

Ajuste Ótimo e Coordenado dos Parâmetros do Compensador Estático de Reativos

LEONARDO WILLER DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Edimar José de Oliveira, D.Sc - Orientador - UFJF

Prof. Sandoval Carneiro Junior, Ph.D. - UFRJ

Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D. - UFJF

Prof. Paulo Augusto Nepomuceno Garcia, D.Sc - UFJF

JUIZ DE FORA, MG – BRASIL.

AGOSTO DE 2005

OLIVEIRA, LEONARDO WILLER

Ajuste Ótimo e Coordenado dos Parâmetros do Compensador
Estático de Reativos [Juiz de Fora] 2005

X, 127 p. 29,7 cm. (UFJF, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2005)

Tese – Universidade Federal de Juiz de Fora

1. Compensador Estático de Reativos
2. Decomposição Matemática de Benders
3. Método de Pontos Interiores

I. UFJF II. Título (Série)

A Deus, aos meus pais Affonso e Fátima,
e a minha irmã Andréia,
com muito amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, criador de todas as coisas, pela minha vida, inteligência, saúde, consolo, força e esperança em todos os momentos, fatores indispensáveis para o sucesso deste trabalho.

Ao Professor Edimar José de Oliveira pela excelência na orientação e dedicação dispensadas para a realização deste trabalho. Além dos ensinamentos, contribuições e segurança transmitida, fatores fundamentais não só para a realização desta dissertação, mas também para minha formação profissional.

Ao Professor José Luiz Rezende Pereira pelos conselhos, incentivos e ensinamentos passados durante o curso de pós-graduação.

Ao LABSPOT (Laboratório de Sistemas de Potência da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora), pela disponibilidade de utilização de recursos computacionais.

A todos os professores, amigos e colegas do curso de pós-graduação que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação.

Aos meus pais Henrique Affonso de Oliveira e Maria de Fátima Ferreira de Oliveira e à minha irmã Andréia Cristina de Oliveira, pelo incentivo e apoio dado durante todo o curso de pós-graduação.

Resumo da Dissertação apresentada à UFJF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AJUSTE ÓTIMO E COORDENADO DOS PARÂMETROS DO COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS

Leonardo Willer de Oliveira

Agosto / 2005

Orientador: Edimar José de Oliveira, D.Sc.

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta uma nova proposta para o ajuste ótimo e coordenado da tensão de referência do compensador estático de reativos (CER), bem como uma metodologia para especificação do mesmo em regime permanente e de contingências. O algoritmo proposto utiliza a metodologia primal-dual de pontos interiores (MPI) associada à técnica de decomposição matemática de Benders.

O objetivo do ajuste ótimo da tensão de referência do CER é reduzir investimentos em fontes adicionais de suporte potência reativa. A determinação dos limites do CER permite a especificação de um equipamento de mínimo custo.

A utilização do MPI para o ajuste do CER foi motivada pelo seu bom desempenho em sistemas de grande porte bem como pela possibilidade de se modelar as não linearidades pertinentes aos sistemas elétricos de potência. A técnica de decomposição matemática de Benders é usada para reduzir a dimensão do sistema quando a análise de contingências é considerada. A metodologia proposta foi implementada em um código de produção do CEPEL denominado FLUPOT, permitindo testar a técnica de ajuste proposta em sistemas de dimensões reais, tais como o sistema elétrico de potência brasileiro interligado.

Abstract of Dissertation presented to UFJF as a partial fulfillment of the requirements for a Master of Science degree (M.Sc.)

OPTIMAL AND COORDINATED ADJUSTMENT OF PARAMETERS OF THE
STATIC VAR COMPENSATOR

Leonardo Willer de Oliveira

August / 2005

Advisor: Prof. Edimar José de Oliveira, D.Sc

Department: Electrical Engineering

This work presents a new proposal for optimal and coordinated adjustment of Static Var Compensator (SVC) reference voltage as well as a technique for the SVC specification in steady state and under contingency evaluation. The proposed algorithm uses the primal-dual interior point technique associated to the mathematical Benders decomposition approach.

The objective of optimal adjustment of the SVC reference voltage is to reduce investments in additional sources of reactive power support. The SVC limits evaluation yields the specification of an equipment of minimum cost.

The motivation for the use of the primal-dual interior point methodology to the SVC adjustment stems from its good performance in large scale power systems as well as the possibility of modeling the electrical power systems nonlinearities. The mathematical Benders decomposition technique is used to reduce system size dimension when contingency analysis is considered. The proposed methodology was implemented in a production code from CEPEL called FLUPOT, allowing to test the proposed technique for systems with real size such as the interconnected Brazilian electrical power system.

SUMÁRIO

Capítulo I.....	11
I.1 Considerações Iniciais.....	11
I.2 Revisão Bibliográfica.....	13
I.3 Motivação da Dissertação	17
I.4 Objetivo da Dissertação	17
I.5 Publicações Decorrentes da Dissertação	17
I.6 Estrutura da Dissertação	18
Capítulo II.....	19
II.1 Introdução.....	19
II.2 Configurações de CER.....	19
II.3 Sistema de Controle de um CER.....	21
II.4 Modelos de CER para Fluxo de Potência	22
II.4.1 Representação do Transformador de Acoplamento	29
II.4.2 Modelo Adotado Nesta Dissertação	30
II.5 Conclusões	34
Capítulo III	35
III.1 Introdução	35
III.2 Os Parâmetros de Ajuste do CER.....	36
III.3 Representação do CER no Problema de FPO.....	38
III.3.1 Restrições de Balanço de Potência.....	39
III.3.2 Restrições da Modelagem do CER	41
III.3.3 Formulação do Problema	41
III.4 Ajuste Ótimo do CER com Análise de Contingência	43
III.4.1 Técnica de Solução	45
III.4.2 Subproblema de Investimento.....	46
III.4.3 Subproblema de Operação	49
III.4.4 Montagem do Corte de Benders	52
III.4.5 Algoritmo de Solução.....	57
III.5 Exemplo Numérico	59
III.6 Conclusões	66
Capítulo IV	67
IV.1 Introdução	67
IV.2 Sistema IEEE-14.....	67
IV.2.1 Análise 1:.....	68
IV.2.2 Análise 2:.....	74
IV.3 Sistema IEEE-118.....	77

IV.3.1 Análise 1:.....	78
IV.3.2 Análise 2:.....	82
IV.4 Sistema Interligado Brasileiro	85
IV.5 Conclusões.....	92
Capítulo V.....	94
V.1 Conclusões	94
V.2 Propostas de desenvolvimentos futuros.....	95
Apêndice A	97
A.1 Introdução.....	97
A.2 Método de Pontos Interiores	97
A.3 Formulação do Problema de FPO	98
A.4 Resolução do Problema.....	101
A.5 Atualização das Variáveis.....	104
A.6 Atualização do Parâmetro Barreira e do Gap	105
A.7 Algoritmo de Solução do MPI	106
Apêndice B.....	108
B.1 Introdução	108
B.2 Formulação Matemática	108
Apêndice C.....	112
C.1 Introdução	112
C.2 Alteração do Custo do CER.....	112
C.3 Alteração do Custo de Alocação.....	116
Apêndice D.....	118
D.1 Introdução	118
D.2 Sistema IEEE-14	119
D.3 Sistema IEEE-118.....	121
D.4 Sistema Interligado Brasileiro	121

