do problema de fluxo de potência.

2.1.3 Alteração da topologia do sistema

A mudança da topologia da rede não está relacionada com fontes de compensação de reativos, mas o remanejamento de fluxos ativos e reativos em linhas de transmissão, através da ação do chaveamento adequado dos equipamentos de manobra, pode aliviar problemas com tensões. Adotar esse tipo de procedimento apenas para melhorar o perfil de tensão da rede no planejamento ótimo de reativos, que raramente considera restrições de segurança estática e dinâmica, não é confiável. O estudo de viabilidade das condições topológicas do sistema é tratado como estratégia operacional.

2.1.4 Transformadores com mudança de “tap” sob carga

Grande parte dos transformadores dos sistemas de energia elétrica têm incorporados dispositivos de controle de níveis de tensão. Posições de “tap” são pontos discretos sobre os enrolamentos de um transformador que altera sua relação de transformação, permitindo que as tensões variem dentro de um certo intervalo correspondente ao número desses pontos. A alteração do valor eficaz da tensão permite o controle e a redistribuição do fluxo de potência reativa no sistema, melhorando o seu perfil de tensão.

A mudança de “tap” sob carga não representa fonte de reativos, mas seu uso apropriado, associado a outros dispositivos de regulação e controle de reativos, permite considerável flexibilidade em manter níveis de tensão adequados no sistema. A calibração dos “taps” existentes pode adiar a necessidade da instalação de novas

fontes reativas, tornando a modelagem e o ajuste deste tipo de controle essencial durante o procedimento de planejamento de reativos.

Operacionalmente a mudança de “tap” pode ser manual ou automática respondendo a sinais de controle de tensão de uma conexão ou barra vizinha. A diferença de tempo entre o envio do sinal e a mudança efetiva do “tap” é de alguns minutos. Esse tempo de atuação enquadra o “tap” como um dispositivo de controle adequado para as regulações normais de tensão ou as alterações de tensão devido a distúrbios pequenos ou moderados, não permitindo seu uso para assegurar e manter a estabilidade do sistema durante um distúrbio mais severo.

2.2 Principais Equipamentos de Compensação Considerados na Etapa de Planejamento de Reativos

Na especificação dos equipamentos para compensação de reativos estão envolvidos diversos aspectos:

- Tipo de compensação necessária - indutiva, capacitiva ou um intervalo de compensação que em alguns cenários é indutiva e em outros capacitiva.
- Magnitude da fonte em MVar ou em “por unidade” – pu.
- Velocidade de resposta do equipamento de compensação e seus dispositivos de controle – esta característica está relacionada com a natureza do problema dinâmico envolvido (instabilidade de tensão, estabilidade dinâmica e transitória, etc), que determina o tempo de resposta adequado para o equipamento de compensação. Quanto mais rápida e precisa for essa resposta maior será o custo do equipamento.
- Localização do equipamento no sistema – Infra estrutura existente, nível de tensão, condições de operação do equipamento.

Os equipamentos de compensação mais utilizados durante a etapa de planejamento ótimo de reativos são capacitores e reatores “shunt”, compensadores síncronos e de estado sólido (estáticos). Existem outras formas de compensação que são mais utilizadas durante a fase de projeto do sistema em um dado cenário: capacitores e reatores série.

2.2.1 Capacitores “shunt”

Os capacitores “shunt” são amplamente utilizados durante a etapa de planejamento. Podem ser do tipo fixos ou bancos que possibilitam combinações série/paralela para determinar a magnitude necessária da fonte em diferentes cenários, proporcionando maior flexibilidade na operação dos capacitores “shunt” existentes no sistema. Outras características desses equipamentos são a modularidade e a confiabilidade, já que não têm partes móveis. O tempo necessário para instalar novas unidades é relativamente curto.

O custo destes equipamentos varia de médio a baixo quando comparado ao de outros equipamentos de compensação. Esse custo depende, entre outros fatores, dos dispositivos de controle necessários que podem ser:

- Chaves com fechamento automático sob carga ou disjuntores que podem ser operados automática, remota ou manualmente, se necessário.
- Chaves projetadas para resolver problemas de sobretensões e surtos de correntes devido a ações de chaveamento do capacitor.

As principais limitações desse tipo de equipamento são relativas a:

- Tempo de resposta alto, impossibilitando-os de participarem da solução de problemas de estabilidade transitória.
- A compensação reativa proporcionada (MVAR) é função das tensões de linhas nas barras onde os equipamentos estão instalados

2.2.2 Indutores “shunt”

Os reatores “shunt” são utilizados em sistemas de energia elétrica com o objetivo de compensar os efeitos dos reativos capacitivos das linhas longas de alta tensão durante períodos de cargas leves eliminando problemas de sobretensões.

São equipamentos importantes no planejamento e controle ótimo de reativos. Podem ser do tipo fixo (uma única capacidade MVAR), ou bancos que permitem um melhor ajuste da capacidade dependendo das condições de carga do sistema. São, normalmente, conectados no sistema de dois modos:

- 1 Conectados às linhas de transmissão. Não são chaveados, são parte do sistema de transmissão e seus valores considerados nos cálculos dos parâmetros das linhas onde estão inseridos. O chaveamento desses equipamentos causa problemas de surto de tensão de chaveamento;
- 2 Conectados ao terciário de transformadores. Nesse modo de ligação os equipamentos são controlados por ação de chaveamentos automáticos.

Os custos destes equipamentos são superiores aos dos capacitores “shunt”, variando de acordo com as magnitudes e dispositivos de comando e proteção. Para grandes capacidades (MVar) os custos são elevados.

2.2.3 Compensadores Estáticos

Os compensadores estáticos são uma família de sistemas de compensação de reativos “shunt” compostos de dispositivos de chaveamento convencionais e de estado sólido (eletrônicos de potência) associados a sistemas de controle que propiciam o ajuste rápido e refinado das compensações reativas necessárias para atender o sistema.

Algumas características dos compensadores estáticos devem ser consideradas no planejamento de reativos:

- 1 Custo relativamente alto, da ordem de duas a três vezes o custo da operação “shunt” convencional;
- 2 Geração de harmônicos, havendo necessidades de filtros e manutenção rigorosa;
- 3 Necessidades de transformadores de acoplamento ou enrolamento terciário de outros transformadores por problemas de limitação de tensão;
- 4 Tempo de resposta instantâneo;
- 5 Fornecem potência reativa contínua e propiciam quando necessário o controle independente de fase.

Desta forma a aplicação de compensadores estáticos está limitada a situações onde se necessitam respostas rápidas dos equipamentos de compensação ou intervalo de compensação contínuo ou ainda controle independente de fase.

2.2.4 Compensadores Síncronos

São máquinas síncronas ajustadas para gerar ou absorver grandes magnitudes de potência reativa (MVAR), propiciando um intervalo contínuo de compensação. Fornecem resposta rápida (um ou dois segundos) a desvios de tensão no sistema e são considerados elementos altamente estabilizantes. Durante um pequeno intervalo de tempo possuem capacidade de sobrecargas, que pode ser utilizada em situações críticas de operação.

Os compensadores síncronos têm custos de instalação, manutenção, dispositivos de controle e equipamento de compensação substancialmente maiores que dos reatores e capacitores “shunt” com capacidade de compensação semelhante. As taxas de falhas destes equipamentos também são maiores.

O uso de compensadores síncronos em sistemas de transmissão está em grande parte limitado aos equipamentos em operação. A especificação de novos equipamentos deve ser feita de forma muito criteriosa e justificada com base nos seguintes atributos:

- Necessidade de um intervalo de compensação de reativos (indutivo, capacitivo);
- Necessidades de um tempo de resposta rápido e sobrecargas reativas durante distúrbios no sistema.

2.3 Custos dos Investimentos em Fontes Reativas

Para o planejamento ótimo de reativos é importante a representação dos custos de expansão de novas fontes uma vez que o objetivo principal do problema é a minimização destes custos. Esses dados podem ser encontrados com precisão em concessionárias de energia elétrica e/ou com os fabricantes de equipamentos de compensação de reativos.

Segundo a referência [1] no custo total de uma fonte reativa estão embutidos custos de capital, custos de operação e instalação. Uma representação mais genérica e adequada para o planejamento de reativos divide o custo total da instalação de uma nova fonte reativa em duas parcelas:

- Custos Fixos: São independentes da magnitude das fontes (MVar). Dependem entre outros dos seguintes fatores:
 - Local onde será instalada a nova fonte no sistema que decorre em problemas relativos a espaço físico e adequação da infra-estrutura disponível, acarretando ou não a necessidade de novas construções;
 - Equipamentos de comando - disjuntores e chaves no caso de instalação de reatores.
- Custos Variáveis: Dependem do tipo de compensação - indutiva/capacitiva, capacidade da fonte (MVar), nível de tensão.

Nas Figuras 2.1 e 2.2 estão indicados os custos para fontes reativas indutivas e capacitivas para três níveis de tensão [1].

2.4 Condições que Requerem o Planejamento de Reativos

O sistema de energia elétrica planejado considerando certas condições de carga e topologia tem reservas reativas necessárias para operar atendendo a restrições de segurança e operação. Com a evolução do sistema, o sistema originalmente planejado sofre alterações topológicas e de crescimento de cargas podendo não mais atender tais restrições.

Baseado nesses aspectos as principais situações e/ou condições que requerem planejamento de reativos são:

- Crescimento de cargas em barras de baixa tensão distantes das unidades geradoras, causando dificuldades com a qualidade de serviço para os consumidores, problemas de instabilidade de tensão e perdas excessivas no sistema de transmissão;
- Linhas de transmissão longas (ou subterrâneas) de alta tensão operando em condições de cargas leves, ocasionam problemas de sobretensões em seus terminais causando problemas em máquinas síncronas, cargas e equipamentos;
- Necessidades de uma estratégia adequada de planejamento reativos/operação do sistema de geração/transmissão, visando manter o suporte reativo necessário para operação segura e manutenção de reservas reativas das fontes de

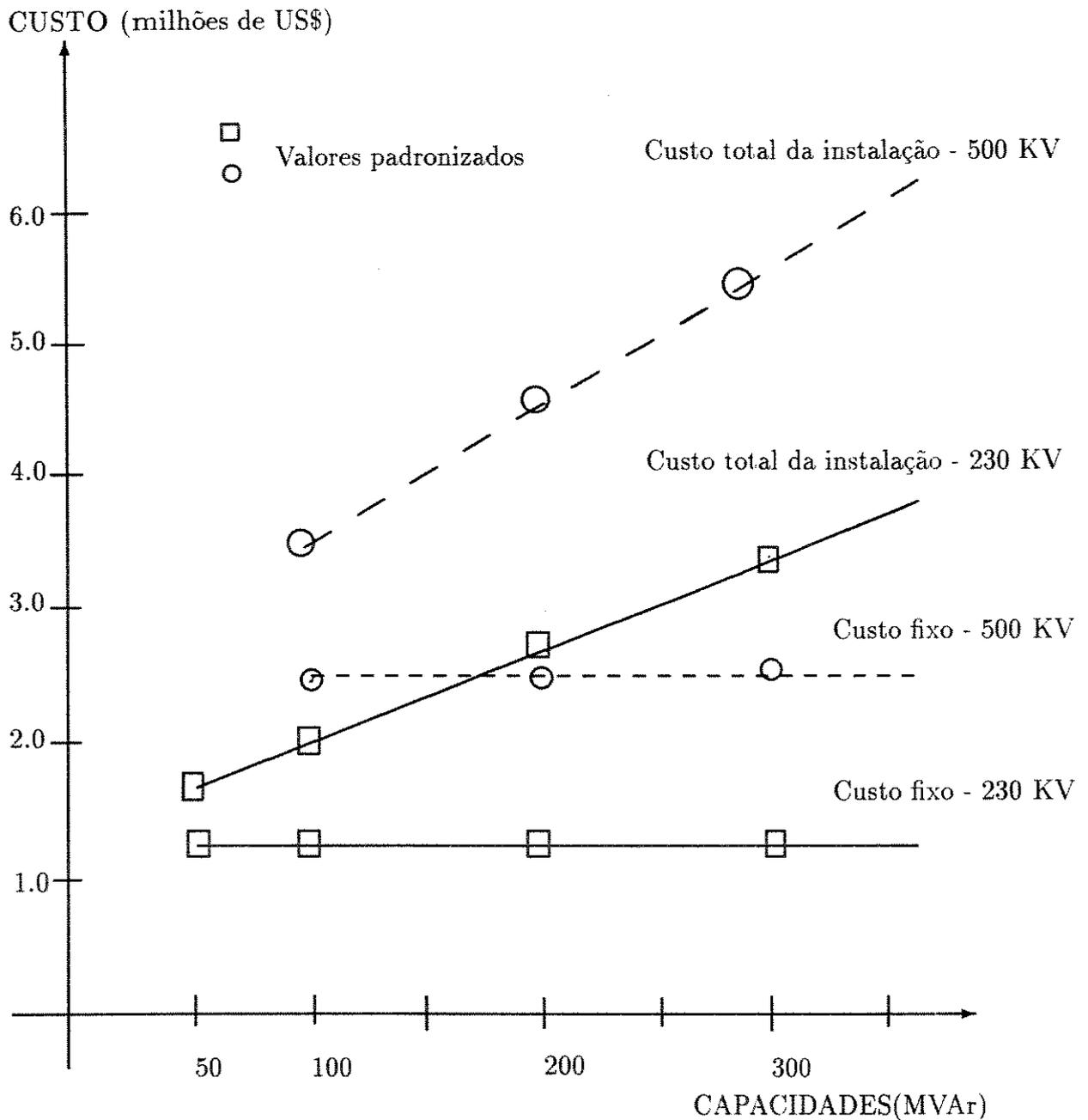


Figura 2.1: Custos da instalação de capacitores “shunt”

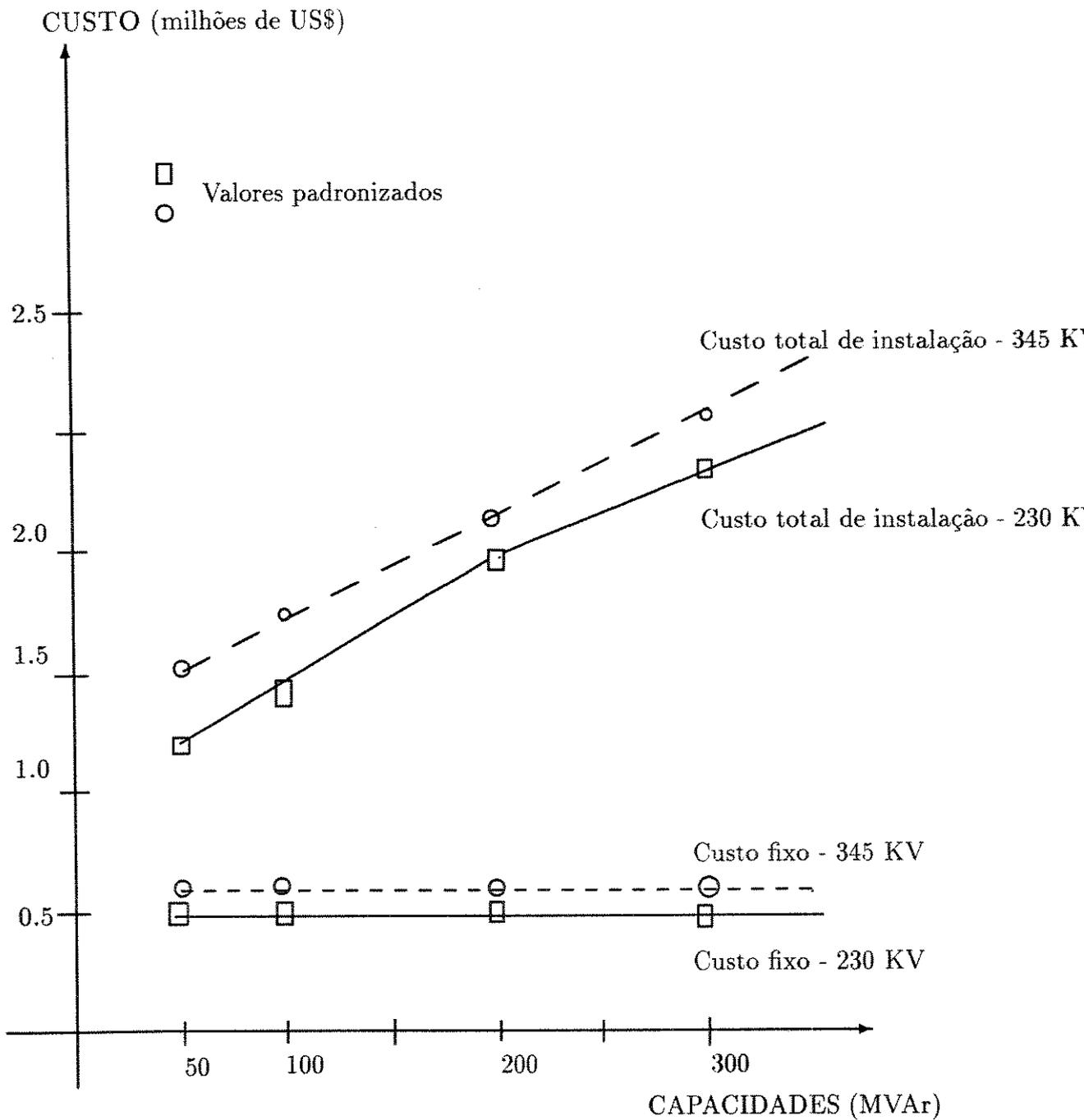


Figura 2.2: Custos da instalação de reatores "shunt"

resposta rápida (compensadores síncronos e estáticos, máquinas síncronas), para serem usadas em condições transitórias do sistema.

- Crescimento dos sistemas de transmissão e subtransmissão com a adição de novas linhas e alteração das necessidades reativas;
- Necessidade de substituir os capacitores de uma área do sistema de energia elétrica por motivos técnicos e/ou econômicos - problemas com os equipamentos de compensação velhos, alteração do nível de tensão de um setor do sistema de energia elétrica.

2.5 Formulação Geral do Problema

O planejamento ótimo de reativos consiste em determinar, sob vários cenários de operação (contingências, níveis de carga), as localizações e as magnitudes das fontes reativas que asseguram operação factível do sistema de energia elétrica. Na formulação e solução do problema alguns aspectos importantes a considerar são:

- As fontes reativas instaladas e os controles disponíveis devem ser levados em consideração na alocação de novas fontes. Nessa etapa, sempre que possível, um percentual de fontes reativas de respostas rápidas deve ser mantido como reserva para atender problemas transitórios no sistema. Esse percentual não é determinado pela metodologia proposta neste trabalho que está relacionada com o estado estacionário da rede. Para avaliar tais necessidades deve-se executar estudos de estabilidade, curto-circuito etc...
- O conjunto de barras candidatas à alocação de novas fontes (\mathcal{I}) deve ser previamente definido pelo planejador, atendendo critérios de natureza física e econômica;
- Os tipos de equipamentos de compensação de reativos a serem utilizados (compensadores síncronos, compensadores estáticos, capacitores “shunt” fixos ou bancos, indutores “shunt” fixos ou bancos) também devem ser definidos.

Para cada cenário de operação o problema reativo pode ser formulado como:

$$\text{Min} \sum_{i \in \mathcal{I}} f_i(y_i) \quad (2.1)$$

sujeito a:

$$G_p(X) = 0 \quad (2.2)$$

$$G_q(X) + B(y_i + y_f^0) = 0 \quad (2.3)$$

$$C_{qq}(X) - y_v^0 \leq 0 \quad (2.4)$$

$$X^{\min} \leq X \leq X^{\max} \quad (2.5)$$

$$0 \leq y_k \leq y_k^{\max} \quad k \in \mathcal{K} \quad (2.6)$$

$$y_l \in \{n \times S\} \quad n = 0, 1, \dots, N_s \quad l \in \mathcal{L} \quad (2.7)$$

$$\mathcal{I} = \mathcal{K} \cup \mathcal{L} \quad (2.8)$$

onde

\mathcal{I} : conjunto de barras (nós elétricos) candidatas à alocação de novas fontes reativas;

y_i : variáveis de investimentos divididas nos subconjuntos \mathcal{K} e \mathcal{L} ;

\mathcal{K} : conjunto de barras onde podem ser alocadas fontes reativas com intervalo de compensação contínuo;

\mathcal{L} : conjunto de barras onde podem ser alocadas fontes reativas fixas ou bancos;

y_f^0 : indica as fontes reativas fixas ou bancos existentes no sistema ou alocadas devido a simulação de outros cenários;

y_v^0 : idem a y_f^0 , para fontes reativas contínuas;

y_k : fontes reativas contínuas (controláveis) permitidas alocar na barra $k \in \mathcal{K}$;

y_l : fontes reativas discretas permitidas alocar na barra $l \in \mathcal{L}$;

X : magnitudes e ângulos das tensões de barras do sistema (V, θ) , “taps” de transformadores (T) , potências ativa e reativa geradas (P_G, Q_G) ;

n : número de estágios considerados para equipamentos de compensação de reativos discretos. Para equipamentos fixos $n = 1$;

S : magnitude da fonte em cada estágio;

N_s : número máximo de estágios.

B : matriz diagonal, dimensão NB , definida como $B = \text{diag}(\gamma_i)$, onde $\gamma_i = 0$ para as barras que não pertencem ao conjunto \mathcal{I} ou não têm fontes reativas discretas instaladas, $\gamma_i = 1$ para fontes indutivas e $\gamma_i = -1$ para fontes capacitivas.

Os conjuntos de equações (2.2) e (2.3) são as equações estáticas do fluxo de potência [33], que representam o balanço de potências ativa e reativa do sistema. São dadas por:

$$P_{Gk} - P_{Lk} - P_k(\theta, V, T) = 0 \quad (2.9)$$

$$Q_{Gk} - Q_{Lk} - Q_k(\theta, V, T) = 0 \quad (2.10)$$

$$k = 1, \dots, NB$$

NB : número de barras do sistema;

P_{Lk}, Q_{Lk} : cargas ativa e reativa na barra k ;

$P_k(\theta, V, T)$: injeção líquida de potência ativa na barra k dada pela equação geral:

$$P_k = V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.11)$$

Ω_k : conjunto formado pela barra k e todas as suas vizinhas;

$Q_k(\theta, V, T)$: injeção líquida de potência reativa na barra k dada pela equação geral:

$$Q_k = V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.12)$$

O conjunto de equações (2.4) representa as restrições lineares envolvendo variáveis de operação e variáveis de investimento contínuas:

$$Q_{G_k}^{\min} - q_r^0 \leq Q_{G_k} \leq Q_{G_k}^{\max} - q_c^0 \quad (2.13)$$

$$k = 1, \dots, NB$$

q_c^0, q_r^0 : fontes reativas contínuas $y_v^0 = (q_c^0, q_r^0)$ devido a simulação de outros cenários;

Q_G^{min}, Q_G^{max} : limites de geração de fontes reativas contínuas (geradores, compensadores síncronos ou estáticos).

A função objetivo $f_i(y_i)$ representa os custos de investimento da instalação de novas fontes reativas no sistema. Nesses custos estão incluídos: investimento de capital, instalação e operação. Para cada barra do sistema os custos são representados por uma componente de custo fixo e outra de custos variáveis:

$$f_i(y_i) = \begin{cases} d_i + c_i y_i & \text{se } y_i > 0 \\ 0 & \text{se } y_i = 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

onde d_i é a componente de custo fixo e c_i a componente de custo variável associada à fonte y_i . Trata-se de uma função objetivo côncava (somatório de várias funções côncavas - demonstração desta propriedade é encontrada em L. Cooper e C. Drebes [23]), sobre um poliedro (conjunto de restrições (2.2-2.8)) onde não se pode afirmar nada sobre convexidade.

2.6 Exemplo - sistema de três barras

Para ilustrar o problema de planejamento de reativos em sistemas de energia elétrica seja o sistema de três barras da Figura-2.3.

