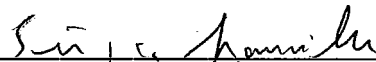


UMA ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO DE FONTES DE POTÊNCIA REATIVA NO MODO DE PLANEJAMENTO PREVENTIVO

MARIA CÂNDIDA ABIB LIMA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

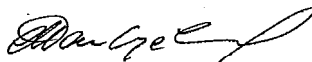
Aprovada por:



Sérgio Granville/Ph.D.
(Presidente)



Nelson Maculan, Dr.Ing.



Mário Veiga Ferráz Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JANEIRO DE 1992

LIMA, MARIA CÂNDIDA ABIB

Uma Abordagem de Otimização de Fontes de Potência Reativa no Modo de Planejamento Preventivo [Rio de Janeiro] 1992.

XIII, 114 p., 29.7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de Sistemas e Computação, 1992)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Planejamento de Reativos I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

Aos meus pais

Lício e Jamili

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Sérgio Granville, pela sua paciente orientação e apoio constante, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho;

À COPPE, pela oportunidade a mim oferecida;

Ao CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, em particular ao Departamento de Sistemas, pela oportunidade e suporte técnico–financeiro;

À Nora Marcela Campodónico Viacava, por seu apoio, sugestões e revisão de texto;

Agradeço a Flávio Rodrigo de Miranda Alves, por suas sugestões e revisão de texto;

Aos colegas Luiz Correa Lima e Simone Prado, por suas sugestões no decorrer do desenvolvimento da tese;

Agradeço a Mário Veiga Ferraz Pereira, pelo incentivo à realização deste trabalho;

À ELETROBRÁS, em especial à Luiz Felipe Baptista, pela orientação nos critérios de planejamento e fornecimento dos dados;

À todos colegas do CEPEL, pelo apoio demonstrado;

À Maria Cristina Rangel e Murilo Castellano pela amizade e companheirismo durante o primeiro ano de mestrado;

Aos meus pais e irmãs pelo apoio durante todo período de mestrado;

Agradeço a Ayru Leal de Oliveira Filho, pelo apoio, paciência e compreensão nos momentos mais críticos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.).

UMA ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO DE FONTES DE DE POTÊNCIA REATIVA NO MODO DE PLANEJAMENTO PREVENTIVO

Maria Cândida Abib Lima

Janeiro, 1992

Orientador: Sérgio Granville

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

O problema do planejamento ótimo de fontes de potência reativa consiste na determinação do dimensionamento e localização ótimos das fontes de potência reativa. A partir dos dados de rede elétrica e informações técnico-econômicas acerca dos equipamentos de compensação reativa, procura-se determinar um plano de investimento de custo mínimo que assegure a operação viável do sistema elétrico tanto em estado normal, como em situações de contingências

Neste trabalho, o planejamento ótimo de fontes de potência reativa é formulado como um problema misto não-linear/inteiro. Técnicas de decomposição são empregadas para decompor o problema original em dois níveis: problema de investimento e de operação. Várias configurações da rede são consideradas e uma especial atenção é dada à estrutura hierárquica do problema de operação – operação estado normal/contingências. Exemplos numéricos com redes de grade porte são apresentados e discutidos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.).

**AN APPROACH TO REACTIVE POWER SOURCES
OPTIMIZATION IN PREVENTIVE
PLANNING MODE**

Maria Cândida Abib Lima

Janeiro, 1992

Thesis Supervisor: Sérgio Granville
Department: Systems and Computation Engineering

Optimal reactive sources planning consists in determining the optimal type, size and sites of reactive sources. Given the electric system data and technical-economical information about reactive equipments, the objective is to determine a minimum cost expansion plan which ensures feasible system operation simultaneously for situations of the normal state and contingencies.

In this dissertation, optimal reactive sources planning is formulated as mixed nonlinear/integer problem. Decomposition techniques are used to decompose the original problem in two levels: investment problem and operation problem. Several network configurations are considered and a special attention is given to the hierarchical structure of the operation problem – normal state/contingencies configurations. Numerical examples with large systems are presented and discussed.

ÍNDICE

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
 CAPÍTULO II – POTÊNCIA REATIVA E FLUXO DE POTÊNCIA .	6
 II.1 – Introdução	6
 11.2 – Conceitos preliminares	6
II.2.1 – Potência complexa	7
II.2.2 – Relação entre potência reativa e tensão	8
 11.3 – Fluxo de potência	11
 II.3.1 – Formulação matemática	12
II.3.1.1 – Equações algébricas não lineares	13
II.3.1.2 – Inequações algébricas não lineares	16
II.3.1.3 – Sistema completo	17
 II.3.2 – Métodos de solução de fluxo de potência	18
II.3.2.1 – Solução do problema básico	18
II.3.2.2 – Método de Newton	20
II.3.2.3 – Método Desacoplado	22
II.3.2.4 – Método Desacoplado Rápido	24

II.3.3 – Controles	24
II.3.3.1 – Modos de representação	25
II.3.3.2 – Controle da magnitude de tensão em nó da rede (barra local)	26
II.3.3.3 – Controle de magnitude de tensão em nó da rede por ajuste de tap (transformadores em fase)	27
II.3.3.4 – Controle de magnitude de tensão em nó da rede (barra remota)	27
 CAPÍTULO III _ FONTES DE POTÊNCIA REATIVA	 29
 III.1 _ Introdução	 29
 111.2 _ Principais componentes do sistema e sua relação com a potência reativa	 29
 111.3 _ Equipamentos utilizados para compensação reativa	 31
III.3.1 – Capacitores shunt	31
III.3.2 – Reatores shunt	32
III.3.3 – Compensadores síncronos	32
III.3.4 – Compensadores estáticos	33
III.3.5 – Capacitores série	34
 III.4 _ Considerações sobre as fontes de potência reativa na otimização	 34
III.4.1 – Aspectos econômicos das fontes de potência reativa	35

CAPÍTULO IV – DECOMPOSIÇÃO DO PROBLEMA	38
IV.1 – Introdução	38
IV.2 – Problema geral	39
IV.2.1 – Tipo de equipamento	40
IV.2.2 – Formulação básica	41
IV.3 – Metodologia da decomposição	43
IV.4 – Problema de investimento	45
IV.5 – Algoritmo geral para solução do problema de alocação ótima de fontes de potência reativa	46
IV.6 – Construção do corte de viabilidade ou corte de Benders	47
 CAPÍTULO V – PROBLEMA DE OPERAÇÃO	 51
V.1 – Introdução	51
V.2 – Modos de planejamento	51
V.3 – Problema de operação para modo de planejamento corretivo	53
V.3.1 – Algoritmo utilizado para resolução dos subproblemas de operação	56

V.4 – Problema de operação para modo de planejamento preventivo ..	57
V.4.1 – Algoritmo utilizado para resolução do problema de operação no modo de planejamento preventivo	60
V.4.2 – Manutenção do ponto de operação do caso base	61
V.4.3 – Construção do corte de sensibilidade	62
CAPÍTULO VI – RESULTADOS	69
VI.1 – Introdução	69
VI.2 – Análise de viabilidade	70
VI.3 – Exemplo de uma seqüência de estudo	73
VI.4 – Modo de Planejamento Preventivo x Modo de Planejamento Corretivo	76
VI.5 – Exemplo de utilização do sistema	79
VI.6 – Resultados do sistema brasileiro	82
VI.6.1 – Sistema de 113 barras	83
VI.6.2 – Sistema de 1834 barras	85
VI.6.3 – Sistema de 1832 barras	88
VI.7 – Conclusões	88

CAPÍTULO VII – FORMA ALTERNATIVA DE TRATAMENTO DO SUBPROBLEMA DE OPERAÇÃO DE CONTINGÊNCIAS NO MODO DE PLANEJAMENTO PREVENTIVO	90
VII.1 – Introdução	90
VII.2 – Manutenção do ponto de operação de caso base	90
VII.3 – Algoritmo utilizado para resolução do problema de operação no modo de planejamento preventivo	94
VII.4 – Comparação entre os dois modos de solução	95
VII.4.1 – Sistema de 113 barras	95
VII.4.2 – Sistema de 1834 barras	99
VII.4.3 – Sistema de 1832 barras	101
VII.4.4 – Conclusão	102
CAPÍTULO VIII – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	106
VIII.1 – Conclusões	106
VIII.2 – Desenvolvimentos futuros	108
VIII.2.1 – Subproblema de operação de contingência no modo de planejamento preventivo	108
VIII.2.2 – Modo de planejamento preventivo estendido	108

VIII.2.3 –	Implementação de um novo algoritmo de fluxo de potência ótimo aplicado à otimização de fontes de potência reativa	109
REFEFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		110

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Em torno de 30% de todos os recursos mundiais de energia primária são usados para gerar energia elétrica e esta é quase toda transmitida e distribuída através de corrente alternada em 50 e 60 Hertz [1]. O aumento e difusão das cargas do sistema implica na necessidade da máxima utilização da capacidade de transmissão.

Um modo de se aumentar a capacidade de transferência de energia (transmissão) em sistemas de potência em corrente alternada e reduzir os problemas de tensão é através da compensação reativa, isto é, da instalação de equipamentos que são fontes de potência reativa (no Capítulo III será feita uma descrição destes equipamentos). Surge então o problema do planejamento da expansão das fontes de potência reativa que é o problema da localização e do dimensionamento destas fontes no sistema elétrico.

O problema de planejamento ótimo de fontes de potência reativa tem como dificuldades à sua implementação, além da sua não-linearidade, os seguintes aspectos:

- escolha dos critérios que serão usados no planejamento: estes critérios envolvem deste o nível de tensão em que o sistema deve operar até quais controles poderão ser alterados durante a operação do sistema em situações de emergência ou não;

- definição dos custos;
- restrições técnicas e de segurança: considerações das restrições operacionais, níveis de tensão, bloqueio da alocação de fontes de potência reativa em determinadas barras, consideração de áreas de interesse para a compensação reativa, etc;
- aquisição de dados;
- modelagem do sistema: consideração dos equipamentos de compensação reativa existentes e dos equipamentos que serão instalados;
- convergência do algoritmo utilizado para estudo de fluxo de potência: a deficiência de reativo no sistema elétrico muitas vezes pode fazer com que os algoritmos utilizados para o estudo de fluxo de potência não converjam;
- não-convexidade da rede elétrica;

Durante os últimos vinte e cinco anos, numerosos métodos vêm sendo propostos para se resolver o problema da compensação reativa em estado permanente, tais como sucessivos estudos de fluxo de potência, fluxo de potência ótimo, técnicas de sensibilidade, etc [2].

Tradicionalmente, nas concessionárias de energia elétrica, o problema da expansão das fontes de potência reativa tem sido resolvido através de métodos de tentativa e erro. Estes métodos se utilizam de programas de fluxo de potência e são procedimentos muito dispendiosos do ponto de vista humano e computacional (veja [3], [4], [5], [6]). A solução encontrada deste modo não é ótima e sim a

melhor das soluções tentadas.

Assim, fica claro que para a determinação de uma solução que seja ótima do ponto de vista econômico-e-operacional-e-que-seja obtida de-uma maneira eficiente, o uso de técnicas de pesquisa operacional é indicado.

No sentido de se obter algoritmos que utilizam técnicas de otimização para a solução do problema da expansão ótima de fontes de potência reativa, vários trabalhos foram publicados desde a década de 60 [7]. Muitas destas publicações são baseadas em modelos linearizados da rede elétrica e, portanto, em métodos de programação linear. Exemplos podem ser encontrados em trabalhos de Iba et alii [8], Garcia [9] e Mantovani [10]. Exemplo de formulação considerando a natureza discreta dos equipamentos pode ser visto em Aoki et alii [11]. Outros pesquisadores têm usado programação não linear como exemplo Ertem et alii [12].

Nos trabalhos anteriores, as várias configurações da rede (caso base e contingências) somente podem ser consideradas separadamente. Recentemente, técnicas de decomposição foram propostas para a resolução do problema de expansão ótima de fontes de potência reativa com o objetivo de viabilizar o tratamento simultâneo destas configurações. Exemplos de aplicação de técnicas de decomposição podem ser vistos em Lebow et alii [13], Granville et alii [14] e Hong et alii [15].

Na aplicação de técnicas de decomposição no problema de alocação ótima de fontes de potência reativa, o problema original é decomposto inicialmente em dois níveis: problema de investimento (misto linear–inteiro) e problema de operação (não linear). O problema de operação, por sua vez, é decomposto em problemas menores correspondentes à operação nas várias configurações da rede.

Neste trabalho, o problema do planejamento ótimo de fontes de potência reativa é formulado como um problema misto não-linear/inteiro. Seguindo a linha dos trabalhos citados anteriormente, técnicas de decomposição foram empregadas para decompor o problema original em dois níveis: problema de investimento e de operação. Várias configurações da rede são consideradas e uma especial atenção é dada à estrutura hierárquica do problema de operação – operação caso base / contingências. Exemplos numéricos com redes de grande porte são apresentados e discutidos.

A seqüência de apresentação dos vários tópicos é apresentada a seguir:

O Capítulo II – Potência Reativa e Fluxo de Potência – trata da relação existente entre potência reativa e tensão, além de introduzir alguns conceitos de Engenharia Elétrica (entre estes o de potência reativa). Também neste capítulo é feita uma detalhada descrição de fluxo de potência, explicando o que é, para que serve e como é resolvido (algoritmos mais utilizados).

No Capítulo III – Fontes de Potência Reativa – os equipamentos utilizados em compensação reativa, bem como seus aspectos econômicos, serão apresentados com o objetivo de preparar o leitor para o próximo Capítulo.

O Capítulo IV – Decomposição do Problema – descreve o problema da expansão ótima de fontes de potência reativa e a metodologia de decomposição utilizada para resolvê-lo.

No Capítulo V – Problema de Operação – os conceitos de modo de planejamento Corretivo e Preventivo estão detalhados. Além disso, neste Capítulo se encontra o esquema de decomposição do problema de operação para ambos os modos de planejamento.

O Capítulo VI – Resultados – mostra os resultados computacionais com seus respectivos tempos de execução além de fazer uma detalhada análise dos mesmos. Serão mostrados resultados da aplicação da metodologia em sistemas norte-americano (329 e 3150-barras) e brasileiro (1-13, 1832 e 1834 barras).

O Capítulo VII – Forma Alternativa de Tratamento do Subproblema de Operação de Contingências no modo de Planejamento Preventivo – mostra um modo alternativo de solução dos subproblemas de operação de contingências no modo de planejamento preventivo, assim como traça um paralelo entre os dois modos de solução destes subproblemas apresentados neste trabalho.

No **Capítulo VIII** – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros – são apresentadas as conclusões obtidas através deste trabalho assim como propostas de trabalhos futuros são feitas.

CAPÍTULO 11

POTÊNCIA REATIVA E FLUXO DE POTÊNCIA

II.1 – Introdução

Um dos itens básicos da qualidade de suprimento de energia elétrica é a manutenção da tensão dentro de determinados limites durante a operação do sistema. Isto é feito através do controle dos fluxos de potência reativa na rede. Os fluxos de potência reativa são determinados a partir de estados da rede elétrica.

Uma das ferramentas básicas para o estudo da rede elétrica em suas diversas configurações (situação normal e emergências) é o fluxo de potência ou fluxo de carga. Através do fluxo de potência pode-se calcular o estado do sistema para determinada configuração.

Neste capítulo será feita uma rápida introdução a conceitos básicos de Engenharia Elétrica na tentativa de deixar clara a relação entre potência reativa e tensão e de familiarizar o leitor com os termos usados em eletricidade. Na seção seguinte haverá uma descrição de fluxo de potência com sua formulação matemática, métodos de solução e controles.

II.2 – Conceitos preliminares

Nesta seção será feita uma descrição de alguns conceitos preliminares de

Engenharia Elétrica.

II.2.1 – Potência complexa [16]

Considere um circuito de corrente alternada que tem para valores de tensão e corrente as seguintes expressões:

$$V = |V| (\cos \theta + j \operatorname{sen} \theta)$$

$$I = |I| (\cos \varphi + j \operatorname{sen} \varphi)$$

onde: V = Tensão no circuito;

I = Corrente no circuito.

Tem-se que a potência complexa (S) é definida por:

$$S = V I^*$$

onde: $I^* = |I| (\cos \varphi - j \operatorname{sen} \varphi)$

obs.: o módulo $|S|$ da potência complexa é chamado de potência aparente.

Então:

$$S = |V| (\cos \theta + j \operatorname{sen} \theta) |I| (\cos \varphi - j \operatorname{sen} \varphi)$$

$$S = |V| |I| [\cos \theta \cos \varphi + \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \varphi + j (\operatorname{sen} \theta \cos \varphi - \cos \theta \operatorname{sen} \varphi)]$$

$$S = |V| |I| [\cos (\theta - \varphi) + j \operatorname{sen} (\theta - \varphi)]$$

Assim:

$$S = |V| |I| (\cos \phi + j \operatorname{sen} \phi)$$

onde: $\phi = \theta - \varphi$

Logo:

$$S = \underbrace{|V| |I| \cos \phi}_P + j \underbrace{|V| |I| \operatorname{sen} \phi}_Q$$

$$S = P + j Q$$

onde: $P =$ Potência Ativa;

$Q =$ Potência Reativa;

$\phi =$ diferença angular entre V e I .

Potência Reativa é, por definição, o termo imaginário da potência complexa.

Em uma análise no domínio do tempo observa-se que a potência reativa, ao contrário da potência ativa (chamada potência útil), é incapaz de realizar trabalho.

A Potência Reativa é medida em voltamperes reativos (VAr), mas na prática a unidade utilizada é o MVar que corresponde a 10^6 VAr.

II.2.2 – Relação entre potência reativa e tensão [16]

Um perfil constante da tensão nos garante que está havendo um equilíbrio entre a potência reativa produzida e a potência reativa consumida. Sempre que o módulo da tensão em uma barra (nó da rede) sofrer variações, isso significa que o

balanço da potência reativa não está sendo mantido nesta barra.

Seja o sistema de duas barras da figura (II.1), levando-se em consideração as seguintes hipóteses:

- a tensão da barra 1 é mantida constante;
- V_1 será considerada ^{*}tensão de referência;
- a impedância da linha de transmissão é puramente indutiva ($Z = jX$);
- a potência na barra 2 é aproximadamente igual a $P + jQ$, sendo que a potência reativa é um pouco maior na barra 1.

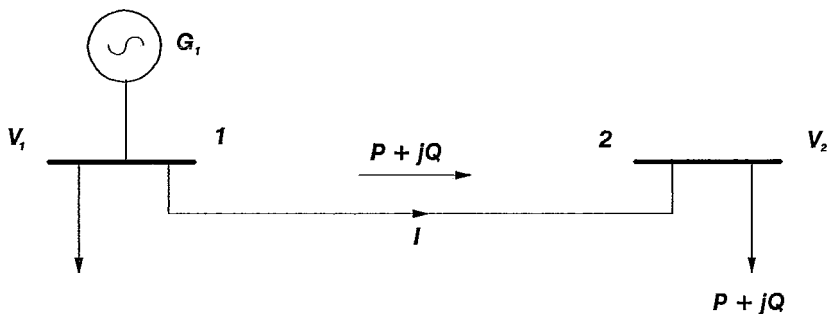


figura II.1 – Representação gráfica de um sistema elétrico de duas barras

Devido à queda de tensão ao longo da linha e aplicando-se a Primeira lei de Kirchhoff [17], tem-se:

$$V_2 = V_1 - IZ \quad (II.1)$$

* Impedância (Z) é a grandeza que representa a oposição à circulação de corrente elétrica em um circuito. É definida como a relação entre V e I : $Z = V / I$. Portanto tem uma parte real e outra imaginária: $Z = R + jX$ (sendo R resistência e X reatância) [18].