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1 - Diagrama esquemático do RCT – CF.	20
Figura II.2 - Diagrama esquemático do RCT – CCT.	20
Figura II.3 - Diagrama de blocos das principais funções do controle de um CER.	21
Figura II.4 - Representação do CER na região de controle : barra PV.....	22
Figura II.5 - Característica tensão versus corrente : barra PV.....	23
Figura II.6 - Representação do CER fora da região de controle : Barra PQ.	24
Figura II.7 - Característica tensão versus corrente.....	24
Figura II.8 - Modelo do CER na região de controle.....	25
Figura II.9 - Modelo de injeção de potência.	26
Figura II.10 - Susceptância em derivação continuamente variável.....	29
Figura II.11 - Susceptância em derivação fixa.	29
Figura II.12 - Representação do Transformador de Acoplamento (TA).	30
Figura II.13 - Modelo Adotado.....	31
Figura II.14 - Característica tensão versus potência reativa.....	32
Figura III.1 - Deslocamento vertical da característica do CER.	36
Figura III.2 - Esquema de solução por decomposição de Benders.....	45
Figura III.3 - Fluxograma do algoritmo proposto.	58
Figura III.4 - Topologia base do sistema de 4 barras.	59
Figura IV.1 - Sistema IEEE-14.....	68
Figura IV.2 - Tensão controlada sem o ajuste de V_{k0} : IEEE-14.....	72
Figura IV.3 - Tensão controlada com o ajuste de V_{k0} : IEEE-14.....	72
Figura IV.4 - Compensação desenvolvida sem o ajuste de V_{k0} : IEEE-14.....	73
Figura IV.5 - Compensação desenvolvida com o ajuste de V_{k0} : IEEE-14.....	73
Figura IV.6 - Tensão controlada sem o ajuste de V_{k0} : IEEE-118.	80
Figura IV.7 - Tensão controlada com o ajuste de V_{k0} : IEEE-118.....	80
Figura IV.8 - Compensação desenvolvida sem o ajuste de V_{k0} : IEEE-118.	81
Figura IV.9 - Compensação desenvolvida com o ajuste de V_{k0} : IEEE-118.....	81
Figura IV.10 – Sistema Interligado Brasileiro e localidades dos CERs.....	87
Figura A.1 - Simplex X MPI.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Dados de circuitos do sistema teste.....	60
Tabela III.2 – Resultados do Subproblema de Investimento : Iteração 1.....	61
Tabela III.3 – Resultados do Subproblema de Operação : Iteração 1.....	62
Tabela III.4 – Resultados do Subproblema de Investimento : Iteração 4.....	64
Tabela III.5 – Resultados do Subproblema de Investimento sem ajuste do CER.....	65
Tabela IV.1 – Lista de contingências IEEE-14.....	68
Tabela IV.2 – Análise 1 IEEE-14.....	69
Tabela IV.3 – Análise 1 IEEE-14 : sem o ajuste de V_{k0}	70
Tabela IV.4 – Resultados de geração IEEE-14.....	70
Tabela IV.5 – Análise 2 IEEE-14 : carga pesada.....	74
Tabela IV.6 – Análise 2 IEEE-14 : carga leve.....	75
Tabela IV.7 – Faixa de operação CER IEEE-14.....	76
Tabela IV.8 – Análise 2 IEEE-14 : carga pesada sem o ajuste de V_{k0}	76
Tabela IV.9 – Lista de contingências IEEE-118.....	77
Tabela IV.10 – Análise 1 IEEE-118.....	78
Tabela IV.11 – Análise 1 IEEE-118 : sem o ajuste de V_{k0}	79
Tabela IV.12 – Análise 2 IEEE-118 : carga pesada.....	82
Tabela IV.13 – Análise 2 IEEE-118 : carga leve.....	83
Tabela IV.14 – Faixa de Operação dos CERs IEEE-1118.....	83
Tabela IV.15 – Análise 2 IEEE-118 : carga pesada sem o ajuste de V_{k0}	84
Tabela IV.16 – Lista de contingências Sistema Interligado Brasileiro.....	87
Tabela IV.17 – Resultados do sistema interligado brasileiro : condição-1.....	89
Tabela IV.18 – Resultados do sistema interligado brasileiro : condição-2.....	91
Tabela D.1 – Dados de geração e carga IEEE-14.....	119
Tabela D.2 – Dados de circuitos IEEE-14.....	120
Tabela D.3 – Dados do compensador estático de reativos IEEE-14.....	120
Tabela D.4 – Dados dos compensadores estáticos de reativos IEEE-118.....	121
Tabela D.5 – Dados dos compensadores estáticos de reativos Brasil.....	121

Capítulo I

Introdução

I.1 Considerações Iniciais

O aumento da demanda de energia elétrica, acompanhado pelo crescente número de restrições econômicas e/ou ambientais para construção de novos centros de geração e linhas de transmissão [1], tem forçado uma operação dos sistemas de transmissão com altos níveis de carregamento tornando-os mais vulneráveis e aumentando significativamente os riscos de blecautes na rede [2]. Adicionalmente, com a desregulamentação do setor de energia elétrica as ampliações dos sistemas de geração e transmissão têm sido analisadas com maior rigor [3]. Como conseqüência, torna-se cada vez mais necessário um aumento da capacidade de controle destes sistemas.

Esta necessidade resulta em uma mudança nos conceitos e práticas tradicionais relativas aos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) e tecnologias emergentes têm sido avaliadas com a finalidade de proporcionar um fornecimento de energia elétrica com qualidade e confiabilidade. Uma alternativa atrativa é o desenvolvimento dos dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission System*) [4] [5], uma família de produtos de eletrônica de potência que melhoram a estabilidade dos sistemas, aumentam a confiabilidade, reduzem o custo operacional e diminuem o custo de investimento. Estes equipamentos podem ter várias funções no sistema, tanto em regime permanente [6] como em regime dinâmico [7], devido à sua alta velocidade de controle. Diferentes tipos de dispositivos FACTS oferecem vantagens para a solução de diferentes tipos de problemas [8]. A referência [9] mostra o programa dirigido pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI) para desenvolvimento da tecnologia FACTS.

O Compensador Estático de Reativos (CER) [10][11] é um exemplo destes dispositivos e consiste em um importante componente para o controle rápido do módulo da tensão nodal durante as oscilações do sistema. Adicionalmente, este equipamento tem aplicação em regime permanente [12] [13] como suporte de potência reativa ao sistema.