A formulação do problema de planejamento de reativos para este sistema simples é dada por:

$$\text{Min}[(1,0 + 1,0 \times y_1)r_1 + (5,0 + 1,0 \times y_2)r_2 + (1,0 \times y_3)r_3$$

s.a.

$$P_{G1} - P_{L1} - P_1(V_k, \theta_k) = 0$$

$$P_{G2} - P_{L2} - P_2(V_k, \theta_k) = 0$$

$$P_{G3} - P_{L3} - P_3(V_k, \theta_k) = 0$$

$$Q_{G1} - Q_{L1} - Q_1(V_k, \theta_k) + B_{11}y_1 = 0$$

$$Q_{G2} - Q_{L2} - Q_2(V_k, \theta_k) + B_{22}y_2 = 0$$

$$Q_{G3} - Q_{L3} - Q_3(V_k, \theta_k) + B_{33}y_3 = 0$$

$$-0,10 \leq Q_{Gk} \leq 0,10$$

$$0,98 \leq V_k \leq 1,02$$

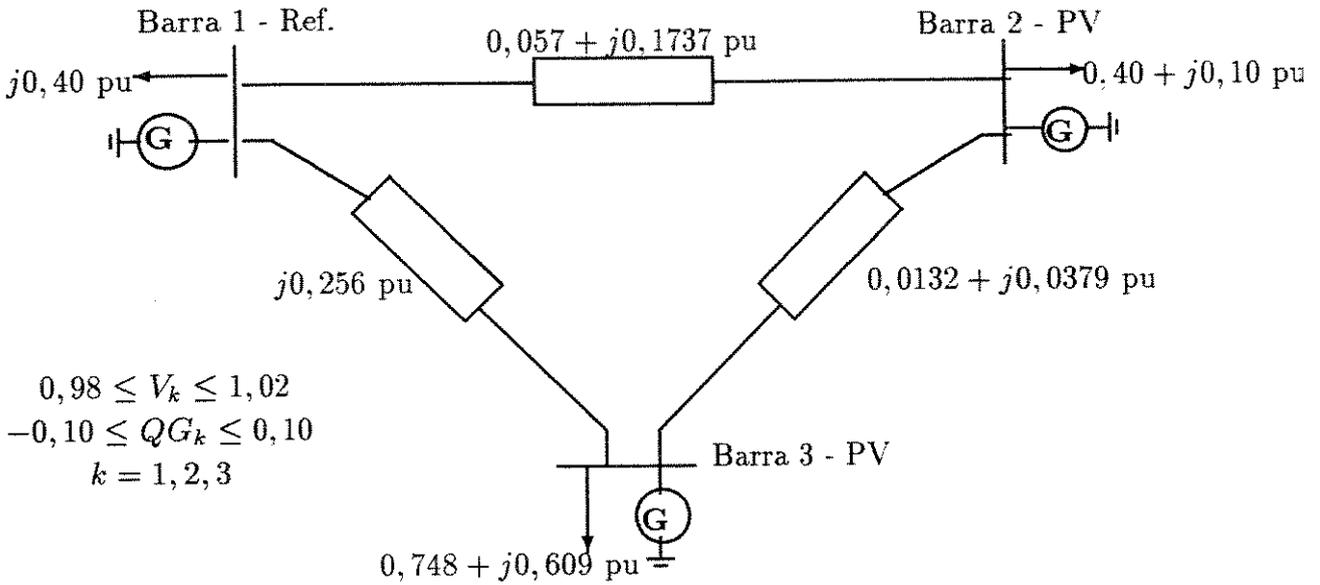


Figura 2.3: Sistema exemplo de três barras.

$$r_k = 0/1$$

$$k = 1, 2, 3$$

$$P_{G2} = 0,45pu, P_{G3} = 0,70pu, P_{L1} = 0,00 P_{L2} = 0,40pu, P_{L3} = 0,748pu$$

$$Q_{G2} = 0,00, Q_{G3} = 0,00, Q_{L1} = 0,40pu Q_{L2} = 0,10pu, Q_{L3} = 0,609pu$$

A primeira etapa no procedimento de planejamento de reativos consiste em definir o conjunto de barras candidatas à alocação de novas fontes. Neste exemplo, conforme representado na função objetivo todas as barras são candidatas à alocação de novas fontes e o conjunto y de variáveis de investimento é composto apenas por elementos discretos de bancos reativos (indutores/capacitores) com módulos de $0.125pu$, da seguinte forma:

y_l para cada barra é dado por:

$$\text{barra 1} \implies l = 1 \in \{0, 0; 0,125, 0,25, \dots, 1,00\}$$

$$\text{barra 2} \implies l = 2 \in \{0, 0; 0,125, 0,25, \dots, 1,50\}$$

$$\text{barra 3} \implies l = 3 \in \{0, 0; 0,125, \dots, 0,50\}$$

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

Nos últimos anos foram publicados diversos trabalhos envolvendo o tema planejamento de reativos em sistemas de energia elétrica, que pode ser enquadrado como um dos subproblemas do fluxo de potência ótimo. A formulação básica do problema nesses trabalhos é praticamente a mesma, diferindo nas abordagens de algumas restrições e/ou aspectos de modelagem das variáveis envolvidas no planejamento de reativos, dentre os quais citam-se os seguintes:

- Modelagem das cargas reativas do sistema: considerar cargas reativas constantes ou através de uma distribuição de carga probabilística ou nebulosa (“fuzzy”);
- Considerar os limites das magnitudes das tensões fixos ou através de uma modelagem nebulosa;
- Adotar ou não restrições de segurança nos limites das magnitudes das tensões, com a adequação de índices para evitar problemas de colapso de tensão;
- Considerar a natureza discreta das variáveis referentes a alguns tipos de fontes reativas e controladores de níveis de tensão, ou tratá-los como variáveis reais.

As abordagens adotadas para resolver o problema de otimização podem ser classificadas em métodos que decompõem o problema reativo em vários subproblemas usando decomposição de Benders [20] e métodos que resolvem o problema geral sem efetuar a decomposição explícita (programação linear sucessiva, sistemas especialistas, algoritmos genéticos).

Neste capítulo é realizada uma descrição sucinta de alguns trabalhos publicados que tratam do planejamento de reativos fornecendo uma visão geral dos diferentes enfoques e abordagens dadas ao problema, bem como as diferentes técnicas de solução propostas, objetivando situar dentro desse contexto o algoritmo desenvolvido neste trabalho.

1. **W.M.Lebow, R.Rouhani, R. Nadira, P.B.Usoro, R.K.Mehra, D.W.Sobieski, M.K.Pal, M.P.Bhavaraju [1,2]**: Esses trabalhos estão entre as primeiras publicações que propõem a decomposição do problema de planejamento de reativos em dois subproblemas e a decomposição hierárquica dos mesmos através da técnica de decomposição de Benders.

A decomposição é executada em dois níveis, para cada cenário de operação considerado. O primeiro nível trata da solução do fluxo de potência ótimo, considerando como função objetivo a minimização das perdas ativas do sistema de transmissão e executando o despacho reativo das fontes existentes. O segundo nível envolve a expansão ótima de fontes reativas, tratando-se de um problema de programação linear inteira mista tipo carga fixa e a técnica de otimização utilizada para resolvê-lo foi o algoritmo “branch-bound”. São consideradas contingências no modo corretivo e apresentados resultados de testes executados com três sistemas: IEEE118 e sistemas reais de 472 e 1079 barras.

2. **S.Granville, M.V.F.Pereira,A.Monticelli [4]**: Trabalho que juntamente com [1,2,3] apresenta uma formulação completa do planejamento de reativos considerando várias condições de carga (nominal, leve, pesada) e contingências nos modos corretivo e preventivo. A técnica proposta para solução do problema é a decomposição hierárquica de Benders em três estágios onde:

Estágio 1: Tomam-se decisões sobre as capacidades reativas factíveis x^* a serem alocadas no sistema;

Estágio 2: Adotadas as capacidades x^* alocadas no estágio anterior resolve-se o problema de operação da forma mais eficiente possível, e satisfazendo as restrições de segurança em condições normais de operação obtendo-se um ponto de operação y^* ;

Estágio 3: Com a capacidade de expansão x^* e o ponto de operação y^* em condições normais de operação, buscar um ponto de operação viável z^* depois da ocorrência de uma contingência do “ranking”.

A função objetivo considerada é a minimização da soma dos custos de operação e investimentos em novas fontes reativas. Apresentam o desenvolvimento de um pro-

cedimento para selecionar o conjunto de barras mais adequado à alocação de novas fontes iniciando o planejamento com um conjunto inicial de barras e, se necessário, altera-se o mesmo considerando aspectos econômicos e de factibilidade. Apresentam resultados para o sistema IEEE118.

3. T.Gómez, J.Lumbreras, V.M.Parra [7]: Apresentam a solução do problema de planejamento de reativos através da decomposição de Benders em dois níveis diferindo de [3,4] que propõem a solução em três níveis. Esta simplificação é feita definindo-se um conjunto de variáveis de controle preventivo e a otimização do problema reativo com relação a este conjunto de variáveis é executada juntamente com as variáveis de investimento no problema mestre onde são gerados dois conjuntos de equações de cortes de Benders:

- (1) Sensibilidades do problema reativo completo e as variáveis de investimentos;
- (2) Sensibilidades do problema reativo e as variáveis de controle preventivo.

O subproblema de operação é resolvido de forma aproximada, assumindo-se o desacoplamento $P - \theta$ e $Q - V$. As variáveis $P - \theta$ são consideradas constantes após solução do fluxo de carga e as equações não lineares que relacionam as variáveis $Q - V$ são linearizadas e consideradas como parte do subproblema de operação (outras restrições consideradas referem-se a limites nas magnitudes das tensões, "taps" de transformadores, capacidades próprias de geração de máquinas, compensadores síncronos e estáticos, etc). No caso base, considera-se uma função objetivo não linear (sujeita a restrições lineares) que representa o custo das perdas ativas do sistema de geração transmissão e um termo linear dado pela soma das injeções de potência reativa que garantam operação viável para o sistema. No cenário de contingências a função objetivo considerada é representada apenas pelo termo linear. Há uma iteração entre os problemas de otimização e fluxo de potência até que uma convergência, por algum critério pré-estabelecido seja encontrada. Apresentam-se resultados contínuos e discretos para sistemas reais de 102, 213 e 443 barras.

4. Y.Hong, D.I.Sun, S.Lin, C.LIn [6]: O problema reativo é formulado considerando-se cenários correspondentes a vários anos, coordenando a expansão de fontes reativas de um ano base até os anos correspondentes ao horizonte de planejamento, identificando alterações previstas para cargas, gerações e topologia do sistema ao longo deste período. O problema é resolvido utilizando-se decomposição de Benders em dois níveis conforme figura 3.1.

O subproblema de operação é resolvido utilizando-se o método de Newton[34] considerando como função objetivo a minimização de perdas do sistema de transmissão e redução das infactibilidades (magnitudes das tensões, potência reativa gerada).

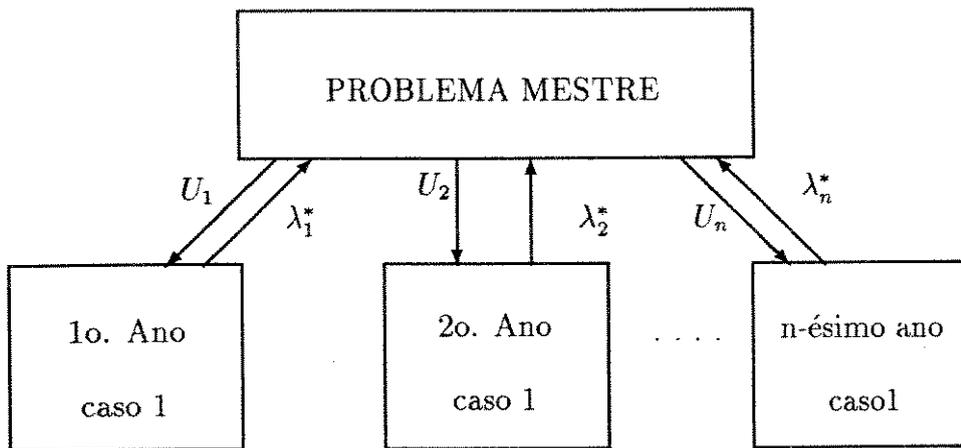


Figura 3.1: Esquema de decomposição de Benders em dois níveis - Múltiplos anos e cenários de planejamento

Apresentam resultados com propostas de investimentos contínuas e discretas para um sistema real de 217 barras.

5. O.O.Obadina,G.J.Berg [14]: O problema de planejamento de reativos é formulado e resolvido em dois estágios:

Estágio 1: Executa o despacho ótimo das fontes reativas e ajustes dos dispositivos de controle dos níveis de tensão existentes no sistema, resolvendo um problema de otimização não linear com as seguintes características:

- A função objetivo reflete os custo total variável (associado à magnitude da fonte) da instalação de reativos em todas as barras de um conjunto pré-definido de candidatas;
- Consideram-se as restrições normais do problema de planejamento de reativos (segurança, operação, limitações das capacidades reativas permitidas alocar, etc) e um conjunto de restrições que asseguram margem de segurança para o sistema com relação a colapso de tensão.

Estágio 2: Neste estágio o número de barras onde serão instaladas novas fontes é minimizado, assegurando que as restrições de operação do sistema de energia elétrica e a margem de segurança com relação ao estado crítico ($SM \geq SM^{esp}$), sejam atendidas. As equações não lineares (fluxo de potência), envolvidas na formulação do problema foram linearizadas em torno de um ponto de operação obtido no primeiro

estágio, obtendo-se um problema linear inteiro misto (PLIM) (incremental), com uma função objetivo com componentes de custos fixos e variáveis associados à alocação de novas fontes reativas, em cada uma das barras do conjunto de candidatas.

Apresentam-se resultados da aplicação do método para o sistema teste IEEE14.

6. S.Granville, M.C.A.Lima [5]: Apresentam uma formulação completa para o problema de planejamento de reativos considerando os tipos de fontes reativas (fixas, bancos, contínuas) e várias condições de operação do sistema de energia elétrica (condições típicas de carregamento, contingências nos modos corretivo e preventivo). Utilizam decomposição de Benders em três níveis, onde o último nível neste procedimento visa incorporar ao esquema de decomposição o tratamento das contingências no modo preventivo.

Uma técnica alternativa é apresentada e testada para realizar o planejamento considerando contingência no modo preventivo. Esta técnica consiste em fixar as variáveis de controle (magnitudes das tensões nos geradores, “taps”, controles de bancos reativos e injeções reativas fictícias) nos valores dados pela solução do problema de operação (despacho reativo) do caso base, e com estes valores fixos, resolve-se um problema de operação para a contingência em estudo verificando a carência reativa neste cenário. Se o sistema apresentar necessidade de suporte reativo neste cenário cria-se uma restrição adicional para o problema de operação no caso base, baseada na necessidade reativa para manter o sistema operando adequadamente no cenário das contingências em estudo. A solução do problema de operação vai gerar índices de sensibilidades (multiplicadores de Lagrange) para o problema de investimento. Com este procedimento os autores mostram, utilizando os sistemas de 113 e 1832 barras que se chegam a propostas de investimentos mais econômicas que as obtidas com o esquema de decomposição em três níveis.

O subproblema de operação foi resolvido utilizando-se técnica de programação quadrática seqüencial (PQS). No procedimento de solução do problema de operação define-se uma zona de interesse, executando a otimização apenas dentro desta zona, mas resolvendo o fluxo de potência para o sistema completo. Este procedimento PQS-FP é considerado convergido quando os valores das variáveis de controle (tensões em barras de carga e injeções reativas em barras de geração) nos problemas de otimização e fluxo de potência coincidem (obedecendo uma tolerância pré especificada).

Aspectos relacionados com a importância de considerar uma função custos (fixo, variável) adequada são discutidos e resultados da simulação de um sistema de 3150 barras ilustram este aspecto.

7. **K.H.Abdul-Hahman e S.M.Shahidehpour [13]**: Planejamento de reativos é resolvido usando decomposição hierárquica de Benders em dois níveis, decompondo o problema de planejamento de reativos em dois subproblemas: operação e investimento. O subproblema de investimento é tratado de mesma forma que em outros trabalhos que utilizam técnica de decomposição de Benders para resolver o problema reativo[1,2,3,4,7].

Aspectos interessantes neste trabalho referem-se ao tratamento dado à solução e formulação do subproblema de operação:

1. Modelagem fuzzy das restrições de tensões de barras através de uma representação trapezoidal, onde está incluído um fator de segurança estática que pode ser ajustado heurísticamente. Cada variação de tensão ($\Delta V_i, i - barra$) é representada por duas restrições lineares para cada um dos limites (mínimo, máximo) - figura 3-2.

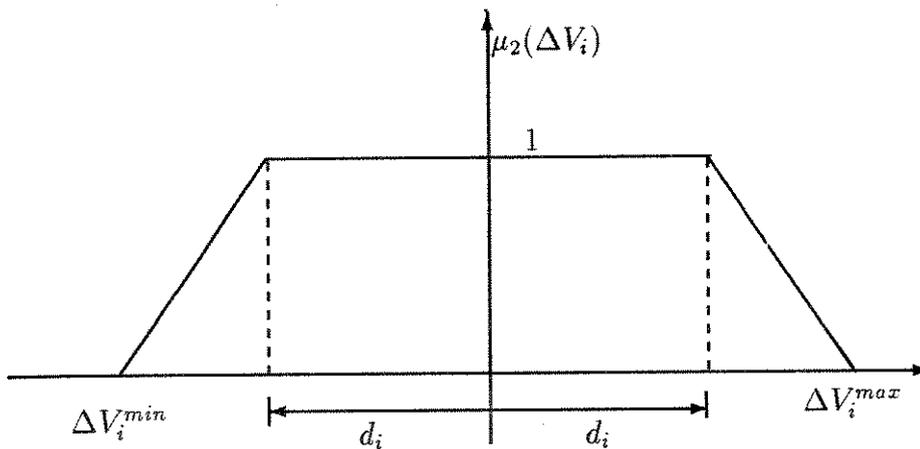


Figura 3.2: Membros da função fuzzy para variações de tensões nas barras

2. Tratamento não probabilístico da incerteza das demandas das cargas reativas, considerando um modelo de distribuição trapezoidal mapeando a variável fuzzy no intervalo $[0,1]$. A distribuição de possibilidades terá valor 1 para carregamentos frequentes e cairá para valores baixos para cargas que dificilmente acontecem.

A representação trapezoidal das cargas reativas implica em quatro conjuntos de restrições independentes para o problema de operação, aumentando acentuadamente

suas dimensões. Para contornar este problema são adotados os seguintes procedimentos:

- Usando a técnica de decomposição de Dantzig-Wolf de primeira ordem o problema de operação é decomposto em quatro subproblemas $k(k = 1, 2, 3, 4)$;
- O sistema elétrico de potência foi decomposto em N áreas (NA) e a cada um dos subproblemas de operação k aplicou-se a decomposição de Dantzig-Wolf de segunda ordem, considerando cada uma das áreas, e resolvendo em cada uma delas, um problema de otimização que considera a natureza fuzzy das restrições magnitudes das tensões, otimizando uma função objetivo com dois segmentos:
 - redução de perdas com a adequação do perfil de tensão nas cargas;
 - ajustar o perfil de tensão do sistema de forma a mantê-lo operando em regiões seguras.

O sistema IEEE30 modificado é usado para testar a metodologia proposta.

8. K.Iba [15]: A solução do problema de planejamento e despacho ótimo de reativos em sistemas de energia elétrica é tratada usando algoritmo genético modificado (a idéia básica está apoiada em algoritmos genéticos mas o método proposto é bem diferente das técnicas de algoritmos genéticos convencionais, pois para as variáveis discretas utilizam-se valores discretizados ao invés dos bits 0/1 que são usados nos algoritmos genéticos).

O sistema é decomposto em diferentes áreas/regiões utilizando-se uma técnica aproximada, e então cada subsistema é avaliado calculando independentemente várias funções objetivo em cada subsistema, utilizando-se as melhores informações de cada um deles para um certo objetivo. As soluções são melhoradas aplicando regras simples de inteligência artificial. A função multiobjetivo utilizada é composta de violações de tensões, violação da capacidade reativa dos geradores e ponderações destes três segmentos.

Os objetivos de usar este tipo de abordagem segundo o autor são:

- Maiores possibilidades de convergência para um ótimo global. O problema de planejamento de reativos não é matematicamente convexo, fazendo com que a maioria das técnicas de otimização tradicionalmente aplicadas (programação linear, programação não linear - Newton, Programação quadrática) não converjam para um ótimo global;

- Considerar a natureza discreta de algumas variáveis envolvidas no planejamento de reativos - posição de “taps” de transformadores, bancos de capacitores/reatores “shunt” chaveados, tensões em geradores de referência. Estas variáveis são representadas como um “string”/vetor X que são chamados cromossomos.

O método proposto foi aplicado em dois sistemas reais de 51 e 224 barras para mostrar sua capacidade e desempenho.

9. K.Aoki, M.Fan, N.Nishikori [8]: Esse trabalho formula o problema de planejamento de reativos considerando uma função cujo objetivo é minimizar custos (fixos e variáveis) da instalação de novas unidades de capacitores considerando restrições de investimento e operação. O número de unidades de capacitores instalados ou a serem instalados em cada barra é tratado como uma variável inteira.

As equações do fluxo de potência são linearizadas em torno de um ponto de operação e o problema geral de planejamento de reativos é formulado como um problema linear inteiro misto (PLIM).

A técnica usada para resolver o problema geral de planejamento é programação linear sucessiva (FC-PLIM). O PLIM é resolvido utilizando-se um algoritmo heurístico cuja idéia básica é buscar boas soluções inteira factíveis localizadas próximas à solução do PL (vértice) e dentro do poliedro “convexo” formado pelo conjunto de restrições. Obtida uma solução inteira inicia-se a chamada fase de melhoria que constitui em mudar os valores de uma variável inteira de cada vez de forma a proporcionar a diminuição dos custos de instalação de novas fontes reativas, buscando instalá-las em poucas barras do sistema.

Usando a metodologia proposta são apresentados resultados para um sistema real de 135 barras.

10. Y.Y.Hong e C.C.Liu [16]: Tratam da solução do problema de planejamento de reativos considerando contingências e restrições de segurança relativas a problemas de colapso de tensão, utilizando técnicas baseadas em heurísticas e sistemas especialistas. A função objetivo reflete custos da instalação de novas fontes reativas no sistema: Custos fixos e custos variáveis.

Dois sistemas especialistas com base de conhecimento distintas foram desenvolvidos:

- Sistema-1: Executa a análise das condições de operação do sistema identificando as linhas e geradores sobrecarregados, barras com maior concentração

de cargas, linhas de longa distância, linhas radiais aéreas vulneráveis e barras candidatas à alocação de novas fontes. Em seguida determina-se uma das curvas (potência ativa (P)-tensão (V)), (potência reativa (Q)- tensão (V)), (potência aparente (S)-tensão (V)) a ser estudada para determinar o índice de segurança contra colapso de tensão.

- **Sistema-2:** Resolve o problema de planejamento de reativos executando as seguintes tarefas:
 1. Identificar os controles disponíveis (tensões de geradores, compensadores “shunt”, “taps” de transformadores) para solucionar problemas de violações de tensão;
 2. Processar fluxo de carga com vistas a um dos procedimentos:
 - a. Obter as sensibilidades que permitem os ajustes dos controles existentes no sistema;
 - b. Obter dados para formular e resolver o problema de programação quadrática que fornece as sensibilidades (multiplicadores de Lagrange) em relação ao ponto crítico nas curvas P-V, Q-V e S-V.
 3. Selecionar de acordo com regras estabelecidas, e com base em aspectos econômicos (nível de tensão, tipos de dispositivos de controle, etc) e tempos de respostas necessários, os tipos de equipamentos de compensação de reativos a serem instalados no sistema.
 4. Utilizando todas as fontes reativas obtidas no item 3, com todas as restrições satisfeitas e os ajustes dos controles completamente estabelecidos, proceder à instalação efetiva de nova fonte reativa apenas em uma barra do sistema, a cada iteração deste procedimento.

A utilização destes dois sistemas especialistas é feita de modo iterativo até que a convergência seja obtida. O sistema IEEE30 é usado para ilustrar o método desenvolvido.

11. Y.T.Hsiao e outros[17]: O planejamento de reativos em sistemas de energia elétrica é formulado como um problema de otimização restrita, multiobjetivo e não diferenciável. As funções objetivos consideradas são:

- **Redução de Perdas:** Minimização de perdas ativas totais do sistema de transmissão:

$$\text{Min}C_1(x) = \sum_{k=1}^{nl} G_k(i, j)[V_i^2 + V_j^2 - 2 \times V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (3.1)$$

onde nl : número de linhas no sistema; $G_k(i, j)$: condutância da linha k conectada entre as barras i e j ; V_i : magnitude da tensão na barra i e δ_i : ângulo da tensão na barra i .

- Custo da Expansão de Fontes Reativas :

$$\text{Min}C_2(x) = \sum_{j=1}^{np} [C_v^p(z_j) + C_v^f(z_j)] \quad (3.2)$$

onde np : número máximo de barras candidatas à alocação de novas fontes; z_j : capacidade da fonte reativa na localização j ; C_v^p : custo variável da fonte reativa com capacidade z_j e C_v^f : custo fixo relacionado com a manutenção e instalação da fonte reativa na localização j .

- Desvio da Magnitude das Tensões de Barras:

$$\text{Min}C_3(x) = \sum_{l=1}^{nb} \left[\frac{V_l - V_l^{esp}}{\Delta V_l^{max}} \right]^2 \quad (3.3)$$

onde nb : número de barras do sistema; V_l : magnitude da tensão na barra l ; V_l^{esp} : magnitude especificada da tensão na barras l ; ΔV_l^{max} : máximo limite de desvio de tensão permitido na barra l .

- Desvio do Fluxo de Potência em Linhas de Transmissão:

$$\text{Min}C_4(x) = \sum_{m=1}^{nl} \left[\frac{P_m - P_m^{esp}}{\Delta P_m^{max}} \right]^2 \quad (3.4)$$

onde nl : número total de linhas no sistema, P_m : fluxo na linha m em MVA, P_m^{esp} : fluxo especificado na linha m que permite o desvio de seu limite; ΔP_m^{max} : é o limite da capacidade da linha m .

Consideram-se as seguintes restrições:

- Carga $F(x, u, z) = 0$
- Operacionais $G(x, u, z) = 0$
- Contingências $F_k(x^k, u^k, z^k) = 0$ e $G_k(x^k, u^k, z^k) \leq 0$ para $k = 1, \dots, nc$

A metodologia proposta para solução do problema consiste na técnica “simulated annealing” estendida em dois estágios:

Estágio 1: Encontrar um ponto global não inferior para o problema de otimização multiobjetivo usando a técnica “simulated annealing”. Seja (x^*, u^*, z^*) o ponto obtido neste estágio e $\epsilon_j^* = C(x^*, u^*, z^*)$, $j = 1, \dots, m$ e C_n escolhida para ser a função objetivo primária;

Estágio 2: A técnica “simulated annealing” para função com um único objetivo é aplicada ao seguinte problema oriundo da aplicação do método da restrição- ϵ :

$$\text{Min} C_N(x, u, z) \quad (3.5)$$

s.a.

$$x, u, z \in \Omega \quad (3.6)$$

$$C_i(x, u, z) \leq \epsilon_i^* + \Delta\epsilon_i \quad i = 1, \dots, m \quad i \neq N \quad (3.7)$$

$$F(x, u, z) = 0 \quad (3.8)$$

$$G(x, u, z) \leq 0 \quad (3.9)$$

onde $\Delta\epsilon_i > 0$ é uma tolerância atribuída pelo planejador.

São apresentados resultados das simulações para os sistemas IEEE30 e um sistema real de 358 barras.

Capítulo 4

Modelo Proposto

O modelo proposto neste trabalho para a solução do planejamento de reativos consiste basicamente de 6 fases:

- 1 - Definição do cenário de planejamento e determinação das barras candidatas à alocação de novas fontes pelo planejador;
- 2 - Inicialização – fluxo de potência (não linear) inicial e linearização via modelo CRIC¹;
- 3 - Solução inicial – Despacho reativo via PL-sucessiva e refinamento do conjunto de candidatas à alocação;
- 4 - Busca Heurística – Decompõe-se o problema linearizado em um subproblema de investimento e um de operação para ser resolvido via método de enumeração implícita. Nesta fase são levados em consideração os custos fixos de instalação de fontes reativas; porém as capacidades das fontes são consideradas contínuas (relaxa-se, quando for o caso, a característica discreta das fontes);
- 5 - Discretização da solução - a partir da solução obtida no passo 4, busca-se uma solução discreta (quando existirem fontes discretas) via método proposto por Balas-Martin. Caso uma solução discreta seja obtida, vai para a fase seguinte; caso contrário repetem-se os passos 3 e 4 anteriores considerando alocadas as fontes que foram discretizadas;
- 6 - Validação da solução – alocam-se as fontes no sistema e verifica-se através dos passos 2 e 3 se a solução obtida resolveu o problema proposto (não linear).