Sabemos que:

$$V_1 I^* \approx P + jQ \Rightarrow I = \frac{P - jQ}{V_1} \quad (\text{II.2})$$

Substituindo (II.2) em (II.1), tem-se:

$$V_2 = V_1 - \frac{P - jQ}{V_1} jX$$

$$V_2 = V_1 - \frac{X}{V_1} Q - j \frac{X}{V_1} P$$

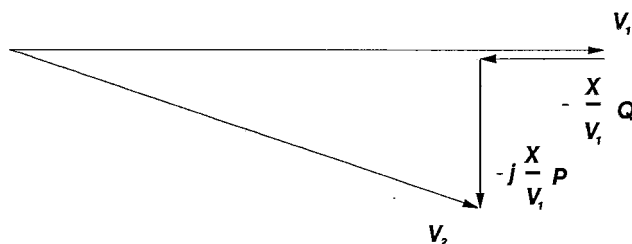


figura 11.2 – Diagrama fasorial do sistema de duas barras da figura (II.1)

Observando-se o diagrama fasorial mostrado na figura (11.2) nota-se o seguinte:

- uma variação da potência ativa P provoca uma queda desprezível do módulo da tensão, uma vez que o fasor relativo a P é perpendicular a V_1 ;
- uma variação da potência reativa Q provoca uma queda considerável do módulo de tensão, pois o fasor relativo a Q está em fase com V_1 .

Observe que no caso mostrado, para manter constante o módulo de V_2 , deve-se fazer com que as demandas de Q sejam compensadas localmente na barra 2, isto é, tem-se que injetar potência reativa na barra 2.

A partir das observações acima, conclui-se que a potência reativa Q é um parâmetro importante de controle da tensão do sistema.

11.3 – Fluxo de potência

O objetivo fundamental dos estudos de fluxo de potência é a determinação das tensões, correntes, potências ativas e reativas em diversos pontos de uma rede elétrica, sob determinadas condições de carga e geração. Estes estudos são feitos considerando-se que as variações do sistema elétrico com o tempo são suficientemente lentas para que se possa ignorar os efeitos transitórios (estado permanente).

Este estudo é importante tanto na operação quanto no planejamento do sistema elétrico. Na operação fornece informações sobre o desempenho do sistema elétrico em situação normal (caso base) ou em situação de emergência (quando ocorrem contingências). No planejamento, o fluxo de potência, fornece dados essenciais a uma avaliação da eficácia de planos alternativos para a expansão do sistema.

O problema do fluxo de potência pode ser formulado por um sistema de equações e inequações algébricas não lineares. O conjunto destas equações é formado por duas equações para cada barra. Cada uma das equações representa o fato de a soma das potências ativas e reativas injetadas em uma barra ser igual à soma das potências ativas e reativas que saem da mesma barra. Isso é a aplicação

da primeira lei de Kirchhoff à rede elétrica.

O conjunto de inequações é formado pelas restrições operacionais da rede elétrica e de seus-componentes.

II.3.1 – Formulação matemática

A cada barra k do sistema elétrico estão associadas quatro variáveis, sendo que duas delas entram no problema como dados (são especificadas) e duas delas são incógnitas, são elas:

V_k – magnitude da tensão da barra k ;

θ_k – ângulo da tensão da barra k ;

P_k – injeção líquida (geração menos carga) de potência ativa na barra k ;

Q_k – injeção líquida (geração menos carga) de potência reativa na barra k .

A partir da determinação de quais variáveis entram no problema como dados e quais entram como incógnitas tem-se os seguintes tipos de barras:

- **Barra PQ ou barra de carga:** as injeções de potência ativa (P_k) e reativa (Q_k) são especificadas. A magnitude e o ângulo da tensão são incógnitas;
- **Barra PV, barra de geração ou barra de tensão controlada:** a injeção de potência ativa (P_k) e a magnitude da tensão (V_k) são especificadas. A injeção de potência reativa e o ângulo da tensão são incógnitas;

- **Barra $V\theta$, barra de referência, barra swing ou barra slack:** o ângulo de fase (θ_k) e a magnitude da tensão (V_k) são especificadas. As injeções de potência ativa e reativa são incógnitas. Em qualquer sistema elétrico existe normalmente uma barra de referência cujo ângulo é a referência de fase do sistema. Este tipo de barra também tem a função de fechar o balanço de potência do sistema, levando em conta as perdas de transmissão não conhecidas antes de se ter a solução final do problema (daí a necessidade de se dispor de uma barra do sistema na qual não é especificada a potência ativa).

II.3.1.1 – Equações algébricas não lineares

Aplicando-se a Primeira lei de Kirchhoff ao sistema tem-se:

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

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

- onde:
- $k = 1, \dots, n_b - n_b$ é o número de barras do sistema elétrico;
 - P_k = injeção líquida (geração menos carga) de potência ativa na barra k ;
 - Q_k = injeção líquida (geração menos carga) de potência reativa na barra k ;
 - Ω_k = conjunto de barras que se ligam diretamente à barra k ;
 - V_k, V_m = magnitudes das tensões das barras terminais da ligação $k-m$;

θ_k, θ_m = ângulos das tensões das barras terminais da ligação k-m;

P_{km} = fluxo de potência ativa no ramo k-m;

Q_{km} = -fluxo de potência reativa no ramo k-m;

b_k^{sh} = susceptância de elementos "shunt" ligados à barra k.

Sendo $b_k^{sh} V^2$ a componente da injeção de potência reativa devida ao elemento shunt da barra.

obs.: As expressões acima foram definidas adotando-se a seguinte convenção de sinais: as injeções líquidas de potência são positivas quando entram na barra (geração) e negativas quando saem da barra (carga); os fluxos de potências são positivos quando saem da barra e negativos quando entram.

Os fluxos P_{km} e Q_{km} são funções não lineares de $V_k, V_m, \theta_k, \theta_m$ e podem ser deduzidos utilizando-se o modelo Π dos circuitos [19]:

$$P_{km} = (a_{km} V_k)^2 g_{km} - (a_{km} V_k) V_m g_{km} \cos(\theta_{km} + \phi_{km}) - (a_{km} V_k) V_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \phi_{km}) \quad (II.3)$$

$$Q_{km} = - (a_{km} V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + (a_{km} V_k) V_m b_{km} \cos(\theta_{km} + \phi_{km}) - (a_{km} V_k) V_m g_{km} \sin(\theta_{km} + \phi_{km}) \quad (II.4)$$

onde: $k = 1, \dots, n_b - n_b$ é o número de barras do sistema elétrico;

* Susceptância (B) é a parte imaginária da admitância (Y), que por sua vez é o inverso da impedância (portanto $Y = 1 / Z, Y = G + jB$).

- m = barras que se ligam diretamente à barra k ;
 V_k, V_m = magnitudes das tensões das barras terminais da ligação $k-m$;
 θ_{km} = $\theta_k - \theta_m$, defasamento angular no ramo $k-m$;
 ϕ_{km} = defasamento angular introduzido por transformadores defasadores no ramo $k-m$;
 P_{km} = fluxo de potência ativa no ramo $k-m$;
 Q_{km} = fluxo de potência reativa no ramo $k-m$;
 b_k^{sh} = susceptância de elementos "shunt" ligados à barra k .
 Sendo $b_k^{sh} V^2$ a componente da injeção de potência reativa devida ao elemento shunt da barra;
 b_{km} = susceptância série do ramo $k-m$;
 g_{km} = condutância série do ramo $k-m$;
 a_{km} = relação de transformação do transformador do ramo $k-m$.

As equações (11.3) e (11.4) são as expressões gerais dos fluxos e, como dito anteriormente, foram deduzidas a partir do modelo II dos circuitos considerando-se que:

- r no caso de linhas de transmissão $a_{km} = 1$ e $\phi_{km} = 0$;
- para transformadores em fase $b_k^{sh} = 0$ e $\phi_{km} = 0$;
- para defasadores puros $b_k^{sh} = 0$ e $a_{km} = 1$;
- r para defasadores $b_k^{sh} = 0$.

* Condutância (G) é a parte real da admitância (Y), que por sua vez é o inverso da impedância (portanto $Y = 1 / Z$, $Y = G + jB$).

II.3.1.2 – Inequações **algébricas** não lineares

Essas inequações são devidas às restrições operacionais da rede elétrica. Estes limites-de operação são:

- limites de injeção de potência reativa em barras PV

$$Q_k^{\min} \leq Q_k \leq Q_k^{\max}$$

- limites de tensão em barras PQ:

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max}$$

- limites de taps dos transformadores:

$$T_{km}^{\min} \leq T_{km} \leq T_{km}^{\max}$$

- limites de fluxos nos circuitos

$$| S_{km} | \leq S_{km}^{\max}$$

onde: S_{km} é o fluxo de potência aparente na linha k-m e é dado por:

$$S_{km} = (P_{km}^2 + Q_{km}^2)^{1/2}$$

II.3.1.3 – Sistema completo

A partir dos itens (II.3.1.1) e (II.3.1.2) tem-se o seguinte problema:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (\text{II.5})$$

$$Q_k = -b_k^{\text{sh}} V_k^2 + \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (\text{II.6})$$

$$Q_k^{\min} \leq Q_k \leq Q_k^{\max} \quad k \in \text{conjunto de barras PV}$$

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max} \quad k \in \text{conjunto de barras PQ}$$

$$T_{km}^{\min} \leq T_{km} \leq T_{km}^{\max}$$

$$|S_{km}| \leq S_{km}^{\max}$$

- onde: $k = 1, \dots, n_b - n_b$ é o número de barras do sistema elétrico;
- P_k = injeção líquida (geração menos carga) de potência ativa na barra k ;
- Q_k = injeção líquida (geração menos carga) de potência reativa na barra k ;
- Ω_k = conjunto de barras que se ligam diretamente à barra k ;
- V_k, V_m = magnitudes das tensões das barras terminais da ligação $k-m$;
- θ_k, θ_m = ângulos das tensões das barras terminais da ligação $k-m$;
- P_{km} = fluxo de potência ativa no ramo $k-m$;
- Q_{km} = fluxo de potência reativa no ramo $k-m$;
- S_{km} = fluxo de potência aparente no ramo $k-m$;
- b_k^{sh} = susceptância de elementos "shunt" ligados à barra k .

Sendo $b_k^{\text{sh}} V^2$ a componente da injeção de potência reativa devida ao elemento shunt da barra.

II.3.2 – Métodos de solução de fluxo de potência

Como pôde ser observado nas seções anteriores, o problema do fluxo de potência é um problema complexo cujas dimensões crescem muito rapidamente em função do quadrado do número de barras apresentado pelo sistema em estudo.

Os métodos de cálculo de fluxo de potência são, em geral, constituídos de duas partes. A primeira, também chamada de algoritmo básico, trata da solução iterativa de um sistema de equações. A segunda parte trata das restrições operativas (ajustes e controles). Em geral as duas partes do problema são resolvidas alternadamente, intercalando-se a solução das equações básicas com os ajustes e controles referentes às restrições operativas.

Existem vários métodos de solução do problema do fluxo de potência. Os de maior interesse prático e que apresentam melhores resultados são os métodos de Newton e seus derivados: método desacoplado e método desacoplado rápido.

II.3.2.1– Solução do problema básico

A solução de fluxo de potência consiste no fato de que sendo conhecidas duas grandezas por barra, deve-se determinar as outras duas de tal forma que as equações (11.5) e (11.6) sejam satisfeitas.

Considere-se uma rede elétrica com n_b barras, sendo n_c o número de barras

de carga (PQ), n_g o número de barras de geração (PV) e uma barra de referência ($V\theta$). O sistema (11.5, 11.6) pode ser reescrito como:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_k &= P_k - P_k(\underline{V}, \underline{\theta}) = 0 \\ \Delta Q_k &= Q_k - Q_k(\underline{V}, \underline{\theta}) = 0 \end{aligned} \right\} \text{(II.7)}$$

onde: $k = 1, \dots, n_b$

$$\underline{V} = (V_1, \dots, V_{n_b})^t$$

$$\underline{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_{n_b})^t$$

Reescrevendo resumidamente as grandezas que entram como dados e as grandezas que são incógnitas, por tipo de barra:

tipo de barra	dados	incógnitas
PQ	P_k, Q_k	V_k, θ_k
PV	P_k, V_k	Q_k, θ_k
V0	V_k, θ_k	P_k, Q_k

Observa-se que, no sistema (II.7), uma vez conhecendo-se V_k e θ_k para todas as barras, o problema de calcular P_k e Q_k nas barras onde essas grandezas são desconhecidas é imediato:

$$\Delta P_k = P_k - P_k(\underline{V}, \underline{\theta}) = 0, \quad \text{para barras V9}$$

$$\Delta Q_k = Q_k - Q_k(\underline{V}, \underline{\theta}) = 0, \quad \text{para barras V8 e PV}$$

A dificuldade maior consiste em se determinar V_k e θ_k nas barras PQ e θ_k nas barras PV. Para isso considere o seguinte subsistema de $(2n_c + n_g)$ incógnitas

e com $(2n_c + n_g)$ equações:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_k &= P_k - P_k(\underline{V}, \theta) = 0, & \text{para barras PQ e PV} \\ \Delta Q_k &= Q_k - Q_k(\underline{V}, \theta) = 0, & \text{para barras PQ} \end{aligned} \right\} \text{(II.8)}$$

O subsistema acima pode ser escrito da forma:

$$g(\underline{x}) = 0 \quad \text{(II.9)}$$

onde: \underline{x} é o vetor \underline{x} representa as variáveis de estado ou dependentes, cujas componentes são os ângulos θ_k nas barras PQ e PV e V_k nas barras PQ;

A função vetorial g representa as expressões ΔP_k nas barras PQ e PV e as expressões ΔQ_k nas barras PQ.

II.3.2.2 – Método de Newton

A resolução do problema $g(\underline{x}) = 0$ pelo método de Newton consiste nos seguintes passos:

- 1 – fazer $s = 0$ e escolher uma solução inicial $\underline{x} = \underline{x}^s = \underline{x}^0$;
- 2 – calcular $g(\underline{x}^s)$;
- 3 – testar a convergência: se $|g_i(\underline{x}^s)| \leq \text{tolerância}$, para $i = 1, \dots, n_b$, o processo convergiu para solução \underline{x}^s , caso contrário vá para 4;
- 4 – aproximar a função $g(\underline{x})$ pelo seu hiperplano tangente, linearizando

o problema em torno do ponto $(x^s, g(x^s))$. Isso é feito por intermédio da série de Taylor:

$$g(x^s + \Delta x^s) \cong g(x^s) + J(x^s) \Delta x^s$$

sendo J a matriz Jacobiana dada por:

$$J(x^s) = \left[\begin{array}{cc} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{array} \right]^s \left. \begin{array}{l} \} \\ \} \end{array} \right\} \begin{array}{l} n_c + n_g \\ n_c \end{array}$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{n_c + n_g} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{n_c}$$

- 5 – resolver o problema linearizado $g(x^s) + J(x^s) \Delta x^s = 0$
 para obtenção de $x^{s+1} = x^s + \Delta x^s$
 com $\Delta x^s = - [J(x^s)]^{-1} g(x^s)$

- 6 – fazer $s = s + 1$ e ir para 2

Considerando-se que P_k e Q_k nas equações (11.8) são dados pode-se reescrever a matriz Jacobiana como:

$$J(x^s) = \left[\begin{array}{cc} H & N \\ M & L \end{array} \right]^s$$

$$\text{onde: } H = \frac{\partial P}{\partial \theta} \qquad N = \frac{\partial P}{\partial V}$$

$$M = \frac{\partial Q}{\partial \theta} \qquad L = \frac{\partial Q}{\partial V}$$

obs.: A submatrizes H, N, M e L são esparsas e estruturalmente simétricas. Técnicas de esparsidade são normalmente utilizadas na implementação computacional do algoritmo.

II.3.2.3 – Método Desacoplado

Este método baseia-se no desacoplamento existente entre potência ativa-ângulo de fase e potência reativa-tensão em sistemas de extra alta tensão. Matematicamente isto significa que as sensibilidades $\partial P/\partial \theta$ e $\partial Q/\partial V$ são muito mais intensas que as sensibilidades $\partial Q/\partial \theta$ e $\partial P/\partial V$.

Com base neste fato aproxima-se a matriz Jacobiana fazendo-se N e M iguais a zero.

É importante ressaltar que fazer $N=M=0$ não altera a solução, pois o sistema a ser resolvido continua sendo o mesmo. Essa estratégia somente altera o percurso do processo iterativo.

Com esta aproximação o processo consiste em:

$$\Delta P(V^s, \theta^s) = H(V^s, \theta^s) \Delta \theta^s$$

$$\Delta Q(V^s, \theta^s) = L(V^s, \theta^s) \Delta V^s$$

$$\theta^{s+1} = \theta^s + \Delta\theta^s$$

$$V^{s+1} = V^s + \Delta V^s$$

ou:

$$\Delta P(V^s, \theta^s) = H(V^s, \theta^s) \Delta\theta^s$$

$$\theta^{s+1} = \theta^s + \Delta\theta^s$$

$$\Delta Q(V^s, \theta^s) = L(V^s, \theta^s) \Delta V^s$$

$$V^{s+1} = V^s + \Delta V^s$$

Com o algoritmo alternado acima, as variáveis θ e V são atualizadas a cada meia iteração e estes valores atualizados são imediatamente utilizados no cálculo de ΔQ e ΔP .

O método desacoplado pode ser definido alternativamente como:

$$\Delta P/V = H' \Delta\theta$$

$$\Delta Q/V = L' \Delta V$$

onde: $H' = V^{-1} H$

$$L' = V^{-1} L$$

V matriz diagonal cujos elementos da diagonal são as magnitudes das tensões das barras PQ do sistema.

II.3.2.4 – Método Desacoplado Rápido [19]

Este método é uma variação do anterior em que as submatrizes H' e L' são substituídas por matrizes constantes B' e B'', que só dependem dos parâmetros da rede.

São consideradas as seguintes equações:

$$AP / V = B'AO$$

$$AQ / V = B'' AV$$

O processo iterativo consiste em:

$$\begin{aligned} \Delta P (V^s, \theta^s) / V^s &= B' \Delta \theta^s \\ \theta^{s+1} &= \theta^s + \Delta \theta^s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q (V^s, \theta^s) / V^s &= B'' \Delta \theta^s \\ V^{s+1} &= V^s + \Delta V^s \end{aligned}$$

II.3.3 – Controles [19]

Além das equações e inequações já descritas (expressões dos fluxos de potência e limites de operação da rede elétrica), o sistema elétrico tem uma série de dispositivos de controle que influenciam na sua operação. Daí a necessidade de serem modelados para que o desempenho do sistema elétrico possa ser simulado corretamente.

Em geral, os controles considerados em fluxos de potência são:

- controle de magnitude de tensão em nó da rede (local e remoto);
- controle de magnitude de tensão em nó da rede por ajuste de tap (transformadores em fase);
- controle do fluxo de potência ativa (transformadores defasadores);
- controle de intercâmbio entre áreas.

Uma observação importante é que a introdução destes controles no processo de solução de fluxos de potência aumenta a complexidade dos mesmos e geralmente dificulta a convergência tornando o processo mais lento.

Dos controles relacionados acima serão descritos apenas os dois primeiros (controle de magnitude de tensão em nó da rede e controle de magnitude de tensão em nó da rede por ajuste de tap), pois estão diretamente associados a este trabalho.

II.3.3.1 – Modos de representação

Existem basicamente três maneiras de representar os controles mencionados anteriormente:

- Controle por tipo de barra: neste caso o controle é feito pelas imposições próprias de cada tipo de barra. Por exemplo, o controle de tensão no caso de barras PV é feito pela definição deste tipo de barra nas equações básicas de fluxo de potência.