O CER foi usado inicialmente na indústria para compensação de flutuações de tensão causadas por cargas como fornos a arco, passando a ser usado em sistemas de potência graças a sua capacidade de resolver problemas de rede sempre que se necessite de um dispositivo de ação rápida para controle da potência reativa [14], como por exemplo:

- Controle contínuo de tensão;
- Melhoria da estabilidade transitória e de regime permanente;
- Redução das sobretensões temporárias (de manobra);
- Aumento da capacidade de transferência de potência ativa em sistemas de transmissão;
- Minimização de perdas em sistemas de transmissão;
- Amortecimento de oscilações subsíncronas;
- Redução do desequilíbrio de tensão e de corrente;
- Redução das correntes de curto-circuito;
- Controle de *Flicker*, etc.

Tendo em vista a importância do CER para o planejamento e a operação dos sistemas, existem vários trabalhos publicados sobre os modelos e as suas aplicações no sistema elétrico de potência.

I.2 Revisão Bibliográfica

O Reator Controlado a Tiristor (RCT) foi um dos primeiros compensadores estáticos a surgir no mercado e consiste em um elemento de rede primariamente explorado para controle de tensão em regime dinâmico e permanente [15]. A primeira aplicação do RCT para controle de tensão foi em 1977, construído pela *General Electric Corporation* (GEC). Em 1978, um RCT de 40MVAR começou a operar em *Minnesota Power and Light System*, este desenvolvido pelo EPRI e construído pela *Westinghouse Electric Co.* [2].

Em 1990, avaliou-se o desempenho dinâmico de 9 compensadores estáticos instalados em pontos estratégicos do sistema de transmissão Hydro-Quebec, Canadá, através do ajuste dos reguladores de tensão destes equipamentos, com o objetivo de melhorar a estabilidade do sistema visando a ocorrência de contingências críticas¹ [16]. Neste caso, o parâmetro de ajuste foi o tempo de resposta dos reguladores, a fim de se obter a máxima taxa de resposta permissível para que não ocorressem problemas de estabilidade na malha de controle e de ressonâncias com a impedância do sistema. Em 1992, um estudo descreveu a importância da aplicação do CER no sistema de transmissão ESKOM, no sul da África [17]. Naquele ano, este sistema tinha 12 compensadores projetados e instalados durante o final dos anos 70 até meados dos anos 80. O objetivo da aplicação destes compensadores era a melhoria do desempenho dinâmico do sistema, através do controle de tensão e da redução do desequilíbrio de corrente e de tensão na rede. Este estudo investigou o uso do CER para reduzir os efeitos das faltas ocorridas em períodos nos quais a usina hidroelétrica que alimentava este sistema encontrava-se na capacidade mínima ou máxima de geração. Como resultado verificou-se um aumento da qualidade do fornecimento de energia. Um ano depois, foi abordada a utilização do CER no sistema NGC (*The National Grid Company of the UK*), Inglaterra, como suporte de potência reativa em resposta à ocorrência de contingências neste sistema [18].

Nos últimos anos, novas tendências têm direcionado para o desenvolvimento de compensadores estáticos de reativos transportáveis, com a finalidade de oferecer a capacidade de rápida re-alocação em resposta às transformações ocorridas nas redes elétricas [19].

¹ Retirada de linhas de transmissão.

Em 2002, foi relatada a instalação de 12 compensadores re-alocáveis na Inglaterra e no País de Gales, como parte dos investimentos do programa de planejamento da operação do sistema, com o objetivo de manter os padrões de segurança e qualidade em resposta às alterações sofridas pelo mesmo [20].

A referência [21] apresentou uma descrição detalhada do CER, abordando diversos aspectos como configurações, sistema de controle, condições de operação e aplicações em sistemas de transmissão. Nesta descrição destacam-se os parâmetros do CER cuja determinação é necessária para a aplicação deste dispositivo em sistemas de potência, ou seja: (i) A tensão de referência do equipamento e (ii) Os limites de compensação capacitiva e indutiva.

Em um outro tipo de abordagem, existem vários trabalhos que analisam a aplicação do CER em regime permanente como suporte de potência reativa. Muitos destes trabalhos utilizam algoritmos de otimização combinatorial, nos quais o CER é modelado como uma fonte variável de potência reativa. Para determinar a localização e as dimensões ótimas do CER, em [22] utilizou-se o Algoritmo Genético (*Genetic Algorithm - GA*), baseado na genética natural e no processo evolutivo [23]. Neste trabalho, analisou-se a localização de compensadores nos pontos médios de linhas de transmissão para manter as tensões nestes pontos ajustadas em 1,0 pu. O objetivo era otimizar a utilização das linhas de transmissão do sistema. Como resultado, o ajuste ótimo do CER permitiu elevar os níveis de carregamento do sistema mantendo as tensões das barras dentro dos limites operacionais. Porém, uma das desvantagens da utilização do GA é a possibilidade de convergência prematura para uma solução sub ótima. A eficiência do algoritmo depende da escolha da população inicial de indivíduos ou soluções viáveis. Esta escolha envolve a determinação de diversos parâmetros tais como o número de compensadores, o número de valores discretos de compensação permitidos e o número de indivíduos, o que requer alguma experiência para a sua utilização.

Nas referências [24] e [25], foi descrita a implementação de um algoritmo híbrido de otimização combinatorial que aliava o Algoritmo de Busca Tabu (*Tabu Search - TS*) [26] e o “*Simulated Annealing*” (SA) [27]. Estes dois processos estão entre os principais algoritmos de otimização combinatorial utilizados e o algoritmo híbrido formado foi denominado TS/SA. O objetivo destes trabalhos era a determinação da localização e das dimensões ótimas do CER associada à minimização dos custos de geração térmica no

sistema. Uma das desvantagens da utilização deste algoritmo é a existência de parâmetros que são difíceis de se determinar² [22]. Além disso, nos algoritmos de otimização combinatorial abordados, não se considerou os custos associados ao investimento em compensador estático de reativos.

Outros trabalhos que não utilizam otimização combinatorial também foram desenvolvidos com o objetivo de analisar a aplicação do CER em regime permanente. Para determinar a localização e as dimensões ótimas do CER, em [28] foram exploradas técnicas de otimização em um equivalente do sistema elétrico de potência no sul da Itália. Primeiramente, eram determinadas as barras candidatas à instalação de CER através da análise modal da matriz jacobiana próximo ao ponto crítico de operação do sistema. Em estudos de regime permanente, esta análise permite indicar as barras candidatas à compensação de potência reativa [29]. Posteriormente era solucionado um problema de otimização, associado à minimização do custo de investimento em compensação estática de reativos, para manter as tensões das barras dentro dos limites operacionais em regime de contingência³. Ou seja, esse trabalho considerava o custo de investimento em CER na função objetivo do problema de otimização proposto.