¹Calcul de Reseaux Implicitelement Couplés – proposto por Carpentier [21]

Voltar para definição de outro cenário. Se não resolveu, o problema deve ser redefinido – redefinir conjunto de candidatas, relaxar restrições (critérios), etc.

Neste Capítulo são detalhadas essas 6 fases.

4.1 Planejamento de Reativos Sob Vários Cenários

As necessidades reativas de um sistema podem diferir significativamente em função das condições de carga e/ou topologia da rede, e o planejamento de reativos deve ser executado considerando-se diferentes cenários de operação [1-5]. Neste trabalho aborda-se o planejamento de reativos sob condições de contingências no modo corretivo e vários níveis de carga (nominal, leve, pesada).

4.1.1 Contingências

A consideração de contingências no planejamento de reativos tem por objetivo dotar o sistema de capacidade de operar de forma viável caso ocorra um dos eventos considerados. Normalmente as contingências são consideradas de dois modos [3,5]:

- Modo Preventivo (pré-contingência): Neste caso, nenhum controle corretivo é permitido depois de falhas em equipamentos. São mantidos fixos (do caso base) os valores de “taps”, bancos reativos, geradores síncronos, tensões controladas por compensadores síncronos e estáticos, cuidando-se para que limites de geração reativa não sejam violados. As variáveis de operação do caso base e contingência são dependentes.
- Modo Corretivo (pós-contingência): Ações de controle corretivo são permitidas após as falhas em equipamentos. Valores de “taps”, controles de bancos reativos e geradores, compensadores síncronos, sistemas de controle estático de reativos e níveis de tensão podem ser livremente ajustados depois da ocorrência de uma contingência.

No modo preventivo deseja-se que o despacho reativo para o sistema pré-contingência seja adequado para satisfazer restrições de tensões e fluxos em linhas depois da ocorrência de qualquer uma das contingências que fazem parte de um conjunto pré

definido (“ranking”), sem que se efetue o redespacho de potência reativa no sistema. Embora o planejamento preventivo seja ideal, tal solução freqüentemente não existe [1,2], ou quando existe implica em altos investimentos.

No modo corretivo os controles de níveis de tensão e as fontes reativas são reajustados (redespacho) para assegurar restrições de fluxos em linhas e tensões depois da ocorrência de uma contingência. O objetivo do planejamento é instalar fontes reativas o suficiente para que, através dos ajustes das mesmas, seja possível atender as contingências que fazem parte de um conjunto pré estabelecido.

Neste trabalho consideram-se contingências no modo corretivo. Se a nova instalação reativa é adequada para o caso base e para as contingências mais severas do “ranking”, é razoável supor que para as contingências menos severas existe uma quantidade adequada de suporte reativo, sem que seja necessária a instalação de novas fontes, dispensando-se então a simulação de todas as contingências do “ranking”. As capacidades alocadas devido a simulação de qualquer cenário devem ser consideradas na simulação de cenários subseqüentes. As fontes contínuas podem ser consideradas utilizando-se as restrições de acoplamento (2.13) que existem entre os subproblemas de operação e investimento. As fontes discretas podem ser consideradas nas equações de balanço reativo (2.10), sendo inseridas na potência reativa consumida das respectivas barras onde ocorreram alocações.

4.1.2 Múltiplos Níveis de Carga

As condições de carga do sistema são as mais diversas, variando conforme o dia, mês, estação do ano. Em alguns sistemas estudos de várias condições de carga podem indicar a necessidade de um intervalo de compensação entre o indutivo e o capacitivo. Para o sistema operando sob condições de carga pesada, normalmente há necessidade de compensação de reativos capacitivos nas barras de baixa tensão que estão altamente carregadas e podem causar dificuldades com a qualidade do serviço prestado aos consumidores, restringir capacidade de transferência, diminuir margem de estabilidade e ocasionar problemas de instabilidade de tensão e perdas excessivas no sistema de transmissão. Outro problema comum é de altas tensões que podem ocorrer quando o sistema está operando sob carga leve. Este problema ocorre em sistemas com linhas de transmissão longas onde estão associadas altas capacitâncias. Nesses casos é comum a necessidade de cargas reativas na forma de compensação indutiva “shunt”.

O algoritmo desenvolvido permite a simulação do planejamento de reativos sob vários níveis de carga, obtendo-se os valores e a natureza das compensações reativas

necessárias em cada um deles.

4.2 Fluxo de Potência Inicial

Na simulação de cada cenário os dados para a primeira PL do processo iterativo de planejamento de reativos são gerados por um programa que calcula fluxo de potência (FP), com tratamento especial de barras de carga. As magnitudes das tensões são mantidas em uma faixa especificada permitindo, em geral, que se obtenha convergência e um melhor desempenho do processo de otimização. Os limites de geração de reativos são considerados abertos para as barras de tensão controlada (PV's e referência). Para as barras em que não há controle de tensão – barras PQ's – as magnitudes das tensões são recalculadas a cada iteração. Se a magnitude de uma tensão cai fora de seus limites, o tipo de barra é redefinido passando de PQ para PV, com a magnitude da tensão especificada no limite violado ($V_k^{esp} = V_k^{lim}$). Ao mesmo tempo, a injeção de reativos Q_k nessa barra é liberada, passando a ser recalculada a cada iteração. No final do fluxo de potência tem-se todas as tensões dentro dos limites especificados e possíveis necessidades de reativos estão nas injeções nodais (tanto em barras PV's quanto em barras originalmente PQ's).

4.3 O Conjunto de Barras Candidatas (\mathcal{I})

A solução do problema de planejamento de reativos está diretamente relacionada com o conjunto de barras candidatas; um conjunto mal elaborado pode levar a problemas infactíveis ou então a soluções não atraentes. É fácil concluir que quanto maior o conjunto de barras candidatas, maior a probabilidade de se obter uma melhor solução; todavia, um conjunto com muitas barras candidatas resulta em um número muito grande de casos a serem analisados. Daí, como será descrito a seguir, a adoção de heurísticas para reduzir, sempre que possível, o tamanho desse conjunto.

Neste trabalho o conjunto de candidatas (definido a priori) é, se necessário, inicialmente expandido, e em seguida é reduzido, quando possível, como descrito a seguir.

1. Inicialmente o conjunto é definido (pelo planejador) contendo um conjunto de barras no sistema onde se permite a alocação de novas fontes reativas;
2. Através da simulação da PL sucessiva verifica-se se é possível a obtenção de

uma solução viável com o conjunto definido no item anterior; se forem detectadas barras carentes de suporte reativo que não estão no conjunto, essas barras são incluídas no conjunto;

3. Em outra etapa utiliza-se uma heurística para tentar reduzir o número de barras do conjunto de candidatas \mathcal{I} definido nas etapas anteriores, com o objetivo de tornar a busca binária mais eficiente. Esta etapa está detalhada na seção 4.6.

4.4 Obtenção do Modelo Linearizado

Considere-se o problema geral de planejamento de reativos formulado no Capítulo 2. A injeção líquida de potência reativa em uma barra qualquer pertencente ao conjunto \mathcal{I} é composta da potência reativa “gerada” pelas fontes existentes na barra (consideradas neste trabalho como as capacidades de geração de reativos de máquinas síncronas, compensadores síncronos e estáticos), e de outras fontes que podem ser alocadas à essa barra (bancos de reatores e capacitores “shunt”, compensadores síncronos ou estáticos), ou seja:

$$Q_i = Q_i^{carga} + Q_{Gi} + Q_{Ai} \quad i \in \mathcal{I} \quad (4.1)$$

Q_i^{carga} : potência reativa especificada (carga) na barra i ;

Q_{Gi}, Q_{Ai} : potências reativas gerada e alocada

O valor Q_i^{carga} é fixo (especificado) e, portanto, pode ser levado em consideração de maneira indireta no processo de linearização. O termo Q_{Ai} representa as variáveis de investimento y_i da formulação geral que são particionadas em indutores (q_{ri}) e capacitores (q_{ci}) discretos ou contínuos, com estrutura de custos igual à das Figuras 2-1 e 2-2. Decompondo a parcela referente a Q_{Ai} em indutores e capacitores a equação (4.1) é escrita como:

$$Q_i = Q_i^{carga} + Q_{Gi} + (q_{ci} - q_{ri}) + (q_{ci}^f - q_{ri}^f) \quad i \in \mathcal{I} \quad (4.2)$$

q_{ci}^f, q_{ri}^f : fontes reativas (capacitivas e indutivas respectivamente) fixas ou bancos existentes no sistema e/ou alocadas devido a simulação cenários previamente considerados.

Uma formulação mais rigorosa considera a potência reativa gerada pelos bancos reativos – capacitores e indutores “shunt” na equação (4.2), dada pela susceptância da fonte multiplicada pelo quadrado da magnitude da tensão. Na formulação desenvolvida neste trabalho, assumem-se que esses valores são fixos e dados pela capacidade do banco reativo (MVAR ou pu).

Considere-se que exista um ponto inicial de operação $(V^\nu, \theta^\nu, T^\nu)$ e que há possibilidade de se perturbar a potência reativa nas barras do conjunto \mathcal{I} de um valor ΔQ_i , ou seja:

$$Q_i^{\nu+1} = Q_i^\nu + \Delta Q_i^\nu \quad (4.3)$$

Esta perturbação será responsável pela alteração nos valores de todas as variáveis dependentes $(P_s^{\nu+1}, \theta_k^{\nu+1}, V_k^{\nu+1}, T_k^{\nu+1})$ onde:

$$\theta_k^{\nu+1} = \theta_k^\nu + \Delta \theta_k^\nu \quad (4.4)$$

$$V^{\nu+1} = V^\nu + \Delta V^\nu \quad (4.5)$$

$$T^{\nu+1} = T^\nu + \Delta T^\nu \quad (4.6)$$

$$P_s^{\nu+1} = P_s^\nu + \Delta P_s^\nu(\theta^{\nu+1}, V^{\nu+1}, T^{\nu+1}) \quad (4.7)$$

Os valores de $\theta_k^{\nu+1}$, $V^{\nu+1}$ e $T^{\nu+1}$ que são obtidos em função de $(\Delta Q_i)^\nu$, dependem fundamentalmente da formulação adotada para levar em conta as restrições de igualdade. Na formulação que pode ser considerada rigorosa (sem desprezar sensibilidades), exige-se que no ponto $(\theta_k^{\nu+1}, V^{\nu+1}, T^{\nu+1})$ todas as restrições de igualdade (2.2) e (2.3) da formulação geral sejam satisfeitas, ou seja, exige-se que:

$$P_{Gk} - P_{Lk} - P_k(\theta^{\nu+1}, V^{\nu+1}, T^{\nu+1}) = 0 \quad (4.8)$$

$$Q_{GJ} - Q_{LJ} - Q_J(\theta^{\nu+1}, V^{\nu+1}, T^{\nu+1}) = 0 \quad (4.9)$$

onde:

J: barras que não pertencem ao conjunto de candidatas \mathcal{I}

Considerando que:

$$P_k(\theta^{\nu+1}, V^{\nu+1}, T^{\nu+1}) = P_k(\theta^\nu, V^\nu, T^\nu) + \Delta P_k \quad (4.10)$$

$$Q_J(\theta^{\nu+1}, V^{\nu+1}, T^{\nu+1}) = Q_J(\theta^\nu, V^\nu, T^\nu) + \Delta Q_k \quad (4.11)$$

e que:

$$\Delta P = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \Delta \theta + \left[\frac{\partial P}{\partial V} \right] \Delta V + \left[\frac{\partial P}{\partial T} \right] \Delta T \quad (4.12)$$

$$\Delta Q = \left[\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right] \Delta \theta + \left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right] \Delta V + \left[\frac{\partial Q}{\partial T} \right] \Delta T \quad (4.13)$$

as restrições não lineares (2.2) e (2.3) são representadas pelo seguinte modelo linear:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial T} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta T \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta P_s \\ \dots\dots\dots \\ 0 \\ \hline 0 \\ \dots\dots\dots \\ \Delta q_c - \Delta q_r + \Delta q_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \hline 0 \\ \dots\dots\dots \\ \Delta q_c^f - \Delta q_r^f \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$\Delta q_c^f, \Delta q_r^f$: Valores fixos de bancos reativos, respectivamente capacitivo e indutivo, alocados nas barras.

onde foi considerado (sem perda de generalidade) um arranjo de equações tal que a primeira corresponde à barra de referência e as últimas às barras do conjunto \mathcal{I} (que têm potência reativa como variáveis de controle).

A partir da decomposição da injeção de potência reativa (4.2) e os custos associados à instalação de novas fontes, a função objetivo (2.1) pode ser escrita como:

$$fo = \sum_{i \in \mathcal{I}} [(d_{ci} + c_{ci}q_{ci}) + (d_{ri} + c_{ri}q_{ri})]r_i \quad (4.15)$$

d_{ci}, d_{ri} : custos fixos associados à alocação de fontes reativas capacitivas e indutivas;

c_{ci}, c_{ri} : custos variáveis,

r_i : variável binária de decisão 0/1.

As restrições de igualdade linearizadas (4.14), sensibilidades entre potências ativa e reativa e variáveis do problema, apresentam o inconveniente de aumentarem o número de restrições e variáveis a serem tratadas na solução do problema. Visando um algoritmo mais eficiente, com as sensibilidades entre as variáveis envolvidas no problema sendo expressas através do menor número possível de equações e da forma mais precisa possível, adotou-se neste trabalho a matriz “jacobiano reativa” $[L_C]$ [21] desenvolvida por J.L.Carpentier. Essa matriz é formada por sensibilidades entre potência reativa e tensão (magnitude) considerando que os fluxos de potência ativa através dos bipolos do sistema são constantes durante a iteração reativa. Esta situação é um caso particular do que se deseja no planejamento de reativos que é manter inalteradas as injeções de potência ativa do sistema ($\Delta P = 0$), quando a parte reativa (tensões ou injeções de potência reativa) sofre alterações (ver Apêndice C). O resultado que se obtém da aplicação destes conceitos é a construção de um jacobiano genérico das injeções reativas em termos dos módulos das tensões e dos “taps” dos transformadores com um grau de esparsidade igual ao dos métodos desacoplados tradicionais.

Adotando-se a matriz L_C como sensibilidade e não considerando os limites na variação dos ângulos da tensões ($\Delta\theta$) e da potência ativa da barra de balanço (ΔP_s), o problema de planejamento de reativos linearizado pode ser escrito como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \sum_{i \in \mathcal{I}} [(d_{ci} + c_{ci}\Delta q_{ci})r_i + (d_{ri} + c_{ri}\Delta q_{ri})r_i] \\
 & \text{s.a.} \\
 & [L_C] \begin{bmatrix} \Delta V \\ \dots \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta q_{cl} - \Delta q_{rl} + \Delta q_{pl} + (\Delta q_{cl}^f - \Delta q_{rl}^f) \\ \dots \\ \Delta q_{ck} - \Delta q_{rk} + \Delta q_{pk} + (\Delta q_{ck}^f - \Delta q_{rk}^f) \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} l \in \mathcal{L} \\ \\ k \in \mathcal{K} \\ \\ \end{matrix} \\
 & -\infty \leq \Delta\theta \leq \infty \\
 & -\infty \leq \Delta P_s \leq \infty \\
 & V^{min} - V \leq \Delta V \leq V^{max} - V \\
 & T^{min} - T \leq \Delta T \leq T^{max} - T \\
 & (Q_G^{min} - q_{rv}^0) - q_p \leq \Delta q_p \leq (Q_G^{max} + q_{cv}^0) - q_p \\
 & -q_{rk}r \leq \Delta q_{rk} \leq (q_{rk}^{max} - q_{rk})r \\
 & -q_{ck}r \leq \Delta q_{ck} \leq (q_{ck}^{max} - q_{ck})r \\
 & \Delta q_{ri}, \Delta q_{cl} \in \{n \times S\} \quad n = 0, 1, \dots, N_s \quad l \in \mathcal{L} \\
 & \mathcal{I} = \mathcal{K} \cup \mathcal{L}
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

onde:

ΔP_s : Variação da injeção de potência ativa na barra de referência.

O problema representado pelo conjunto de equações (4.16) é um problema linear inteiro misto (PLIM) onde estão envolvidas variáveis reais, inteiras e discretas.

4.5 Solução do Problema de Despacho Reativo

Uma das etapas do procedimento de solução, como mencionado no início deste Capítulo, consiste em resolver, para cada cenário de estudo, um problema de despacho reativo, obtendo-se as seguintes informações:

- Regiões do sistema onde há necessidade de reforçar o suporte reativo;
- Verificar se o conjunto de barras candidatas previamente selecionado pelo planejador permite solução viável;
- Ponto de operação obtido após o despacho ótimo de reativos e o ajuste dos controles de tensão existentes no sistema.

A etapa seguinte consiste da solução, caso necessária, do problema de investimentos reativos – onde e quanto alocar.

Seja o problema (4.16), alterado com a troca das variáveis de investimento reativas $(\Delta q_{ci}, \Delta q_{ri})$ $i \in \mathcal{I}$, por variáveis de folga contínuas $(\Delta y_{1i}, \Delta y_{2i})$ e, ainda, considerando como função objetivo a minimização da soma dessas variáveis. O problema de PL que se origina dessas alterações é um problema relaxado (em relação ao original) e se torna:

$$\begin{aligned} \text{Min } w &= \sum_{i \in \mathcal{I}} (\Delta y_{1i} + \Delta y_{2i}) \\ \text{s.a.} & \\ [L_C] \begin{bmatrix} \Delta V \\ \dots \\ \Delta T \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \Delta q_p + \Delta y_{1l} - \Delta y_{2l} + (q_{cl}^f - q_{rl}^f) \\ \dots \\ \Delta q_p + \Delta y_{1k} - \Delta y_{2k} + (q_{ck}^f - q_{rk}^f) \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
-\infty &\leq \Delta\theta \leq \infty \\
-\infty &\leq \Delta P_s \leq \infty \\
V^{min} - V &\leq \Delta V \leq V^{max} - V \\
T^{min} - T &\leq \Delta T \leq T^{max} - T \\
(Q_G^{min} - q_{rv}^0) - q_p &\leq \Delta q_p \leq (Q_G^{max} + q_{cv}^0) - q_p \\
\Delta y_{1i} &\geq 0 \quad \Delta y_{2i} \geq 0 \\
\mathcal{I} &= \mathcal{K} \cup \mathcal{L}
\end{aligned} \tag{4.17}$$

No problema (4.17) as variáveis de folga $(\Delta y_{1i}, \Delta y_{2i})$ representam injeções reativas fictícias; se a razão de uma possível solução inviável do problema for falta de suporte reativo, essas injeções permitirão a obtenção de uma solução [3,4,5]. Além disso, a solução de (4.17) fornece informações, caso existam, das regiões com falta de suporte de reativos, variáveis duais ótimas, e informações que permitem uma alteração do conjunto de candidatas, quando necessário.

- $w < tol$ indica que a capacidade instalada de suporte de reativos é suficiente para manter o problema de operação viável,
- $w > tol$ devem ser instaladas novas fontes reativas no sistema.

Outro aspecto interessante na solução do despacho reativo refere-se às barras onde alocar variáveis de folga $(\Delta y_{1i}, \Delta y_{2i})$ - elas podem ser alocadas em todas as barras do sistema ou apenas nas barras candidatas à expansão de fontes reativas. Durante o desenvolvimento deste trabalho verificou-se que sempre que possível é conveniente restringir o uso dessas variáveis apenas às barras candidatas, uma vez que isto facilita as próximas etapas de solução.

Para resolver (4.17) foi utilizada uma seqüência de cálculos de fluxo de potência (não linear) e programação linear, o que na literatura é denominada *Programação Linear Sucessiva* [24,25]. Devido ao uso da PL para resolver o problema reativo podem surgir problemas de oscilações devido a linearização das restrições de igualdade [18,19]. A seguir discutem-se alguns aspectos envolvidos na solução do PL sucessivo e o algoritmo utilizado para sua solução.

4.5.1 Programação linear sucessiva

As sensibilidades e linearizações adotadas para representação das restrições de igualdade (equações do fluxo de potência) geram as maiores dificuldades na PL sucessiva.

O problema de sensibilidade foi resolvido de maneira satisfatória através do modelo "CRIC". O problema de linearização, também relacionado com as condições de convexidade do problema de planejamento de reativos, foi abordado em [18,19] e uma solução adequada ao mesmo é apresentada nesses trabalhos, que não consideram os "taps" como variáveis de controle. Considerando os "taps" como dispositivos de controle e usando a heurística proposta em [18,19], os problemas de convergência para o PL sucessivo se agravam e foi necessário um ajuste da heurística para tratar as oscilações que ocorrem durante a solução da PL sucessiva. Esse ajuste está ilustrado no algoritmo a seguir. O diagrama de blocos detalhado deste algoritmo encontra-se na Figura D.1 (Apêndice D).

Algoritmo - PL SUCESSIVA

- i. Fazer $\nu = 0$, $\mu = 0$. Calcular fluxo de potência especial obtendo o ponto X^ν ;
- ii. Calcular os limites das variáveis da PL, a matriz de sensibilidade $[L_C]$ e o custo dos reativos alocados ($CUSTO^\nu$);
- iii. Resolver PL primal. Se a solução da PL for inviável o problema deve ser redefinido, caso contrário ir para iv;
- iv. Atualizar estado $(V^{\nu+1}, T^{\nu+1})$ e processar FP convencional. Consideram-se barras PV's as barras do conjunto formado pela união dos conjuntos \mathcal{I} e as barras PV's definidas na entrada de dados;
- v. Calcular o novo custo dos reativos alocados ($CUSTO^{\nu+1}$). Se $CUSTO^{\nu+1} < CUSTO^\nu$ ir para viii, caso contrário fazer $\mu = 1$ para indicar que ocorreu a primeira oscilação do custo;
- vi. Baseado nas variações de estado dadas pela PL do passo iii, executar, se possível, uma busca para encontrar solução com custo menor que do passo anterior. Se esta solução não for encontrada, adotar o estado do passo iv;
- vii. Limitar excursão máxima das variáveis da PL;
- viii. Testar convergência por algum critério previamente adotado. Caso o critério não esteja sendo obedecido, fazer $\nu = \nu + 1$ e voltar para ii, caso contrário, ir para ix,
- ix. Guardar estado final PL sucessiva (V^0, θ^0, T^0) .

FIM da PL Sucessiva.

4.6 Refinamento do Conjunto de Barras Candidatas

Esta etapa consiste em reduzir, se necessário e se possível, o conjunto de barras candidatas definido na etapa anterior, com o objetivo de reduzir o esforço computacional na busca binária e evitar explosão combinatória. Para esse fim são propostas duas heurísticas:

- a. Heurística de Cooper e Drebes[23] simplificada - heurística A;
- b. Heurística baseada na solução final do sistema – estado fornecido da PL sucessiva e nos custos fixos relacionados com a alocação de novas fontes - heurística B.

Com o desenvolvimento da versão paralela do algoritmo que será apresentada no próximo Capítulo, este fato pode ser melhor explorado e constatou-se também a eficiência das heurísticas A e B.

4.6.1 Heurística A

Este algoritmo heurístico para solução aproximada do problema de carga fixa é uma versão simplificada do encontrado na referência [23]. A partir da solução ótima fornecida pela PL sucessiva, o algoritmo simplificado consiste dos seguintes passos:

- i. Calcular os novos valores de custos para as variáveis de investimento $y_i = (q_{ci}, q_{ri})$, incluindo nos mesmos a influência dos custos fixos da seguinte forma:

$$\hat{c}_i = c_i + C_{fixo_i}/y_i \quad se \quad y_i > 0 \quad i \in \mathcal{I} \quad (4.18)$$

- \hat{c}_i : Novo valor do custo variável,
 - C_{fixo_i} : Custo fixo;
 - y_i : fonte reativa alocada.
- ii. Com os novos valores de custos calculados em i, resolver um novo PL. Esse procedimento consiste em executar análise de sensibilidade do PL devido alteração dos custos, adotando a última base ótima obtida até este passo;

iii. Calcular o total dos novos custos fixos e variáveis:

$$Z_1 = \sum_{i \in \mathcal{I}} (c_{ci}q_{ci} + c_{ri}q_{ri}) \quad (4.19)$$

$$Z_2 = \sum_{i \in \mathcal{I}} (C_{fixo_i}) \quad \text{se } y_i > 0 \quad (4.20)$$

- Z_1 : valor total dos custos variáveis;
- Z_2 : idem , custos fixos.

iv. A convergência adotada para o algoritmo consiste em verificar dois critérios:

- a. Se o número de iterações que o simplex leva para achar uma solução ótima for menor que o número de barras do sistema que está sendo estudado multiplicado por um fator ξ calibrado pelo planejador, ir para v;
- b. Se os valores de Z_1 e Z_2 entre uma alteração de custo e outra não sofrem variações significativas de seus valores, ir para v;

Se nenhum destes critérios puder ser atendido voltar para i;

v Formar o subconjunto \mathcal{I}' das barras que serão consideradas na solução do subproblema de investimento, de forma tal que farão parte do mesmo todas as barras que tiveram capacidades reativas alocadas $y_i = (q_{ci}, q_{ri}) \quad i \in \mathcal{I}$

Na Figura 4.1 está o diagrama de blocos simplificado do algoritmo.