- r Mecanismos de ajuste executados alternadamente com a solução iterativa do sistema (II.8), ou seja, durante o cálculo de uma iteração as variáveis de controle permanecem inalteradas e, entre uma iteração e outra, essas variáveis são ajustadas procurando-se fazer com que as variáveis controladas se aproximem cada vez mais dos respectivos valores especificados. Geralmente são feitas algumas iterações para solução do sistema (11.8) (convergência parcial), antes de se começar a intercalar mecanismos de ajuste de controles. Isso facilita a convergência, uma vez que, deste modo, são evitados problemas como a atuação indevida de dispositivos de controle pela escolha de valores iniciais muito distantes do ponto de solução.

- r Incorporação de equações e variáveis adicionais ao sistema (11.8) ou substituição de equações e variáveis dependentes desse subsistema por novas equações e/ou variáveis.

II.3.3.2 – Controle da magnitude de tensão em nó da rede (barra local)

- r Barras do tipo PV:

Este controle é feito através do tipo de barra. Neste caso usa-se o tipo de barra PV, que por definição considera V_k especificado em determinado valor.

O mecanismo de controle atua do seguinte modo: considere uma barra PV de índice k , cuja tensão especificada é V_k . Se a cada iteração do processo de solução a quantidade de reativo a ser injetada nesta barra (Q_k) aumentar para que a tensão permaneça em V_k , em um dado momento, Q_k pode ultrapassar $Q_{k_{max}}$. Neste caso, o tipo da barra k será redefinido passando esta barra de PV a PQ com Q_k fixo em

$Q_{k_{\max}}$ ($Q_k = Q_{k_{\max}}$) e a tensão V_k será liberada. Esta tensão (V_k) provavelmente irá diminuir de valor. O mesmo raciocínio é aplicado no caso em que para se manter V_k no valor especificado, Q_k viola o limite mínimo ($Q_k < Q_{k_{\min}}$).

Após uma barra PV ter sido transformada em PQ, deve-se testar a cada iteração subsequente, a possibilidade de essa barra voltar a seu tipo original.

- Barras do tipo PQ:

No caso de barra PQ, não existe um controle efetivo da tensão da barra e sim limites que devem ser observados (item II.3.1.2).

II.3.3.3 – Controle de magnitude de tensão em nó da rede por ajuste de tap [transformadores em fase]

Transformadores com controle automático de tap são geralmente utilizados para controlar a magnitude de tensão em um nó da rede.

A representação deste controle é feita pela alteração do vetor de variáveis dependentes x , no qual a magnitude da tensão controlada V , é substituída pela relação de transformação a_{km} (que é a variável de controle do transformador em fase). Deste modo, o conjunto de equações do sistema (11.8) se mantém inalterado.

II.3.3.4 – Controle de magnitude de tensão em nó da rede (barra remota)

Este tipo de controle pode ser feito tanto por transformadores em fase como

por injeção de reativos.

No caso do controle ser executado por injeção de reativos, a representação é feita através da incorporação de equações e variáveis adicionais ao sistema (11.8) pois a barra de controle é classificada como do tipo P (só a injeção de potência ativa P_k é especificada), enquanto a barra cuja magnitude de tensão é controlada é classificada como do tipo PQV (P_k , Q_k e V_k são especificados) [19].

CAPÍTULO III

FONTES DE POTÊNCIA REATIVA

III.1 – Introdução

O objetivo deste capítulo é traçar um paralelo entre as fontes de potência reativa, suas aplicações e seus custos, visando a modelagem do problema de planejamento de reativos.

Serão descritos os principais componentes do sistema elétrico e sua relação com a potência reativa. Na seção seguinte os equipamentos utilizados para compensação reativa serão detalhados e na última seção serão mostrados dois exemplos da curva de custo empregada na formulação do problema de planejamento de reativos.

III.2 – Principais componentes do sistema e sua relação com a potência reativa

Transformadores: consomem potência reativa proporcionalmente ao quadrado da corrente que os percorre. Os taps dos transformadores podem ser fixos ou variáveis sob carga entre os limites mínimo e máximo (OLTC – On Load Tap Changer).

Linhas de transmissão: podem gerar ou absorver potência reativa em função do carregamento a que estejam submetidas. A potência reativa consumida na

indutância da linha, varia com o quadrado da corrente devida ao fluxo transmitido. Como o fluxo de potência em uma linha varia substancialmente ao longo do dia, o balanço reativo na mesma pode variar consideravelmente. Uma linha de transmissão que forneça suporte reativo quando pouco carregada poderá, quando muito carregada, solicitar e consumir potência reativa do restante do sistema [20].

Geradores: geram potência ativa e reativa. Normalmente as gerações de potência ativa são fixadas em seus valores especificados e as gerações de potência reativa variam dentro de seus limites. O gerador é a principal fonte de fornecimento de reativos.

Carga: o tipo de carga que mais consome energia é a carga industrial. Este tipo de carga é tipicamente indutiva pois é composta por um grande número de motores o que faz com que se torne grande consumidora de potência reativa.

Pode-se constatar que o balanço de potência reativa de um sistema elétrico varia durante o correr do dia. O baixo carregamento do sistema nas primeiras horas da manhã faz com que o consumo de potência reativa diminua. Como consequência do baixo carregamento do sistema as linhas de transmissão passam a injetar potência reativa no sistema. Estes dois fatos fazem com que as tensões tendam a subir. O oposto ocorre nas horas de carga máxima (pico do sistema), quando além do alto consumo industrial de potência, tem-se as linhas de transmissão também consumindo reativo, neste caso a tensão tende a cair.

Devido a essas oscilações descritas no parágrafo anterior, em situações onde o existe grande variação entre carga leve e carga pesada, vários estudos são feitos para se determinar a compensação reativa a ser instalada.

III.3 – Equipamentos utilizados para compensação reativa

Os principais equipamentos utilizados para a compensação da potência reativa são:

- capacitores shunt;
- r reatores shunt;
- compensadores síncronos;
- r compensadores estáticos;
- capacitores série.

III.3.1 – Capacitores shunt

Os capacitores shunt são os mais simples meios de compensação reativa. Seus custos específicos são os mais baixos de todos os elementos de compensação reativa.

São geralmente ligados através de disjuntores a diversos níveis de tensão, podendo ser instalados a unidade ou, como é mais frequente, em bancos com várias unidades. Podem ser fixos ou mecanicamente chaveados.

Sua instalação traz como benefícios potenciais a correção **do nível de tensão operativa**, redução da capacidade de transformação na interligação entre empresas, redução de perdas na transmissão, etc. [20].

Capacitores shunt geram reativo proporcionalmente ao quadrado da tensão da barra a que estão conectados o que é um inconveniente pois caso haja redução de tensão, a potência reativa gerada reduz-se substancialmente.

III.3.2 – Reatores shunt

Juntamente com os capacitores shunt são os mais simples meios de compensação reativa. Seus custos são relativamente baixos, mas dependentes da tensão [20].

A instalação de Reatores Shunt tem como finalidade básica o controle das sobretensões absorvendo potência reativa do sistema. Consomem potência reativa proporcionalmente ao quadrado da tensão, neste caso esta característica é benéfica, pois na medida em que a tensão aumenta, a absorção de potência reativa aumenta na proporção do quadrado da tensão, reduzindo assim a tensão a níveis aceitáveis [20].

III.3.3 – Compensadores síncronos

São máquinas rotativas que, ao contrário dos capacitores shunt que apenas geram potência reativa, e dos reatores shunt que apenas absorvem, tanto podem gerar como absorver potência reativa. Para tanto possuem sensores e uma lógica de atuação ditada pelo regulador automático de tensão, que aumenta ou diminui a excitação no campo da máquina para atender as necessidades do sistema [20]. São geralmente utilizados quando há necessidade de um controle contínuo da potência reativa do sistema.

Seus custos específicos são os maiores de todos elementos de compensação reativa devido ao fato de:

- exigir manutenção frequente e dispendiosa por ser uma máquina rotativa;

- necessitar de instalação conjunta de um transformador específico pois não podem ser conectados diretamente à alta tensão;
- possuir sistema de refrigeração complexo.

III.3.4 – Compensadores estáticos

São diferentes composições de equipamentos de compensação reativa, que controlam o fluxo de reativo utilizando um dos três componentes básicos:

- reator controlado a tiristores;
- reator saturado;
- capacitor chaveável a tiristores [21]

Seus custos específicos são maiores que os dos reatores e capacitores shunt, mas geralmente menores que os dos compensadores síncronos uma vez que não necessitam de manutenção com grande frequência.

São indicados quando há necessidade de um controle contínuo da potência reativa do sistema.

É importante observar que, apesar dos compensadores síncronos apresentarem geralmente custos maiores que os compensadores estáticos, a especificação destes muitas vezes se faz necessária devido a critérios de Engenharia (nível de curto circuito, harmônicos, etc) [22].

III.3.5 – Capacitores série

Nos sistemas de transmissão em alta tensão, caracterizados pela transferência de grandes quantidades de energia por longas distâncias, a conexão de capacitores em série às linhas aéreas de transmissão aumenta a capacidade de transferência de potência nestes circuitos, compensando assim o efeito das altas reatâncias série indutivas das linhas.

Neste trabalho serão usados para compensação de potência reativa todos os elementos descritos nos itens anteriores com exceção dos capacitores série.

III.4 – Considerações sobre as fontes de potência reativa na otimização

A metodologia utilizada neste trabalho considera as fontes de potência reativa existentes no sistema elétrico a ser estudado (geradores, transformadores, compensadores síncronos, etc) e possibilita a determinação ótima da alocação de novas fontes de potência reativa.

Quando o objetivo é o planejamento das fontes de potência que serão instaladas, dois aspectos são de fundamental importância: a operação viável do sistema em estudo (eficiência das novas fontes de potência reativa) e o custo do plano de investimento proposto.

Para se assegurar a operação viável do sistema isto é, que não haja nenhuma violação de tensão, é necessária alguma ferramenta de análise de rede que, no caso deste trabalho, é o fluxo de potência descrito no capítulo anterior.

O custo do plano de investimento é resultado da **minimização** da soma dos custos individuais de cada equipamento a ser instalado.

III.4.1 – Aspectos econômicos das fontes de potência reativa

O planejamento de novas fontes de potência reativa envolve custos dos equipamentos, custos de instalação destes equipamentos e custos de operação.

- **Custos dos equipamentos** são todos os custos relativos: ao tipo de equipamento (capacitor ou reator shunt, compensador síncrono, etc), à capacidade alocada, ao nível de tensão no qual o equipamento deve operar, ao equipamento de controle ou de chaveamento necessário e às transformações necessárias ao equipamento para sua instalação.
- **Custos de instalação dos equipamentos** são todos os custos relativos: à localização dos equipamentos, à construção e ao tempo de construção.
- **Custos de operação** são todos os custos relativos: à manutenção dos equipamentos, perdas e dificuldades operacionais.

Com o objetivo de simplificar a formulação do problema de planejamento das fontes de potência reativa e com base em uma lista de prioridades definida pelas empresas concessionárias de energia, os seguintes fatores são considerados na expressão do custo:

- **Custos dos equipamentos:** tipo de equipamento (capacitor ou reator shunt, compensador síncrono, etc), capacidade alocada, nível de tensão no qual o equipamento deve operar, equipamento de controle ou de

Exemplos de curva de custo para reatores e capacitores shunt podem ser vistos nas figuras (111.1) e (111.2).

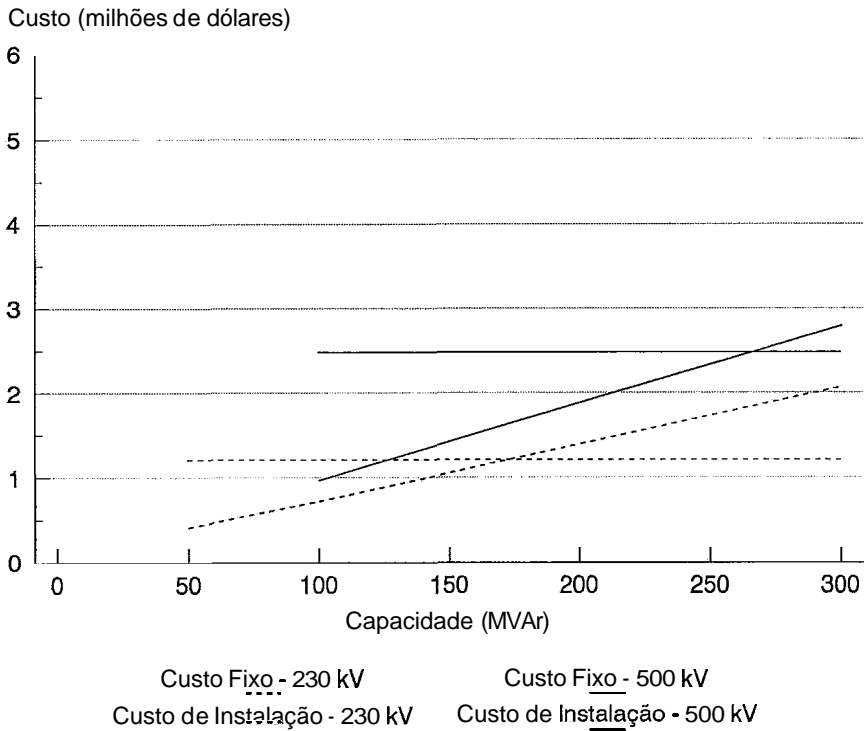


figura III.1 – Exemplo de curva de custo de instalação de Capacitores Shunt

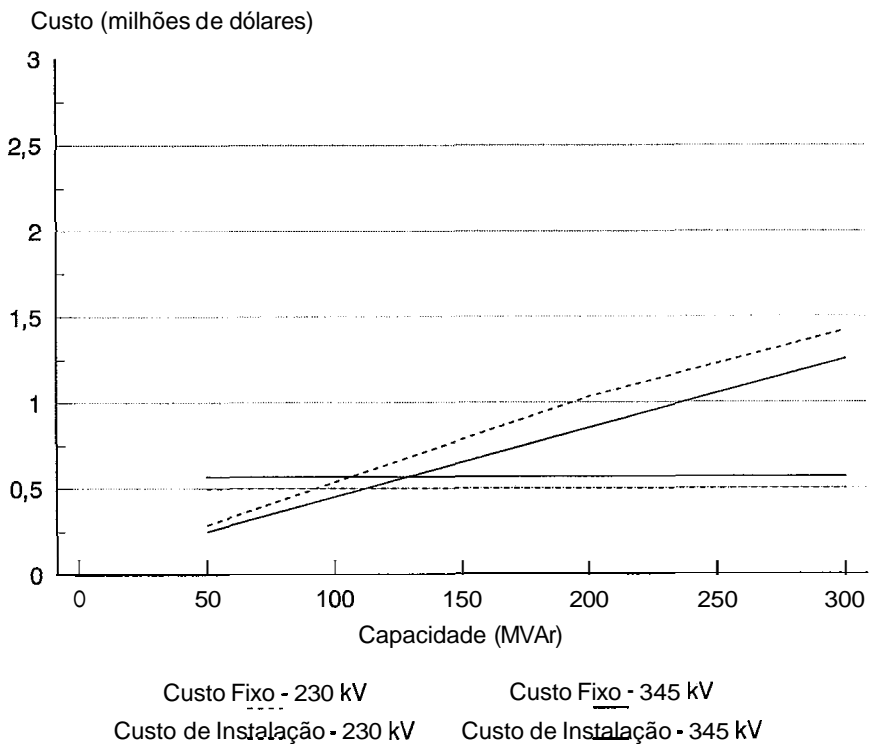


figura III.2 – Exemplo de curva de custo de instalação de Reatores Shunt

chaveamento necessário (disjuntores, etc).

- Custos de instalação dos equipamentos: localização dos equipamentos, construção.

Os custos de operação, assim como estudos do ciclo de vida dos equipamentos não são considerados neste trabalho, uma vez que são de muita importância em estudos de operação e manutenção mas de importância indireta em estudos de planejamento.

Estas duas figuras (111.1) e (111.2) são gráficos representativos da função custo (milhões de dolares por capacidade em MVA_r). Mostram a variação desta função devido ao nível de tensão (500 kV e 230 kV para capacitores shunt e 345 kV e 230 kV para reatores shunt) e os custos fixos (custos de instalação e equipamentos para chaveamento).

Estas curvas sugerem a utilização de otimização discreta o que faz com que o problema de investimento seja definido como um problema de programação mista linear—inteiro.

CAPÍTULO IV

DECOMPOSIÇÃO DO PROBLEMA

IV.1 – Introdução

O objetivo deste trabalho é a determinação do dimensionamento e localização ótimos de fontes de potência reativa que assegurem a operação do sistema tanto em situações normais (caso base) como em situações de contingência.

Situação de contingência é o desligamento de um ou mais dos elementos abaixo:

- linha de transmissão;
- gerador;
- r reator;
- banco de capacitores;
- r carga.

A metodologia abordada neste trabalho é baseada na decomposição hierárquica do problema em dois níveis:

- Problema de Investimento: onde as decisões acerca da localização e dimensionamento de novas fontes de potência reativa são tomadas;
- Problema de Operação: onde as decisões tomadas pelo problema anterior

são testadas (viabilidade e otimalidade) levando-se em conta as restrições operacionais do sistema elétrico nas suas diversas configurações (caso base e contingências)

A solução ótima é então obtida a partir da resolução interativa dos dois problemas:

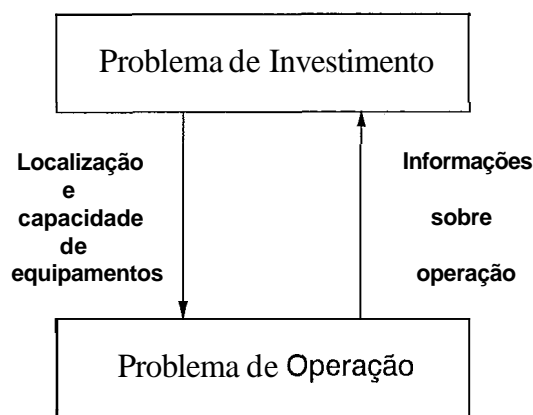


figura IV.1 – Decomposição hierárquica do problema

Neste capítulo será feita uma detalhada descrição matemática da metodologia de decomposição bem como da interação entre problema de investimento / problema de operação.

IV.2 – Problema geral

No planejamento de fontes de potência reativa, tem-se uma rede elétrica sujeita a restrições operacionais (seção II.3.1) e procura-se o melhor plano de investimento que proporcione a operação viável do sistema nas suas diversas configurações (caso base e contingências). É assumido que os valores de potência ativa do sistema estão próximos àqueles do ponto de operação econômico sendo, portanto, mantidos inalterados (exceto com relação a barra de referência) durante o processo de planejamento.

Assim a formulação do problema fica:

$$\text{Min } \sum_{k \in \Gamma} r_k C_k$$

sujeito a:

- a) restrições de investimento
- b) restrições operacionais do caso base
- c) restrições operacionais da contingência #1

.
restrições operacionais da contingência #n

onde: Γ = conjunto de barras do sistema elétrico ou conjunto de barras pré-determinado pelo operador do sistema;

C_k = custo das fontes de potência reativa da barra k;

r_k = variável 0/1 que indica a alocação ou não de fontes de potência reativa na barra k.

IV.2.1 – Tipo de equipamento

O tipo de equipamento a ser instalado pode ser do tipo fixo (banco de capacitores/reatores) ou controlável (compensadores síncronos ou estáticos), ficando a escolha a critério do planejador da expansão.

Os equipamentos controláveis são capazes de manter um nível de tensão especificado em uma determinada barra através de uma injeção variável de

potência reativa (seção III.3.3). Isto pode ser de muita importância pois pode acontecer de uma contingência precisar de reativo do tipo indutivo enquanto outra precisa de reativo capacitivo para a manutenção do ponto de operação do caso base. Já os equipamentos do tipo fixo, fornecem uma injeção de potência reativa dependente do nível de tensão da barra na qual estão localizados segundo a expressão:

$$Q_k = b_k V_k^2$$

onde: b_k = susceptância shunt ($b > 0$ reativo capacitivo, $b < 0$ reativo indutivo) da barra k .