Na referência [30] a análise modal foi novamente utilizada para indicar as barras candidatas à instalação do CER visando uma operação do sistema dentro dos limites permitidos de tensão em regime de contingência. Toda barra candidata à instalação deste dispositivo era considerada como uma barra PQ, na qual o valor calculado da potência reativa injetada indicaria as dimensões do equipamento. Uma vantagem desta metodologia em relação às anteriores é a utilização de um modelo mais apurado, que considerava a tensão de referência, a susceptância e o ângulo de disparo dos tiristores que compõem o CER. Porém, essa metodologia não considerava o custo de investimento em compensador estático de reativos.

A referência [31] propôs a utilização de índices baseados nas margens de carregamento e nos perfis de tensão do sistema para determinar a localização ótima do CER. As barras candidatas à compensação eram determinadas através da análise modal,

² Um destes parâmetros é denominado “temperatura” e controla a probabilidade de aceitação de soluções ruins. Esta probabilidade vai sendo reduzida durante a execução do algoritmo.

³ Retirada de linhas de transmissão.

enquanto que a seleção dentre estas barras candidatas era decidida por índices. Estes índices eram: (i) Índice 1 - Baseado na diferença entre as margens de carregamento⁴ pré-contingência para o sistema com e sem o CER; (ii) Índice 2 - Baseado na diferença entre as margens de carregamento pós-contingência para o sistema com e sem o CER e (iii) Índice 3: Baseado nos perfis de tensão das barras candidatas com o compensador no sistema. As barras selecionadas seriam as que apresentassem os maiores índices, os quais também consideravam as dimensões dos equipamentos. Entretanto, este trabalho tratou exclusivamente da localização do CER, não abordando o ajuste deste dispositivo.

As referências [32] e [33] avaliaram a contribuição dos compensadores estáticos de reativos para a minimização dos cortes de carga em sistemas sobrecarregados ou em regime de contingência. Nestes trabalhos, a geração de potência reativa fornecida pelo CER foi incluída no conjunto de variáveis de controle do Fluxo de Potência Ótimo (FPO) com os limites especificados conforme os limites de compensação deste dispositivo.

Em [34] foi utilizado o critério de custos marginais para determinar a localização ótima do CER. Os custos marginais correspondem aos multiplicadores de Lagrange obtidos da solução do problema de FPO e fornecem um sinal monetário relevante para o direcionamento de investimentos no sistema. Desse modo, os multiplicadores referentes às restrições de balanço de potência reativa podem indicar a localização do CER. Nesse trabalho, para cada barra do sistema era obtido um custo marginal e as barras com os maiores custos seriam selecionadas para a instalação do compensador estático. Primeiramente, executava-se o FPO associado à minimização dos custos de geração térmica no sistema para obtenção dos multiplicadores de Lagrange e da localização do CER. Em seguida, o FPO era novamente executado a fim de ajustar as dimensões deste dispositivo, através do valor obtido de geração de potência reativa fornecida pelo mesmo. Porém, os custos de investimento em CER não foram considerados na função objetivo do FPO.

⁴ Obtidas pelo fluxo de potência continuado.

I.3 Motivação da Dissertação

O número de publicações para análise do CER em regime permanente mostra a importância deste equipamento nos sistemas elétricos de potência. Entretanto, em todos estes trabalhos a tensão de referência do CER foi considerada como uma constante, ou seja, não foi explorado na literatura o potencial de regulação ótima deste parâmetro. Em consequência, não existe uma metodologia para a especificação deste equipamento que considera o ajuste ótimo da sua tensão de referência. Estes fatos tornam o tema promissor para pesquisa.

I.4 Objetivo da Dissertação

Esta dissertação tem como objetivo a elaboração de uma nova metodologia para determinar o ajuste ótimo e coordenado da tensão de referência do CER, considerando-se vários compensadores instalados no SEP, e para a especificação deste equipamento com o mínimo custo. Com esta nova metodologia pretende-se minimizar o investimento em fontes de potência reativa no sistema e evitar interrupções no fornecimento de energia elétrica em regime de contingência.

A modelagem de ajuste proposta considera contingências no sistema através da técnica de decomposição hierárquica de dois estágios empregada em [35]. Para tanto, será utilizada a Metodologia Primal-Dual de Pontos Interiores (MPI) [36] associada à técnica de decomposição matemática de Benders [37].

I.5 Publicações Decorrentes da Dissertação

- “Proposta de Ajuste da Tensão de Referência do Compensador Estático de Reativos”, Artigo aprovado no VI Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CLAGTEE), Mar Del Plata, Novembro de 2005.

I.6 Estrutura da Dissertação

Além desse capítulo esta dissertação contém mais quatro capítulos e quatro apêndices. O capítulo II descreve o CER, abordando aspectos tais como suas aplicações, configurações e sistema de controle, além de uma revisão dos modelos utilizados para sua representação em problemas de Fluxo de Potência Convencional (FPC) e de FPO.

O capítulo III apresenta a formulação do problema de FPO para planejamento de potência reativa associado ao ajuste dos parâmetros do CER. Portanto, a metodologia proposta para o ajuste destes parâmetros é apresentada nesse capítulo. Um exemplo numérico é mostrado para descrever os passos da metodologia proposta e os benefícios de sua aplicação.

No capítulo IV são apresentados e discutidos os resultados obtidos mediante a aplicação da metodologia proposta. Para tanto, são utilizados dois sistemas testes do IEEE e o sistema elétrico de potência brasileiro com 2860 barras. Neste caso, é realizado o ajuste coordenado de 12 compensadores estáticos.

No capítulo V são apresentadas as principais conclusões do trabalho e sugestões para desenvolvimentos futuros.

O Apêndice A apresenta os principais aspectos da metodologia primal-dual de pontos interiores.

O Apêndice B apresenta os conceitos básicos e a formulação da decomposição matemática de Benders.

O Apêndice C apresenta a composição dos custos de investimento em potência reativa no SEP para aplicação da metodologia proposta.

O Apêndice D mostra os dados complementares dos sistemas elétricos utilizados nesta dissertação.

Capítulo II

O Compensador Estático de Reativos - CER

II.1 Introdução

O CER, também conhecido como SVC (*Static Var Compensator*), é um equipamento composto por reatores e capacitores ligados em derivação, que juntamente com transformadores e dispositivos de chaveamento e controle formam um sistema de compensação reativa, podendo ser controlado dentro de um limite específico. O termo “estático” é usado para indicar que diferentemente dos compensadores síncronos o CER não possui nenhum componente principal girante ou rotativo.