4.6.2 Heurística B

A análise de factibilidade através da PL sucessiva normalmente fornece um conjunto menor de barras que o definido pelo planejador, onde são alocadas novas fontes reativas. Nessa etapa do procedimento de solução ainda não foram considerados aspectos econômicos referentes aos custos fixos associados com a alocação de novas fontes

Após a obtenção da solução ótima através da PL sucessiva, o procedimento heurístico para obtenção de \mathcal{I} consiste em executar os seguintes passos:

- i. Definir o número de barras que farão parte de um subconjunto $\mathcal{I}' (\mathcal{I}' \subseteq \mathcal{I})$, usando um dos seguintes critérios:

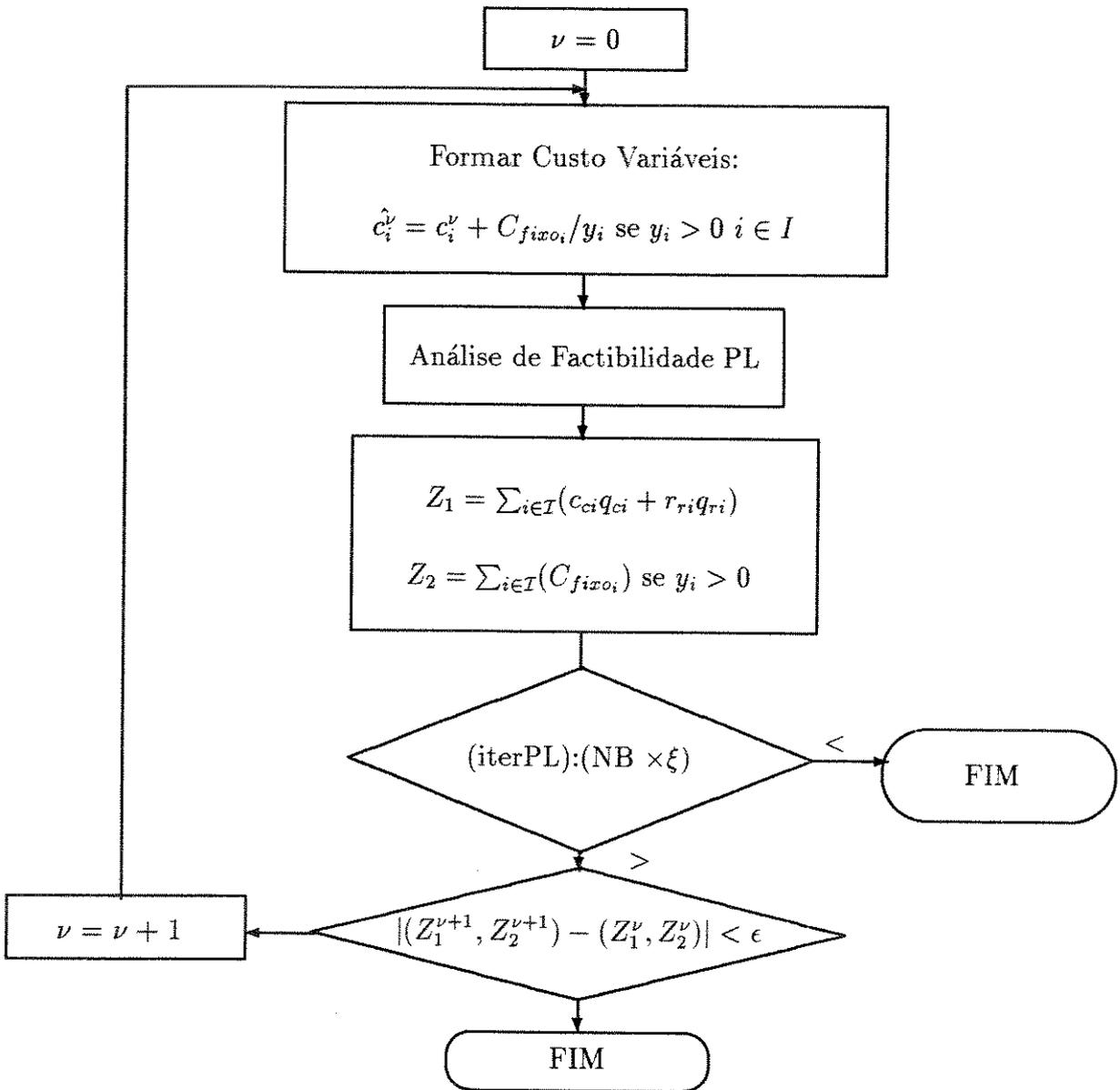


Figura 4.1: Diagrama de blocos - HEURÍSTICA A

- a - Quantidade mínima de barras que garanta factibilidade para o problema de planejamento;
- b - Conjunto formado pela união do conjunto de barras obtido no item anterior e outras barras $i, i \in \mathcal{I}$. O número máximo de barras que faz parte deste conjunto ($N_{\mathcal{I}'}^2$) é determinado pelo planejador.

Definir um contador - k que indica a quantidade de barras que estão contidas em \mathcal{I}' . Fazer $k = 0$;

- ii. Colocar as barras onde ocorreram alocações em ordem decrescente, segundo a relação:

$$RL_i = Q_{alocado_i} / C_{fixo_i} \quad (4.21)$$

onde $Q_{alocado_i}$ e C_{fixo_i} são, respectivamente, potência reativa alocada pelo PL e o custo fixo associado à alocação de fontes reativas na i -ésima barra $i \in \mathcal{I}$;

- iv. Escolher a barra que apresenta maior relação RL_i e que ainda não faz parte do conjunto \mathcal{I}' . Acrescentá-la a \mathcal{I}' e incrementar o contador $k = k + 1$;
- v. Se o subconjunto \mathcal{I}' atende os critérios (a) ou (b) do passo i escolhidos a critério do planejador, vá para vi, caso contrário formar novo vetor custo da PL com os seguintes valores:

- Barras pertencentes ao subconjunto \mathcal{I}' custos normais;
- Barras não pertencentes a \mathcal{I}' custos artificiais elevados;

Resolver o problema de PL com este novo valor do vetor custo e ir para ii;

- vi. Retirar do conjunto de barras candidatas \mathcal{I}' , uma por vez, as barras com coeficientes elevados de custos fixos, e verificar a factibilidade. Se com a retirada dessas barras o problema continuar viável, as mesmas deixam de fazer parte de \mathcal{I}' .

Um diagrama de blocos ilustrando esse procedimento encontra-se na figura 4.2.

4.7 Solução do Problema de Investimento

Seja o problema (4.16) alterado pela relaxação das restrições de discretização das variáveis $(\Delta q_{rl}, \Delta q_{cl})$ $l \in \mathcal{L}$, referenciado a partir daqui como (4.16) relaxado. O

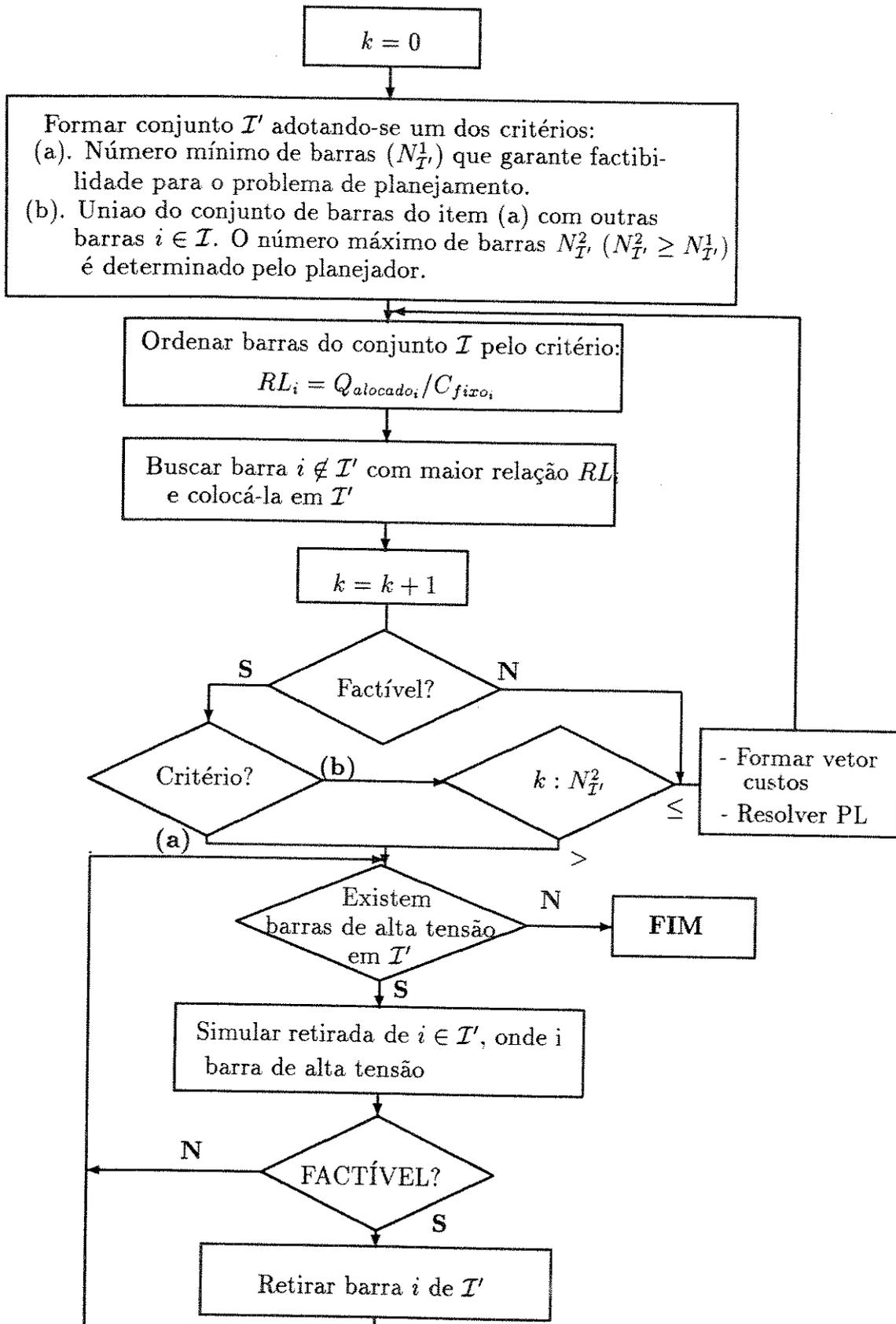


Figura 4.2: Diagrama de blocos - HEURÍSTICA B

problema resultante dessa relaxação é um problema clássico de programação linear mista com variáveis reais e binárias, referenciado na literatura como “problema de carga fixa”. Este tipo de problema está presente em estudos de planejamento onde há uma decisão básica: *investir* ou *não investir*, *construir* ou *não construir*.

Algoritmos tipo “branch-and-bound”, decomposição de Benders, entre outros, são utilizados para resolver este tipo de problema de otimização. Podem ser exploradas características especiais de cada problema de maneira que algoritmos especializados eficientes são desenvolvidos para resolvê-lo. Tais algoritmos podem ser classificados como métodos exatos [22] e métodos aproximados [23], sendo ainda possível uma combinação desses métodos para obtenção de um algoritmo que resolva com eficiência e boa precisão um dado problema. O enfoque adotado neste trabalho se encaixa nesta última classe de métodos.

A partir da definição do conjunto de candidatas à alocação de novas fontes e o refinamento das mesmas inicia-se a solução do problema de investimento que utiliza técnica de enumeração implícita [26,27].

4.7.1 Busca Binária

Uma possível forma de resolver (4.16) relaxado, seria enumerar todas as soluções possíveis e adotar aquela de menor custo (busca exaustiva [26,27]). Definido um conjunto de barras candidatas à alocação de novas fontes reativas, cada solução corresponde a uma proposta de investimento onde a decisão de alocar ou não reativos em cada uma destas barras já foi tomada. Para representar esta proposta de investimento, define-se uma palavra (“word”) com número de “bits” igual ao número de barras candidatas. Nessa palavra o valor do “bit” (1 ou 0) em determinada posição define se a barra correspondente àquela posição é ou não candidata à alocação de novas fontes. Neste trabalho esta palavra será denominada *padrão*.

Esse tipo de algoritmo, para ser atrativo computacionalmente, precisa ser refinado de forma tal que propostas não promissoras sejam descartadas sem que seja necessário testá-las – técnicas de enumeração implícita.

Na construção de algoritmos dedicados à solução de PLIM, consideram-se os princípios básicos: *separação*, *relaxação* e *sondagem* [26], descritos a seguir.

- *Separação*: Para qualquer problema de otimização (P), $F(P)$ indica o seu conjunto de soluções viáveis. O problema (P) é dito ser separável nos subproblemas $(P_1), \dots, (P_q)$ se as seguintes condições são atendidas:

- i. Toda solução viável de (P) é uma solução viável de exatamente um dos subproblemas $(P_1), \dots, (P_q)$;
- ii. Uma solução viável de qualquer um dos subproblemas $(P_1), \dots, (P_q)$ é uma solução viável de P .

Estas condições asseguram que $F(P_1), \dots, F(P_q)$ são partições de $F(P)$. Os subproblemas $(P_1), \dots, (P_q)$ são chamados *descendentes* de (P) . A criação de descendentes dos descendentes de (P) é equivalente ao refinamento da partição de $F(P)$.

- *Relaxação*: Qualquer problema de otimização restrita (P) pode ser relaxado perdendo parte de alguma de suas restrições, resultando em um novo problema (P_R) . Na seleção de tipos de alternativas de relaxação para um dado problema, há dois critérios principais a serem considerados:

1. Deseja-se que o problema relaxado (P_R) seja sensivelmente mais fácil de resolver que o problema original (P) ;
2. Deseja-se que a solução de (P_R) conduza à solução de (P) , ou na pior das hipóteses que o valor ótimo de (P_R) esteja o mais próximo possível do valor ótimo de (P) .

O tipo mais comum de relaxação para um programa inteiro é a perda de todas as exigências de integralidade sobre as variáveis. O PL resultante é freqüentemente um excelente compromisso entre esses dois critérios. A exigência para (P_R) ser uma relaxação válida de (P) é que $F(P) \subseteq F(P_R)$, ou seja, o conjunto de soluções factíveis de P , $F(P)$, esteja contido ou seja igual ao conjunto de soluções factíveis de P_R , $F(P_R)$. Dessa definição implica as seguintes relações, onde (P) é assumido como um problema de minimização:

- i. Se (P_R) não tem solução viável, então (P) também é inviável;
- ii. O valor mínimo de (P) não é menor que o valor mínimo de (P_R) ;
- iii. Se uma solução ótima de (P_R) é viável em (P) , então ela é uma solução ótima de (P) .

Essas relações são triviais e podem ser constatadas analisando-se as características dos problemas de otimização em geral.

- *Sondagem*: Devido ao critério de separação, uma seqüência de problemas candidatos (CP) tem que ser examinada e quando algum deles não puder ser resolvido o mesmo tem que ser separado e seus descendentes devem ser analisados. No procedimento de solução de (P) denomina-se *solução incumbente* a

melhor solução viável encontrada até então. A análise das soluções dos problemas candidatos corresponde ao critério de sondagem, que permite concluir se a região viável $F(CP)$ associada a um problema candidato (CP) pode conter a solução ótima de (P) e em caso afirmativo encontrá-la. Se $F(CP)$ contém uma solução viável melhor que a incumbente, podendo inclusive ser a ótima, a mesma passa a ocupar o lugar de incumbente. Dessa maneira (CP) é completamente estudado e pode ser descartado sem separação adicional. A seguir estão resumidos os principais critérios de sondagem, onde se considera que todos os problemas são de minimização, $v(\cdot)$ indica o valor ótimo do problema e z^* o valor da solução incumbente ($z^* = \infty$ se uma solução viável de (P) não foi ainda encontrada). O problema candidato (CP) está sondado se algum dos critérios listados a seguir for satisfeito:

- i. Análise de (CP_R) - relaxação particular do problema candidato revela que (CP) não tem solução viável, ou seja, $F(CP_R) = \emptyset$;
- ii. Análise de (CP_R) revela que (CP) não tem solução viável melhor que a incumbente, ou seja, $v(CP_R) \geq z^*$;
- iii. Análise de (CP_R) indica solução ótima viável. Então esta solução deve ser ótima para (CP), logo (CP) está sondado. Como (CP) é um subproblema de (P), então esta solução é também viável em (P), e se seu valor é menor que z^* , ela passa a ser a nova solução incumbente.

A busca utilizada neste trabalho considera as particularidades do problema reativo evitando analisar casos que levariam a soluções inviáveis. Aspectos relacionados com custos fixos, avaliação de problemas de áreas onde se faz necessária a alocação de novas fontes, são usados para melhorar o desempenho da busca.

Como exemplo, seja o sistema de três barras apresentado no Capítulo 2. A estrutura da árvore ilustrando todas as possíveis propostas de investimentos está mostrada na Figura (4.3). Considerando que a ordem das barras seja (1, 3, 2) a linha pontilhada indica o caminho de custo mínimo. Cada nó no último nível da árvore corresponde a um possível plano de investimento. Uma estrutura geral de busca está representada na Figura 4.4.

No algoritmo desenvolvido inicia-se a busca de custo mínimo, a partir do primeiro nó no último nível da árvore $[(1, 1, \dots, 1, 1)]$, onde se permite a alocação de reativos em todas as barras do conjunto de candidatas, representando esta solução a de maior custo fixo (na realidade essa solução já está disponível, obtida durante o processo de redução do número de candidatas).

Analisando-se o problema reativo, verificou-se ser este bastante sensível a alterações dos valores de custos. Aumentando-se gradativamente estes custos em uma

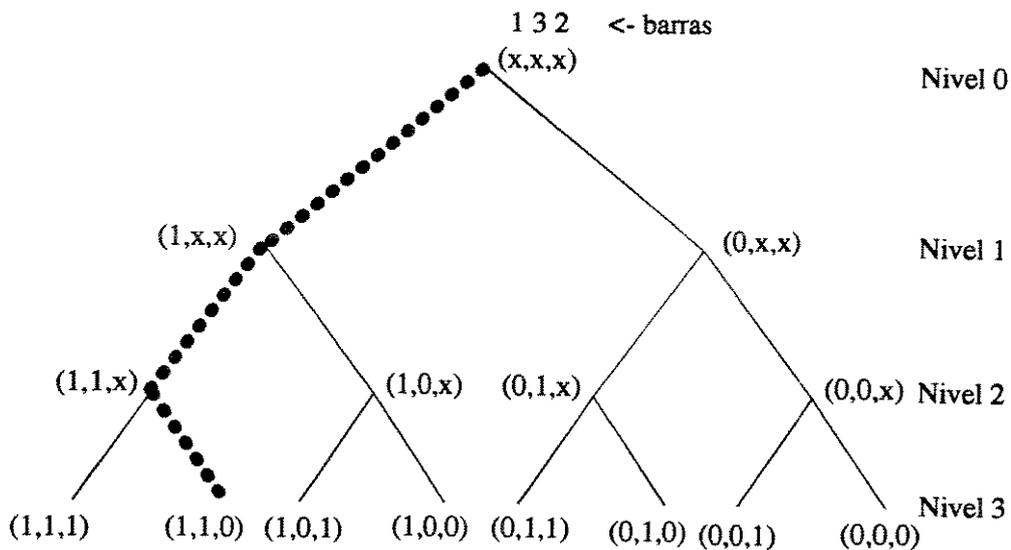


Figura 4.3: *Árvore de de decisão para o sistema exemplo de 3 barras*
 1: A barra está disponível para alocação de novas fontes
 0: Não é permitido alocar
 x: Não foi ainda tomada decisão de alocar ou não

dada barra do sistema, a PL só continuará alocando fontes nessa barra se isto for estritamente necessário. Na implementação da busca binária essa característica foi explorada:

- Alteram-se artificialmente os custos das fontes para as barras onde não pode haver alocação;
- Notar que a solução do problema de PL definido acima pode ser obtido a partir da solução já disponível em que são permitidas alocações em todas as barras candidatas. São necessárias, normalmente, apenas algumas iterações de PL para resolver o novo problema.
- A verificação da viabilidade da proposta de investimento é feita simplesmente verificando o custo. Caso seja “anormal”, então houve alocação em barras onde não era permitido, significando que a proposta é *inviável*

4.7.2 Algoritmo de Busca Binária

- i. Iniciar com a solução ótima da PL caso base onde se permite a alocação de

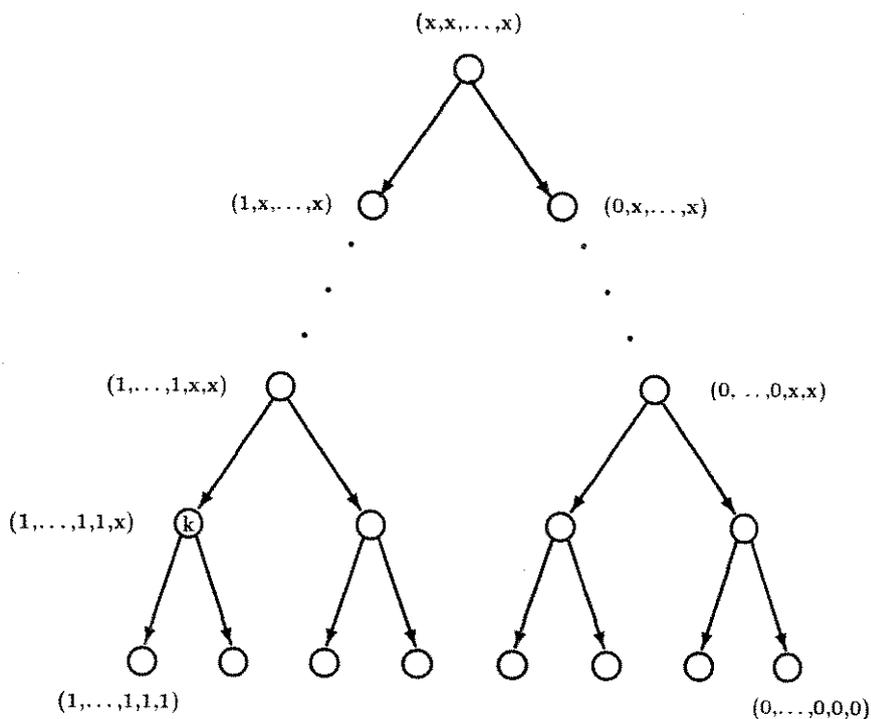


Figura 4.4: Busca em uma árvore de decisão genérica

reativos em todas as barras do conjunto \mathcal{I}' e gerar a lista;

- ii. Verificar se existem casos na lista. Se a lista estiver vazia terminou o processo de busca, caso contrário retirar última proposta da lista;
- iii. Formação do vetor custo das variáveis de investimento para a combinação que será analisada, adotando-se o seguinte procedimento:

Nas barras $i (i \in \mathcal{I})$, onde o padrão tem valor 0 atribui-se custo variável elevado,

Nas barras $i (i \in \mathcal{I})$, onde o padrão tem valor 1 assumem-se para os custos variáveis de investimento o valor fornecido pelo arquivo de dados.

- iv. Considerar estado convergido PL sucessiva (V^0, θ^0, T^0) e resolver PL primal e verificar barras onde ocorreu alocação de fontes reativas. Verificar se proposta de investimento é viável ou inviável;

- v. Proposta inviável ir para ii, caso contrário:

Calcular custos fixos da combinação analisada;

Calcular valor da função objetivo;

Gerar descendentes deste caso;

Comparar custo total da combinação que acabou de ser analisada com o custo da solução incumbente z^* . Se este custo for menor que z^* , então o mesmo passa a ser incumbente juntamente com o padrão.

Voltar para ii

Este algoritmo está ilustrado no diagrama de blocos da figura 4.5.

4.7.3 Redução da Árvore

Em algoritmos de enumeração o número de casos a serem analisados é função exponencial do número de barras candidatas; em um problema com n candidatas tem-se 2^n propostas de investimentos. Por outro lado, ao utilizar técnicas para reduzir o número de propostas a serem examinadas, deve-se evitar o descarte da solução ótima.

Ao iniciar a solução do problema de busca binária tem-se um problema viável, onde todas as decisões sobre o conjunto inicial de barras candidatas já foram tomadas. Dessa forma, a redução da árvore é efetuada com base na análise da viabilidade de cada solução obtida. Se ao analisar um nó qualquer da árvore, concluir-se que a proposta de investimento referente ao mesmo é inviável, então todo os os descendentes desse nó são também inviáveis e não precisam ser analisados, eliminando-se um conjunto completo de soluções (elimina-se um ramo da árvore).

Uma outra regra que pode ser utilizada para diminuir o número de casos analisados, é construída em função dos custos. Uma determinada proposta de investimento só será simulada pela rotina de otimização se o *custo fixo* associado a ela for *menor* que a *solução incumbente* encontrada até então. Este critério pode ser eficiente, mas isto depende da forma de como as propostas de investimentos são geradas.

Outra forma de melhorar a eficiência do método de busca é a utilização das heurísticas para fazer o refinamento do conjunto de barras candidatas, que foram apresentadas na seção anterior. Pode-se ainda implementar critérios baseados na variação da solução incumbente para reduzir as dimensões da árvore de decisão.