IV.2.2 – Formulação básica

Com o objetivo de simplificar será apresentada a seguir a formulação do problema considerando apenas uma configuração do sistema elétrico (caso base). O tipo de equipamento a ser instalado é do tipo controlável. O detalhamento da operação das configurações de contingência será feito no próximo capítulo.

$$\text{Min } \sum_{k \in \Gamma} r_k (d_k + c_{r_k} q_{r_k} + c_{c_k} q_{c_k}) \quad (\text{IV.1})$$

sujeito a:

a) restrições de investimento

$$0 \leq q_{c_k} \leq q_{c_k}^{\text{max}}$$

$$0 \leq q_{r_k} \leq q_{r_k}^{\text{max}}$$

b) restrições operacionais do caso base

$$\begin{aligned}
 P_{km}(V, \theta, T) - P_k &= 0 & k \in \gamma \\
 Q_{km}(V, \theta, T) - Q_k &= 0 & k \in \gamma \\
 P_{\min_k} \leq P_k \leq P_{\max_k} & & k \in \gamma \\
 Q_{k_{\min}} \leq Q_k \leq Q_{k_{\max}} & & k \notin \Gamma \\
 Q_{k_{\min}} - q_{rk} \leq Q_k \leq Q_{k_{\max}} + q_{ck} & & k \in \Gamma \\
 V_{k_{\min}} \leq V_k \leq V_{k_{\max}} & & k \in \gamma \\
 T_j \leq T_j \leq T_j & & j \in \eta
 \end{aligned} \tag{IV.2}$$

onde: Γ = conjunto de barras candidatas a receber equipamento de compensação reativa adicional;

r_k = variável 0/1 que indica alocação ou não de fontes de potência reativa na barra k;

d_k = custo fixo de instalação de equipamento reativo na barra k;

c_{r_k} = custo de instalação de equipamento indutivo por unidade de MVAR na barra k;

c_{c_k} = custo de instalação de equipamento capacitivo por unidade de MVAR na barra k;

q_{r_k} = capacidade adicional de reativo indutivo injetada na barra k;

q_{c_k} = capacidade adicional de reativo capacitivo injetada na barra k;

γ = conjunto de todas as barras do sistema;

η = conjunto dos transformadores controláveis.

A especificação de equipamento do tipo fixo pode ser feita pela inclusão dos

termos:

$$(-q_{r_k} + q_{c_k}) V_k^2$$

nas equações que representam o balanço de potência reativa em substituição às restrições (IV.2).

IV – Metodologia 1 decomposição

Observando-se o problema formulado na seção anterior fica claro o seu desacoplamento, daí a idéia de decompô-lo em dois níveis: problema de investimento e problema de operação, como mostrado na figura (IV.1).

O problema de investimento é definido como um problema de programação mista linear-inteiro (cujo exemplo de função custo pode ser visto na seção III.4.1) e o problema de operação é definido como um problema de programação não-linear. Ambos trocam informações entre si. Isto é, o problema de investimento passa informações sobre localização e capacidade dos equipamentos a serem instalados ao problema de operação e este passa informações a respeito da operação do sistema nas suas diversas configurações ao problema de investimento.

Para a formulação do esquema de decomposição, o seguinte problema de otimização é definido:

$$W(q_{r_k}, q_{c_k}) = \text{Min} \sum_{k \in \Gamma} (s_{1k} + s_{2k}) \quad (\text{IV.3})$$

sujeito a:

$$P_{km}(V, \theta, T) - P_k = 0 \quad k \in \gamma$$

$$\begin{aligned}
Q_{km}(V, \theta, T) - Q_k - s_{1k} + s_{2k} &= 0 & k \in \gamma \\
P_{\min_k} \leq P_k \leq P_{\max_k} & & k \in \gamma \\
Q_{k_{\min}} \leq Q_k \leq Q_{k_{\max}} & & k \notin \Gamma \\
Q_{k_{\min}} - q_{rk} \leq Q_k \leq Q_{k_{\max}} + q_{ck} & & k \in \Gamma \\
V_{k_{\min}} \leq V_k \leq V_{k_{\max}} & & k \in \gamma \\
T_j \leq T_j \leq T_j & & j \in \eta \\
s_{1k} \geq 0; s_{2k} \geq 0 & &
\end{aligned}$$

onde: os valores de q_{rk} e q_{ck} são determinados pelo problema de investimento.

Observe que, se, para os valores de q_{rk} e q_{ck} , o problema de operação original não for viável por problemas de reativo, as variáveis de folga (s_{1k} e s_{2k}) introduzidas nas equações de balanço de potência reativa serão diferentes de zero. Isto significa que o plano de investimento proposto pelo problema de investimento (q_{rk} e q_{ck}) não é suficiente para que o problema de operação seja viável, havendo portanto a necessidade de uma maior injeção de potência reativa para a viabilização da operação. Logo, as variáveis de folga s_{1k} e s_{2k} podem ser interpretadas como injeções fictícias de potência reativa e determinam o grau de inviabilidade reativa do sistema.

A solução ótima do problema de operação é uma função do nível de capacidade reativa alocada $W(q_{rk}, q_{ck})$ e fornece a seguinte informação:

- se $W(q_{rk}, q_{ck}) = 0$, o plano de investimento proposto pelo problema de investimento (que é a capacidade reativa alocada) é suficiente para permitir a operação viável do sistema nesta configuração;

- se $W(q_{r_k}, q_{c_k}) > 0$, o plano de investimento proposto pelo problema de investimento não é suficiente para permitir a operação viável do sistema nesta configuração.

Em princípio, o problema de otimização (IV.3) poderia ser formulado com a introdução de variáveis de folga em todas as restrições como implementado em por Lebow et alli [13] e segundo indicação de Geoffrion [23]. Como resultados de experiências computacionais, desenvolvidas no âmbito do projeto da Universidade de Stanford com o EPRI (Electric Power Research Institute) – Project 2473–6 / 1988, verificou-se que esta abordagem era instável computacionalmente. A introdução das injeções s_{1_k} e s_{2_k} nas equação de balanço de potência reativa proposta por Granville et alli [14] foi uma tentativa de de solucionar este problema e tem apresentado bons resultados.

IV.4 – Problema de investimento

Com a definição da função $W(q_{r_k}, q_{c_k})$ o problema (IV.1) pode ser formulado como:

$$\text{Min } \sum_{k \in \Gamma} (r_k d_k + c_{r_k} q_{r_k} + c_{c_k} q_{c_k}) \quad (\text{IV.4})$$

sujeito a:

$$0 \leq q_{c_k} \leq r_k \bar{q}_{c_k}$$

$$0 \leq q_{r_k} \leq r_k \bar{q}_{r_k}$$

$$W(q_{r_k}, q_{c_k}) \leq 0;$$

Se a expressão analítica de $W(q_{r_k}, q_{c_k})$ fosse conhecida o problema da expansão ótima de fontes de potência reativa poderia ser resolvido sem a representação explícita do problema de operação. O método de Benders [23] constroi uma aproximação de $W(q_{r_k}, q_{c_k})$, $W'(q_{r_k}, q_{c_k})$, baseada na solução do problema de operação.

O problema de investimento é um problema de programação mista linear–inteiro com variáveis 0/1. Para a sua solução foi empregado o algoritmo de Branch–and–Bound [24] através do uso do código comercial XMP [25].

IV.5 – Algoritmo geral para solução do problema de alocação ótima de fontes de potência reativa

O processo iterativo problema de investimento/problema de operação consiste no seguinte algoritmo:

- 1 – Inicie com uma aproximação $W'(q_c, q_r)$ que é um limite inferior de $W(q_c, q_r)$ (por exemplo, $W'(q_c, q_r) = 0$ para todo (q_c, q_r));
- 2 – Resolva o problema de investimento (IV.4);
- * *
- 3 – Dado a decisão de capacidade (q_c, q_r) , resolva o problema de operação obtendo $W = W(q_c, q_r)$;
- * * *
- 4 – Se $W = 0$, então (q_c, q_r) é solução ótima. Caso contrário, use o resultado para atualizar a aproximação $W'(q_c, q_r)$ e volte para 2.

Associado à solução do problema (IV.3), existe um conjunto de

multiplicadores de Lagrange que refletem a sensibilidade da função objetivo com relação às variáveis de capacidade (q_{r_k}, q_{c_k}) . Com base nestes multiplicadores são construídos os cortes de Benders ou cortes de viabilidade (que são usados na construção das aproximações de $W(q_{r_k}, q_{c_k})$ para a configuração considerada). Estas cortes são incorporadas ao problema de investimento que é então resolvido para se determinar um novo plano de expansão.

IV.6 – Construção do corte de viabilidade ou corte de Benders

Com o objetivo de determinar os cortes de Benders considere o problema (IV.3) na seguinte forma:

$$W(q_{r_k}, q_{c_k}) = \text{Min} \sum_{k \in \Gamma} (s_{1_k} + s_{2_k}) \quad (\text{IV.5})$$

sujeito a:

$$P_{km}(V, \theta, T) - P_k = 0 \quad k \in \gamma$$

$$Q_{km}(V, \theta, T) - Q_k - Q_k^e - s_{1_k} + s_{2_k} = 0 \quad (\pi_k) \quad k \in \gamma$$

$$P_{\min_k} \leq P_k \leq P_{\max_k} \quad k \in \gamma$$

$$Q_{k_{\min}} \leq Q_k \leq Q_{k_{\max}} \quad k \notin \Gamma$$

$$-Q_k^e \leq q_{r_k} \quad (\lambda_{1_k}) \quad k \in \Gamma$$

$$Q_k^e \leq q_{c_k} \quad (\lambda_{2_k}) \quad k \in \Gamma$$

$$V_{k_{\min}} \leq V_k \leq V_{k_{\max}} \quad k \in \gamma$$

$$T_j^{\min} \leq T_j \leq T_j^{\max} \quad j \in \eta$$

$$s_{1_k} \geq 0$$

$$s_{2_k} \geq 0$$

onde: π_k = multiplicador de Lagrange associado à restrição de balanço de potência reativa;

X_{1_k} e λ_{2_k} = multiplicadores de Lagrange associados às respectivas restrições;

Q_k^e = geração de reativo do equipamento a ser instalado.

*
Sejam W^* o valor ótimo da função objetivo do problema (IV.5), $X_{1_k}^*$ o multiplicador de Lagrange associado à restrição de limite superior de geração de potência reativa na solução ótima e $\lambda_{2_k}^*$ o multiplicador de Lagrange associado à restrição de limite inferior de geração de potência reativa na solução ótima para os seguintes valores de capacidade:

$$\begin{aligned} q_{r_k} &= q_{r_k}^* \\ q_{c_k} &= q_{c_k}^* \end{aligned}$$

O corte de Benders associado a essa solução é

$$W^*(q_{r_k}, q_{c_k}) - \lambda_{1_k}^*(q_{r_k} - q_{r_k}^*) - \lambda_{2_k}^*(q_{c_k} - q_{c_k}^*).$$

Este corte representa as variações da quantidade de injeção fictícia de potência reativa como uma função da capacidade de reativo instalada (q_{r_k}, q_{c_k}) .

A aproximação de $W(q_{r_k}, q_{c_k})$, $W^i(q_{r_k}, q_{c_k})$, é definida da seguinte forma:

$$W^i(q_{r_k}, q_{c_k}) = \text{Min } a$$

sujeito a:

$$\alpha \geq W^i - \lambda_{1_k}^i (q_{r_k} - q_{r_k}^i) + \lambda_{2_k}^i (q_{c_k} - q_{c_k}^i) \quad i = 1, \dots, j$$

onde: j = número de cortes gerados

Isto é equivalente a enviar os seguintes cortes ao problema de investimento:

$$W^i(q_{r_k}, q_{c_k}) - \lambda_{1_k}^i (q_{r_k} - q_{r_k}^i) - \lambda_{2_k}^i (q_{c_k} - q_{c_k}^i) \leq 0 \quad i = 1, \dots, j$$

É importante observar que as restrições de limite de variável (bounds) são tratadas de maneira implícita pelo algoritmo de solução do pacote computacional escolhido para resolver o problema de operação. Portanto, os valores dos multiplicadores de Lagrange associados àquelas restrições devem ser calculados através do custo reduzido associado à variável Q_k^e .

Note que a variável Q_k^e aparece somente na restrição de balanço de potência reativa uma vez que as restrições que dizem respeito aos limites de geração de potência reativa são tratados implicitamente.

A expressão do custo reduzido associado à variável Q_k^e é:

$$c_k^* = c_k - \pi_k^* a_k - \lambda_{1_k}^* a_{1_k} - \lambda_{2_k}^* a_{2_k}$$

onde: c_k^* = custo associado à variável Q_k^e ,
 π_k^* = multiplicador de Lagrange associado à restrição de balanço de potência reativa na solução ótima;
 $\lambda_{1_k}^*$ = multiplicador de Lagrange associado à restrição de limite mínimo de geração de potência reativa do equipamento;
 $\lambda_{2_k}^*$ = multiplicador de Lagrange associado à restrição de limite máximo de geração de potência reativa do equipamento;
 a_k = coeficiente da variável Q_k^e na restrição de balanço de potência reativa;

a_{1_k} = coeficiente da variável Q_k^e na restrição de limite inferior de geração de potência reativa;

a_{2_k} = coeficiente da variável Q_k^e na restrição de limite superior de geração de potência reativa;

Como a variável Q_k^e é ilimitada (seus bounds são tratados implicitamente) seu custo reduzido é zero, então:

$$0 = 0 + \pi_k^* - \lambda_{1_k}^* + \lambda_{2_k}^*$$

Deste modo tem-se:

- para $\pi_k^* > 0 \Rightarrow \begin{cases} \lambda_{1_k}^* = \pi_k^* \\ \lambda_{2_k}^* = 0 \end{cases}$
- para $\pi_k^* < 0 \Rightarrow \begin{cases} \lambda_{1_k}^* = 0 \\ \lambda_{2_k}^* = -\pi_k^* \end{cases}$

Logo o corte de Benders fica:

- para $\pi_k^* > 0$: $W^*(q_{r_k}, q_{c_k}) - \pi_k^* (q_{r_k} - q_{r_k}^*) \leq 0$
- para $\pi_k^* < 0$: $W^*(q_{r_k}, q_{c_k}) + \pi_k^* (q_{c_k} - q_{c_k}^*) \leq 0$

CAPÍTULO V

PROBLEMA DE OPERAÇÃO

V.1 – Introdução

Este capítulo tem como objetivo detalhar o problema de operação. Para tanto é necessário definir como será tratada a operação das contingências, o que está relacionado com o conceito de modo de planejamento.

Na seção (V.2) será explicado o que é e quais as diferenças entre os dois modos de planejamento considerados neste trabalho: *modo de planejamento corretivo* e *modo de planejamento preventivo*.

Na seção (V.3), o algoritmo de solução do problema de operação no modo de planejamento corretivo será detalhado. Na seção seguinte (seção V.4), o mesmo será feito para o modo de planejamento preventivo.

v.2 – Modos de planejamento

O modo de planejamento está relacionado com a política de operação do sistema no que diz respeito às configurações de contingência.

- Modo de Planejamento **CORRETIVO**: pós-contingência. Neste modo de planejamento as fontes de potência reativa (nível de tensão nas usinas,

compensadores síncronos e estáticos e tap de transformadores) podem ser alteradas após a ocorrência de uma contingência. A instalação de novas fontes de potência reativa só é feita quando estas medidas corretivas não são suficientes para viabilizar a operação do sistema. Neste modo de planejamento, o ponto de operação de caso base e contingências são independentes.

- Modo de Planejamento PREVENTIVO: pré-contingência. Neste modo de planejamento nenhuma medida corretiva é permitida após a ocorrência de uma contingência. Isto é, após a ocorrência de uma dada contingência os valores dos taps dos transformadores, as tensões das usinas, compensadores síncronos ou estáticos não são alterados, permanecendo com os mesmos valores definidos pelo caso base. O objetivo é instalar novas fontes de potência reativa de tal forma que, para um ponto de operação viável do sistema em situação normal, a operação do sistema continue viável, mesmo após a ocorrência de contingências. Deste modo, a solução encontrada será simultaneamente viável para caso base e contingências.

Apesar da ênfase deste trabalho ser o modo de planejamento preventivo, ambos os modos de planejamento serão tratados.

* Entende-se por ponto de operação, os valores de tensão, ângulo, geração de potência ativa e reativa e tap de transformadores relativos ao sistema em determinado momento.

V.3 – Problema de **operação** para modo de **planejamento** corretivo

Para o modo de planejamento corretivo, cujo o objetivo é a obtenção de um plano de expansão das fontes de potência reativa de custo mínimo onde os pontos de operação das diversas configurações possam ser independentes, tem-se o esquema de solução do problema da expansão ótima de fontes de potência reativa apresentado na figura (V.1).

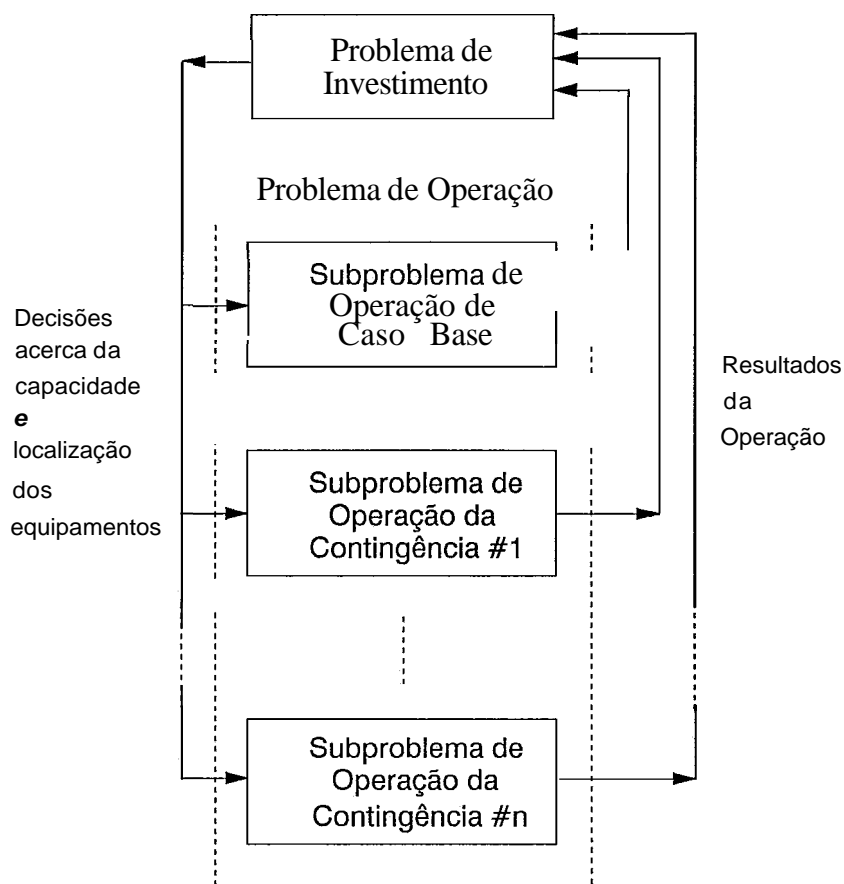


figura V.1 – Esquema de solução para modo de planejamento corretivo

Note que, neste esquema de decomposição, tem-se (como mostrado no capítulo anterior) dois estágios de decisão. O primeiro estágio é o problema de investimento que decide sobre localização e capacidade dos equipamentos que serão instalados. O segundo estágio é o problema de operação que analisa as decisões

tomadas pelo problema de investimento, determinando o ponto de operação mais eficiente que viabilize as restrições operacionais de cada configuração. Observe que o problema de operação é composto por vários subproblemas que analisam de forma independente as informações acerca de investimento (alocação de reativos) e enviam informações sobre sua operação ao problema de investimento. É importante reafirmar que cada configuração (caso base e contingências) pode ter seu ponto de operação diferente das demais.