II.2 Configurações de CER

O CER é composto por um reator controlado a tiristores (RCT) conectado em paralelo com um banco de capacitores, que pode ser fixo (CF – Capacitor Fixo) ou chaveado (CCT – Capacitor Chaveado a Tiristor) [38], conforme mostrado nas Figura II.1 e Figura II.2, respectivamente:

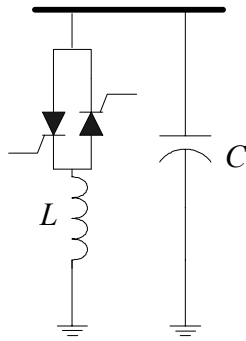


Figura II.1 - Diagrama esquemático do RCT – CF.

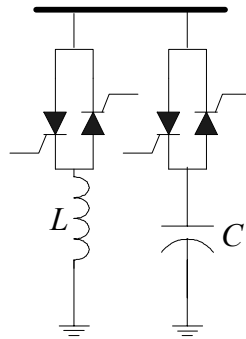


Figura II.2 - Diagrama esquemático do RCT – CCT.

Os tiristores conduzem alternadamente a cada semi-ciclo da tensão da barra onde está ligado o CER, de acordo com o ângulo de disparo α (medido a partir da passagem desta tensão por zero). A condução total é obtida com um ângulo de disparo $\alpha = 90^\circ$ (neste caso a forma de onda da corrente, em termos ideais, é a mesma que a obtida se os tiristores fossem curto-circuitados). A condução parcial é obtida com ângulos α entre 90° e 180° .

Através do controle do ângulo α uma reatância indutiva equivalente continuamente variável é sintetizada nos terminais do RCT [39], sendo dada pela seguinte expressão:

$$X_{RCT}(\alpha) = \frac{\pi\omega L}{2\pi - 2\alpha + \text{sen}(2\alpha)} \quad (\text{II.1})$$

Conectando o RCT em paralelo com o capacitor em qualquer uma das configurações anteriores, pode-se obter uma reatância equivalente sintetizada nos terminais do CER e controlada pelo ângulo α . Os limites desta reatância determinam a região de controle do compensador, sendo definidos pela susceptância máxima do indutor e pela susceptância total devido aos bancos de capacitores em serviço e à capacitância de filtragem.

II.3 Sistema de Controle de um CER

A função básica do sistema de controle de um CER é controlar a tensão do sistema. Isto é conseguido através da regulação da absorção ou geração de energia reativa pelo compensador. Uma característica interessante do CER é a sua flexibilidade sendo o seu controle capaz de atender a diferentes requisitos da rede elétrica a que será conectado.

O sistema de controle de um CER em nada difere de um sistema de controle convencional, constituído basicamente de: planta (ou processo), regulador, medição e atuador. A planta é o próprio compensador e o atuador nada mais é do que o sistema de disparo.

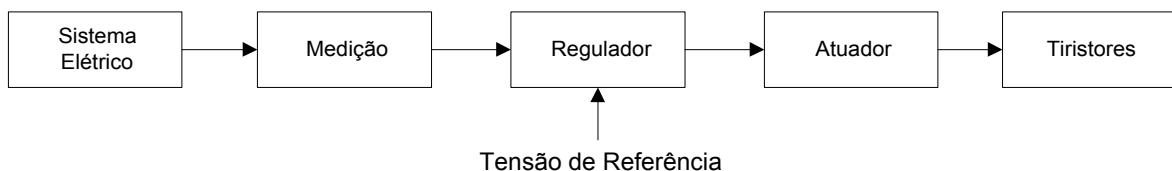


Figura II.3 - Diagrama de blocos das principais funções do controle de um CER.

Várias grandezas do sistema elétrico podem ser medidas a fim de se obter sinais que serão tratados de modo a fornecer as variáveis de entrada para a malha de regulação. No entanto, é mais usual a medição da tensão. Em sistemas de transmissão, utiliza-se o controle trifásico, no qual as tensões das três fases do sistema são processadas e o sinal de entrada do regulador corresponde a uma média destas tensões.

No regulador, a tensão do sistema é comparada com uma tensão de referência previamente escolhida e um sinal de erro é gerado a fim de se obter uma saída proporcional

ao ângulo de disparo.

II.4 Modelos de CER para Fluxo de Potência

Para avaliar o desempenho do CER em regime permanente, geralmente são usadas ferramentas computacionais, tais como o fluxo de potência convencional e o fluxo de potência ótimo. Esta avaliação depende da precisão do modelo adotado para este dispositivo. Neste sentido, muitos desenvolvimentos foram realizados para simular o comportamento do CER em regime permanente [40][41].

Os modelos de CER recomendados pelo CIGRÉ [42] e pelo IEEE [43] para fluxo de potência são muito utilizados. Em linhas gerais, a barra de tensão controlada pode ser representada como uma barra PV [44], com uma susceptância em derivação variável b_{CER} . Esta representação, ilustrada na Figura II.4, é válida para o CER operando na região de controle.

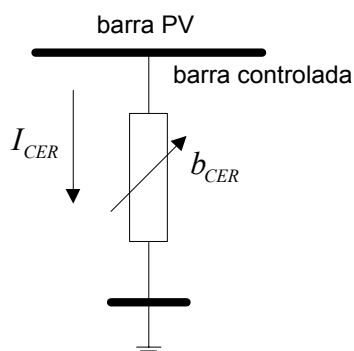


Figura II.4 - Representação do CER na região de controle : barra PV.

Sendo a barra controlada do tipo PV, sua tensão é constante. Neste caso, a curva característica de regime permanente que estabelece a relação entre a tensão controlada e a corrente no CER é mostrada na Figura II.5:

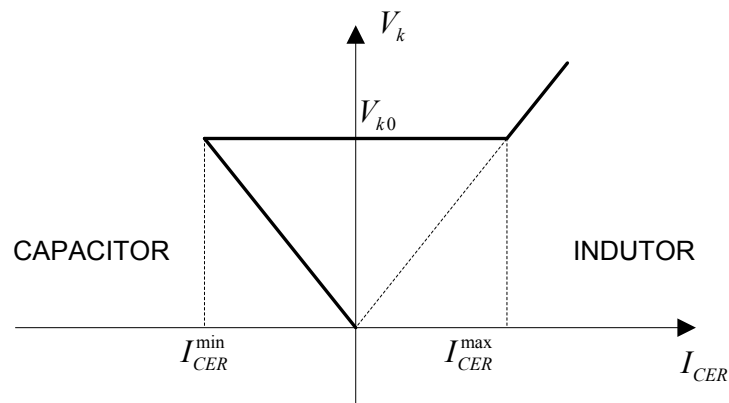


Figura II.5 - Característica tensão versus corrente : barra PV.

Onde:

V_{k0} Representa a tensão de referência do CER;

$I_{CER}^{min}, I_{CER}^{max}$ Representam os valores mínimo e máximo de corrente no CER, respectivamente.

Observa-se da Figura II.5 que de acordo com esta representação, o CER oferece uma resposta instantânea às variações das condições operacionais do sistema, a fim de manter constante a tensão da barra controlada. Observa-se ainda que o coeficiente de inclinação da faixa linear desta curva característica é igual a zero.