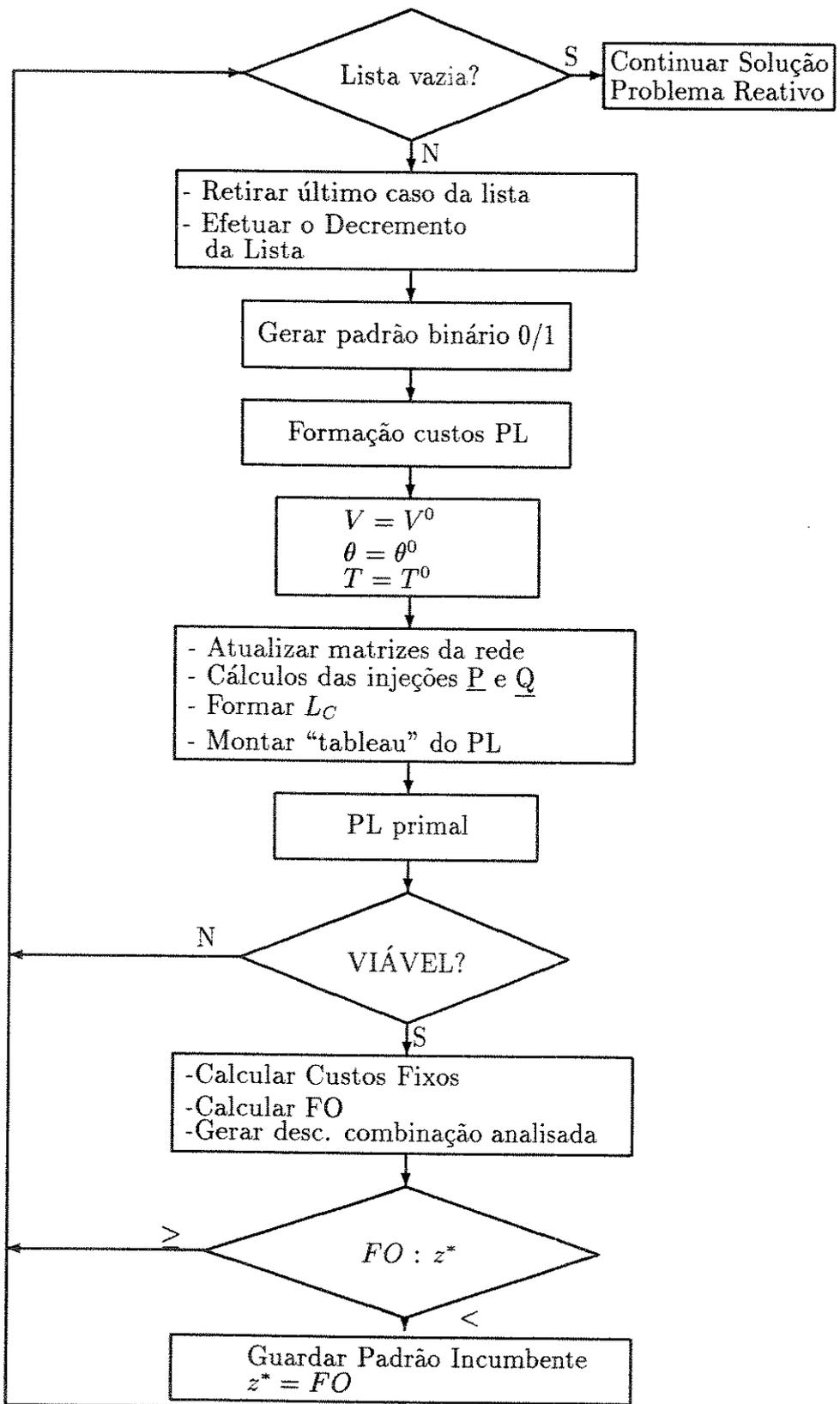


Figura 4.5: Busca heurística da solução de custo mínimo total - SOLUÇÃO INCUMBENTE

4.8 Discretização

No problema formulado (2.1-2.8) existem variáveis binárias, contínuas e discretas e uma solução exata do mesmo levaria a um esforço computacional de tal tamanho que inviabilizaria a aplicação do modelo. Dessa forma, na solução do problema de investimento através do algoritmo de busca binária as restrições sobre as variáveis $y_l, l \in \mathcal{L}$ foram relaxadas e, uma vez obtida a solução de investimento mínimo pela busca binária, a natureza discreta destas variáveis é considerada.

O procedimento proposto neste trabalho para considerar a natureza discreta destas variáveis é baseado em heurística desenvolvida por Balas-Martin [32] para resolver problemas binários 0/1, sendo que para ser usada no problema reativo foi submetida a algumas adaptações/especializações necessárias para contornar as seguintes dificuldades decorrentes das características do problema:

- Nada se pode afirmar sobre sua convexidade;
- É fortemente não linear e mal condicionado, que foi linearizado em torno de um ponto de operação.

O algoritmo especializado para o problema reativo, assim como o original, possui duas fases: uma primeira fase de busca que visa encontrar uma boa solução discreta por pivoteamento e uma segunda fase que consiste em aproximar as variáveis que eventualmente não foram discretizadas na primeira fase para o valor discreto mais próximo e verificar o efeito da precisão destas aproximações no problema completo, resolvendo novo problema de operação. A fase de aproximação só ocorre se na fase de busca não for possível a discretização das restantes variáveis do problema.

4.8.1 Algoritmo Heurístico de Discretização

- i. Partir do “tableau” da PL correspondente à solução obtida via busca binária;
- ii. Efetuar pivoteamento, chamado *tipo 1*, que consiste em retirar da base uma variável discreta “ j ” (bancos reativos), trocando-a por uma contínua (tensão, “tap”, capacidades próprias) que está fora da base de forma tal que a função objetivo (FO) da PL tenha seu valor ótimo alterado (piorado) o mínimo possível. A seguir este procedimento é detalhado:
 1. Para cada uma das variáveis contínuas “ j ” fora da base, verificar as variáveis “ k ” a serem discretizadas que estão na base e que são candidatas

a deixarem a mesma. Esse procedimento é efetuado com base no método Simplex para determinar variáveis que entram e saem da base, sendo considerados nesses cálculos os valores discretos mais próximos;

2. Se variáveis candidatas a deixar a base são variáveis discretas, adotar aquela que provoca a menor variação na FO da PL e ir para iv, caso contrário ir para iii;
- iii. Se existirem variáveis discretas na base executar pivoteamento, aqui chamado *tipo 2*, que consiste em manter viabilidade e manter inalterado o número de variáveis discretas na base. São executados os seguintes passos:
1. Para cada uma das variáveis “*j*” (tensão, capacidades próprias, “taps”) fora da base verificar, usando a regra da razão mínima do método primal simplex, a variável “*k*” da base que é candidata a deixar a mesma. Encontrada alguma variável candidata a deixar a base ir para iv;
 2. Não existindo variável candidata a deixar a base, sinalizar este fato e ir para v;

Se não existirem ir para v;

iv. Adotar um dos seguintes procedimentos:

1. *Variável candidata a deixar a base é de natureza discreta*: alterar os limites da mesma para os valores discretos padronizados mais próximos. Executar iteração do primal simplex de PL e ir para ii;
2. *Variável candidata a deixar a base é contínua*: iteração do primal simplex de PL e ir para ii;

v. Processar Fluxo de Potência. Não existindo mais variáveis discretas na base, terminou a solução do problema para o cenário em estudo, caso contrário ir para vi;

vi. Verificar os seguintes itens:

1. É a primeira vez que se buscou a discretização com “pivots” do tipo 1 e 2 e apenas algumas variáveis foram discretizadas. Considerar alocadas as variáveis já discretizadas e ir para vii;
2. É a primeira vez que se buscou a discretização com os “pivots” do tipo 1 e 2 e não se obteve a discretização de nenhuma variável - imprimir mensagem que o problema *não* apresenta solução discreta;

3. Não é possível a discretização de mais variáveis. Aproximar as variáveis para o valor discreto mais próximo e verificar precisão da solução obtida através do despacho de reativos. Se a solução for satisfatória terminou solução do problema para cenário em estudo, caso contrário é necessária a redefinição do problema.
- vii. Resolver despacho de reativos;
- viii. Resolver subproblema de investimento - busca heurística e ir para i.

Este algoritmo está ilustrado no diagrama de blocos detalhado da Figura D.2 (Apêndice D).

4.9 Algoritmo Completo Para Solução do Problema

A seguir apresenta-se o algoritmo completo proposto para solução do problema de planejamento de reativos. O mesmo foi implementado em uma estação de trabalho SUN SPARC2 utilizando linguagem de programação Fortran 77.

- i. Leitura de dados;
- ii. Determinar cenários em que será feito o estudo de planejamento de reativos e definição do conjunto de barras candidatas à alocação de novas fontes;
- iii. Despacho ótimo de reativos;
- iv. Verificar se há necessidade de alocação de novas fontes reativas, onde se considera duas situações:
 - (1) Antes de iniciar solução do problema de investimento;
 - (2) Após tentativas de discretização da proposta de investimento com o uso da heurística de Balas-Martin adaptada;
- v. A critério do planejador, fazer refinamento do conjunto da barras candidatas para determinar o subconjunto \mathcal{I}' que será usado durante a busca heurística;
- vi. Assumir como solução incumbente z^* inicial a solução onde permitem-se alocar reativos em todas as barras do subconjunto $\mathcal{I}' (PR) (1, 1, \dots, 1)$;

- vii. Iniciar geração da lista com os primeiros k padrões (k - número de barras candidatas consideradas na busca binária);
- viii. Executar busca heurística binária para determinar combinação de custo mínimo;
- ix. Repetir solução de custo mínimo para ser discretizada. Marcar barras onde ocorreu alocação;
- x. Heurística de discretização de Balas-Martin adaptada para o problema de planejamento de reativos;
- xi. Se a solução discreta apresenta boa precisão ir para xii, caso contrário informar que o problema não apresenta solução discreta, devendo o mesmo ser redefinido;
- xii. Existindo vários cenários a serem simulados ir para ii, caso contrário FIM.

O algoritmo completo para solução do planejamento de reativos está ilustrado no diagrama de blocos da Figura 4.6.

4.10 Exemplo - sistema de três barras

Seja o problema de planejamento de reativos para o sistema teste de três barras conforme formulado no Capítulo 2. Segundo a metodologia proposta, a solução desse problema consiste das seguintes etapas:

[Fase I] Cenário de planejamento - para o caso base. As três barras são candidatas à alocação de novas fontes conforme especificado na função objetivo da formulação previamente apresentada.

[Fase II] Solução do fluxo de potência especial e linearização das equações de balanço da potência reativa pelo modelo **CRIC**:

$$\Delta Q_l(V_k, \theta_k) = \sum_{j=1}^3 L_{C(l,j)} \Delta V_j \quad k = 1, 2, 3 \quad l = 1, 2, 3$$

[Fase III] Despacho reativo via PL sucessiva, onde a PL para este exemplo consiste do problema (4.17) escrito como:

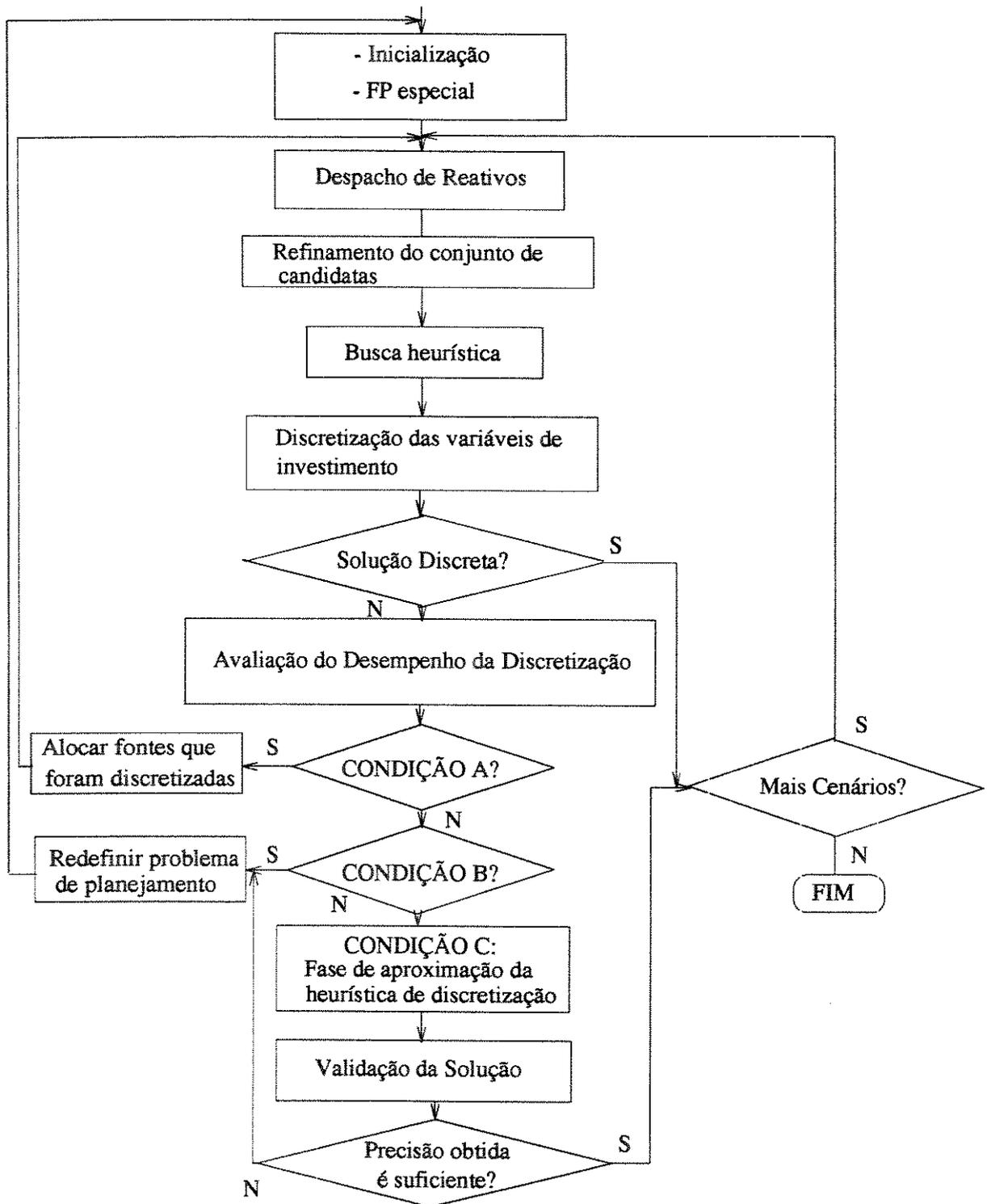


Figura 4.6: Diagrama de blocos do algoritmo implementado

(*CONDIÇÃO A: Discretizado um sub-conjunto de variáveis com possibilidades de discretizar outras variáveis; CONDIÇÃO B: Problema não apresenta solução discreta; CONDIÇÃO C: Terminaram as possibilidades de discretização das variáveis.*)

$$\begin{aligned}
 \text{Min } w &= (\Delta y_{1_1} + \Delta y_{2_1}) + (\Delta y_{1_2} + \Delta y_{2_2}) + (\Delta y_{1_3} + \Delta y_{2_3}) \\
 \text{s.a.} \\
 -\infty &\leq \Delta P_1 \leq \infty \\
 -\infty &\leq \Delta \theta \leq \infty \\
 \sum_{j=1}^3 L_{C_{(1,j)}} \Delta V_j - \Delta y_{1_1} + \Delta y_{2_1} - \Delta q_{p_1} &= 0 \\
 \sum_{j=1}^3 L_{C_{(2,j)}} \Delta V_j - \Delta y_{1_2} + \Delta y_{2_2} - \Delta q_{p_2} &= 0 \\
 \sum_{j=1}^3 L_{C_{(3,j)}} \Delta V_j - \Delta y_{1_3} + \Delta y_{2_3} - \Delta q_{p_3} &= 0 \\
 0,98 - V_k^\nu &\leq \Delta V_k \leq 1,02 - V_k^\nu \\
 -0,10 - qp_k^\nu &\leq \Delta qp_k \leq 0,10 - qp_k^\nu \\
 \Delta y_{1_k} \geq 0 \quad \Delta y_{2_k} \geq 0 \quad k &= 1, 2, 3
 \end{aligned}$$

onde V_k^ν, qp_k^ν representam um ponto de operação para o sistema obtido pelo processamento do fluxo de potência inicial. Este sistema não possui transformadores com mudança de “tap” sob carga e nem fontes reativas fixas (q_c^f, q_r^f) ou variáveis (q_c^v, q_r^v) instaladas.

O ponto de operação obtido adotando-se este procedimento está apresentado na tabela (4.1), onde se verifica que toda a capacidade própria de geração de reativos existentes em cada uma das barras (± 0.10)pu foi utilizada, mas mesmo assim há um “déficit” de reativos de natureza capacitiva de 0.81 pu para manter o sistema operando dentro das condições pré estabelecidas.

barra	tensão(pu)	Q_{gerado} (pu)	y_1 (pu)
1	1,020	0,10	0,64
2	0,988	0,10	-
3	0,980	0,10	0,17

Tabela 4.1: Ponto de operação para o sistema após despacho das fontes reativas existentes.

[Fase IV] Busca Heurística – A árvore de decisão para este exemplo está ilustrada na figura (4.7).

Após testar 7 propostas de investimento de um total de 8, a busca de custo mínimo forneceu o resultado referente às três primeiras colunas da tabela (4.2).

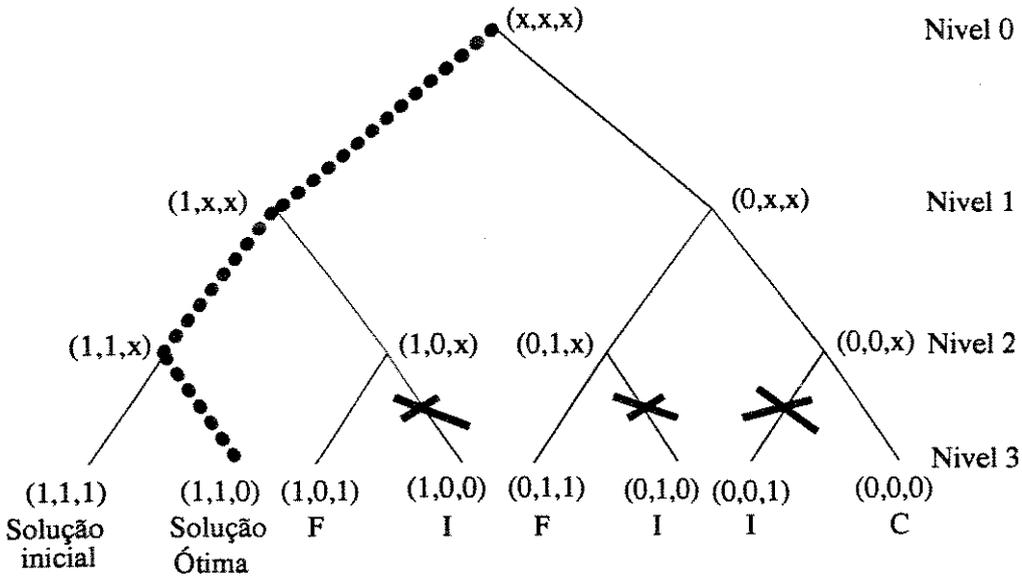


Figura 4.7: *Árvore de de decisão para o sistema exemplo de 3 barras – F - Proposta Factível, I - Proposta Inviável, C - Proposta Cortada*

[Fase V] Discretização: As propostas de investimento contínuas obtidas pela busca binária foram discretizadas segundo os módulos de bancos reativos, e os resultados desta discretização encontram-se nas duas últimas colunas da Tabela (4.2). Note que nesta tabela a discretização das variáveis de investimento ocorre devido ao redespacho das capacidades próprias, levando a uma solução mais cara, como esperado.

barra	(a) Contínuo		(b) Discreto (0.125 pu)	
	Q_G (pu)	$Q_{alocado}$ (pu)	Q_G (pu)	$Q_{alocado}$ (pu)
1	0,10	0,64	0,04	0,625
2	0,10	-	0,10	-
3	0,10	0,17	0,10	0,25

Tabela 4.2: *Sistema 3 barras: solução do problema de planejamento de reativos: (a) – contínuas; (b) – discretizadas em 0,125 pu, e capacidades reativas próprias gerada (Q_G).*

[Fase VI] Validação da solução: As propostas de investimentos contínuas e discretas foram testadas através do despacho de reativos e os resultados estão apresentados na Tabela (4.3).

barra	tensão (pu)	ângulo (graus)	Q_{gerado} (pu)	y_1 (pu)
1	1,012	0,000	0,04	-
2	0,986	0,297	0,10	-
3	0,980	0,258	0,10	-

Tabela 4.3: *Ponto de operação obtido através do despacho de reativos usando as fontes (capacitores) obtidas no planejamento de reativos.*

Capítulo 5

Solução em Computador Paralelo

Analisando o algoritmo apresentado no capítulo anterior verifica-se que o PLIM gerado pode ser resolvido em máquinas que permitam programação concorrente (computadores paralelos ou “cluster” de estações) de maneira eficiente, dado que os subproblemas de operação gerados, podem ser resolvidos de maneira independente.

Esta versão paralela foi implementada em um computador de memória distribuída nCUBE2 de 64 nós. Em seu desenvolvimento utilizou-se um modelo de programação assíncrono, alocando-se um processador mestre para gerenciar o processo de solução do subproblema de investimento e um conjunto de processadores escravos que analisam as propostas de investimentos enviadas pelo mestre, devolvendo os resultados ao mestre assim que terminam de executar tarefas.

5.1 Algumas Definições Usuais em Processamento Paralelo

Essas definições foram retiradas das referências [35] e [36].

a. Ganho

Quando uma máquina com vários processadores está operando com máximo desempenho, todos os processadores realizam trabalho útil. Nesse caso, os n processadores que compõem o processador paralelo contribuem efetivamente para desempenho global e o tempo de execução equivale ao tempo seqüencial dividido por n . Na maioria das aplicações o desempenho máximo raramente é atingido, exceto

em algumas aplicações de algoritmos assíncronos.

Os problemas de ineficiência tendem a crescer com o número de processadores. Na prática observa-se que a eficiência decresce rapidamente levando à saturação da curva de ganho (ou seja, o número de processadores ativos não consegue diminuir o tempo global do processo) e eventualmente a ganho negativo (a participação de mais processadores provocam o aumento do “overhead”¹). Uma estimativa do ganho ideal a ser obtido com um algoritmo paralelo pode ser obtida pela lei de Amdahl:

$$G = \frac{T}{(T_s + \frac{T_p}{n})} \quad (5.1)$$

T : tempo de execução seqüencial do algoritmo completo;

T_s : tempo de execução da porção não paralelizável do programa;

T_p : tempo de execução da porção paralelizável do programa;

n : número de processadores.

A equação (5.1) pode ser reescrita como:

$$G = \frac{1}{(f_s + \frac{f_p}{n})} \quad (5.2)$$

onde f_s e f_p são as frações seqüenciais (não paralelizáveis) e paralelizáveis, respectivamente, do algoritmo seqüencial. Quando o número de processadores cresce, o limitante superior de G é dado por $1/f_s$, ou seja, o máximo ganho do algoritmo paralelo estará limitado pela fração não paralelizável do algoritmo. Esta estimativa é ideal pois não está levando em consideração aspectos como comunicação, sincronismo, etc.

A estimativa do ganho (G) é importante pois através da mesma é possível determinar se um determinado algoritmo é bom candidato para ser paralelizado.

b. Granularidade

¹Overheads (custos): são as chamadas fontes de ineficiência e estão relacionadas com o uso de múltiplos processadores que precisam se comunicar e tendem a atrasar a solução do problema. Tipos de “overheads”: sincronismo, comunicação, algoritmo

O desempenho de uma implementação paralela é fortemente afetado pelo processo de decomposição do problema original. A taxa de granularidade é dada pela razão entre o tempo de processamento (p) e o tempo de comunicação (C). Um paralelismo de alta granularidade implica em uma taxa (p/C) relativamente alta, onde cada unidade de cálculo produz um nível de comunicação relativamente pequeno. Em um paralelismo de grão fino a taxa (p/C) é muito pequena, tendo um “overhead” por comunicação relativamente grande comparado com o tempo de processamento da tarefa. Uma boa decomposição deve identificar tarefas com altas taxas (p/C), pois assim o impacto do “overhead” de comunicação é minimizado.

c. “Speedup”

O “speedup” ou ganho é definido pela razão:

$$S = \frac{t_s}{t_p} \quad (5.3)$$

onde t_s é o tempo de execução do melhor algoritmo seqüencial e t_p é o tempo do algoritmo paralelo usando p processadores.

d. Eficiência

A eficiência de um algoritmo paralelo executado em “ p ” processadores é definida como:

$$\epsilon = \frac{S}{p} \quad (5.4)$$

onde S é o “speedup” conseguido com p processadores.

e. Sincronismo

Os mecanismos de sincronismo e comunicação estão relacionados à solução de problemas em máquinas SIMD ², que permitem vários processadores trabalharem concorrentemente. Estes mecanismos são conhecidos no gerenciamento de processos concorrentes e são expressos em linguagem de programação.

Para processos sincronizados é assegurado que se as tarefas que são executadas não são de igual tamanho a potência dos cálculos é perdida, enquanto se espera que

²MIMD (Multiple Instruction Multiple Data): realizam processamento paralelo através de processadores que operam de maneira autônoma mas interagem de acordo com diferentes formas de comunicação e acesso à memória - memória distribuída, memória partilhada e memória híbrida

os outros processadores completem suas tarefas. Sincronismo envolve comunicação, porque de alguma forma os processadores devem buscar informações se os outros processadores completaram suas tarefas ou não, aumentando a complexidade de comunicação do algoritmo. A vantagem do sincronismo é que a divisão do trabalho entre os vários processadores tende a ser fácil, porque é conhecido quando estarão aptos a reiniciarem suas próximas tarefas. As características do processo assíncrono são exatamente o contrário destas.

O sincronismo do processo traz conseqüências diretas para o algoritmo de enumeração implícita. Se os processadores não estão sincronizados, a divisão do trabalho entre os processadores e a troca de conhecimento entre os mesmos introduzem não determinismo neste algoritmo. Neste caso nada pode ser dito sobre a ordem exata que serão executadas as análises das diferentes propostas de investimento.

e. Troca de mensagem

A troca de mensagem pode ser realizada somente através de comunicação. Uma perfeita troca de informação pode ser obtida tomando de cada processador disponível todo o conhecimento que ele obteve. O que constitui uma boa relação entre complexidade de comunicação e complexidade computacional depende das características do problema a ser resolvido, bem como das características do algoritmo paralelo e do sistema de computadores paralelos utilizados.

5.2 Algoritmo Paralelo de Enumeração Implícita

A busca binária para solução do problema de carga fixa, que faz parte do algoritmo apresentado neste trabalho, assim como outros algoritmos combinatórios, pertence a uma classe de problemas de otimização que propiciam o uso de técnicas de processamento distribuído (computadores paralelos, várias "workstation" e/ou microcomputadores processando concorrentemente através de "software" adequados), para serem resolvidos concorrentemente [28,29,30,31]. O problema de investimento é separado do problema de operação, uma vez que o problema de operação (PL) é completamente resolvido a partir da definição dos locais onde instalar novas fontes reativas, tornando possível processar vários problemas de operação de forma concorrente.