Para cada configuração, o subproblema de operação é definido como:

$$W(q_{rk}, q_{ck}) = \text{Min} \sum_{k \in \Gamma} (s_{1k} + s_{2k})$$

sujeito a:

$$P_{km}(V, \theta, T) - P_k = 0 \quad k \in \gamma$$

$$Q_{km}(V, \theta, T) - Q_k - s_{1k} + s_{2k} = 0 \quad k \in \gamma$$

$$P_{\min_k} \leq P_k \leq P_{\max_k} \quad k \in \gamma$$

$$Q_{k_{\min}} \leq Q_k \leq Q_{k_{\max}} \quad k \notin \Gamma$$

$$Q_{k_{\min}} - q_{rk} \leq Q_k \leq Q_{k_{\max}} + q_{ck} \quad k \in \Gamma$$

$$V_{k_{\min}} \leq V_k \leq V_{k_{\max}} \quad k \in \gamma$$

$$T_j \leq T_j \leq T_j \quad j \in \eta$$

$$s_{1k} \geq 0; s_{2k} \geq 0$$

onde: os valores de q_{rk} e q_{ck} são determinados pelo problema de investimento.

Γ = conjunto de barras candidatas a receber equipamento de compensação reativa adicional;

q_{rk} = capacidade adicional de reativo indutivo injetada na barra

k ;

q_{c_k} = capacidade adicional de reativo capacitivo injetada na barra
 k ;

γ = conjunto de todas as barras do sistema;

η = conjunto dos transformadores controláveis.

Na extensão da decomposição de Benders para este caso, a partir do resultado da otimização do respectivo subproblema, definem-se funções $W'_\ell(q_{r_k}, q_{c_k})$, $\ell = 1, \dots, L$ correspondentes a cada configuração. Estas aproximações, (descritas na seção IV.5), serão incorporadas ao problema de investimento que fica:

$$\text{Min } \sum_{k \in \Gamma} r_k (d_k + c_{r_k} q_{r_k} + c_{c_k} q_{c_k})$$

sujeito a:

$$0 \leq q_{c_k} \leq \bar{q}_{c_k}$$

$$0 \leq q_{r_k} \leq \bar{q}_{r_k}$$

$$W'_\ell(q_{r_k}, q_{c_k}) \leq 0 \quad \ell = 1, \dots, L;$$

onde: Γ = conjunto de barras candidatas a receber equipamento de compensação reativa adicional;

r_k = variável 0/1 que indica alocação ou não de fontes de potência reativa na barra k ;

d_k = custo fixo de instalação de equipamento reativo na barra k ;

c_{r_k} = custo de instalação de equipamento indutivo por unidade de MVAR na barra k ;

c_{c_k} = custo de instalação de equipamento capacitivo por unidade

de MVAr na barra k ;

q_{r_k} = capacidade adicional de reativo indutivo injetada na barra k ;

q_{c_k} = capacidade adicional de reativo capacitivo injetada na barra k ;

L = número de configurações do sistema consideradas.

Para cada solução do problema de investimento, o problema de operação é resolvido para verificar viabilidade e, com isso, atualizar a aproximação $W'(q_{r_k}, q_{c_k})$ de cada configuração. O processo iterativo termina quando a viabilidade de todas as configurações é alcançada.

V.3.1 – Algoritmo utilizado para resolução dos subproblemas de operação

O subproblema de operação apresentado corresponde a um problema de fluxo de potência ótimo com a geração de potência ativa fixa em todas as barras exceto a barra $V\theta$ (barra de referência). Computacionalmente, o problema de fluxo de potência ótimo é um problema de programação não-linear de grande porte com centenas a milhares de restrições não lineares. Para resolver este problema são usadas técnicas de programação quadrática de acordo com o seguinte algoritmo [26]:

- 1 – Resolva um problema de fluxo de potência;
- 2 – Construa um problema de otimização cuja função objetivo é uma aproximação quadrática da função Lagrangeana associada às equações não lineares de balanço de potência reativa. As restrições do problema são baseadas na linearização das mesmas equações;
- 3 – Resolva este problema usando técnicas de programação quadrática

através da utilização do pacote comercial MINOS [27];

- 4 – Verifique se a solução do problema de otimização coincide com o resultado do fluxo de potência. Se houver coincidência PARE. Caso contrário, atualize as variáveis de controle do problema de fluxo de potência com os valores obtidos pela otimização. Resolva o fluxo de potência e vá para 2.

V.4 – Problema de operação para modo de planejamento preventivo

Para o modo de planejamento preventivo, onde característica principal é a obtenção de um plano de expansão de custo mínimo cujo ponto de operação do sistema seja simultaneamente viável para as diversas configurações do sistema, tem-se esquema de solução do problema de expansão ótima de fontes de potência reativa mostrado na figura (V.2).

Tem-se, neste caso, um esquema hierárquico de três níveis onde as informações acerca da operação das contingências são enviadas ao subproblema de operação de caso base. Isto porque os subproblemas de operação são dependentes entre si, ou seja, a decisão sobre o melhor ponto de operação tomada pelo subproblema de operação de caso base tem que satisfazer as configurações de contingência.

O processo iterativo caso base/contingências termina quando a operação de todas contingências se torna viável para o ponto de operação definido pelo caso base. O corte de Benders para o problema de investimento somente é gerado após a convergência do processo iterativo acima.

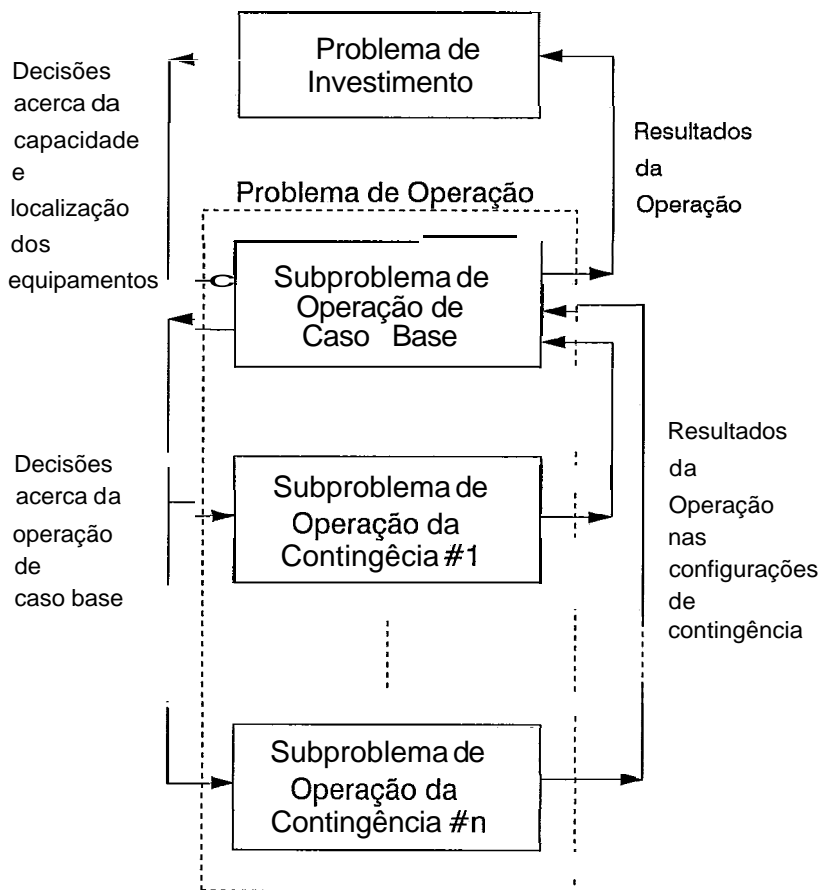


figura V.2 – Esquema de decomposição para modo de planejamento preventivo

A informação enviada, de cada subproblema de operação de contingência, ao caso base é dada por um corte, chamado de corte de sensibilidade. Estes cortes são restrições lineares que refletem a sensibilidade da operação das contingências em relação ao nível de tensão das usinas geradoras, ao tap de transformador e às injeções fictícias de potência reativa.

Tem-se então o subproblema de operação de caso base para o modo

preventivo:

$$W(q_{r_k}, q_{c_k}) = \text{Min} \sum_{k \in \Gamma} (s_{1_k} + s_{2_k})$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} P_{km}(V, \theta, T) - P_k &= 0 & k \in \gamma \\ Q_{km}(V, \theta, T) - Q_k - s_{1_k} + s_{2_k} &= 0 & k \in \gamma \\ P_{\min_k} \leq P_k \leq P_{\max_k} & & k \in \gamma \\ Q_{k_{\min}} \leq Q_k \leq Q_{k_{\max}} & & k \notin \Gamma \\ Q_{k_{\min}} - q_{r_k} \leq Q_k \leq Q_{k_{\max}} + q_{c_k} & & k \in \Gamma \\ V_{k_{\min}} \leq V_k \leq V_{k_{\max}} & & k \in \gamma \\ T_j \leq T_j \leq T_j & & j \in \eta \\ s_{1_k} \geq 0; s_{2_k} \geq 0 & & \\ S_\ell(V_{\text{gen}_k}, T_{km}, s_{1_k}, s_{2_k}) \geq 0 & & \ell = 1, \dots, L \end{aligned}$$

onde: os valores de q_{r_k} e q_{c_k} são determinados pelo problema de investimento;

L = número de restrições lineares;

Γ = conjunto de barras candidatas a receber equipamento de compensação reativa adicional;

q_{r_k} = capacidade adicional de reativo indutivo injetada na barra k ;

q_{c_k} = capacidade adicional de reativo capacitivo injetada na barra k ;

y = conjunto de todas as barras do sistema;

η = conjunto dos transformadores controláveis.

$S_\ell(V_{\text{gen}_k}, T_{km}, s_{1_k}, s_{2_k})$ = corte de sensibilidade gerado por uma dada contingência.

V.4.1 – Algoritmo utilizado para resolução do problema de operação no modo de planejamento preventivo

Baseado no que foi exposto, tem-se que a interação entre os subproblemas de operação de caso base e contingências segue o algoritmo abaixo:

- 1 – Resolva um problema de fluxo de potência ótimo para a configuração de caso base seguindo o algoritmo descrito em (V.3.1) (subproblema de operação de caso base);
- 2 – Ajuste os valores das cargas reativas das barras onde ocorreram injeções fictícias de potência reativa ($s_{1_k} \geq 0$ ou $s_{2_k} \geq 0$);
- 3 – Para cada configuração de contingência faça:
 - i – resolva um fluxo de potência. Neste processo os valores dos taps dos transformadores são iguais aos valores do caso base. O mesmo ocorre com relação às tensões das usinas, compensadores síncronos ou estáticos contanto que os limites de geração de potência reativa correspondentes não sejam violados;
 - ii– verifique se existe alguma violação de tensão. Se este for o caso, construa restrição linear (item V.4.3 – Construção do corte de sensibilidade) que expresse esta violação em termos das variáveis de tap, tensão de usina, compensadores síncronos e estáticos e das injeções fictícias de reativo. Caso não haja violação de tensão, termine o processo.

- 4 – Incorpore as restrições lineares ao subproblema de operação de caso base, restitua as cargas originais do sistema e retorne à etapa 1.

Um outro modo de solução dos subproblemas de operação de contingência será mostrado no capítulo (VII), bem como resultados dos dois modos de solução serão discutidos.

A aplicação da decomposição de Benders no processo iterativo investimento/operação para este caso segue os mesmos passos descritos no capítulo anterior. Para cada solução do problema de investimento, o problema de operação é resolvido para verificar viabilidade e, com isso, atualizar a função $W'(q_{r_k}, q_{c_k})$. O processo iterativo termina quando o plano de investimento proposto pelo problema de investimento viabiliza a operação de todas as configurações do sistema consideradas.

V.4.2 – Manutenção do ponto de operação do caso base

Após o término do subproblema de operação do caso base tem-se como resultado a quantidade de injeção fictícia de reativo necessária à viabilização do mesmo e o ponto de operação desta configuração. Com isso pode-se passar às contingências. Para tal é necessário que o ponto de operação de caso base seja mantido.

A informação sobre as injeções fictícias irão para as contingências através de ajustes na carga reativa da barra correspondente:

$$Q_{load_k} = Q_{load_{original_k}} - s_{1_k} + s_{2_k}$$

onde: Q_{load_k} = valor da carga da barra k nas contingências;

$Q_{load_{original_k}}$ = carga original da barra k;

s_{1_k} = injeção fictícia do tipo capacitiva;

s_{2_k} = injeção fictícia do tipo indutiva.

As tensões nas barras de tensão controlada (usinas, compensadores síncronos, compensadores estáticos) são mantidas iguais às do caso base desde que as gerações de potência reativa não ultrapassem seus limites. Caso isto aconteça, esta restrição é relaxada e a geração de reativos na barra é fixada no limite correspondente.

Os taps dos transformadores são mantidos fixos iguais aos do caso base.

V.4.3 – Construção do corte de sensibilidade

Ao ser executado um fluxo de potência para determinada contingência, as violações de tensão serão expressas através de cortes de sensibilidade.

Como mencionado anteriormente, o fluxo de potência que é executado para este estudo tem o controle de limite de geração de reativo nas barras PV ativado. Isso faz com que (como visto na seção II.3.3.2 – Barras do tipo PV), a tensão das barras PV seja mantida constante até que algum limite de geração de reativo (mínimo ou máximo) seja atingido. Quando isso acontece, a geração de reativo é fixada no limite violado e a tensão da barra deixa de ser mantida constante e, portanto, a barra muda de tipo, se tornando PQ.

A partir das equações da rede,

$$\text{Inj}_k + Q_{\text{gen}_k} - Q_{\text{load}_k} = \sum_{m \in \Omega} Q_{km} (V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) - b_k^{\text{sh}}(V_k)$$

onde: Q_{gen_k} = geração reativa na barra k ;
 Q_{load_k} = carga reativa na barra k ;
 Inj_k = injeção de potência reativa na barra k ;
 k = $1, \dots, nb$ (número de barras do sistema).

ou, equivalente:

$$\text{Inj}_k + Q_{\text{gen}_k} = F_k(V, T) + Q_{\text{load}_k} \quad (\text{V.1})$$

$$\text{onde: } F_k(V, T) = \sum_{m \in \Omega} Q_{km} (V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) - b_k^{\text{sh}}(V_k)$$

Expandindo a função $F_k(V, T)$ em série de Taylor em torno do valor de $F_k(V^0, T^0)$ e desprezando-se os termos de ordem igual ou superior a 2 tem-se:

$$F_k(V, T) \cong F_k(V^0, T^0) + \frac{\partial F_k}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial F_k}{\partial T_k} \Delta T_k$$

Substituindo a expressão acima em (V.1):

$$\text{Inj}_k + Q_{\text{gen}_k} = F_k(V^0, T^0) + \frac{\partial F_k}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial F_k}{\partial T_k} \Delta T_k + Q_{\text{load}_k}$$

Para simplificar, seja:

$$\ell_1 = \frac{\partial F_k}{\partial V_k} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k}$$

$$\ell_2 = \frac{\partial F_k}{\partial T_k} = \frac{\partial Q_k}{\partial T_k}$$

Logo:

$$\text{Inj}_k + Q_{\text{gen}_k} = F_k(V^0, T^0) + \ell_1 \Delta V_k + \ell_2 \Delta T_k + Q_{\text{load}_k}$$

Somando-se $(-Q_{\text{gen}_k}^0 - \text{Inj}_k^0)$ a ambos os membros da equação:

$$\text{Inj}_k + Q_{\text{gen}_k} - Q_{\text{gen}_k}^0 - \text{Inj}_k^0 = F_k(V^0, T^0) - Q_{\text{gen}_k}^0 - \text{Inj}_k^0 + \ell_1 \Delta V_k + \ell_2 \Delta T_k + Q_{\text{load}_k}$$

Dado que as equações da rede são satisfeitas na solução do fluxo de potência,

$$F_k(V^0, T^0) + Q_{\text{load}_k} - Q_{\text{gen}_k}^0 - \text{Inj}_k^0 = 0,$$

portanto,

$$\Delta \text{Inj}_k + \Delta Q_{\text{gen}_k} = \ell_1 \Delta V_k + \ell_2 \Delta T_k$$

Deste modo, em estrutura matricial, tem-se:

$$\begin{aligned} [\Delta \text{Inj}_k]_{(nb \times 1)} + [\Delta Q_k]_{(nb \times 1)} &= \\ &= [l_1]_{(nb \times nb)} [\Delta V_k]_{(nb \times 1)} + [l_2]_{(nb \times nb)} [\Delta T_k]_{(nb \times 1)} \end{aligned}$$

Considerando-se os tipos de barra PV e PQ e suas características pode-se escrever:

$$\begin{aligned} \begin{array}{l} \text{barras PV} \\ \dots\dots\dots \\ \text{barras PQ} \end{array} \begin{bmatrix} \Delta \text{Inj}_i + \Delta Q_{\text{gen}_i} \\ \dots\dots\dots \\ \Delta \text{Inj}_j \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{k_i}}{\partial V_{\text{gen}_i}} & \frac{\partial Q_{k_i}}{\partial V_{\text{load}_j}} \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial Q_{k_i}}{\partial V_{\text{gen}_i}} & \frac{\partial Q_{k_i}}{\partial V_{\text{load}_j}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{\text{gen}_i} \\ \dots\dots\dots \\ \Delta V_{\text{load}_j} \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{k_i}}{\partial T_m} \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial Q_{k_i}}{\partial T_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \end{bmatrix} \end{aligned}$$

onde: ΔQ_{gen_i} = incremento de potência reativa gerada na barra PV de índice i;

ΔInj_i = incremento de injeção de potência reativa na barra i;

ΔInj_j = incremento de injeção de potência reativa na barra j;

V_{gen_i} = tensão na barra PV (barra de geração) de índice i;

V_{load_j} = tensão na barra PQ (barra de carga) de índice j;

ΔV_{gen_i} = incremento de tensão na barra PV de índice i;

ΔV_{load_j} = incremento de tensão na barra PQ de índice j;

$m = 1, \dots, n_t$ (número de transformadores)

Observe que ΔQ_{gen_k} para barras do tipo PQ é zero.

Sejam:

$$\ell_1 = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 \\ L_3 & L_4 \end{bmatrix}$$

$$L_1 = \frac{\partial Q_{k_i}}{\partial V_{\text{gen}_i}}$$

$$L_2 = \frac{\partial Q_{k_i}}{\partial V_{\text{load}_j}}$$

$$L_3 = \frac{\partial Q_{k_i}}{\partial V_{\text{gen}_i}}$$

$$L_4 = \frac{\partial Q_{k_i}}{\partial V_{\text{load}_j}}$$

$$\ell_2 = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix}$$

$$T_1 = \frac{\partial Q_{k_i}}{\partial T_m}$$

$$T_2 = \frac{\partial Q_{k_i}}{\partial T_m}$$

$$i = 1, \dots, n_g$$

$$j = 1, \dots, n_c + n_{gc}$$

$$m = 1, \dots, n_t \text{ (número de transformadores)}$$

$$n_{gc} = \text{número de barras PV que se tornaram PQ}$$

A partir daí pode-se chegar à seguinte expressão:

- Barras PQ:

$$\Delta \ln j_j = L_3 \Delta V_{\text{gen}_i} + L_4 \Delta V_{\text{load}_j} + T_2 \Delta T_m$$

Explicitando-se ΔV_{load_j} , tem-se:

$$\Delta V_{load_j} = L_4^{-1} \Delta In_j + L_4^{-1} (-L_3 \Delta V_{gen_i} - T_2 \Delta T_j) \quad (V.2)$$

Tem-se acima a expressão da sensibilidade da tensão nas barras PQ e PV que se tornaram PQ em relação à potência reativa injetada nas mesmas, tensão das barras PV e tap dos transformadores. Assim, pode-se construir cortes de sensibilidade somente para as barras onde houve violação de tensão. Isto é mostrado a seguir.