Se a compensação de potência reativa atinge um de seus limites, a barra controlada é convertida do tipo PV para o tipo PQ e a susceptância b_{CER} se torna fixa, conforme Figura II.6:

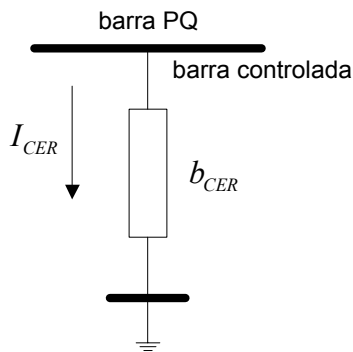


Figura II.6 - Representação do CER fora da região de controle : Barra PQ.

A partir deste ponto, a tensão da barra controlada passa a ser monitorada e caso retorne à região de controle, esta barra volta a ser do tipo PV e a susceptância b_{CER} volta a ser variável.

Para manter constante a tensão na região de controle, a susceptância b_{CER} atinge com facilidade um de seus limites. Na prática, para reduzir a excursão desta susceptância, é permitido à tensão da barra controlada variar dentro de uma faixa específica, como mostra a Figura II.7:

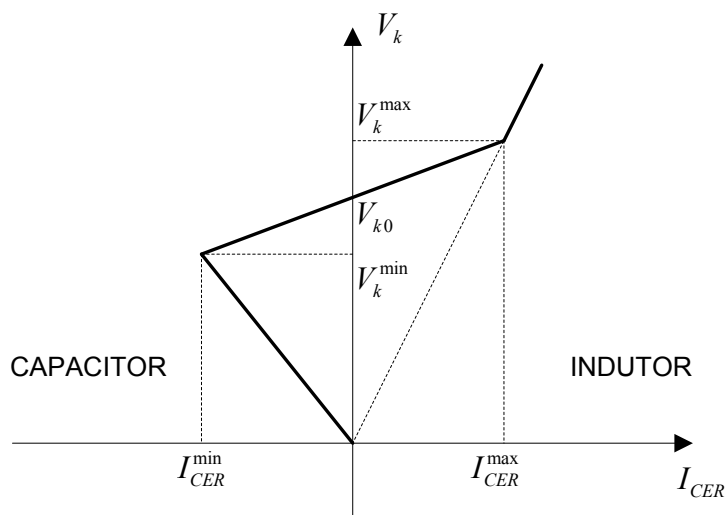


Figura II.7 - Característica tensão versus corrente.

Onde:

V_k^{\min}, V_k^{\max} Representam os valores mínimo e máximo permitidos de tensão na barra controlada, respectivamente.

Um valor típico para a extensão da faixa de controle de tensão é dado em torno de 5% da tensão de referência, V_{k0} , ou seja, $V_k^{\min} = 0,95 \cdot V_{k0}$ e $V_k^{\max} = 1,05 \cdot V_{k0}$ [45][46].

Deste modo, a representação da barra controlada como uma barra PV é aceitável desde que o CER esteja operando dentro dos limites, mas pode conduzir a erros caso o CER esteja operando próximo aos mesmos [47] ou fora da região de controle [48].

Para contornar este problema, CIGRÉ e IEEE propuseram um modelo que utiliza uma barra PV auxiliar conectada à barra controlada através de uma reatância fictícia [49]. A Figura II.8 ilustra este modelo para o CER operando na região de controle.

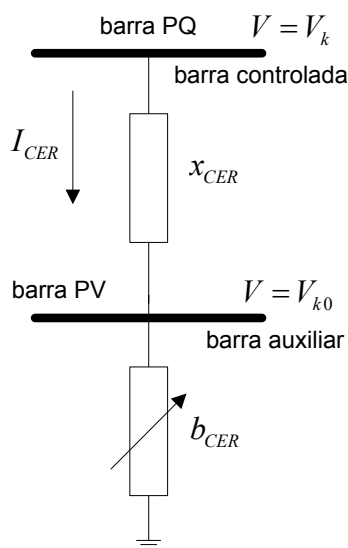


Figura II.8 - Modelo do CER na região de controle.

Onde:

x_{CER} Representa a reatância fictícia.

Do modelo ilustrado na Figura II.8, obtém-se a relação entre a tensão da barra controlada e a corrente no CER:

$$V_k - V_{k0} = x_{CER} \cdot I_{CER} \quad (\text{II.2})$$

Desta relação, verifica-se que a reatância x_{CER} corresponde ao coeficiente de inclinação da curva característica mostrada na Figura II.7 [42] e que, portanto, o modelo proposto representa com fidelidade o comportamento do CER descrito por esta curva. Valores típicos de x_{CER} variam entre 2% e 5% [30], ou seja, $x_{CER}(\%) = \frac{V_k - V_{k0}}{I_{CER}} \cdot 100 = 2 \text{ a } 5\%$. Fora da faixa de controle, o CER pode ser representado como uma barra PQ conforme Figura II.6.

Outro modelo para o CER foi proposto na referência [48] para utilização no fluxo de potência desacoplado rápido, denominado modelo implícito do CER. Neste modelo, a barra controlada é representada como uma barra PQ na qual a potência reativa líquida injetada (ou absorvida) é calculada a cada iteração em função da tensão desta barra, ou seja, em função de V_k . Esse modelo, ilustrado na Figura II.9, é válido tanto na região de controle quanto fora dela.

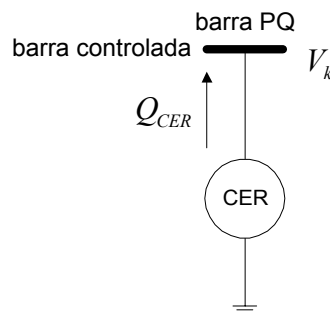


Figura II.9 - Modelo de injeção de potência.

Neste modelo, a potência reativa líquida injetada Q_{CER} é calculada conforme a faixa na qual o CER está operando, ou seja:

(i) Na região de controle, para $V_k^{\min} < V_k < V_k^{\max}$:

$$Q_{CER} = \frac{V_k}{V_k^{\max} - V_k^{\min}} \cdot \left[\frac{Q_{CER}^{\min}}{V_k^{\max}} \cdot (V_k - V_k^{\min}) + \frac{Q_{CER}^{\max}}{V_k^{\min}} \cdot (V_k^{\max} - V_k) \right] \quad (\text{II.3})$$

Onde:

$Q_{CER}^{\min}, Q_{CER}^{\max}$ Representam os limites de compensação estática indutiva e capacitiva, respectivamente.