O subproblema de investimento será chamado de tarefa mestre e os subproblemas de operação de tarefas escravas, conforme ilustrado na figura 5.1. O número de tarefas resolvidas concorrentemente depende do número de processadores (ou estações) usados durante a execução do programa. A distribuição das tarefas entre os

processadores escravos é feita de forma assíncrona. Depois de uma fase inicial, onde as primeiras tarefas são enviadas a todos os processadores a tarefa subsequente é alocada ao primeiro processador que acabou de executar sua tarefa. A distribuição da carga entre os processadores obtida com este esquema normalmente é boa, uma vez que os processadores estarão sempre trabalhando.

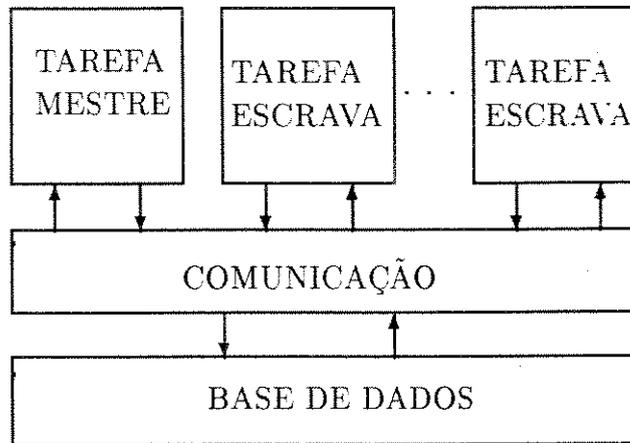


Figura 5.1: Modelo de programação concorrente

O controle da execução das tarefas é feito através da lista tipo **LIFO** que é criada e gerenciada pela tarefa mestre. Neste modelo de programação o mestre toma todas as decisões importantes e os escravos executam as tarefas enviadas pelo mestre. Este algoritmo é referenciado na literatura como algoritmo de Boulder [32]. A vantagem da centralização das tarefas está na possibilidade de executar o mapeamento do trabalho a ser realizado. A desvantagem é que o acesso ao conjunto das tarefas tende a ser congestionado, uma vez que o mesmo pode ser acessado apenas por um processador de cada vez.

As tarefas obtidas decompondo o algoritmo de busca binária são mapeadas no modelo de programação da seguinte forma:

Tarefa Mestre

- a Gerar a lista LIFO inicial contendo os primeiros padrões (propostas de investimento). Estes padrões (que nada mais são que números decimais) indicam onde é permitida a alocação de reativos as barras do conjunto de candidatas. Inicialmente criam-se padrões em que permite-se a alocação em todas as barras candidatas menos uma ou seja, na representação binária os padrões são: $[0, 1, 1, \dots, 1, 1]$, $[1, 0, 1, \dots, 1, 1]$, ..., $[1, 1, 1, \dots, 0, 1]$, $[1, 1, 1, \dots, 1, 0]$;

- b Enviar aos processadores escravos as propostas de investimento da lista (o dado enviado é somente um número), procedendo-se ao seu decremento:
- c Receber de cada processador escravo assim que acabar de executar suas tarefas:
 - Padrão analisado e indicação de sua condição de otimalidade: viável ou inviável. Tratando-se de padrão inviável ir para o (d), caso contrário atualizar informação sobre a melhor solução encontrada - solução incumbente;
 - Fazer o desdobramento do subproblema que foi analisado, atualizando as propostas de investimentos da lista. Ir para (d);
- d Existindo propostas de investimento na lista a última delas é enviada ao processador livre;
- e Manter atualizada fila de processadores que estão momentaneamente sem realizar trabalho. Se todos os processadores estiverem nessa fila indica que o procedimento de busca binária terminou.

Tarefas Escravas

- a Receber a proposta de investimento enviada pela tarefa mestre. (Pode receber também um “flag” indicando fim da busca)
- b Decodificar a informação recebida (identificar barras candidatas na proposta de investimento)
- c Resolver o problema de PL com os custos variáveis artificialmente aumentados para as barras onde não se permite alocar fontes reativas. Verificar se a solução obtida é viável ou inviável;
- d Enviar à tarefa mestre um “flag” lógico - *proposta viável* ou *proposta inviável*;
- e Se a proposta for viável executar os seguintes passos:
 - Atualizar estado das variáveis do sistema de energia elétrica a partir dos resultados da PL e processar fluxo de potência;
 - Calcular o custo da proposta analisada;
- f Enviar à tarefa mestre o valor do custo obtido.

Na figura 5.2 está ilustrada a forma como as tarefa mestre e as tarefas escravas se comunicam.



Figura 5.2: Comunicação entre as tarefas mestre e escravos

5.3 Implementação

5.3.1 Máquina de memória distribuída

O computador de memória distribuída utilizado é um nCUBE2 [37], uma máquina do tipo MIMD segundo a classificação de Flynn. A arquitetura do nCUBE-2 considerando-se 32 nós é mostrada na figura 5.3.

Nós

Cada nó do nCUBE é um computador seqüencial completo, possuindo unidades de processamento independentes (CPU) e de ponto flutuante, memória local de 4 Mbytes de RAM e “hardware” de comunicação, sendo processado em cada nó o sistema operacional nCX (UNIX) completo.

O número de nós é escalável, ou seja, pode-se aumentar a memória e o número de nós que no caso da máquina disponível pode chegar até a 1024 nós. A configuração atual tem 64 nós.

Canais de comunicação

Cada nó está conectado ao outro através de um “hardware” de roteamento de mensagens. Cada processador tem 14 canais bidirecionais DMA (acesso direto à memória). Estes canais suportam transferência de dados e mensagem de controle entre dois nós quaisquer na razão de 2.2 Mbytes/s.

Processadores de entrada/saída

Além dos canais de comunicação entre nós descrito anteriormente, cada nó tem

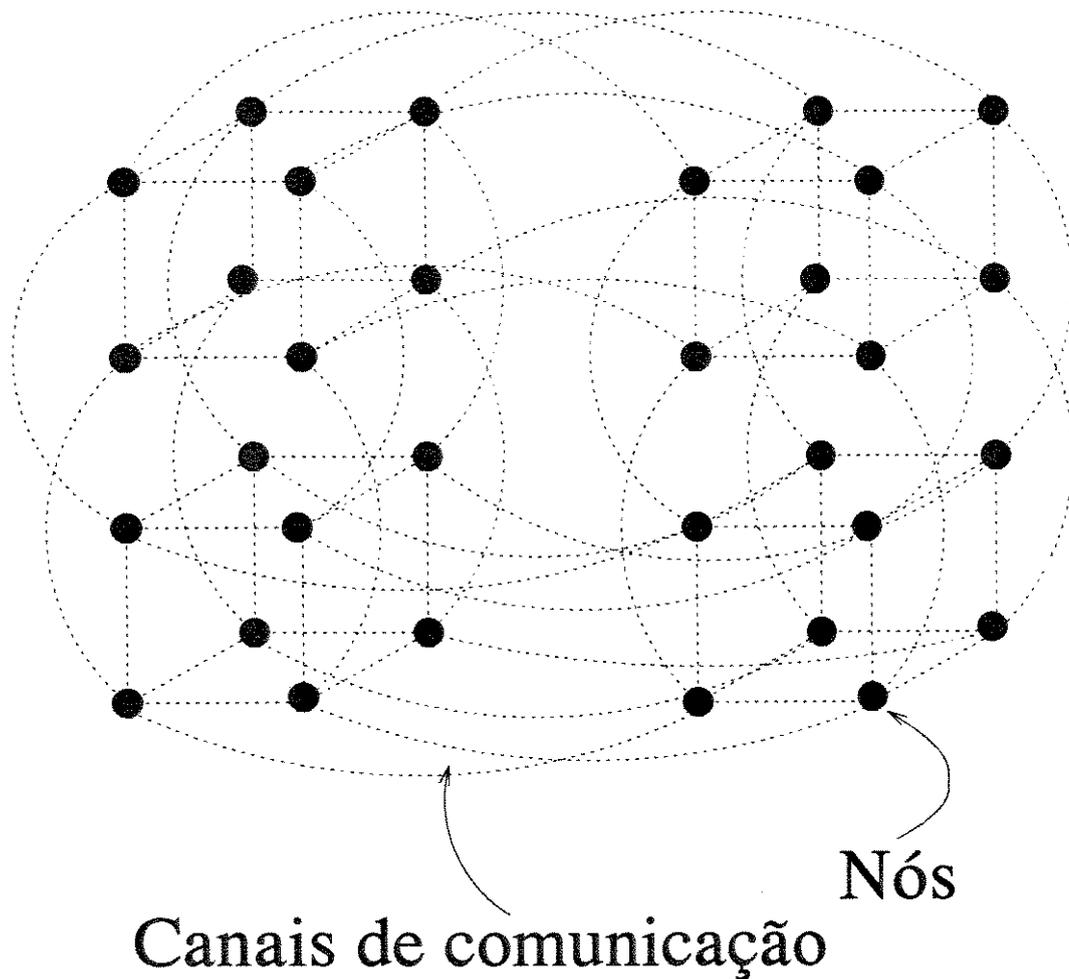


Figura 5.3: Hipercubo com 32 nós

também um canal separado dedicado à transferência deste nó para os processadores de entrada saída. Esses canais operam à mesma razão dos canais de comunicação inter nós. Os processadores de entrada/ saída têm a mesma CPU e configuração de memória dos nós, porém com interfaces adicionais de “software” e “hardware” para discos, monitores e outros periféricos. Na configuração atual, o computador nCUBE está ligado a um “host” constituído de uma estação de trabalho SUN330 e através da mesma a uma rede local. Toda a compilação e construção dos módulos de carga é feito na Sun (ou em qualquer estação da rede local).

5.3.2 Aspectos da Implementação Paralela

No início do processo uma cópia da base de dados é enviada a todos os nós. Esta base é composta pelos dados de linhas/transformadores, barras, limites das variáveis do problema (tensões, potência reativa gerada, fontes reativas a serem alocadas, etc). Esta tarefa é executada com o uso da função "nglobal".

A tarefa mestre é alocada no nó zero do hipercubo e executa a supervisão do procedimento de otimização e de toda a busca binária. As tarefas escravas estão alocadas nos nós $1, 2, \dots, N - 1$, onde N é o número total de nós alocados para simular o programa, podendo assumir os valores 2,4,8,16,32,64. Para executar o programa são necessários, no mínimo, 2 nós. A forma como o mestre e os escravos se comunicam é conhecida como *modelo produtor/consumidor*. O módulo do programa carregado em todos os nós é o mesmo, o que torna o procedimento de carga do programa no hipercubo bastante simples. Em cada nó a tarefa executada é diferente em função do próprio número do nó, que é obtido através da primitiva "whoami". Por exemplo (em fortran):

```
...
mynode = whoami()
IF (mynode = 0) THEN
...
(tarefa mestre)
...
ELSE
...
(tarefa escrava)
...
END IF
...
```

A troca de mensagens entre os processadores mestre (nó zero) e escravos (1-63) é feita através das funções "nwrite" e "nread". Essas funções foram utilizadas para para envio de padrões do nó mestre (nwrite) e recebimento dos mesmos pelos escravos. Utilizou-se também tais funções para o envio dos resultados do processamento dos escravos (problema viável ou inviável, e ainda os custos de cada problema viável)

O critério adotado para desativar os processadores escravos assim que a lista de padrões está vazia é o envio de um "flag = -1" no lugar dos padrões que normalmente são transmitidos/recebidos pelo mestre/escravo.

Capítulo 6

Testes e Resultados

Neste capítulo são apresentados resultados obtidos com a simulação dos sistemas testes IEEE30 [38] e IEEE118 [1] e três sistemas reais brasileiros de 309, 725 e 810 barras. Os detalhes da obtenção do sistema de 309 barras estão no Apêndice A.

Os programas utilizados em todos os testes foram desenvolvidos no laboratório de sistemas de energia elétrica - DSEE/FEE/UNICAMP, exceto os seguintes:

- Cálculo do sistema linear esparsa da PL, usado na simulação dos sistemas testes e do sistema de 309 barras, onde utilizou-se uma rotina do laboratório Harwell [39];
- Na simulação com os sistemas Sul725 e Sul810, a rotina de programação linear utilizada foi a MINOS (versão 5.4) [40].

A PL desenvolvida no LSEE que utiliza a biblioteca de fatoração Harwell, permitiu a implementação do algoritmo de discretização heurística de Balas-Martin.

O desempenho da implementação paralela do algoritmo implementado no hiper-cubo é apresentado através de resultados obtidos com a simulação dos três sistemas reais. Com a implementação paralela foi possível a simulação de conjuntos com grande número de barras candidatas à alocação de novas fontes.

6.1 Sistema IEEE30

Este sistema é bastante conhecido na área de sistemas de energia elétrica e a configuração utilizada foi obtida da referência [38]. Tem 30 barras, 37 linhas de transmissão e 4 transformadores com mudança automática de “tap” sob carga. Nessa referência não aparecem os limites (mínimo e máximo) para variação de “taps” e nos testes efetuados com o sistema IEEE30 os mesmos foram limitados entre [0.9,1.1].

As condições para os testes com esse sistema foram:

- Limites das tensões entre [0,95 - 1,05] pu;
- Condição de carga pesada, considerando dois cenários de operação: caso base e retirada da linha 1-2;
- Custos variáveis para novas fontes reativas unitários em todas as barras do conjunto de candidatas \mathcal{I} ;
- Conjunto de barras candidatas $\mathcal{I} = \{1, 2, 5, 8, 11, 13, 30\}$;
- Em todas as barras $i \in \mathcal{I}$, permite-se alocação de bancos reativos com módulos de 12,5 MVar.

outras condições de testes estão apresentadas na Tabela 6.1.

barra	C_{fixo}	C_c, C_r	$\underline{q}_c, \underline{q}_r (pu)$	$\bar{q}_c, \bar{q}_r (pu)$	$QG_{min} (pu)$	$QG_{max} (pu)$
1	8,0	1,0	0,00	0,50	0,00	0,00
2	8,0	1,0	0,00	1,00	-0,40	0,50
5	8,0	1,0	0,00	0,75	-0,40	0,40
8	8,0	1,0	0,00	0,75	-0,10	0,40
11	3,0	1,0	0,00	0,75	-0,06	0,24
13	3,0	1,0	0,00	0,75	-0,06	0,24
30	3,0	1,0	0,00	0,75	0,00	0,00

Tabela 6.1: Dados usados nas simulações do sistema IEEE30.

No cenário de operação – caso base, constatou-se através do despacho de reativos que as fontes e os controles de tensão existentes no sistema são suficientes para garantir a operação atendendo todas as restrições pré-estabelecidas.

No segundo cenário de operação – retirada da linha 1-2, após o despacho reativo existia um “déficit” de 1.37651 de suporte de reativos distribuído entre várias barras

do sistema (#1 = 0,38 pu, #5 = 0,16 pu, #8 = 0,54 pu, #13 = 0,20 pu, #30 = 0,09 pu).

Usando a heurística - B, o conjunto de barras candidatas, a ser usado na busca binária passou a ser o formado por $\mathcal{I}' = \{8, 1, 30, 13, 11, 5\}$. O número total de propostas de investimentos analisadas neste caso foi 43 (total de 64). A discretização heurística foi executada com pleno êxito e os resultados finais foram confirmados através da solução de nova PL sucessiva, onde as propostas de investimentos obtidas foram consideradas como elementos de compensação "shunt" ligadas nas respectivas barras e a terra. Os resultados destas simulações estão apresentados na Tabela 6.2.

barra	Caso base				Contingência			
	a. Contínuo		b. Discreto		a. Contínuo		b. Discreto	
	Q_G (pu)	Q_{al} (pu)	Q_G pu	Q_{al} (pu)	Q_G (pu)	Q_{al} (pu)	Q_G pu	Q_{al} (pu)
1	0,00	-	0,00	-	0,00	0,41	0,00	0,50
2	0,27	-	0,27	-	0,50	-	0,50	-
5	0,40	-	0,40	-	0,40	-	0,40	-
8	0,40	-	0,40	-	0,40	0,72	0,40	0,75
11	0,24	-	0,24	-	0,24	-	0,24	-
13	0,24	-	0,24	-	0,24	0,22	0,24	0,125
30	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-

Tabela 6.2: Propostas de investimentos de novas fontes reativas contínuas (a), discretizadas em 0,125 pu (b) (Q_G - capacidades reativas próprias geradas).

6.2 Sistema IEEE118

A rede IEEE118 tem 118 barras, 168 linhas de transmissão e 9 transformadores com mudança de "taps" sob carga. Os dados utilizados nos testes com este sistema foram retirados da referência [1].

As condições adotadas para testes foram:

- Três níveis de carga :
 - Nominal;
 - Pesada - 115% da carga nominal;
 - Leve - 85% da carga nominal;

- Quatro Contingências:
 - # 1: Retirada da linha 65-68;
 - # 2: Retirada de uma das linhas 89-92;
 - # 3: Retirada do transformador entre as barras 5-8;
 - # 4: Retirada da linha 26-30;
- Magnitudes das tensões mantidas entre os intervalo $[0,94 - 1,06]$ pu;
- Fontes reativas existentes no sistema e “taps” de transformadores considerados variáveis de controle;
- Os custos variáveis associados à instalação de novas fontes reativas foram considerados unitários para todas as barras do conjunto de candidatas.

Nas simulações de cargas leve e pesada os dados referentes à carga ativa e reativa nominais foram multiplicados pelos fatores correspondente (0,85 e 1,15). O número de barras candidatas foi fixado em 11 e os demais dados usados nas simulações encontram-se na tabela 6.3.

barra	12	21	31	35	49	56	60	71	76	85	94
d_c, d_r	10,0	10,0	10,0	5,0	5,0	10,0	5,0	10,0	5,0	5,0	10,0
\bar{q}_c, \bar{q}_r (pu)	0,8	0,5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,2	0,8

Tabela 6.3: *Dados para o conjunto de barras candidatas (\mathcal{I}) usados na simulação do sistema IEEE118.*

A tabela 6.4 apresenta os valores ótimos obtidos para as posições de “taps” em cada cenário de operação simulado. As propostas de investimentos para cada condição de carga e contingências discretizadas em 12,5 MVar estão indicadas na tabela (6.5), com os valores dados em MVar. No cenário referente à carga leve não foi necessária a alocação de novas fontes reativas.

6.3 Sistema real de 309 barras

Este sistema possui 309 barras, 379 linhas de transmissão, 80 transformadores sendo 34 destes com controle automático de “taps” e foi obtido a partir do cálculo do equivalente estático do sistema sul-sudeste brasileiro, de acordo com o método apresentado no Apêndice A.

tap No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ligação k-l		5-8	30-17	26-25	38-37	63-59	64-61	65-66	68-69	81-80
car- ga le- ve	caso base	1,001	0,961	1,015	0,951	1,017	1,111	1,049	0,9611	1,058
	# 1	0,994	0,999	1,009	0,909	0,971	1,111	1,048	0,961	1,064
	# 2	0,999	0,961	1,010	0,922	1,035	1,111	1,049	0,961	1,060
	#3	0,998	0,961	1,015	0,951	1,016	1,111	1,068	0,961	1,083
	#4	1,010	1,009	0,9804	0,968	1,010	1,111	1,049	1,009	1,078
car- ga no- mi- nal	caso base	1,021	0,961	1,022	0,991	0,992	1,111	1,056	0,961	1,051
	# 1	1,010	0,997	1,010	0,909	0,972	1,111	1,056	0,961	1,060
	# 2	1,014	0,961	1,011	0,909	1,071	1,061	1,057	0,909	1,059
	# 3	1,016	0,961	1,009	0,971	1,009	1,111	1,067	0,961	1,081
	# 4	1,010	1,009	0,990	0,910	0,962	1,111	0,988	1,009	1,111
car- ga pe- sa- da	caso base	1,037	0,939	1,018	0,995	0,992	1,111	1,062	0,954	1,047
	# 1	1,014	0,961	0,991	0,909	0,972	1,111	1,060	0,961	1,076
	#2	1,036	0,939	1,018	0,995	0,992	1,111	1,062	0,954	1,047
	# 3	1,023	0,961	1,009	0,909	1,008	1,111	1,062	0,961	1,096
	# 4	1,080	1,009	0,909	0,910	0,909	1,037	1,050	1,009	1,111

Tabela 6.4: Posições dos “taps” dos transformadores após despacho ótimo de reativos para cada cenário de operação.

As condições adotadas para testes foram:

- Nível de carga fornecido pelo arquivo de dados original;
- “Taps” dos transformadores incluídos no conjunto de variáveis de controle;
- Simulação de duas contingências:

1: retirada do transformador entre a barras 62-58;

carga	barra	Caso base		# 1		# 2		# 3		# 4	
		q_c	q_r	q_c	q_r	q_c	q_r	q_c	q_r	q_c	q_r
nomi- nal	76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	85	-	-	-	-	37,5	-	-	-	-	-
pe- sa- da	76	12,5	-	-	-	62,5	-	-	-	-	-
	85	-	-	-	-	82,5	-	-	-	-	-

Tabela 6.5: Propostas de investimentos reativas obtidas para o sistema IEEE118, discretizadas em 12,5 MVar

2: retirada do transformador entre as barras 62-59:

(No “ranking” de contingências para este sistema considerando-se o subproblema reativo, a retirada destes dois transformadores representam as contingências mais severas (tomando como critério índices baseados na “parte reativa” conforme metodologia apresentada na referência [41]):

- Todas as barras do sistema interno são consideradas do tipo tensão controlada (PV's) e as de fronteira barras de carga (PQ's);
- As magnitudes das tensões foram mantidas entre os níveis de $[0.96 - 1.04]pu$ para as barras do sistema interno (PV's) e $[0.95 - 1.05]pu$ para as barras de fronteiras (PQ's);
- As fontes reativas fixas existentes - bancos, foram consideradas como elementos “shunt”, e consideradas através da matriz de admitância do sistema. Os dados destas fontes encontram-se na Tabela 6.6.
- As fontes reativas manobráveis foram consideradas como capacidades próprias, utilizando-se as restrições de acoplamento (2.4).
- Na simulação de qualquer cenário, as fontes reativas existentes (capacidades próprias dos geradores, compensadores síncronos e estáticos, bancos de capacitores/reatores) são também consideradas através das restrições de acoplamento (2.4).

Barra	Tipo de fonte	Magnitude (MVA)
32	reator fixo	180.0
37	reator fixo	180.0
41	reator fixo	540.0
45	reator manobrável	180.0
55	reator manobrável	2×180.0
57	reator manobrável	2×90.0
64	reator manobrável	3×90.0
67	reator fixo	180.0
121	banco de capacitores	2×6.4
32	banco de capacitores	2×6.5

Tabela 6.6: Fontes reativas existentes no sistema de 309 barras

- O conjunto de barras candidatas, os valores dos custos fixos d_i e as magnitudes máximas das fontes a serem alocadas em cada barra (q_c, q_r) constam na Tabela 6.7. Este conjunto foi obtido a partir de um conjunto maior definido pelo

planejador, através da heurística B, fixando-se o número máximo de barras candidatas em 11. A heurística de Cooper-Drebes modificada - heurística A, foi aplicada para fazer o refinamento do conjunto de candidatas, mas não foi possível atender o critério de convergência para a mesma.

barra	13	26	47	56	69	70	89	121	133	137	190
d_c, d_r	1,0	6,0	12,0	10,0	9,0	6,0	3,0	6,0	6,0	3,0	6,0
$\bar{q}_c, \bar{q}_r (pu)$	1,5	1,5	3,0	3,0	2,0	1,5	4,0	2,0	2,0	2,5	2,0

Tabela 6.7: Dados para o conjunto de barras candidatas (\mathcal{I}) para testes no sistema 309 barras.

O despacho de reativos acusou que para as condições de operação desejadas, existe um “déficit” de reativos, no caso base, distribuído entre as variáveis de folga $(y_{1i}, y_{2i}), i \in \mathcal{I}$ no total de $w = 3.475$ pu. Após efetuar o planejamento de reativos para o caso base (resultados apresentados a seguir) e efetuar a alocação obtida, para os cenários seguintes (#1 e #2) não houve necessidade de alocação de novas fontes.

Adotando-se as 11 barras do sistema dadas na Tabela 6.7 candidatas à alocação de novas fontes reativas, o planejamento de reativos foi executado em cada cenário e na Tabela 6.8 apresentam-se as propostas de investimentos necessárias para atender as condições de operação do caso base.

barra	Caso base			
	a. Contínuo		b. Discreto	
	$q_c (pu)$	$q_r (pu)$	$q_c pu$	$q_r (pu)$
69	1,6133	-	1,625	-
70	1,3532	-	1,375	-
121	0,4559	-	0,50	-
133	-	0,100	-	0,125

Tabela 6.8: Sistema 309 barras. Propostas de investimentos (q_c, q_r) , (a) - contínuas e (b) - discretizadas em 0,125 pu

O número total de propostas de investimentos analisadas durante a busca no caso base foi de 279. As propostas obtidas para este cenário foram testadas através da PL sucessiva, e a soma das infactibilidades w foi menor que a tolerância especificada para este sistema, ou seja $w \leq 0,10pu$.

6.4 Sistemas sul725 e sul810

As principais características destes sistemas estão apresentadas na tabela-(6.9).

Sistema	Sul725	Sul810
número de barras	725	810
número de barras de geração	148	134
número de linhas	788	1137
número de transformadores	424	203
número de transformadores com "taps"	113	86
nível de carga	nominal	nominal
limites magnitudes das tensões	$[0,95 - 1,05]pu$	$[0,95 - 1,05]pu$
custo variável de alocação	1.0	1.0

Tabela 6.9: Características dos sistema sul725 e sul810 e algumas condições adotadas para os testes.

As outras condições de testes adotadas para ambos os sistemas foram:

- Fontes reativas existentes e transformadores com mudança de "taps" sob carga foram considerados no conjunto de variáveis de controle;
- Os custos fixos de investimento considerados estão representados nas tabelas (6.10) e (6.11):

barra	8	13	91	339	340	444	455	524	571
d_c, d_r	1,0	8,0	8,0	8,0	8,0	4,0	50,0	12,0	12,0
$\bar{q}_c, \bar{q}_r (pu)$	3,0	3,0	3,0	0,5	1,0	0,5	3,0	1,5	3,0
barra	644	666	693	696	697	707	708	710	
d_c, d_r	12,0	1,0	1,0	1,0	1,0	8,0	8,0	1,0	
$\bar{q}_c, \bar{q}_r (pu)$	1,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	

Tabela 6.10: Sul725 - valores de custos fixos (d_i) e limites máximos (\bar{q}_c, \bar{q}_r permitidos para alocação de fontes reativas.