Para uma dada violação de tensão na barra kk tem-se:

$$e_{kk}^t = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1_{kk} \ 0 \ \dots \ 0 \ 0]_{(nb \times 1)}$$

Assim, multiplicando a equação (V.2) por e_{kk}^t tem-se determinada a sensibilidade da tensão da barra kk em relação à potência reativa injetada na mesma barra:

$$e_{kk}^t \Delta V_{load_j} = e_{kk}^t L_4^{-1} \Delta In_j + e_{kk}^t L_4^{-1} (-L_3 \Delta V_{gen_i} - T_2 \Delta T_j)$$

Fazendo $w^t = e_{kk}^t L_4^{-1}$,

$$e_{kk}^t \Delta V_{load_j} = w^t \Delta In_j + w^t (-L_3 \Delta V_{gen_i} - T_2 \Delta T_j)$$

Logo:

$$V_{load_{kk}} - V_{load_{kk}}^0 = w^t \Delta In_j + w^t (-L_3 \Delta V_{gen_i} - T_2 \Delta T_j)$$

$$V_{load_{kk}} = w^t \Delta In_j + w^t (-L_3 \Delta V_{gen_i} - T_2 \Delta T_k) + V_{load_{kk}}^0$$

Foi visto que a seguinte inequação deve ser obedecida para todas as barras do sistema:

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max}$$

Assim, para a barra kk :

$$V_{kk}^{\min} \leq w^t (\Delta In_j - L_3 \Delta V_{gen_i} - T_2 \Delta T_j) + V_{load_{kk}}^0 \quad (V.4)$$

$$V_{kk}^{\max} \geq w^t (\Delta In_j - L_3 \Delta V_{gen_i} - T_2 \Delta T_j) + V_{load_{kk}}^0 \quad (V.5)$$

Deste modo, quando a tensão V_{kk} cai abaixo do limite mínimo um corte do tipo (V.4) é construído. Por outro lado, caso a tensão V_{kk} exceda ao limite máximo, um corte do tipo (V.5) é construído.

Os cortes de sensibilidade são implementados como:

$$\begin{aligned} -w^t L_3 V_{gen_i} - w^t T_2 T_j - w^t In_j &\geq V_{kk}^{\min} - V_{load_{kk}}^0 - w^t In_j - w^t L_3 V_{gen_i} - w^t T_2 T_j \\ -w^t L_3 V_{gen_i} - w^t T_2 T_j - w^t In_j &\leq V_{kk}^{\max} - V_{load_{kk}}^0 - w^t In_j - w^t L_3 V_{gen_i} - w^t T_2 T_j \end{aligned}$$

Observe que para as barras **PV** que **não** foram convertidas em PQ não há violações de tensão, pois a tensão destas barras é mantida fixa igual a determinada pelo caso base.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

VI.1 – Introdução

Neste capítulo, serão apresentados os resultados computacionais obtidos com a implementação da metodologia descrita nos capítulos (IV e V). Além disso será explicada detalhadamente a Análise de Sensibilidade, que auxilia o planejador do sistema na determinação dos critérios de planejamento (níveis de tensão adotados), do conjunto de barras candidatas a receber equipamento de compensação reativa adicional e das regiões do sistema com maiores problemas de reativo.

A implementação foi feita em ANSI FORTRAN 77 e os exemplos foram executados em um computador do tipo VAX 8810.

As redes elétricas analisadas são pertencentes ao sistema elétrico norte-americano (3150 e 329 barras) e ao sistema elétrico brasileiro (113, 1834 e 1832 barras). No item (VI.7), resultados dos sistemas brasileiros serão mostrados para o modo de planejamento preventivo.

É importante que fique claro que este capítulo apenas ilustra a utilização do programa desenvolvido mostrando seus modos de utilização e analisando os resultados obtidos. Na realidade, para se definir um plano de investimento para ser executado, é necessária a realização de uma série de estudos com o objetivo de analisar vários casos e questões de planejamento.

VI.2 – Análise de viabilidade

Com o objetivo de restringir o conjunto de barras candidatas para a expansão de fontes de potência reativa e com isso tornar a solução do problema mais rápida, é feita uma análise de viabilidade. Análise de viabilidade é um procedimento indicado para se iniciar um estudo de expansão ótima de fontes de potência reativa.

Entende-se por análise de viabilidade a resolução do problema somente no que diz respeito à operação. Isto é, a análise de viabilidade é executada aplicando-se injeções fictícias de potência reativa em todas as barras do sistema ou em algum subconjunto de barras determinado pelo planejador da expansão, de acordo com a seguinte formulação:

$$A = \text{Min} \sum_{k \in \Gamma} (s_{1k} + s_{2k})$$

sujeito a:

$$P_{km}(V, \theta, T) - P_k = 0 \quad k \in \gamma$$

$$Q_{km}(V, \theta, T) - Q_k - s_{1k} + s_{2k} = 0 \quad k \in \gamma$$

$$P_{\min_k} \leq P_k \leq P_{\max_k} \quad k \in \gamma$$

$$Q_{k_{\min}} \leq Q_k \leq Q_{k_{\max}} \quad k \notin \Gamma$$

$$Q_{k_{\min}} - q_{rk} \leq Q_k \leq Q_{k_{\max}} + q_{ck} \quad k \in \Gamma$$

$$V_{k_{\min}} \leq V_k \leq V_{k_{\max}} \quad k \in \gamma$$

$$T_j \leq T_j \leq T_j \quad j \in \eta$$

$$s_{1k} \geq 0; s_{2k} \geq 0$$

onde: Γ = conjunto de barras candidatas a receber equipamento de

compensação reativa adicional;

γ = conjunto de todas as barras do sistema;

η = conjunto dos transformadores controláveis.

O processo de solução segue os mesmos passos explicados no capítulo (V) (exceto no que diz respeito à construção de cortes de Benders para o problema de investimento) e pode ter os seguintes resultados:

- se $A = 0$, o sistema não precisa de adição de novas fontes de potência reativa, isto é, a capacidade reativa instalada no sistema é suficiente para a sua operação nas diversas configurações;
- se $A \geq 0$, o sistema necessita de alocação adicional de fontes de potência reativa, e portanto há necessidade de investimentos (resolução do problema completo investimento-operação). Neste caso, o conjunto de barras candidatas é formado pelo conjunto de barras que tiveram uma das variáveis s_{1_k} e s_{2_k} associadas diferente de zero.

Observe na figura (VI.1) que no modo de planejamento corretivo diferentes valores de injeção fictícia podem ser especificados. Já no modo de planejamento preventivo figura (VI.2), o mesmo valor de injeção fictícia é especificado para o caso base e contingências

O processo de solução da análise de viabilidade obedece ao seguinte esquema:

e Modo de planejamento corretivo:

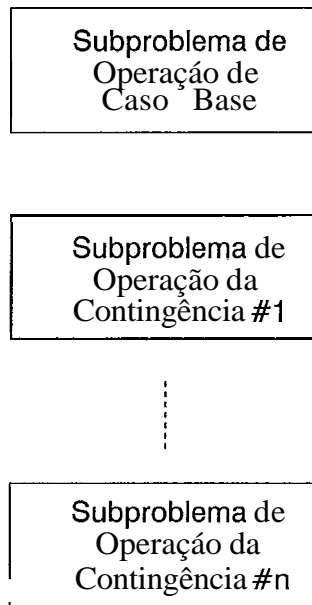


figura VI.1 – Esquema de resolução da análise de viabilidade no modo corretivo

• Modo de planejamento preventivo:

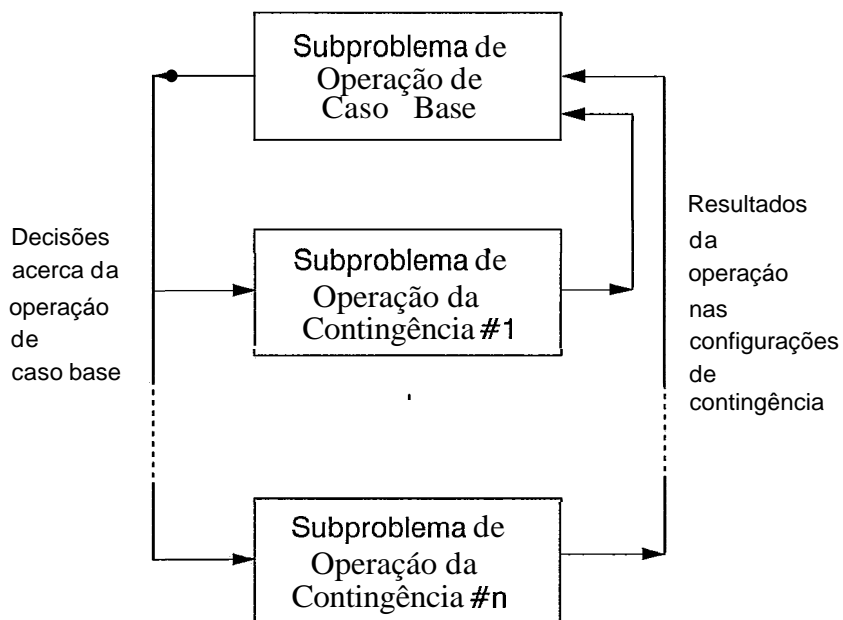


figura VI.2 – Esquema de solução da análise de viabilidade no modo preventivo

É importante destacar que a análise de viabilidade ajuda ao planejador do sistema a determinar um conjunto de barras com deficiência de reativo (caso em que $A \geq 0$), pois haverá injeção fictícia de reativo nestas barras. Isto também facilita a detecção de possíveis incompatibilidades nos critérios de planejamento adotados. Caso o problema de otimização seja inviável, significa que o conjunto de barras candidatas fornecido pelo planejador é insuficiente para a resolução do problema.

VI.3 – Exemplo de uma seqüência de estudo

Para exemplificar uma seqüência de estudo, foi escolhida uma rede derivada do sistema elétrico norte–americano. Esta rede representa a costa oeste dos Estados Unidos. Possui 3150 barras e 4653 linhas, isto gera um problema de investimento com 3150 variáveis zero/um, 6300 variáveis contínuas e 6300 restrições lineares e um problema de operação com aproximadamente 15500 variáveis e 6300 restrições não–lineares por configuração.

Neste exemplo, optou–se pelo modo de planejamento preventivo por ser este modo de planejamento o escopo deste trabalho. Os equipamentos utilizados neste estudo são do tipo fixo (bancos de capacitores/reatores)

O objetivo do estudo é determinar um plano de expansão de custo mínimo para esta rede nas configurações de caso base e sob as seguintes contingências:

- 1 – desligamento da barra BUS 1222
contingência de geração na barra BUS 1220
- 2 – desligamento da linha BUS 1426 – BUS 1113
- 3 – desligamento da linha BUS 535 – BUS 536

- 4 – desligamento da linha BUS 1437 – BUS 1199
- 5 – desligamento da linha BUS 833 – BUS 1323

Em primeiro lugar, é conveniente executar uma análise de viabilidade (seção VI.2) com o objetivo de determinar um conjunto reduzido de barras candidatas a receber equipamentos de compensação reativa e verificar a viabilidade do sistema em relação aos critérios de planejamento e tipo de equipamento considerado.

Como resultado da análise de viabilidade, tem-se o seguinte quadro:

Nome da barra	Injeção MVar	Tipo
BUS 275	2.07	cap
BUS 2601	10.16	cap
BUS 2884	38.33	cap
BUS 2885	37.74	cap
BUS 2886	51.09	cap
BUS 2887	51.91	cap

Total de injeção reativa: 191.3 MVar

Tempo de CPU: 2 horas 30 min

tabela VI.1 – Resultados da análise de viabilidade no modo de planejamento preventivo (sistema de 3150 barras)

De posse dos resultados da análise de viabilidade, pode-se dar prosseguimento ao estudo considerando as barras BUS 275, BUS 2601, BUS 2884, BUS 2885, BUS 2886 e BUS 2887 como candidatas a receber equipamentos de compensação reativa. Com isso, o problema de investimento teve sua dimensão

reduzida (6 variáveis zero/um, 12 variáveis contínuas e 12 restrições lineares) constatou-se que o problema é viável em relação aos critérios de planejamento e tipo de equipamento considerado, pois a análise de viabilidade apresentou resultados coerentes.

O próximo passo do estudo é a determinação da capacidade e da localização dos equipamentos a serem instalados. Executa-se o programa com o objetivo de se determinar o plano de investimento de menor custo. Deste modo, obtém-se os seguintes resultados:

Nome da barra	Alocação MVar	Equipamento
BUS 2884	26.62	cap
BUS 2885	27.60	cap
BUS 2886	69.00	cap
BUS 2887	87.27	cap

Total reativo alocado: 210.49 MVar

Custo total: k\$ 3346.30

Tempo de CPU: 4 horas 19 min

tabela VI.2 – Resultados da expansão no modo de planejamento preventivo
(sistema de 3150 barras)

Os resultados anteriores e o ponto de operação do caso base constituem o plano de investimento de custo mínimo que garantirá a operação viável do sistema tanto em situação normal quanto nas situações de contingência descritas.

VI.4 – Modo de Planejamento Preventivo x Modo de Planejamento Corretivo

Para fazer esta comparação, o sistema escolhido foi um sistema de 329 barras e 456 linhas originário da costa noroeste dos Estados Unidos. Para esta rede elétrica, tem-se um problema de investimento com 329 variáveis zero/um, 658 variáveis contínuas e 658 restrições lineares e um problema de operação com cerca de 1600 variáveis e 650 restrições não-lineares por configuração.

Foram feitos dois estudos, um no modo de planejamento preventivo e outro no modo de planejamento corretivo, seguindo a mesma seqüência descrita no item anterior. Com isso, pôde-se comparar os resultados e tempo de CPU dos dois modos de planejamento.

O tipo de equipamento considerado foi do tipo fixo e as seguintes contingências foram consideradas:

- 1 – desligamento da barra BUS 28
- 2 – desligamento da linha BUS 35 – BUS 138
- 3 – desligamento da linha BUS 4 – BUS 3
- 4 – desligamento da linha BUS 251 – BUS 252
- 5 – desligamento da linha BUS 99 – BUS 218

Ao se executar a análise de viabilidade, os seguintes os resultados mostrados na tabela (VI.3) e (VI.4) foram obtidos.

Note que os resultados para o modo corretivo não puderam ser totalizados uma vez que são diferentes para cada configuração. Apenas pode-se dizer que a contingência mais severa é a contingência 2.

MODO PREVENTIVO		
Nome da barra	Injeção MVar	Tipo
BUS 85	12.60	cap
BUS 122	0.59	cap
BUS 227	9.26	cap

Total de injeção reativa: 22.45 MVar

Tempo de CPU: 1 min 22 seg

Número de iterações de decomposição: 6

tabela VI.3 – Resultados da análise de viabilidade no modo preventivo
(sistema de 329 barras)

MODO CORRETIVO		
Nome da barra	Injeção MVar	Configuração
BUS 84	3.70	ctg 2
BUS 85	3.16	ctg 2
BUS 227	8.23	caso base
BUS 227	8.25	ctg 1
BUS 227	8.25	ctg 2
BUS 227	8.22	ctg 3
BUS 227	8.22	ctg 4
BUS 227	8.22	ctg 5

Tempo de CPU: 1 min 22 seg

Número de iterações de decomposição: 1

tabela VI.4 – Resultados da análise de viabilidade no modo corretivo
(sistema de 329 barras)

Com o conjunto de barras candidatas definido, o programa foi novamente executado visando a determinação de um plano de ótimo de investimento. Chegou-se os seguintes resultados:

MODO PREVENTIVO		
Nome da barra	Alocação MVar	Equipamento
BUS 85	14.76	cap
BUS 227	10.04	cap

Total reativo alocado: 24.80 MVar

Custo total: k\$ 995.15

Tempo de CPU: 1 min 52 seg

Número de iterações de decomposição: 4

tabela VI.5 – Resultados da expansão no modo preventivo (sistema de 329 barras)

MODO CORRETIVO		
Nome da barra	Alocação MVar	Equipamento
BUS 84	6.38	cap
BUS 227	9.13	cap

Total reativo alocado: 15.51 MVar

Custo total: k\$ 772.24

Tempo de CPU: 1 min 53 seg

Número de iterações de decomposição: 3

tabela VI.6 – Resultados da expansão no modo corretivo (sistema de 329 barras)

Observe que, no exemplo mostrado, houve uma maior alocação de equipamentos de compensação reativa para o modo de planejamento preventivo. Isto já era esperado, uma vez que, neste modo de planejamento, não é possível a atuação em taps de transformador, tensão de gerador, compensadores síncronos e estáticos para a viabilização das contingências.

Em relação ao tempo de CPU, a análise de uma configuração no modo corretivo envolve um problema de otimização, podendo assim ser mais dispendiosa que no modo preventivo. Por outro lado, o processo de ajuste de ponto de operação caso base/contingência, no modo preventivo, pode consumir um tempo considerável, fazendo com que no cômputo geral o tempo de CPU nos dois modos sejam equivalentes.

VI.5 – Exemplo de utilização do sistema

Outro exemplo de utilização do programa é a substituição de equipamentos existentes na rede elétrica.

Para mostrar este tipo de utilização, foi escolhido o mesmo sistema elétrico descrito na (seção VI.2) sujeito às mesmas contingências e com a compensação definida na mesma seção já instalada.

Foram retirados deste sistema os capacitores e indutores mostrados na tabela (VI.7).

Para a determinação do conjunto de barras candidatas foram executadas duas análises de viabilidade, para os modos de planejamento preventivo e corretivo e os resultados encontrados estão nas tabelas (VI.8) e (VI.9).

Nome da barra	MVAr cap	MVAr ind
BUS 71	40.00	50.00
BUS 72	60.00	35.00
BUS 325	—	192.00
BUS 535	55.80	—
BUS 552	—	96.00
BUS 565	236.00	—
BUS 1069	—	50.00
BUS 1298	15.30	—
BUS 1639	56.00	—
BUS 1867	—	35.00
BUS 2597	10.20	—
BUS 2823	100.80	—
Total	574.10	458.00

tabela VI.7 – Equipamentos retirados do sistema de 3150 barras

MODO PREVENTIVO		
Nome da barra	Injeção MVAr	Tipo
BUS 1219	146.30	cap
BUS 2597	4.90	cap
Total	151.20	cap

tabela VI.8 – Resultados da análise de viabilidade no modo preventivo
(sistema de 3150 barras)

MODO CORRETIVO	
Injeção MVar	Configuração
—	caso base
143.30	ctg 1
50.90	ctg 2
6.20	ctg 3
72.70	ctg 4
0.70	ctg 5

tabela VI.9 – Resultados da análise de viabilidade no modo corretivo
(sistema de 3150 barras)

Novamente, é importante ressaltar que os resultados para o modo de planejamento corretivo não puderam ser totalizados, uma vez que, para cada configuração tem-se um valor diferente de injeção.

Observe que a análise de viabilidade sugeriu como barra candidata a barra BUS 1219, que não estava incluída no conjunto de barras das quais equipamentos foram removidos. Isto já indica que o sistema não estava com os equipamentos bem localizados.

Como resultado da execução do programa visando investimento, tem-se as tabelas (VI.10) e (VI.11).

Como pode ser visto, o programa determinou em ambos os casos que a adição de reativo em uma única barra proporciona uma solução melhor que a anterior.