(ii) Fora da região de controle, para $V_k < V_k^{\min}$:

$$Q_{CER} = Q_{CER}^{\max} \cdot \left(\frac{V_k}{V_k^{\min}} \right)^2 \quad (\text{II.4})$$

(iii) Fora da região de controle, para $V_k > V_k^{\max}$:

$$Q_{CER} = Q_{CER}^{\min} \cdot \left(\frac{V_k}{V_k^{\max}} \right)^2 \quad (\text{II.5})$$

A cada iteração, a tensão V_k é atualizada e usada para calcular o novo valor de injeção de potência reativa Q_{CER} na barra controlada. Uma vantagem deste modelo em relação à modelagem do CER como uma barra PV com uma susceptância em derivação

variável é a preservação da matriz admitância nodal⁵.

Na referência [34] foi apresentado um modelo similar ao anterior, que representa o CER como uma injeção (ou absorção) continuamente variável de potência reativa na barra controlada, tal como ilustrado na Figura II.9. Este modelo, por sua vez, foi inserido no problema de FPO e utiliza a injeção de potência reativa como uma variável de otimização com limites especificados, ou seja:

$$\begin{aligned} Q_{CER}^{\min} &\leq Q_{CER} \leq Q_{CER}^{\max} \\ Q_{CER}^{\max} &= b_{CER}^{\max} \cdot (V_{k0})^2 \\ Q_{CER}^{\min} &= b_{CER}^{\min} \cdot (V_{k0})^2 \end{aligned} \quad (II.6)$$

Onde:

$b_{CER}^{\min}, b_{CER}^{\max}$ Representam os limites da susceptância do CER, correspondentes à capacidade máxima de absorção e de injeção de potência reativa, respectivamente.

Esse modelo é denominado modelo ativo.

Em [47], o CER foi modelado para os algoritmos de fluxo de potência convencional e fluxo de potência ótimo como uma susceptância em derivação continuamente variável, conectada à barra terminal e ajustada para o controle da tensão nodal. Neste trabalho, os autores propuseram a inclusão da susceptância b_{CER} ao conjunto de variáveis do FPC e do FPO para a solução destes algoritmos através dos métodos de Newton-Raphson.

A Figura II.10 ilustra esse modelo para o CER operando na região de controle:

⁵ A susceptância variável do CER altera a matriz admitância nodal.

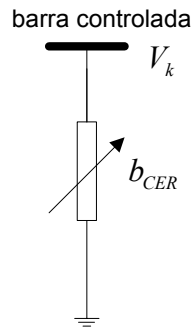


Figura II.10 - Susceptância em derivação continuamente variável.

Fora da região de controle, o CER é modelado como um elemento passivo, como mostra a Figura II.11:

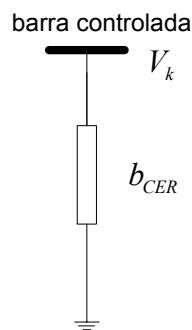


Figura II.11 - Susceptância em derivação fixa.

Esse modelo é denominado modelo passivo [34]. Nesse trabalho, foi proposta a utilização do ângulo de disparo dos tiristores do CER como uma variável do FPC e do FPO. Esta abordagem é útil para os casos em que estes programas são usados para inicializar outras aplicações em sistemas de potência como a análise de harmônicos.

II.4.1 Representação do Transformador de Acoplamento

O CER é conectado à rede elétrica através de um transformador de acoplamento a fim de adequar os níveis de tensão do equipamento aos níveis da rede. Em [50] foi tratada a representação deste transformador no fluxo de potência convencional através da inclusão de um barra adicional aos modelos propostos pelo CIGRÉ e pelo IEEE, conforme Figura

II.12:

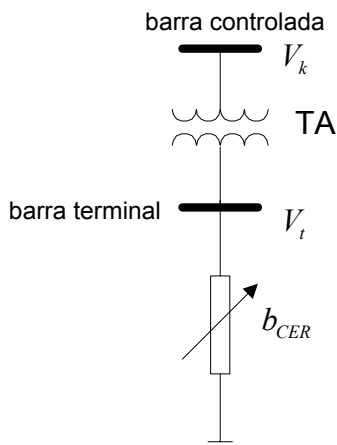


Figura II.12 - Representação do Transformador de Acoplamento (TA).

Onde V_t é a tensão da barra terminal, na qual está instalado o compensador.

Em [51] os modelos do CIGRÉ e do IEEE foram modificados a fim de avaliar corretamente os níveis de compensação de potência reativa na rede elétrica, considerando-se o transformador de acoplamento e sem a inclusão de barra adicional. Esta modificação consiste basicamente no cálculo da admitância equivalente vista da rede elétrica, resultante da combinação em série das admitâncias do CER e deste transformador.

II.4.2 Modelo Adotado Nesta Dissertação

Nesta dissertação, foi adotada a modelagem do CER como uma susceptância em derivação variável para o controle de tensão [47], associada à inclusão de uma barra adicional para representar o transformador de acoplamento [50]. A Figura II.13 ilustra este modelo para o CER operando na região de controle e fora dela:

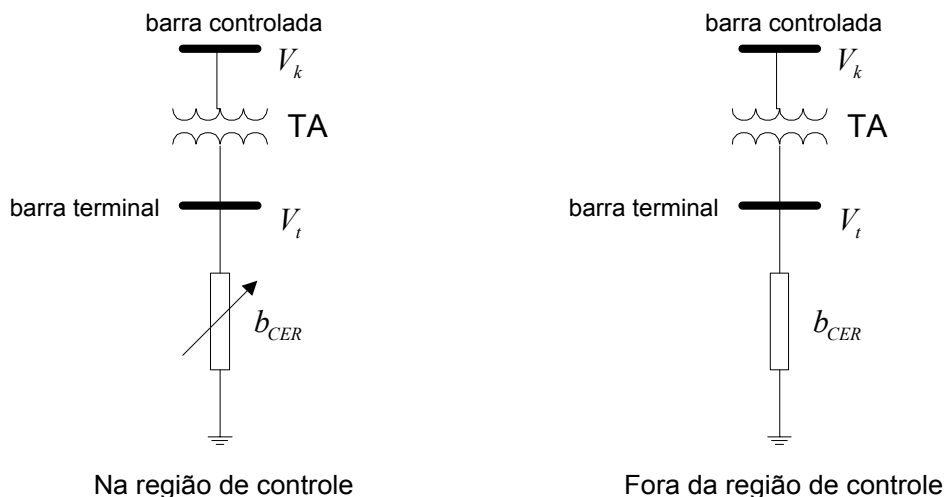


Figura II.13 - Modelo Adotado.

A opção pelo modelo adotado deve-se às vantagens oferecidas pelo mesmo, em relação às demais modelagens do CER. Estas vantagens são citadas a seguir:

- Utiliza o mesmo número de barras tanto na região de controle quanto fora dela, conforme Figura II.13;
- Permite representar o CER fora da região de controle através de modificações simples efetuadas na matriz hessiana de solução;
- Representa os limites do CER como susceptâncias fixas ao invés de injeções fixas de potência reativa;
- Oferece uma representação mais realista do CER.