- Os conjuntos de barras candidatas adotados durante a busca binária foram os seguintes:
 - Conjunto A: As barras apresentadas nas tabelas (6.12) e (6.13), definidas previamente e confirmadas pela análise de factibilidade - PL sucessiva;

barra	16	18	65	70	100	104	142	149	170	171
d_c, d_r	6,0	12,0	6,0	1,0	1,0	3,0	1,0	3,0	8,0	8,0
$\bar{q}_c, \bar{q}_r (pu)$	2,0	2,0	1,5	4,0	1,0	3,0	2,0	1,5	1,5	2,0
barra	181	349	354	379	481	489	496	509	532	534
d_c, d_r	12,0	4,0	18,0	3,0	1,0	3,0	18,0	3,0	4,0	3,0
$\bar{q}_c, \bar{q}_r (pu)$	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	2,5	0,5	1,0
barra	558	559	607	621	668	757	761	771	780	793
d_c, d_r	8,0	1,0	18,0	18,0	5,0	8,0	5,0	4,0	8,0	12,0
$\bar{q}_c, \bar{q}_r (pu)$	5,0	2,0	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	2,5	3,0

Tabela 6.11: Sul810 - valores de custos fixos (d_i) e limites máximos (\bar{q}_c, \bar{q}_r permitidos para alocação de fontes reativas.

- Conjunto B: A partir do conjunto de barras candidatas definido pelo planejador, através da heurística B escolhe-se um subconjunto mínimo de barras que garante operação viável;
- Conjunto C: Subconjunto de barras das tabelas (6.10) e (6.11) escolhidas segundo a heurística de Cooper e Drebes modificada - Heurística A.

As propostas de investimentos reativas obtidas com a simulação destes sistemas encontram-se nas tabelas (6.12) e (6.13).

6.5 Comentários Sobre os Testes para Obter Propostas de Investimentos

- Nas simulações com todos os sistemas as propostas de investimentos obtidas (discretas e/ou contínuas), foram testadas através da PL sucessiva, e a soma das infactibilidades w encontradas estiveram dentro das tolerâncias pré-especificadas para cada sistema.
- A definição do conjunto de barras candidatas que a princípio poderia ser um problema para o algoritmo proposto foi analisada e verificou-se que através do refinamento heurístico do conjunto inicialmente proposto pelo planejador, pode-se chegar a propostas atraentes de planejamento.
- O uso de heurísticas para reduzir o conjunto de candidatas baseado em algum critério físico/econômico (heurísticas A e B), possibilita ao planejador verificar

Conjunto A			Conjunto B			Conjunto C		
barra	reativo alocado(pu)		barra	reativo alocado(pu)		barra	reativo alocado(pu)	
	q_c	q_r		q_c	q_r		q_c	q_r
8	-	-	8	-	-	8	-	-
13	0.0776	-	13	0.0776	-	13	0.0776	-
91	0.1428	-	91	0.1428	-	91	0.1428	-
339	-	-						
340	0.5565	-	340	0.5565	-	340	0.5565	-
444	-	-						
455	1.3199	-	455	1.3199	-	455	1.3199	-
524	-	-						
571	0.6513	-	571	0.6513	-	571	0.6513	-
644	1.1329	-	644	1.1329	-	644	1.1329	-
666	-	-						
693	0.2649	-	693	0.2649	-	693	0.2649	-
696	-	-						
697	-	-						
707	-	-						
708	-	-						
710	-	-				710	-	-

Tabela 6.12: *Propostas de investimentos obtidas para o sistema sul725, considerando-se três conjuntos de barras candidatas durante a busca binária.*

a possibilidade física e viabilidade econômica de alocar reativos em determinadas barras do sistema, ampliando o conjunto de candidatas segundo o seu interesse.

- No caso dos sistemas sul725 e sul810, o comportamento desses sistemas é praticamente o mesmo, devido suas características serem semelhantes e ambos são configurações do sistema do sul-sudeste brasileiro.

6.6 Análise do Desempenho da Implementação Paralela

Para analisar o desempenho da implementação paralela do algoritmo foram utilizados os três sistemas de 309, 725 e 810 barras. Para cada um destes sistemas o mesmo problema foi resolvido utilizando-se diferentes hipercubos e totalizando os

tempos da etapa paralelizável do algoritmo – *busca binária*. Os ganhos (“speedup”) são calculados utilizando-se o melhor tempo da versão seqüencial do programa processada em um nó do nCUBE2. (Segundo a definição de “speedup” apresentada no Capítulo 5, o tempo a ser utilizado neste cálculo é o tempo da melhor versão seqüencial que foi implementada para o algoritmo. No caso deste trabalho e dadas as dificuldades para comparar as soluções do problema obtidas com a metodologia proposta e as fornecidas por outros autores e/ou metodologias, considerou-se o tempo da melhor versão seqüencial, obtido com a implementação seqüencial do algoritmo desenvolvido neste trabalho).

As Tabelas (6.14) (6.15) (6.16) e os gráficos (6.1), (6.2) e (6.3) ilustram a eficiência da implementação paralela.

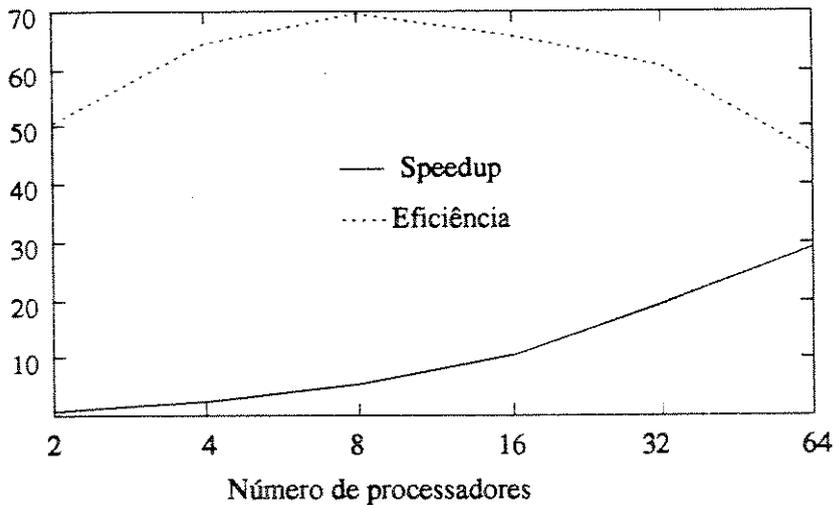


Figura 6.1: Medidas de desempenho do algoritmo paralelo na simulação do sistema real de 309 barras

Nas tabelas (6.15) e (6.16), o ganho obtido com dois processadores é ligeiramente inferior a 1.00, isto porque quando são usados dois processadores tem-se um caso similar ao seqüencial, mas há o custo de comunicação entre os processadores.

A carga computacional entre os processadores pode ser considerada boa. A melhor eficiência encontrada para os sistemas sul725 e sul810 foi obtida com 16 processadores e para o sistema de 309 barras foi com 8 processadores. e a partir daí a eficiência paralela diminui com o número de processadores, fato este conhecido e relacionado com a carga computacional de cada processador e o custo de comunicação entre os mesmos. Esse aspecto também está relacionado com as características do sistema, bem como com as suas necessidades reativas, e o número de

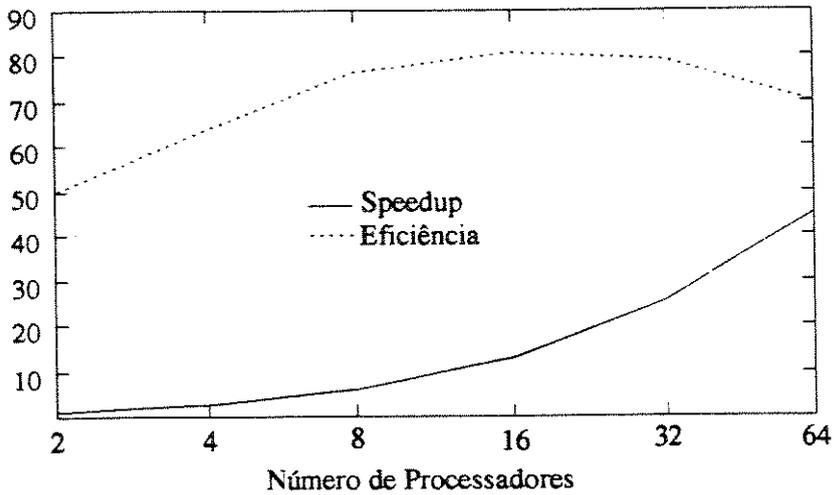


Figura 6.2: Medidas de desempenho do algoritmo paralelo na simulação do sistema Sul725

barras candidatas à alocação de novas fontes usado durante a busca binária.

Tratando-se da solução de problemas de planejamento o tempo de CPU obtido para os sistemas reais pode ser considerado adequado. O tempo de CPU gasto para simular o sistema de 309 barras foi relativamente maior ao tempo de CPU gasto para os sistemas de 725 e 810 barras. isto porque na simulação do sistema de 309 barras utilizou-se a subrotina de PL desenvolvida no LSEE, que é bem menos eficiente que a MINOS 5.4 usada na simulação dos outros dois sistemas.

O uso de processamento paralelo permite que se façam estudos mais completos do problema reativo, considerando-se um número bem maior de barras candidatas à alocação de fontes reativas, permitindo a elaboração de heurísticas para efetuar a escolha mais adequada deste conjunto de candidatas.

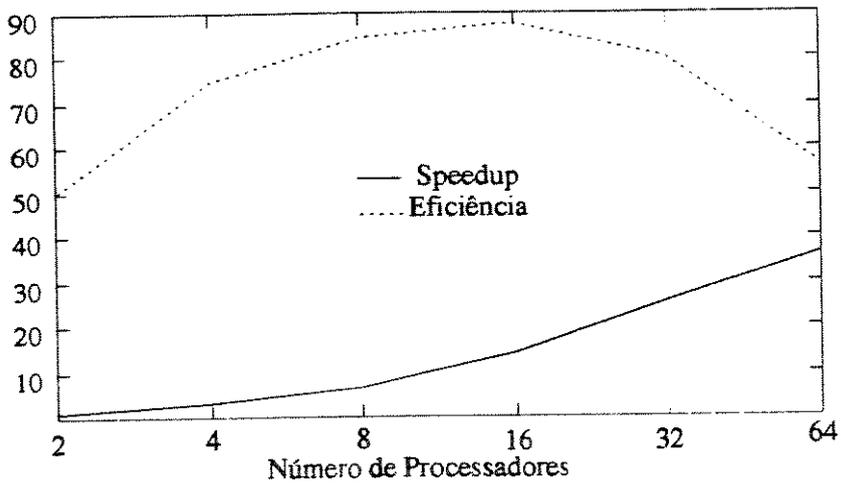


Figura 6.3: Medidas de desempenho do algoritmo paralelo na simulação do sistema Sul810

Conjunto A			Conjunto B			Conjunto C		
barra	reativo alocado(<i>pu</i>)		barra	reativo alocado(<i>pu</i>)		barra	reativo alocado(<i>pu</i>)	
	q_c	q_r		q_c	q_r		q_c	q_r
16	-	-						
18	-	-						
65	-	-						
70	0,6393	-	70	0,6393	-	70	0,6393	-
100	0,5536	-	100	0,5536	-	100	0,5536	-
104	-	-						
142	-	-						
149	-	-						
170	-	-						
171	0,0195	-	171	0,0195	-	171	0,0195	-
181	-	-						
349	0,3255	-	349	0,3255	-	349	0,3255	-
354	-	-						
379	-	-						
481	-	0,3307	481	-	0,3307	481	-	0,3307
489	-	0,7534	489	-	0,7534	489	-	0,7534
496	-	-						
509	-	0,3994	509	-	0,3994	509	-	0,3994
532	-	-						
534	-	0,9775	534	-	0,9775	534	-	0,9775
558	3,9686	-	558	3,9686	-	558	3,9686	-
559	0,7589	-	559	0,7589	-	559	0,7589	-
607	-	-						
621	-	0,8201	621	-	0,8201	621	-	0,8201
668	0,2444	-	668	0,2444	-	668	0,2444	-
757	0,7739	-	757	0,7739	-	757	0,7739	-
761	-	0,0276	761	-	0,0276	761	-	0,0276
771	1,1052	-	771	1,1052	-	771	1,1052	-
780	-	-						
793	-	-						

Tabela 6.13: Propostas de investimentos obtidas para o sistema sul810, considerando-se três conjuntos de barras candidatas durante a busca binária.

Dim. Cubo	No. Proc.	CPU (s)	Sp	S(%)
-	seqüencial	4593,84	-	-
1	2	4541,66	1,01	50,6
2	4	1783,97	2,58	64,5
3	8	824,17	5,57	69,6
4	16	435,40	10,55	65,9
5	32	236,74	19,40	60,6
6	64	157,41	29,18	45,6

Tabela 6.14: Medidas de desempenho do algoritmo paralelo. para o sistema 309 barras - analisadas 279 propostas de investimento (caso base).

Dim. Cubo	No. Proc.	CPU (s)	Sp	S(%)
-	seqüencial	10180,49	-	-
1	2	10207,47	0,997	49,9
2	4	3966,51	2,57	64,2
3	8	1667,35	6,11	76,4
4	16	789,14	12,9	80,6
5	32	403,00	25,26	78,9
6	64	226,53	44,94	70,2

Tabela 6.15: Medidas de desempenho do algoritmo paralelo - sistema sul725 - analisadas 431 propostas de investimento (caso base).

Dim. Cubo	No. Proc.	CPU (s)	Sp	S(%)
-	seqüencial	4342,15	-	-
1	2	4352,48	1,0	50
2	4	1446,44	3,0	75
3	8	643,48	6,75	84,4
4	16	309,73	14,02	87,6
5	32	169,62	25,6	80,0
6	64	120,45	36,06	56,3

Tabela 6.16: Medidas de desempenho do algoritmo paralelo - sistema sul810 - analisadas 325 propostas de investimento (caso base).

Capítulo 7

Comentários e Conclusões

Neste trabalho o planejamento de reativos foi detalhadamente estudado, propondo-se um algoritmo simples, eficiente e robusto para solução do problema. Este algoritmo é composto por diferentes fases que serão analisadas e discutidas a seguir.

- Definição do Conjunto da Barras Candidatas: O conjunto de barras candidatas determina a qualidade da solução obtida para o problema. Um conjunto mal elaborado conduz a problemas de planejamento infactíveis ou a soluções economicamente pouco atraentes. Desta forma, a definição do conjunto de barras candidatas deve ser feita de maneira criteriosa e cuidadosa, considerando aspectos técnicos e físicos, buscando-se torná-lo o mais amplo possível.

- Despacho de Reativos: O despacho reativos é um problema de otimização não linear de grande porte, mal condicionado e de convexidade desconhecida. Na solução do mesmo através de programação linear sucessiva, a parte linear do problema foi formulada como uma PL primal, que considera apenas as sensibilidades reativas, o que significou trabalhar com um número de restrições de igualdade igual ao número de barras do sistema. Nesta fase foi necessária a introdução de uma heurística para contornar oscilações que aparecem devido às linearizações feitas. Essa fase do algoritmo foi a que apresentou maiores dificuldades de convergência e precisão, principalmente quando os “taps” estão incluídos no conjunto de variáveis de controle. O esforço computacional dessa etapa é elevado, pois simula-se o despacho reativo completo para cada cenário de planejamento.

Apesar de todas as dificuldades a modelagem proposta é confiável e precisa, conforme se constatou nos testes realizados utilizando-se diversos sistemas.

- Planejamento de reativos: A solução do problema anterior fornece as necessi-

dades reativas e o estado do sistema após o ajuste das fontes reativas e dos controles das magnitudes de tensão existentes. No caso de indicação da necessidade de alocar novas fontes, inicia-se o planejamento de reativos, que no algoritmo proposto consiste das seguintes etapas:

Refinamento do conjunto de barras candidatas: No caso de não haver interesse ou não ser possível trabalhar com todo conjunto de candidatas definido previamente, propõem-se duas heurísticas para realizar o refinamento do conjunto de candidatas determinado previamente pelo planejador, apresentando ambos resultados satisfatórios nos testes realizados com os sistemas disponíveis, sendo que uma delas referenciada como heurística A, não apresentou bom desempenho para o sistema de 309 barras.

Solução dos subproblemas de operação e investimento: Esta etapa do algoritmo foi resolvida através de busca heurística, que foi implementada explorando-se a sensibilidade do problema reativo com o custo variável de instalação de fontes reativas. Aumentando-se o *custo variável* de instalação de reativos em uma dada barra do sistema, a alocação de reativos nessa barra só ocorrerá caso extremamente necessário, pois caso contrário será alocado reativo em uma outra barra economicamente mais atraente. Essa característica permitiu a redução do custo computacional da busca, adotando-se o seguinte procedimento:

- Inicialmente adota-se o estado convergido obtido pela PL sucessiva. O subproblema de investimento decide onde alocar as fontes reativas e o subproblema de operação, verifica se a proposta é viável, buscando sempre a solução de custo mínimo.
- A incorporação da heurística de corte baseada nas condições de viabilidade da proposta analisada mostrou-se bastante eficiente e adequada para solução deste tipo de problema. Os resultados obtidos usando essa metodologia foram precisos e confiáveis segundo os resultados dos testes.

O procedimento de busca tem ainda a vantagem de fornecer várias soluções viáveis intermediárias para o problema, o que pode ser de grande utilidade no planejamento.

Discretização das variáveis de investimento: a discretização baseada na heurística de Balas-Martin, se adaptou bem ao problema reativo. As características de não linearidade e mau condicionamento do problema, que podem fazer com que não sejam discretizadas todas as variáveis de uma única vez, foram contornadas alocando-se fontes já discretizadas e reiniciando-se o problema.

Nos resultados obtidos, a discretização após o procedimento de busca binária teve desempenho que pode ser considerado bom, dado que a solução final

ficou próxima da relaxada. Como é fato conhecido, isso nem sempre pode ser verdade. O fato de se obter uma solução mais "cara" não deve preocupar, pois deseja-se sempre ter uma reserva de reativos no sistema para uso eventual.

Todos os resultados discretos obtidos foram analisados e testados e estão de acordo com as necessidades reativas do sistema. Esse procedimento de discretização normalmente consome um tempo computacional equivalente à solução de um PL primal com fase I usado para resolver o despacho reativo ótimo do mesmo sistema.

Implementação paralela do algoritmo: O algoritmo proposto apresenta características que permitem fácil implementação paralela, o que foi feito neste trabalho utilizando-se um modelo de programação produtor-consumidor assíncrono implementado em computador de memória distribuída tipo hipercubo.

No caso da implementação paralela há um subproblema mestre (investimento) e vários subproblemas escravos resolvidos em paralelo de forma assíncrona. A carga computacional entre os processadores pode ser considerada boa. Em alguns casos observa-se que a eficiência da implementação paralela diminui com o número de processadores, fato este conhecido e relacionado com a carga computacional de cada processador e o custo de comunicação entre processadores.

A implementação paralela do algoritmo diminui consideravelmente o tempo computacional gasto pela busca heurística, permitindo trabalhar com o conjunto de barras candidatas ampliado.

Para resolver os problemas de não convexidade e o tratamento das variáveis discretas do problema de planejamento de reativos estão sendo propostas por alguns autores técnicas estatísticas, através de buscas n -dimensionais, aliadas a técnicas de inteligência artificial. Essas técnicas podem ser estudadas para resolver o problema de despacho de reativos e posteriormente adaptadas na estrutura básica do algoritmo proposto para o planejamento de reativos.

Sugestões para futuros trabalhos:

- Melhorar a representação das variáveis discretas (bancos reativos, "taps", etc) e a solução deste problema através de técnicas de programação não linear;
- Melhorar o desempenho da implementação paralela buscando formas mais eficientes de gerar as propostas de investimento;
- Pesquisar a simulação de contingências sem executar o despacho reativo do sistema completo;
- Uso de algoritmos genéticos para resolver o problema de planejamento de reativos.

Apêndice A

Obtenção do sistema real de 309 barras

O sistema real de 309 barras usado nos testes apresentados neste trabalho foi obtido através do cálculo de equivalentes estáticos do sistema da região sul/sudeste planejado para 1994. A seguir descreve-se a forma como foi obtido este sistema equivalente.

Uma definição genérica dos sistema representado na figura A.1 são [33]:

- Sistema Interno É a área do sistema de potência que é observável pelo centro de controle, ou seja, pode ser resolvida pelo processador topológico e estimador de estado com a precisão necessária para as subseqüentes funções avançadas. No subconjunto do sistema interno pode existir partes que não são observáveis constituindo as chamadas ilhas não observáveis.
Neste trabalho a área de interesse constitui-se do sistema onde serão feitos estudos objetivando executar o planejamento de reativos.
- Sistema Externo Define-se sistema externo a parte da rede que não é observável pelo centro de controle. O sistema externo para planejamento de reativos é o sistema pertencente a uma outra concessionária que deve monitorar e/ou planejar a sua capacidade reativa.
- Fronteira As barras de fronteira são a interface entre os sistemas interno e externo.

O cálculo do equivalente estáticos para fins de estudos e planejamento de reativos

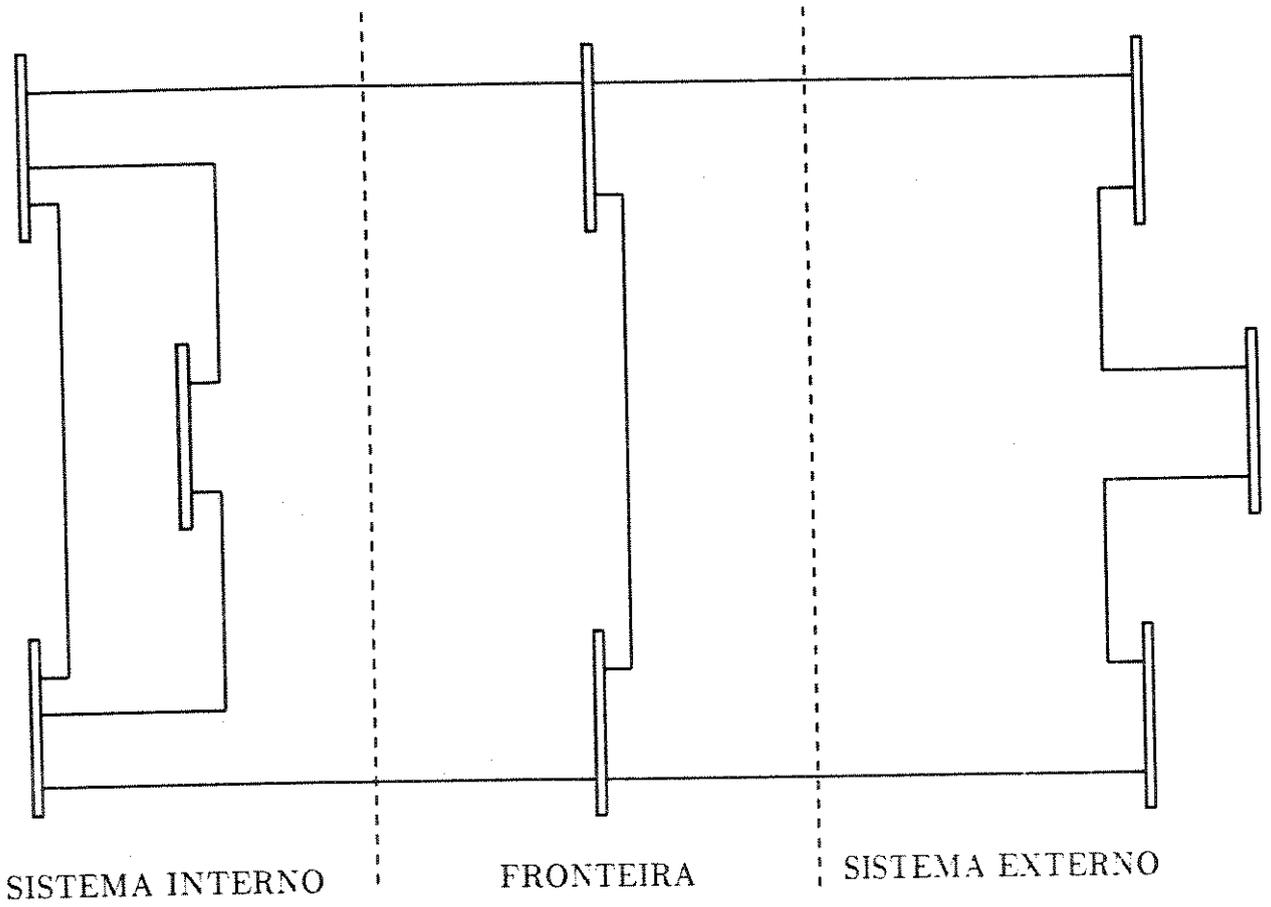


Figura A.1: *Divisões do sistema completo que será equivalenciado*

consistiu dos seguintes passos:

1 - Processar fluxo de potência para sistema completo, obtendo-se o estado em todas as barras (V_k, θ_k $k = 1, \dots, NB$):

2 - Obtenção das linhas equivalentes. Para determinação das linhas equivalentes basta conhecer a topologia do sistema externo. A redução pode ser feita através da eliminação nodal de Gauss;

3 - Montagem do sistema equivalente - sistema interno + fronteira + linhas equivalentes;

4 - Utilizando o estado obtido no passo 1 calcular as injeções em todas as barras para o sistema montado no passo 3. As injeções obtidas nas barras de fronteira são as injeções equivalentes ("boundary matching").

Apêndice B

Funções da Biblioteca do nCUBE

A biblioteca do nCUBE é composta por uma série de funções especiais (primitivas) que podem ser chamadas por programas escritos em linguagem de programação de alto nível como por exemplo FORTRAN77, C ou C++.