MODO PREVENTIVO		
Nome da barra	Alocação MVar	Equipamento
BUS 1219	175.00	cap
Total	175.00	cap

tabela VI.10 – Resultados da expansão no modo preventivo (sistema de 3150 barras)

MODO CORRETIVO		
Nome da barra	Alocação MVar	Equipamento
BUS 1219	155.90	cap
Total	155.90	cap

tabela VI.11 – Resultados da expansão no modo corretivo (sistema de 3150 barras)

Novamente pode-se observar que, como esperado, o modo de planejamento preventivo requer maior quantidade de reativo. Nota-se também que, a barra onde o programa determinou a alocação não pertencia ao conjunto das barras de onde foram retirados equipamentos e que, além disso, a quantidade de reativo determinada é muito menor que a removida, sendo que não houve necessidade da realocação de nenhuma capacidade de equipamento reativo.

VI.6 – Resultados do sistema brasileiro

Na obtenção dos resultados que serão apresentados, os custos de investimentos foram representados por uma função linear e as variáveis de capacidade, que representam os novos equipamentos a serem instalados, contínuas.

Com estas aproximações, o subproblema de investimento pode ser resolvido por algoritmos de programação linear. Entretanto, com o objetivo de acelerar a convergência do algoritmo de decomposição, optou-se, neste caso, por integrar o subproblema de investimento com o subproblema de operação de caso base, as contingências continuam sendo tratadas separadamente. O esquema intuitivo, neste caso, é ilustrado na figura (VI.3).

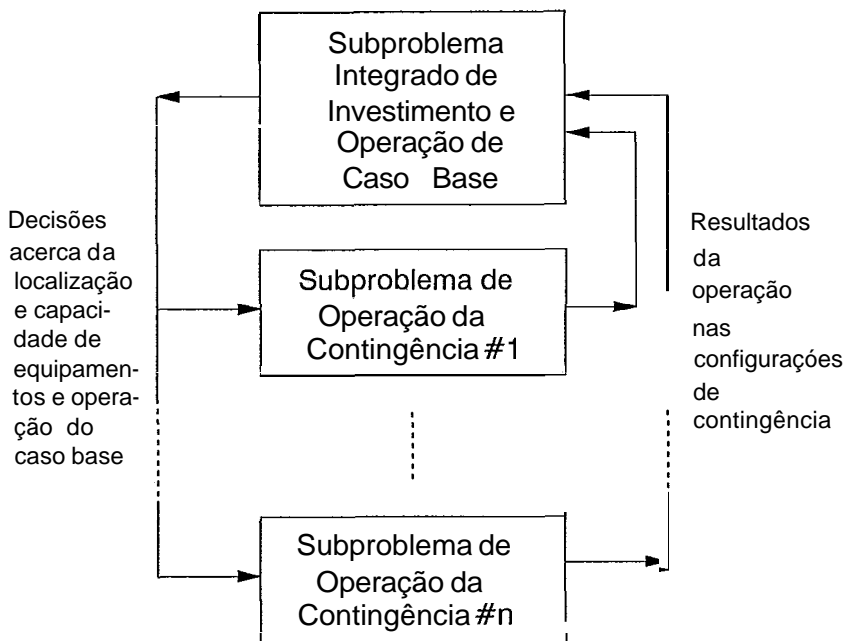


figura VI.3 – Esquema de solução para modo preventivo considerando-se custos lineares

VI.6.1 – Sistema de 113 barras

Este sistema é originário da CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco). Com suas 113 barras e 227 linhas gera um problema de cerca de 500 variáveis e 226 restrições não lineares. As configurações de contingência que foram consideradas neste estudo são as seguintes:

- desligamento da linha ANGELIM 500 – RECIFE 500

- desligamento da linha R.LARGO 500 – SUAPE 500
desligamento de banco de reator na barra SUAPE 500
- desligamento da linha XINGO 500 – R.LARGO 500
desligamento de banco de reator na barra R.LARGO 500
- desligamento da linha NATAL 230 – MUSSURE 230

O conjunto de barras candidatas a receberem alocação de reativo foi determinado pelo planejador da expansão e é composto das seguintes barras:

- | | |
|----------------|-----------------|
| • RECIFE 230 | • NATAL 069 |
| • R.LARGO 230 | • GOIANINHA 069 |
| a C.GRANDE 230 | • MUSSURE 069 |
| • NATAL 230 | • PIRAPAMA 069 |
| • ACU 230 | a MIRUEIRA 069 |
| • MANJOPE 230 | • VARZEA 069 |
| • BONJI 069 | • PENEDO 069 |
| • C.GRANDE 069 | • RIBEIRÃO 069 |

O equipamento considerado disponível para instalação nas barras de 230 kV é do tipo controlável (síncrono). Já no restante das barras, o equipamento disponível é do tipo fixo.

Resolvendo o problema da expansão ótima de fontes de potência reativa para este sistema no modo de planejamento preventivo, tem-se resultados apresentados na tabela (VI.12).

Nome da barra	Alocação MVar	Equipamento
RECIFE 230	43.22	sinc
R.LARGO 230	82.50	sinc
NATAL 230	182.99	sinc
ACU 230	89.86	sinc
BONJI 069	63.90	cap
C.GRANDE 069	85.20	cap
NATAL 069	42.60	cap
GOIANINHA 069	44.57	cap
MUSSURE 069	85.20	cap
PIRAPAMA 069	63.90	cap
MIRUEIRA 069	42.60	cap
VARZEA 069	77.54	cap
PENEDO 069	46.53	cap
RIBEIRÃO 069	54.41	cap

Total reativo alocado: 1008.03 MVar

Custo total: k\$ 1409.60

Tempo de CPU: 23 seg

tabela VI.12 – Solução do subproblema de operação de contingência no modo de planejamento preventivo (sistema de 113 barras)

w.6.2 – Sistema de 1834 barras

Este sistema é originário da região Goiás/Brasília e dá origem a um problema com cerca de 9000 variáveis e 3600 restrições não lineares. As configurações de contingência consideradas são as seguintes:

- desligamento da linha ITUMBIARA 345 – BANDEIRA–345
contingência de shunt na barra BANDEIRA–345
- r desligamento da linha BANDEIRA–345 – BRAS.SUL–345
- contingência de shunt na barra BANDEIRA–345

O conjunto de barras candidatas a alocação de reativo foi determinado pelo planejador do sistema e o tipo de equipamento disponível para a alocação pode ser do tipo controlável (síncrono) ou fixo (bancos de capacitores ou reatores).

Resolvendo-se o problema da expansão ótima de fontes de potência reativa chegou-se aos resultados da tabela (VI.13).

Nome da barra	Alocação MVar	Equipamento
ANHANGUERA 069	6.93	cap
XAVANTES 138	32.92	cap
B.ALTO 069	10.80	cap
MARAROSA 069	1.80	cap
PORANGATU069	1.33	cap
MEIAPONTE 013	10.80	cap
AEROPORTO013	13.80	cap
ANAPOL.SUL 069	4.20	cap
CORUMBA 069	8.65	cap

Total reativo alocado: 91.23 MVar

Custo total: k\$ 4105.23

Tempo de CPU: 6 min 50 seg

tabela VI.13 – Solução do subproblema de operação de contingência no modo de planejamento preventivo (sistema de 1834 barras)

Nome da barra	Alocação MVar	Equipamento
BALTOESTATIC	18.04	sinc
ITQUIRA 138	10.80	cap
MARAJOARA138	10.80	cap
CEILSUL 13.8	12.00	cap
STAMARIA 13.8	9.60	cap
BCENTRO 13.8	6.00	cap
BNORTE 13.8	5.75	cap
SE 03 13.8	7.19	cap
SE 04 13.8	9.60	cap
SE 07 13.8	4.68	cap
SE 08 13.8	4.80	cap
SE 10 13.8	2.40	cap
TAGT 34.5	12.00	cap
CEILNOR 13.8	18.00	cap
TAGT 13.8	12.00	cap
GUARA 13.8	4.80	cap
PAD 13.8	1.94	cap
PLAN 13.8	4.80	cap
ITAPACI 230	10.29	cap
GOIANÉSIA 69	1.80	cap
URUACU 69	1.80	cap

Total reativo alocado: 169.09 MVar

Custo total: k\$ 8180.16

Tempo de CPU: 10 min 3 seg

tabela VI.14 – Solução do subproblema de operação de contingência no modo de planejamento preventivo (sistema de 1832 barras)

VI.6.3 – Sistema de 1832 barras

Este sistema também é originário da região Goiás/Brasília, mas é outra configuração (outro ano de um estudo de planejamento).

As configurações de contingência consideradas são as seguintes:

- desligamento da linha ITUMBIARA 345 – BANDEIRA–345
contingência de shunt na barra BANDEIRA–345
- desligamento da linha BANDEIRA–345 – BRAS.SUL–345
- contingência de shunt na barra BANDEIRA–345

O conjunto de barras candidatas a alocação de reativo foi fornecido pelo planejador do sistema e pode-se instalar equipamentos dos tipos fixo e controlável.

Resolvendo-se o problema da expansão ótima de fontes de potência reativa no modo de planejamento preventivo obteve-se os resultados mostrados na tabela (VI.14).

VI.7 – Conclusões

Deste capítulo pode-se concluir o seguinte:

r o modo de planejamento preventivo é mais caro que o modo de planejamento corretivo;

- a metodologia implementada possibilita não só o dimensionamento e localização de novas fontes de potência reativa, como também a realocação de equipamentos já existentes;
- em um estudo de expansão de novas fontes de potência reativa, é indicado um estudo da análise de viabilidade do sistema elétrico, já que este estudo possibilita a redução do problema de investimento, além de determinar o grau de deficiência de reativo do referido sistema (o que pode significar critérios de planejamento muito rigorosos) e a adequação do mesmo ao tipo de equipamento considerado.

CAPÍTULO VII

FORMA ALTERNATIVA DE TRATAMENTO DO SUBPROBLEMA DE OPERAÇÃO DE CONTINGÊNCIAS NO MODO DE PLANEJAMENTO PREVENTIVO

VII.1 – Introdução

Neste capítulo será detalhado a forma alternativa de tratamento do subproblema de operação de contingências no modo de planejamento preventivo: através da otimização da contingência.

Resultados numéricos de sistemas de 113, 1834 e 1832 serão apresentados.

WI.2 – Análise da operação de contingência através da otimização

A partir do ponto de operação determinado pelo subproblema de operação de caso base incluindo as injeções fictícias, o seguinte problema de otimização é resolvido para cada configuração de contingência:

$$U(V_{gen_k}, T_{km}) = \text{Min} \sum_{k \in \Gamma}^n (s'_{1k} + s'_{2k}) \quad (\text{VII.1})$$

sujeito a:

$$\begin{aligned}
P_{km}(V, \theta, T) - P_k &= 0 & k \in \gamma \\
Q_{km}(V, \theta, T) - Q_k - s'_{1k} + s'_{2k} &= 0 & k \in \gamma \\
P_k^{\min} \leq P_k \leq P_k^{\max} & & k \in \gamma \\
Q_{k_{\min}} \leq Q_k \leq Q_{k_{\max}} & & k \notin \Gamma \\
Q_{k_{\min}} - q_{rk} \leq Q_k \leq Q_{k_{\max}} + q_{ck} & & k \in \Gamma \\
V_{k_{\min}} \leq V_k \leq V_{k_{\max}} & & k \in \gamma \\
V_{\text{gen}_k} = V_{\text{gen}_k}^b & (\delta_{1k}^*) & k \in \text{conj. barras PV} \quad (\text{VII.2}) \\
T_{km} = T_{km}^b & (\delta_{2k}^*) & k \in \eta \quad (\text{VII.3}) \\
s'_{1k} \geq 0; s'_{2k} \geq 0 & &
\end{aligned}$$

onde: os valores de q_{rk} e q_{ck} são determinados pelo problema de investimento.

$V_{\text{gen}_k}^b$ = tensão da barra de geração k da configuração de caso base;

T_{km}^b = tap do circuito k - m da configuração de caso base;

$\delta_{1k}^*, \delta_{2k}^*$ = multiplicadores de Lagrange associados respectivamente às restrições de tensão da barra de geração e tap na solução ótima;

Γ = conjunto de barras candidatas a receber equipamento de compensação reativa adicional;

Υ = conjunto de todas as barras do sistema;

η = conjunto dos transformadores controláveis;

s'_{1k}, s'_{2k} = injeção fictícia de potência reativa para garantir a operação viável nas contingências.

No problema anterior, os ajustes das cargas reativas devido às injeções fictícias de caso base são feitas de acordo com a seção (V.4.2).

Como explicado na seção (IV.3):

- se $U(V_{gen_k}, T_{km}) = 0$, o ponto de operação proposto pelo subproblema de operação de caso base (soma de injeções fictícias de potência reativa), permite a operação viável do sistema na configuração de contingência;
- se $U(V_{gen_k}, T_{km}) > 0$, o ponto de operação proposto pelo subproblema de operação de caso base (soma de injeções fictícias de potência reativa), não permite a operação viável do sistema nas configurações de contingência.

Observe que este problema de otimização é bastante semelhante ao problema de otimização resolvido nos subproblemas de operação de contingência no modo de planejamento corretivo (seção V.3). A diferença entre os dois é que no modo preventivo o ponto de operação de caso base deve ser mantido inalterado, o que é garantido pelas restrições (VII.2 e VII.3).

A função objetivo deste problema representa a quantidade de injeção fictícia de reativo necessária à viabilização da operação da contingência no ponto de operação definido pelo subproblema de operação de caso base. O algoritmo utilizado para a resolução deste problema é o mesmo descrito em (V.3.1).

É importante ressaltar que, neste caso, o controle de geração de potência reativa é simulado através do problema de otimização. Isto é, caso a geração de reativo atinja algum limite ("bound" inferior ou "bound" superior) a variável correspondente é fixada no limite atingido ("bound" superior = "bound" inferior) e a tensão da barra correspondente a este gerador é liberada ("bound" é relaxado).

Caso a função $U(V_{gen_k}, T_{km})$ seja maior que zero, constroi-se o seguinte

corde:

$$U^* + \delta_{1_k}^* (V_{\text{gen}_k} - V_{\text{gen}_k}^b) + \delta_{2_k}^* (T_{km} - T_{km}^b) \leq 0$$

onde: U^* = valor da função objetivo no ótimo;

Este corte é um corte de Benders e expressa a soma de injeções fictícias de reativo como uma função de tensão de barras de geração e tap de transformador. Esta nova restrição representa os resultados da operação nas configurações de contingência e será anexada ao subproblema de operação de caso base para a determinação de um novo ponto de operação. É importante lembrar que os multiplicadores $\delta_{1_k}^*$ e $\delta_{2_k}^*$ não são obtidos diretamente do problema (VII.1), uma vez que as restrições associadas a eles são tratadas implicitamente durante o processo de solução. Assim sendo, o cálculo de $\delta_{1_k}^*$ e $\delta_{2_k}^*$ deve ser feito através do custo reduzido associado às variáveis V_{gen_k} e T_{km} . Portanto:

$$c_{v_{\text{gen}_k}}^* = c_{v_{\text{gen}_k}} - \pi_k^* a'_{v_{\text{gen}_k}} - \delta_{1_k}^* a''_{v_{\text{gen}_k}}$$

$$c_{t_{km}}^* = c_{t_{km}} - \pi_k^* a'_{t_{km}} - \delta_{2_k}^* a''_{t_{km}}$$

onde: $c_{v_{\text{gen}_k}}$ = custo associado à variável V_{gen_k} ;
 $c_{t_{km}}$ = custo associado à variável $T_{t_{km}}$;
 π_k^* = multiplicador de Lagrange associado à restrição de balanço de potência reativa na solução ótima;
 $\delta_{1_k}^*$ = multiplicador de Lagrange associado à restrição de limite de tensão da barra PV k ;
 $\delta_{2_k}^*$ = multiplicador de Lagrange associado à restrição de limite de tap do transformador k ;
 $a'_{v_{\text{gen}_k}}$ = coeficiente da variável V_{gen_k} na restrição de balanço de

potência reativa;

$a''_{v_{gen_k}}$ = coeficiente da variável V_{gen} na restrição de limite de tensão da barra PV k;

$a'_{t_{km}}$ = coeficiente da variável $T_{t_{km}}$ na restrição de balanço de potência reativa;

$a''_{t_{km}}$ = coeficiente da variável $T_{t_{km}}$ na restrição de limite de tap do transformador k.

VII.3 – Algoritmo utilizado para resolução do problema de operação no modo de planejamento preventivo

Baseado no que foi exposto, torna-se claro que a interação entre os subproblemas de operação de caso base e contingências segue o algoritmo abaixo:

- 1 – Resolva um problema de fluxo de potência ótimo para a configuração de caso base seguindo o algoritmo descrito em V.3.1 (subproblema de operação de caso base);
- 2 – Ajuste os valores das cargas reativas das barras onde ocorreram injeções fictícias de potência reativa ($s_{1_k} \geq 0$ ou $s_{2_k} \geq 0$);
- 3 – Para cada configuração de contingência faça:
 - i – resolva o problema de otimização para a configuração de contingência utilizando o algoritmo apresentado na seção (V.3.1) mantendo-se o mesmo ponto de operação determinado pelo subproblema de operação de caso base;

ii– caso $U(V_{gen_k}, T_{km}) > 0$, construa o corte de Benders que será incorporado ao subproblema de operação de caso base.

4 – Incorpore as restrições lineares ao subproblema de operação de caso base, restitua as cargas originais do sistema e retorne à etapa 1.

VII.4 – Comparação entre os dois modos de solução:

Para comparar as duas maneiras de se tratar o subproblema de operação de contingência no modo de planejamento preventivo, foram usados alguns casos exemplos. Testes foram feitos em sistemas de 113, 1834 e 1832 barras. Estes sistemas já foram descritos na seção (VI.6), mas voltarão a ser comentados para facilitar a comparação dos dois modos de solução dos subproblemas de operação de contingências no modo preventivo.

Os custos dos equipamentos foram representados por uma função linear da capacidade alocada. Como dito em (VI.6), esta representação simplifica o algoritmo de solução, pois a necessidade de discretização deixa de existir e, portanto, o problema de investimento pode ser resolvido sem a necessidade de algoritmos de programação inteira.

VII.4.1 – Sistema de 113 barras:

Este sistema é originário da CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco). Com suas 113 barras e 227 linhas gera um problema de cerca de 500 variáveis e 226 restrições não lineares. As configurações de contingência que foram

consideradas neste estudo são as seguintes:

- desligamento da linha ANGELIM 500 – RECIFE 500
- desligamento da linha R.LARGO 500 – SUAPE 500
desligamento de banco de reator na barra SUAPE 500
- desligamento da linha XINGO 500 – R.LARGO 500
desligamento de banco de reator na barra R.LARGO 500
- desligamento da linha NATAL 230 – MUSSURE 230

O conjunto de barras candidatas a receberem alocação de reativo foi determinado pelo planejador da expansão e é composto das seguintes barras:

- | | |
|----------------|-----------------|
| • RECIFE 230 | • NATAL 069 |
| • R.LARGO 230 | • GOIANINHA 069 |
| r C.GRANDE 230 | • MUSSURE 069 |
| • NATAL 230 | • PIRAPAMA 069 |
| r ACU 230 | • MIRUEIRA 069 |
| • MANJOPE 230 | • VARZEA 069 |
| r BONJI 069 | • PENEDO 069 |
| • C.GRANDE 069 | • RIBEIRÃO 069 |

O equipamento considerado disponível para instalação nas barras de 230 kV é do tipo controlável (síncrono) já no restante das barras, o equipamento disponível é do tipo fixo.

Considerando a análise de fluxo de potência como modo de solução dos subproblemas de operação de contingências e resolvendo o problema da expansão ótima de fontes de potência reativa para este sistema, tem-se os seguintes resultados apresentados na tabela (VII.1).