A seguir estão especificadas segundo a referência[37] as funções da biblioteca do nCUBE usadas na implementação paralela do algoritmo de planejamento de reativos.

nglobal

Não tem argumentos. Define a entrada e saída do programa como global. É muito útil quando todos os nós têm que realizar as mesmas operações de entrada e saída.

nlocal

Não tem argumento. Define a entrada e saída específica para cada nó.

amicclk

Esta "function" (dupla precisão) fornece o tempo decorrido desde a última chamada. O tempo é dado em microsegundos.

whoami(mynode,mypid,myhost,ndim)

Identificação dos processadores do nCUBE.

mynode: número do nó no cubo alocado;

mypid: os 16 “bits” menos significativos contêm o número relativo do nó. os 16 “bits” mais significativos fornecem o número de identificação do processo corrente;

myhost: retorna o número de identificação do “host”;

ndim: retorna a identificação do cubo alocado.

nwrite(buffer,nbytes,dest,type,flag)

Utilizada para enviar informações. Coloca uma mensagem a ser enviada em uma fila de transmissão.

buffer: endereço de onde a mensagem deve ser lida para ser transmitida;

nbytes: número de “bytes” a serem transmitidos;

dest: número do processo (16 “bits” menos significativos) e do processador (16 “bits” mais significativos) de destino;

type: número de identificação da mensagem a ser enviada;

flag: sem uso na implementação executada neste trabalho.

nread(buffer,nbytes,source,type,flag)

buffer: endereço onde a mensagem será colocada;

nbytes: número de “bytes” a serem lidos;

source: número do processo (16 “bits” menos significativos) e do processador (16 “bits” mais significativos) que enviou a mensagem.

type: número de identificação da mensagem a ser lida;

flag: sem uso na implementação executada neste trabalho.

Apêndice C

Desenvolvimento das Equações do Jacobiano Reativo - $[L_C]$

O fluxo de potência CRIC[21] desenvolvido por J. Carpentier se fundamenta em dois critérios, um de natureza teórica e o outro prática:

- O primeiro consiste em preservar as injeções ativas constantes durante a iteração reativa (os ângulos das tensões se combinam de forma a manter constantes as injeções de potência ativa);
- O segundo indica que quando os módulos das tensões são alterados, manter constantes as injeções de potência ativa é, na prática, equivalente a manter constante o fluxo de potência através de cada bipolo do sistema de energia elétrica.

Buscando o desenvolvimento de um algoritmo para o planejamento de reativos através de técnicas de programação linear, que usa uma matriz de sensibilidade igual à submatriz $[L]$ do jacobiano do fluxo de potência de Newton[33], adotou-se a submatriz Jacobiano da Injeções Reativas $[L_C]$ como esta sensibilidade. Nesta submatriz as sensibilidades da potência reativa com relação às magnitudes das tensões e “taps” de transformadores são calculadas explicitamente, enquanto que as sensibilidades entre a potência ativa e as variáveis do problema (magnitudes e ângulos das tensões, “taps”) são calculadas implicitamente.

Neste apêndice serão deduzidas segundo a referência [21] as expressões que fornecem o cálculo do jacobiano reativo $[L_C]$ (sensibilidade do PL).

Seja o bipolo representado na figura (C.1) e as seguintes relações:

$$z_{km} = r_{km} + jx_{km} \tag{C.1}$$

z_{km} : impedância do bipolo $k - m$:

r_{km}, x_{km} : respectivamente resistência e reatância do bipolo $k - m$:

$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} \tag{C.2}$$

y_{km} : admitância do bipolo $k - m$:

g_{km} : condutância série dada por:

$$g_{km} = y_{km} \sin \alpha_{km} \tag{C.3}$$

b_{km} : susceptância série dada por:

$$b_{km} = -y_{km} \cos \alpha_{km} \tag{C.4}$$

$$\alpha_{km} = \arctan \frac{r_{km}}{x_{km}} \tag{C.5}$$

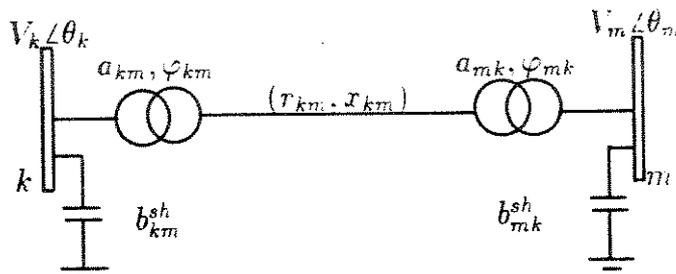


Figura C.1: Bipolo representando modelo π da linha de transmissão ligada às barras k e m por transformadores em fase

As expressões que fornecem o fluxo de potência ativa e reativa neste bipolo são dadas por:

$$P_{km} = (a_{km} V_k)^2 y_{km} \sin \alpha_{km} + a_{km} V_k V_m y_{km} \sin(\theta_{km} - \alpha_{km}) \quad (C.6)$$

$$P_{mk} = (a_{km} V_k)^2 \sin \alpha_{km} + a_{km} V_k V_m \sin(\theta_{mk} - \alpha_{km}) \quad (C.7)$$

$$Q_{km} = (a_{km} V_k)^2 y_{km} \cos \alpha_{km} - b_{km}^{sh} V_k^2 - a_{km} V_k V_m y_{km} \cos(\theta_{km} - \alpha_{km}) \quad (C.8)$$

$$Q_{mk} = y_{km} (V_k)^2 \cos \alpha_{km} - b_{mk}^{sh} V_m^2 - a_{km} V_k V_m \cos(\theta_{mk} - \alpha_{km}) \quad (C.9)$$

b_{km}^{sh}, b_{mk}^{sh} : elementos "shunt" ligados, respectivamente entre as barras k e m e a terra;

a_{km} : "tap" do transformador do lado k do bipolo.

As injeções líquidas de potência reativa nas barras k e m são dadas por:

$$Q_k = \sum_{k \neq m} Q_{km} - b_{km}^{sh} V_k^2$$

$$Q_k = -V_k \sum_{k \neq m} a_{km} V_m \cos(\theta_{km} - \alpha_{km}) + V_k^2 \sum_{k \neq m} (a_{km}^2 y_{km} \cos \alpha_{km} - b_{km}^{sh}) \quad (C.10)$$

$$Q_m = \sum_{k \neq m} Q_{mk} - b_{mk}^{sh} V_m^2$$

$$Q_m = -V_m^2 \sum_{k \neq m} y_{km} V_m \cos(\alpha_{km} - b_{mk}^{sh}) - V_m \sum_{k \neq m} a_{km} V_k y_{km} \cos(\theta_{mk} - \alpha_{km}) \quad (C.11)$$

Considerando fixo o fluxo de potência ativa P_{km} , quando a parte reativa está sob consideração, conclui-se que em (C.6) e (C.7) $\sin(\theta_{km} - \alpha_{km})$ é função de V_k, V_m, a_{km} .

Considerar o fluxo de potência ativa constante no bipolo é equivalente a manter a abertura angular constante, sendo que os valores de (a_{km}, V_k, V_m) têm que se recomparam para manter este critério - $\sin(\theta_{km} - \alpha_{km}) = cte$. Isolando $[\sin(\theta_{km} - \alpha_{km})]$ em (C.6) e (C.7) tem-se

$$\sin(\theta_{km} - \alpha_{km}) = \frac{P_{km} - a_{km}^2 y_{km} V_k^2 \sin \alpha_{km}}{a_{km} y_{km} V_k V_m} \quad (C.12)$$

$$\sin(\theta_{mk} - \alpha_{km}) = \frac{P_{mk} - y_{km} V_m^2 \sin \alpha_{km}}{a_{km} y_{km} V_k V_m} \quad (C.13)$$

e usando a relação trigonométrica:

$$\sin^2(\theta_{km} - \alpha_{km}) + \cos^2(\theta_{km} - \alpha_{km}) = 1$$

manipulando as equações (C.10) e (C.11) tem-se:

$$Q_k = V_k^2 \sum_{k \neq m} (a_{km}^2 y_{km} \cos \alpha_{km} - b_{km}^{sh}) - V_k \sum_{k \neq m} a_{km} y_{km} V_m \sqrt{1 - \left(\frac{P_{km} - a_{km}^2 y_{km} V_k^2 \sin \alpha_{km}}{a_{km} y_{km} V_k V_m} \right)^2} \quad (C.14)$$

$$Q_m = V_m^2 \sum_{k \neq m} (y_{km} \cos \alpha_{km} - b_{mk}^{sh}) - V_m \sum_{k \neq m} a_{km} y_{km} V_k \sqrt{1 - \left(\frac{P_{mk} - y_{km} V_m^2 \sin \alpha_{km}}{a_{km} y_{km} V_k V_m} \right)^2} \quad (C.15)$$

Cálculos das sensibilidades:

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = 2V_k \sum_{k \neq m} (a_{km}^2 y_{km} \cos \alpha_{km} - b_{km}^{sh}) - \sum_{k \neq m} k \neq m a_{km} y_{km} \left[\frac{V_m + 2a_{km} V_k \sin \alpha_{km} \sin(\theta_{km} - \alpha_{km})}{\cos(\theta_{km} - \alpha_{km})} \right] \quad (C.16)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = - \frac{a_{km} y_{km} V_k}{\cos(\theta_{km} - \alpha_{km})} \quad (C.17)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial a_{km}} = 2a_{km}y_{km}V_k^2 \cos\alpha_{km} - \left[\frac{y_{km}V_kV_m + 2a_{km}y_{km}V_k^2 \operatorname{sen}\alpha_{km} \operatorname{sen}(\theta_{km} - \alpha_{km})}{\cos(\theta_{km} - \alpha_{km})} \right] \quad (\text{C.18})$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial V_m} = 2V_m \sum_{m \neq qk} (y_{km} \cos\alpha_{km} - b_{km}^{sk}) - \sum_{m \neq k} \frac{y_{km} [a_{km}V_k + 2V_m \operatorname{sen}\alpha_{km} \operatorname{sen}(\theta_{mk} - \alpha_{km})]}{\cos(\theta_{mk} - \alpha_{km})} \quad (\text{C.19})$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial V_k} = - \frac{a_{km}y_{km}V_m}{\cos(\theta_{mk} - \alpha_{km})} \quad (\text{C.20})$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial a_{km}} = - \frac{y_{km}V_mV_k}{\cos(\theta_{mk} - \alpha_{km})} \quad (\text{C.21})$$

Apêndice D

Diagramas de Blocos - PL sucessiva e discretização

A partir dos algoritmos de PL sucessiva e discretização heurística das propostas de investimento, apresentam-se neste Apêndice os diagramas de blocos detalhados da implementação computacional dos mesmos.

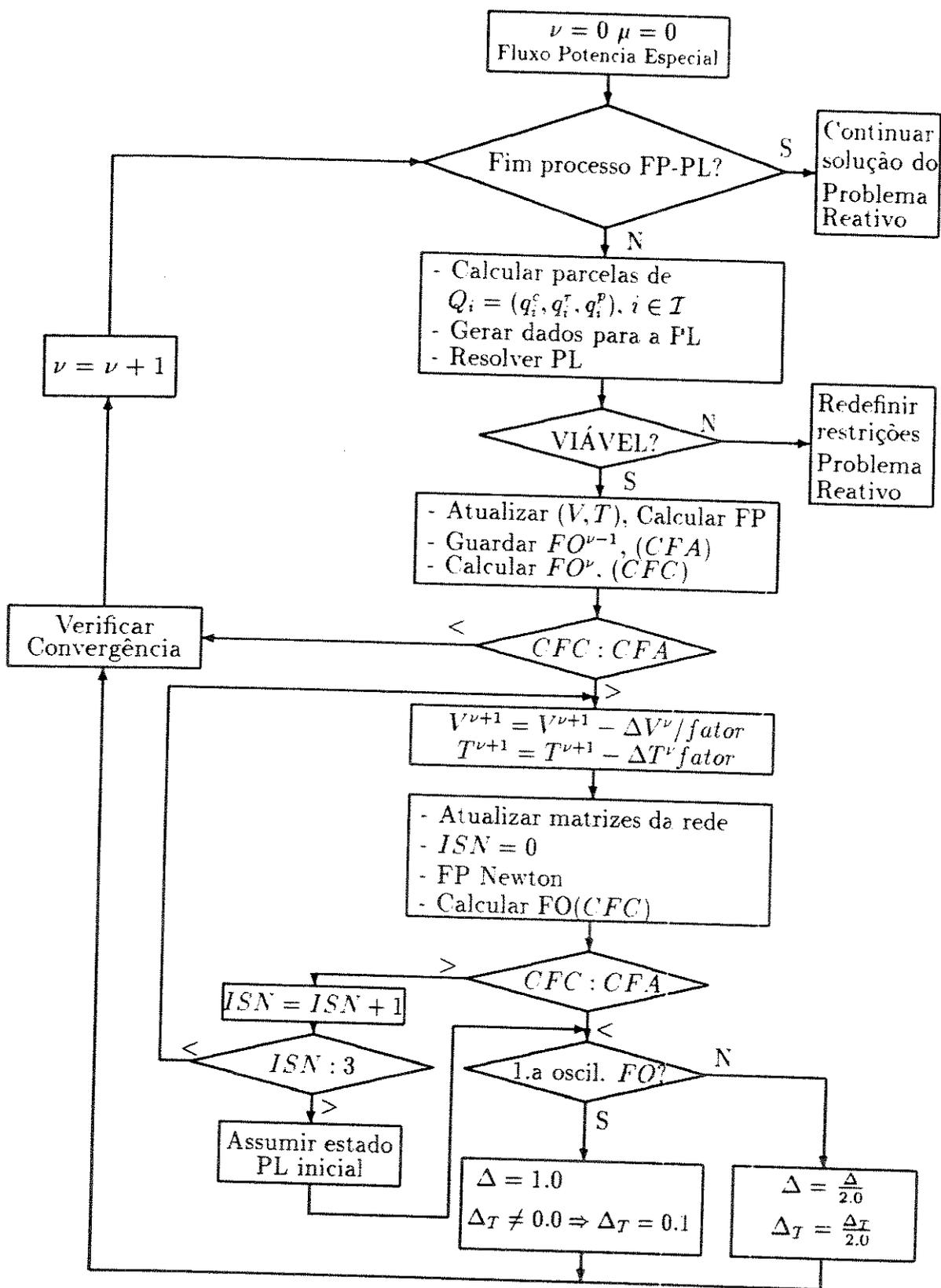
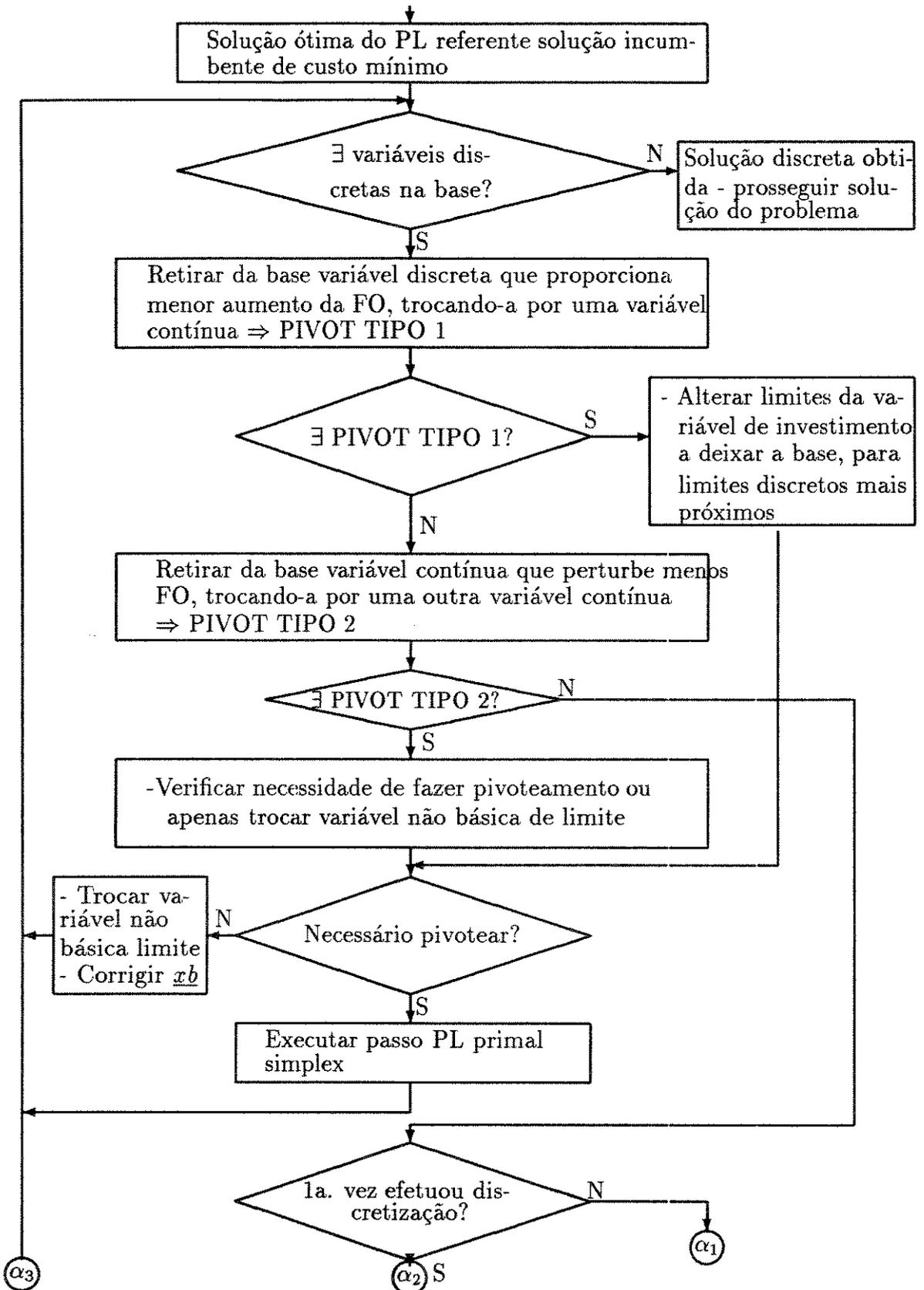


Figura D.1: Diagrama de blocos ilustrando PL sucessiva e procedimento heurístico para resolver problema de oscilação da FO



continua próxima página ...

Bibliografía

- [1] Lebow, W.M. & Rouhani, R. & Nadira, R. & Usoro, P.B. & Mehra, R.K. & Sobieski, D.W. & Pal, M.K. & Bhavaraju, M.P. "Optimization of Reactive Volt-Ampere (VAR) Sources in System Planning". Vol. 1: Solution Techniques. Computing Methods and Results, EL-3279, Vol.1, EPRI Final Report, November 1984.
- [2] Lebow, W.M. & Rouhani, R. & Nadira, R. & Usoro, P.B. & Mehra, R.K. & Sobieski, D.W. & Pal, M.K. & Bhavaraju, M.P. "A Hierarchical Approach to Reactive Volt-Ampere (VAR) Optimization in System Planning". IEEE Transaction on PAS, 104(8):2051-2057, August 1985.
- [3] Granville, S. & Pereira, M.V.F. & Monticelli, A.J. "Use of Decomposition Techniques in Expansion Planning: volume three - an integrated methodology for VAR sources planning", EPRI Final Report for RP2473-6.
- [4] Granville, S. & Pereira, M.V.F. & Monticelli, A.J. "An Integrated Methodology for VAR Sources Planning", IEEE Transactions on PAS, 3(2):549-557, May 1988.
- [5] Granville, S. & Lima, M.C.A. "Application of Decomposition Techniques to VAR Planning: Methodological & Computational Aspects", IEEE PES 1994 Winter Meeting, New York, NY.
- [6] Hong, Y.Y & Sun, D.I. & Lin, S.Y. "Multi-year Multi-case Optimal VAR Planning", 1989 IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4 November 1990, pp.1992-1301.
- [7] Gómez, T. & Pérez-Arriaga, I.J. & Lumbreras, J. & Parra, V.M. "A Security-Constrained Decomposition Approach to Optimal Reactive Power Planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991, pp. 1069-1076.

-
- [8] Aoki, K. & Fan, M. & Nishikori, A. "Optimal VAR Planning by Approximation Method for Recursive Mixed-Integer Linear Programming", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 4, Nov. 1988, pp.1741-1747.
- [9] Lin, W.E & Papalexopoulos, A.D. & Tinney, W.F. "Discrete Shunt Controls In A Newton Optimal Power Flow", *IEEE/PES Winter Meeting*, New York, NY, 1991.
- [10] Hsiao, Y. & Liu, C. & Chiang, H. & Chen, Y. "A New Approach for Optimal VAR Planning in Large Scale Electric Power Systems", *IEEE/PES Summer Meeting*, Seattle, WA, 1992.
- [11] Deeb, N.I. & Shahidepour, S.M. "Decomposition Approach for Minimising Real Power Losses in Power Systems", *IEE Proceedings-C*, 138(1):27-38, January 1991.
- [12] Granville, S. "Optimal Reactive Dispatch Through Interior Points Methods", *IEEE/PES Winter Meeting*, Columbus, OH, January 31 - February 5, 1993.
- [13] Abdul-Rahman, K.H. & Shahidepour, S.M. "Application of Fuzzy Sets to Optimal Reactive Power Planning with Security Constraints", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 2, May 1994, pp. 589-597.
- [14] Obadina, O.O. & Berg, G.J. "VAR Planning for Power System Security", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4, No. 2, May 1989, pp. 677-686.
- [15] Iba, K. "Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 2, May 1994, pp. 685-692.
- [16] Hong, Y. & Liu, C. "A Heuristic and Algorithmic Approach to VAR Planning", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 2, May 1992, pp. 505-512.
- [17] Hsiao, Y. & Chiang, H. & Liu, C. & Chen, Y. "A Computer Package for Optimal Multi-Objective VAR Planning in Large Scale Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 2, May 1994, pp. 668-676
- [18] Garcia, A.V. & Mantovani, J.R.S. "Alocação de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica Utilizando um Modelo Implicitamente Acoplado". In: *Congresso Brasileiro de Automática, 7o., Anais da Sociedade Brasileira de Automática*, São José dos Campos. 1988, pp.861-866.
- [19] Mantovani, J.R.S. "Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica: Solução Via Programação Linear Sucessiva Utilizando um Modelo Implicitamente Acoplado", *Tese de mestrado*, UNICAMP, 1987.

-
- [20] Geoffrion, A.M. "Generalized Benders Decomposition" *JOTA* 10(4):237-260. 1972.
- [21] Carpentier, J.L. "CRIC, a New Active Reactive Decoupling Process in Load Flows. Optimal Power Flow and System Control". Proc. IFAC Conference on Power Systems and Power Plan Control, August 1986, pp.65-70.
- [22] Barr, R.S. & Glover, F. & Klingman, D. "A New Optimization Method for Large Scale Fixed Charge Transportation Problems", *Operations Research*, Vol.29, No.3, May-June 1981, pp.448-463.
- [23] Cooper, L. & Drebes, C. "An Approximate Solution Method For the Fixed Charge Problem", *Naval Research Logistics Quarterly*, 1967, pp.101-111.
- [24] Stott, B. & Alsac, O. "Experience with Successive Linear Programming for Optimal Rescheduling of Active and Reactive Power", *CIGRE/IFAC Symposium on Control Applications to Power System Security*, Florence, 1983.
- [25] Palacios-Gomez, F. & Lasdon, L. & Engquist, M. "Nonlinear Optimization by Successive Linear Programming", *Management Science*, Vol. 28, No. 10, October 1982, pp.1106-1120.
- [26] Geoffrion, A.M. & Marsten, R.E. "Integer Programming Algorithms: A Framework and State-of-Art Survey", *Management Science*, (18):465-481, 1972.
- [27] Dakin, R.J. "A Tree Search Algorithm for Mixed Integer Programming Problems", *Computer Journal*, 8(3):250-255, 1965.
- [28] Pruul, E.A. & Nemhauser, G.L. & Rushmeier, R.A. "Branch- and-Bound and Parallel Computation: A Historical Note", *Operations Research Letters*, 7(2):65-69, April 1988.
- [29] Boehning, R.L. & Butler, R.M. & Gillett, B.E. "A Parallel Integer linear Programming Algorithm", *European Journal of Operational Research*, North-Holland, No. 34 1988 pp.393-398.
- [30] Kindervater, G.A.P. & Trienekens, H.W.J.M. "Experiments With Parallel Algorithms For Combinatorial Problems", *European Journal of Operational Research*, North-Holland, No. 33 1988 pp.65-81.
- [31] Bruin, A. & Rinnooy Kan, A.H.G. & Trienekens, H.W.J.M. "A Simulation Tool For The Performance Evaluation Of Parallel Branch And Bound Algorithms", *Mathematical Programming*, North Holland, No. 42 1988 pp.245-171.
- [32] Balas, E. & Martin, C.H. "Pivot and Complement - A Heuristic For 0-1 Programming", *Management Science*, Vol.26, No.1, January 1980, pp.86-96.

-
- [33] Monticelli, A.J. "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica". Editora Edgard Blücher, 1983.
- [34] Sun, D.I. & Ashley, B. & Hughes A. & Tinney, W. F. "Optimal Power Flow by Newton Approach". IEEE Transactions on Power Systems. No. 10, October 1984, pp. 2854-2880.
- [35] Quinn, M. "Designing Efficient Algorithms for Parallel Computers. Ed. McGraw-Hill, 1987;
- [36] Stone, H. "High Performance Computer Architectures", Addison-Wesley Publishing Co., 1987.
- [37] NCUBE-2 Processor Manual, Dezembro 1990.
- [38] University of Washington Energy Group Power Systems Archive.
- [39] Duff, I. S. - MA28 - a set of FORTRAN subroutines for sparse unsymmetric linear equations, A.E.R.E. Report R.8730..., HMSO. London. 1977.
- [40] MINOS 5.4 User's Guide - Systems Optimization Laboratory, Stanford University, Stanford, California.
- [41] Santos, J.V.C. "Análise de Segurança Estática de Sistemas de Potência: Um Estudo Sobre Critérios de Seleção de Contingências no Subproblema Reativo", Tese de mestrado, UNICAMP, 1993.
- [42] Rodrigues, M. & Saavedra, O.R. & Monticelli, A.J. "Asynchronous Programming Model for the Concurrent Solution of the Security Constrained Optimal Power Flow Problem" IEEE Summer Meeting. July 1993, Vancouver - Canadá.