Nome da barra	Alocação MVar	Equipamento
RECIFE 230	43.22	sinc
R.LARGO 230	82.50	sinc
NATAL 230	182.99	sinc
ACU 230	89.86	sinc
BONJI 069	63.90	cap
C.GRANDE 069	85.20	cap
NATAL 069	42.60	cap
GOIANINHA 069	44.57	cap
MUSSURE 069	85.20	cap
PIRAPAMA 069	63.90	cap
MIRUEIRA 069	42.60	cap
VARZEA 069	77.54	cap
PENEDO 069	46.53	cap
RIBEIRÃO 069	54.41	cap

Total reativo alocado: 1008.03 MVar

Custo total: k\$ 1409.60

Tempo de CPU: 23 seg

tabela VII.1 – Solução do subproblema de operação de contingência através da análise de fluxo de potência (sistema de 113 barras)

Considerando o mesmo caso, mas resolvendo-se os subproblemas de operação de contingências através da otimização, tem-se os seguintes resultados para o problema da expansão ótima de fontes de potência apresentados na tabela (VII.2).

Nome da barra	Alocação MVar	Equipamento
R.LARGO 230	53.48	sinc
C.GRANDE 230	55.70	sinc
NATAL 230	200.00	sinc
ACU 230	21.05	sinc
BONJI 069	63.90	cap
C.GRANDE 069	85.20	cap
NATAL 069	42.60	cap
GOIANINHA 069	6.23	cap
MUSSURE 069	85.20	cap
PIRAPAMA 069	63.90	cap
MIRUEIRA 069	42.60	cap
VARZEA 069	83.36	cap
PENEDO 069	44.51	cap
RIBEIRÃO 069	38.12	cap

Total reativo alocado: 885.84 MVar

Custo total: k\$ 1216.06

Tempo de CPU: 53 seg

tabela VII.2 – Solução do subproblema de operação de contingência através de otimização (sistema de 113 barras)

Comparando-se os dois resultados, nota-se que na solução apresentada na tabela (VII.1) o total reativo alocado e o custo da alocação foram maiores que os da solução apresentada na tabela (VII.2). A diferença entre dos custos é de k\$ 193.57, o que representa uma redução de 13,17% no custo da primeira solução.

Quanto aos tempos de CPU, observa-se que a primeira solução foi mais rápida que a segunda em 30 segundos, isto representa uma redução de 56,6% no tempo da segunda solução.

VII.4.2 – Sistema de 1834 barras

Este sistema é originário da região Goiás/Brasília e dá origem a um problema com cerca de 9000 variáveis e 3600 restrições não lineares. As configurações de contingência consideradas são as seguintes:

- desligamento da linha ITUMBIARA 345 – BANDEIRA–345
contingência de shunt na barra BANDEIRA–345
- a desligamento da linha BANDEIRA–345 – BRAS.SUL–345
- a contingência de shunt na barra BANDEIRA–345

O conjunto de barras candidatas a alocação de reativo foi determinado pelo planejador do sistema e o tipo de equipamento disponível para a alocação pode ser do tipo controlável (síncrono) ou fixo (bancos de capacitores ou reatores).

Considerando a análise de fluxo de potência como modo de solução dos subproblemas de operação de contingência, chegou-se aos resultados da tabela (VII.3).

Nome da barra	Alocação MVar	Equipamento
ANHANGUERA 069	6.93	cap
XAVANTES 138	32.92	cap
B.ALTO 069	10.80	cap
MARAROSA 069	1.80	cap
PORANGATU069	1.33	cap
MEIAPONTE 013	10.80	cap
AEROPORTO013	13.80	cap
ANAPOL.SUL 069	4.20	cap
CORUMBA 069	8.65	cap

Total reativo alocado: 91.23 MVar

Custo total: k\$ 4105.23

Tempo de CPU: 6 min 50 seg

tabela VII.3 – Solução do subproblema de operação de contingência através de análise de fluxo de potência (sistema de 1834 barras)

Considerando a otimização como modo de solução dos subproblemas de operação de contingência, chegou-se aos seguintes resultados mostrados na tabela (VII.4).

Comparando os resultados, nota-se a confirmação das mesmas observações feitas para o sistema de 113 barras. Isto é, o total reativo alocado e o custo de alocação da primeira solução são maiores que os da segunda solução. A diferença entre os custos representa 3,1% do custo da primeira solução. Quanto ao tempo de execução, observa-se ser a primeira solução extremamente mais rápida, sendo a diferença dos tempos representativa de 95,3 % do tempo da segunda solução.

Nome da barra	Alocação MVar	Equipamento
ANHANGUERA 069	10.80	cap
XAVANTES 138	28.59	cap
B.ALTO 069	9.77	cap
MARAROSA 069	1.80	cap
MEIAPONTE 013	10.80	cap
AEROPORTO 013	13.80	cap
ANAPOL.SUL 069	4.20	cap
CORUMBA 069	8.65	cap

Total reativo alocado: 88.42 MVar

Custo total: k\$ 3978.73

Tempo de CPU: 2 horas 24 min 18 seg

tabela VII.4 – Solução do subproblema de operação de contingência através de otimização (sistema de 1834 barras)

VII.4.3 – Sistema de 1832 barras

Este sistema também é originário da região Goiás/Brasília, mas é outra configuração (outro ano de um estudo de planejamento).

As configurações de contingência consideradas são as seguintes:

- desligamento da linha ITUMBIARA 345 – BANDEIRA–345
contingência de shunt na barra BANDEIRA–345
- r desligamento da linha BANDEIRA–345 – BRAS.SUL–345

- contingência de shunt na barra BANDEIRA–345

O conjunto de barras candidatas a alocação de reativo foi fornecido pelo planejador do sistema e pode-se instalar equipamentos dos tipos fixo e controlável.

Considerando a análise de fluxo de potência como modo de solução dos subproblemas de operação de contingência, obteve-se os resultados mostrados na tabela (VII.5).

Considerando a otimização como modo de solução dos subproblemas de operação de contingência, obteve-se os resultados mostrados na tabela (VII.6).

As soluções apresentadas nas tabelas (VII.5) e (VII.6) confirmam o que já tinha sido observado nos itens (VII.5.1) e (VII.5.2) e mostra que a diferença entre os custos representa 8,9% do custo da primeira solução (tabela VII.5). Já em relação aos tempos de CPU, constata-se que a diferença entre os tempos obtidos pelas duas soluções representa 85,1% do tempo da segunda solução.

VII.4.4 – Conclusão

Pode-se observar, nos resultados numéricos apresentados anteriormente, que o tratamento da operação das contingências via otimização é mais preciso que através do uso de dados de sensibilidade provenientes da matriz Jacobiana do fluxo de potência. Este foi um resultado interessante, pois mostra que erros significativos podem ser obtidos com a aplicação de técnicas de sensibilidade a este problema (como exemplificado, de até **13%**). Por outro lado, o tempo de CPU pode inviabilizar aquela alternativa para sistemas com muitas barras, dado o método de otimização não linear empregado na solução dos subproblemas de

Nome da barra	Alocação MVar	Equipamento
BALTOESTATIC	18.04	sinc
ITIQUIRA 138	10.80	cap
MARAJOARA138	10.80	cap
CEILSUL 13.8	12.00	cap
STAMARIA 13.8	9.60	cap
BCENTRO 13.8	6.00	cap
BNORTE 13.8	5.75	cap
SE 03 13.8	7.19	cap
SE 04 13.8	9.60	cap
SE 07 13.8	4.68	cap
SE 08 13.8	4.80	cap
SE 10 13.8	2.40	cap
TAGT 34.5	12.00	cap
CEILNOR 13.8	18.00	cap
TAGT 13.8	12.00	cap
GUARA 13.8	4.80	cap
PAD 13.8	1.94	cap
PLAN 13.8	4.80	cap
ITAPACI 230	10.29	cap
GOIANÉSIA 69	1.80	cap
URUACU 69	1.80	cap

Total reativo alocado: 169.09 MVar

Custo total: k\$ 8180.16

Tempo de CPU: 10 min 3 seg

tabela VII.5 – Solução do subproblema de operação de contingência através de análise de fluxo de potência (sistema de 1832 barras)

Nome da barra	Alocação MVar	Equipamento
BALTOESTATIC	6.66	sinc
BSUL-138-TER	28.92	cap
B.ALTO 69	10.80	cap
ITIQUIRA 138	10.80	cap
MARAJOARA138	10.80	cap
CEILSUL 13.8	12.00	cap
STAMARIA 13.8	9.60	cap
BCENTRO 34.5	12.00	cap
SE 03 13.8	4.21	cap
SE 04 13.8	9.60	cap
SE 07 13.8	4.67	cap
SE 08 13.8	4.80	cap
SE 10 13.8	1.06	cap
CEILNOR 13.8	18.00	cap
GUARA 13.8	4.80	cap
PAD 13.8	2.20	cap
PLAN 13.8	4.80	cap
ITAPACI 230	1.09	cap
GOIANÉSIA 69	1.80	cap
URUACU 69	1.80	cap

Total reativo alocado: 160.42 MVar

Custo total: k\$ 7448.75

Tempo de CPU: 1 hora 7 min 39 seg

tabela VII.6 – Solução do subproblema de operação de contingência através de otimização (sistema de 1832 barras)

operação. Este problema pode ser solucionado caso algoritmos mais rápidos para a otimização dos subproblemas de operação sejam desenvolvidos.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

VIII.1 – Conclusões

Este trabalho descreveu uma metodologia de pesquisa operacional aplicada à expansão ótima de fontes de potência reativa, abordando com maior ênfase a aplicação desta metodologia no modo de planejamento preventivo.

As principais características do método são as seguintes:

- r aplicação de decomposição de Benders para particionar o problema original em dois níveis: problema de investimento e problema de operação;
- r solução do problema original a partir da solução alternada dos dois problemas;
- aplicação de técnicas de programação inteira para solução do problema de investimento;
- aplicação de algoritmo de fluxo de potência ótimo (programação não linear) na solução do problema de operação.
- r consideração da estrutura hierárquica do problema de operação;

- e consideração simultânea de várias configurações da rede elétrica;
- no modo de planejamento preventivo, construção de cortes de sensibilidade com base em dados da matriz Jacobiana do fluxo de potência para solução do problema de operação;
- e consideração da alternativa de solução do problema de operação via otimização para o modo de planejamento preventivo;

Conclui-se que o modo de planejamento corretivo é mais robusto que o modo de planejamento preventivo, isto é, o modo de planejamento preventivo pode não encontrar solução para problemas que foram resolvidos pelo modo de planejamento corretivo. Isto se deve ao fato do modo de planejamento corretivo ter maior flexibilidade de operação ao contrário do preventivo que exige rigidez na manutenção de um único ponto de operação (de caso base).

O tratamento dos subproblemas de operação de contingências via otimização é mais preciso que através do uso de dados de sensibilidade provenientes da matriz Jacobiana do fluxo de potência. Por outro lado, o tempo de CPU pode inviabilizar aquela alternativa para sistemas com muitas barras devido ao método de otimização não linear utilizado na solução destes problemas. Este problema pode ser solucionado caso algoritmos mais rápidos para a otimização dos subproblemas de operação sejam desenvolvidos.

Foram observados, muitas vezes, problemas na solução do problema de investimento, uma vez que este utiliza algoritmos combinatórios. Notou-se que com o aumento do número de variáveis, a implementação comercial utilizada, muitas vezes não encontrava solução em tempo computacional aceitável. Já com a

utilização do método de decomposição de Benders, problemas de convergência foram raramente verificados.

Pode-se dizer que a aplicação desta metodologia a problemas práticos tem proporcionado resultados satisfatórios, propiciando, com a sua utilização, economia de esforços humanos e computacionais. Isto pôde ser constatado pelos estudos de planejamento realizados pela Eletrobrás no decorrer de 1991.

VIII.2 – Desenvolvimentos futuros

VIII.2.1 – Subproblema de operação de contingência no modo de planejamento preventivo

Como mostrado no capítulo anterior, a comparação entre os dois modos de solução do subproblema de operação de contingência no modo de planejamento preventivo mostrou que a solução deste problema através da construção de cortes de sensibilidade baseados em dados da matriz Jacobiana pode apresentar erros significativos. Uma proposta de desenvolvimento futuro deste trabalho seria uma investigação sistemática das diferenças encontradas entre os dois modos de solução.

VIII.2.2 – Modo de planejamento preventivo estendido

No decorrer dos estudos feitos utilizando-se o programa, foi constatado que seria desejável ter uma nova opção de planejamento – modo de planejamento preventivo estendido. Nesta forma de planejamento o usuário especificaria a priori quais fontes de potência reativa e quais transformadores poderiam ser reajustados após a ocorrência da contingência. Essa abordagem é mais segura que a corretiva

(pois não prevê alteração em todos os controles após a ocorrência de contingências) e não tão onerosa quanto a preventiva, uma vez que permite que alguns controles sejam alterados assim que acontece a contingência.

VIII.2.3 – Implementação de um novo algoritmo de fluxo de potência ótimo aplicado à otimização de fontes de potência reativa

Novas metodologias para a solução de problemas de otimização não-linear de grande porte têm surgido nos Últimos anos. Este é o caso dos algoritmos de pontos interiores [28]. O método primal-dual em pontos interiores [29] aplicado em problemas de programação linear [30], programação quadrática [31] e não-linear convexa [32] tem mostrado resultados que incentivam a pesquisa nesta direção. Além disso, estudos devem ser feitos a fim de investigar a aplicação de algoritmos de pontos interiores (por exemplo o primal-dual) em conjunto com métodos de decomposição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MILLER, T.J.E., Reactive Power Control in Electric Systems, New York, John Willey & Sons
- [2] CIGRE WG 38-01, "Reactive Power Compensation Analyses and Planning Procedure", Chechoslovakia, 1987
- [3] RAMOS, D.S., ETRUSCO, W.M., ROBBA, E.J., KAGAN, N., Dimensionamento e Alocação da Compensação Reativa para Correção do Nível de Tensão – Metodologia e Experiência de Alocação, São Paulo, CESP – Companhia Energética de São Paulo
- [4] SANTOS JÚNIOR, A., ELERI, E., AZEVEDO, H.R., OLIVEIRA, R., RESENDE, J.W., MARTINS NETO, L., LEMES, M.N., SAMESINA, M.I., DECKMAN, S.M., Compensação de Reativos em Sistemas Elétricos de Potência, Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, vol. 2, 1988
- [5] RAMOS, D.S., ESMERALDO, J.P.V., FURTADO, R.C., FIGUIREDO, E.F., MOROZOWSKI FILHO, M., COSTA, P.A.P., ABDO, J.M.M., AIRES, J.C.O., CORREA, M.D.L., SANCHES, S.R., CARRIEL, L.P., ESUMI, N., DIAS, G.D., CUNHA, P.P.A., "Critérios e Procedimentos para o Dimensionamento da Compensação Reativa Capacitiva em Derivação", IX SNPTEE – grupo IV – GSP, 1987

- [6] FURTADO,R.C., ESMERALDO,J.P.V., FIGUEIREDO,E.F., RAMOS, D.S., MOROZOWSKI FILHO,M., PAZ,J.O.C., CUNHA,P.P.A., ESUMI,N., CORREA,M.D.L., AIRES,J.C.O., NASCIMENTO,O.F., SANCHES,S.R., CARRIEL,L.P., "Critérios e Procedimentos para Dimensionamento de Compensação Reativa Indutiva em Derivação", IX SNPTEE – grupo VII – GPL, 1987
- [7] DOPAZO,J.F., KLITIN,O.A., STAGG,G.W., WATSON,M., "An Optimization Technique for Real and Reactive Allocation", Proceedings of the IEEE, pp. 1877–1885, 1967
- [8] IBA,K., SUZUKI,H., SUZUKI,K., SUZUKI,K., "Practical Reactive Power Allocation/Operation Planning using advanced Linearizing Algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, n° 2, pp. 558–566, May 1988
- [9] GARCIA,A.V., Relatório Final do Convênio CEPTEL/UNICAMP sobre Planejamento de Reativos, UNICAMP, 1987
- [10] MANTOVANI,J.R.S., "Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica: Uma Solução via Programação Linear Sucessiva utilizando um Modelo Implicitamente Acoplado", Tese de Mestrado em Engenharia Elétrica, UNICAMP, 1987
- [11] AOKI,K., FAN,H., HISHIKORI,A., "Optimal VAR Planning by Approximation for Recursive Mixed–Integer Linear Programming", IEEE Transactions on Power Svstems, vol. 3, n° 4, pp. 1741–1747, Nov 1988

- [12] ERTEM S., TUDOR,J.R., "Optimal Shunt Capacitor Allocation by Nonlinear Programming", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-2, n° 4, pp. 1310-1315, Oct 1987
- [13] LEBOW,W.M., MEHRA,R.K., NADIRA,R., ROUHANI,R., USORO,P.B., BHAVARAJU,M.P., PAL,M.K., SOBIESKI,D.W., "Optimization of Reactive Volt Ampere (VAR) Sources in System Planning", EPRI Report EL-3729, vol. 1, Nov 1984
- [14] GRANVILLE,S., PEREIRA,M.V.F., DANTZIG,B.G., AVI,B., AVRIEL,M., MONTICELLI,A., PINTO,L.M.V.G., "An Integrated Methodology for VAR Sources Planning", Mathematical Decomposition Techniques for Power System Expansion Planning – EPRI Report EL 5299, vol.4, Feb 1988
- [15] HONG,Y., SUN,D.I., LIN,S., LIN,C., "Multi-Year Multi-Case Optimal VAR Planning", IEEE Transactions on Power Systems, vol.5, n° 4, Nov 1990
- [16] ELGERD,O.I., Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica, São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1976
- [17] CLOSE,C.M., Circuitos Lineares, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S. A.,1975
- [18] MILLER,R.H., Operação de Sistemas de Potência, Mc Graw-Hill
- [19] MONTICELLI,A.J., Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, São Paulo, Editora Edgard Blucher, 1983

- [20] BERER, R., "Compensação Reativa em Sistemas de Transmissão", Moderna Eletricidade, no.150, pp. 8–18, 1986
- [21] PETERSSON, T., "Reactive Power Compensation", ASEA – Power Transmission and Distribution Division, pp. 14–22
- [22] PINHEIRO, R.F., Equipamentos Estáticos para Compensação de Reativos e Desequilíbrios em Sistemas Elétricos, tese de mestrado Universidade Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1980
- [23] GEOFFRION, A.M., "Generalized Benders Decomposition", Journal of Optimization Theory and Applications, vol.10, n° 4, pp. 237–260, 1972
- [24] SALKIN, H.M., Integer Programming, USA, Addison Wesley Publishing Company, pp. 165–209, 1975
- [25] XMP SOFTWARE, User's Manual for: ZOOM, Tucson, XMP Software, Inc., 1989
- [26] GRANVILLE, S., LIMA, M.C.A., LIMA, L.C., PRADO, S., "PLANVAR – An Optimization Software for VAR Sources Planning"
- [27] MURTAGH, B.A., SAUNDERS, M.A., MINOS 5.0 User's Guide, Stanford University, Technical Report SOL 83–20, 1983
- [28] KARMAKAR, N., "A New Polynomial Time Algorithm for Linear Programming", Combinatorica, 4, 1984

- [29] GONZAGA,C., "Path Following Methods for Linear Programming", to be published in SIAM Review
- [30] LUSTIG,I.J., MARSTEN,R.E., SHANNO,D.F., "Computational Experience with a Primal–Dual Interior Point Method for Linear Programrning", Linear Algebra and its Applications, 152, 1991
- [31] CARPENTER,J.J., LUSTIG,I.J., MULVEY,J.M., SHANNO,D.F., "Higher Order Predictor–Corrector Interior Point Methods with Application to Quadratic Programming", RUTCOR Research Report, New Jersey, 1990
- [32] CARPENTER,J.J., LUSTIG,I.J., MULVEY,J.M., SHANNO,D.F., "A Primal–Dual Interior Point Method for Convex Nonlinear Programs", RUTCOR Research Report, New Jersey, 1990