A Figura II.7 apresenta a curva que relaciona a tensão controlada e a corrente no CER. Entretanto, a metodologia de solução do FPO utiliza equações de balanço de potência. Para tanto, a Figura II.14 mostra a curva característica de estado permanente que estabelece a relação entre a tensão controlada e a compensação de potência reativa fornecida pelo CER em pu:

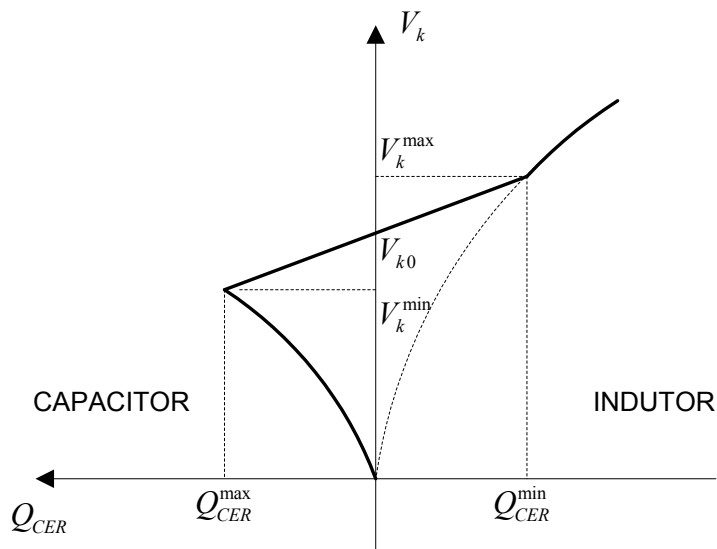


Figura II.14 - Característica tensão versus potência reativa.

A faixa linear desta curva característica pode ser equacionada como:

$$V_k = V_{k0} + r_{CER} \cdot Q_{CER} \quad (\text{II.7})$$

Onde:

r_{CER} Coeficiente de inclinação da curva característica da Figura II.14.

Para tratar a susceptância do CER como uma variável de otimização, na referência [47] é apresentada a relação entre a compensação de potência reativa Q_{CER} e a variável de otimização b_{CER} , ou seja:

$$Q_{CER} = b_{CER} \cdot V_t^2 \quad (\text{II.8})$$

Combinando-se as equações (II.7) e (II.8), obtém-se:

$$V_k = V_{k0} + r_{CER} \cdot b_{CER} \cdot V_t^2 \quad (II.9)$$

Assim, a equação (II.9) descreve o comportamento do CER de acordo com a sua curva característica, eficiente para modelar este dispositivo no problema de FPO. Adicionalmente, este modelo permite representar a susceptância deste equipamento como uma variável de otimização.

Os limites Q_{CER}^{\min} e Q_{CER}^{\max} da Figura II.14 são dados pelas expressões:

$$\begin{aligned} Q_{CER}^{\min} &= b_{CER}^{\min} \cdot V_t^2 \\ Q_{CER}^{\max} &= b_{CER}^{\max} \cdot V_t^2 \end{aligned} \quad (II.10)$$

A equação de balanço de potência reativa da barra terminal deve incluir a compensação de potência reativa fornecida pelo CER. Supondo-se que o CER seja instalado em uma barra i, esta equação é escrita como:

$$QG_i + b_{CER} \cdot V_i^2 - QL_i - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} = 0 \quad (II.11)$$

Onde:

QG_i Representa a geração de potência reativa na barra i (MVar);

QL_i Representa a carga reativa instalada na barra i (MVar);

Q_{ij} Representa o fluxo de potência reativa no ramo $i - j$ (MVA_r);

Ω_i Representa o conjunto de barras adjacentes à barra i .

A equação (II.11) é uma das restrições do problema de FPO e acomoda a modelagem do CER neste problema.

II.5 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado o compensador estático de reativos, abordando suas aplicações, configurações, sistema de controle e os principais modelos utilizados para representar este dispositivo em problemas de FPC e de FPO. A escolha de determinada configuração do CER depende tanto das condições do sistema e de suas necessidades quanto dos fatores econômicos envolvidos. Dependendo da função do CER, e dependendo do sistema elétrico ao qual ele vai ser conectado, o seu controle pode mudar. Cada caso deve ser analisado em separado, pois a solução ótima para uma aplicação do CER pode não ser a mesma para outra. Dentre os modelos propostos na literatura, cada qual com suas vantagens e desvantagens, foi adotada neste trabalho a modelagem do CER como uma susceptância em derivação variável. Dos motivos que determinaram esta escolha, destaca-se que este modelo representa com fidelidade o comportamento deste dispositivo no sistema elétrico de potência em regime permanente.

Capítulo III

Metodologia Proposta

III.1 Introdução

Tendo em vista a importância do CER para o planejamento e a operação dos sistemas, associada à carência de uma metodologia para a regulação da tensão de referência deste dispositivo, este capítulo propõe uma metodologia tanto para o ajuste ótimo da tensão de referência, como para a especificação do equipamento.

O ajuste ótimo dos parâmetros do CER é um problema de otimização não linear e de grande porte que envolve a minimização de investimentos em suporte de potência reativa no sistema. Por outro lado, este problema requer uma análise abrangente da rede, pois deve considerá-la tanto em condições normais de operação como em regime de contingência, onde cada contingência gera uma topologia de rede distinta.

Dessa forma, a metodologia proposta deve incluir as não linearidades do problema e comportar todas estas topologias de rede, resultando em um aumento significativo do número de variáveis. Portanto, este é um problema de otimização de grande dimensão e, conseqüentemente, requer robustez da metodologia proposta para sua solução.

III.2 Os Parâmetros de Ajuste do CER

A metodologia proposta nesta dissertação para a especificação do CER com o mínimo custo baseia-se no ajuste ótimo dos limites do mesmo. Deste modo, os parâmetros de ajuste são a tensão de referência e os limites deste dispositivo. Nesta seção, será descrita a importância destes ajustes para um bom desempenho do CER no SEP.

Do ponto de vista operacional, a tensão de referência do CER consiste no módulo da tensão da barra controlada no ponto onde a compensação de potência reativa é igual a um valor pré-ajustado. A regulação deste parâmetro visa um bom desempenho dinâmico do equipamento no SEP. Em regime permanente, isto quer dizer que na tensão de referência do CER, o valor da compensação de potência reativa através do dispositivo deve ser próximo de zero para uma dada condição de carga.

É prática comum regular a tensão de referência do CER para evitar a operação deste equipamento em um dos seus limites [21]. Isto porque a regulação deste parâmetro promove um deslocamento vertical da curva característica de regime permanente deste dispositivo. Porém, não existe uma metodologia para o ajuste ótimo deste parâmetro. A Figura III.1 mostra esse deslocamento:

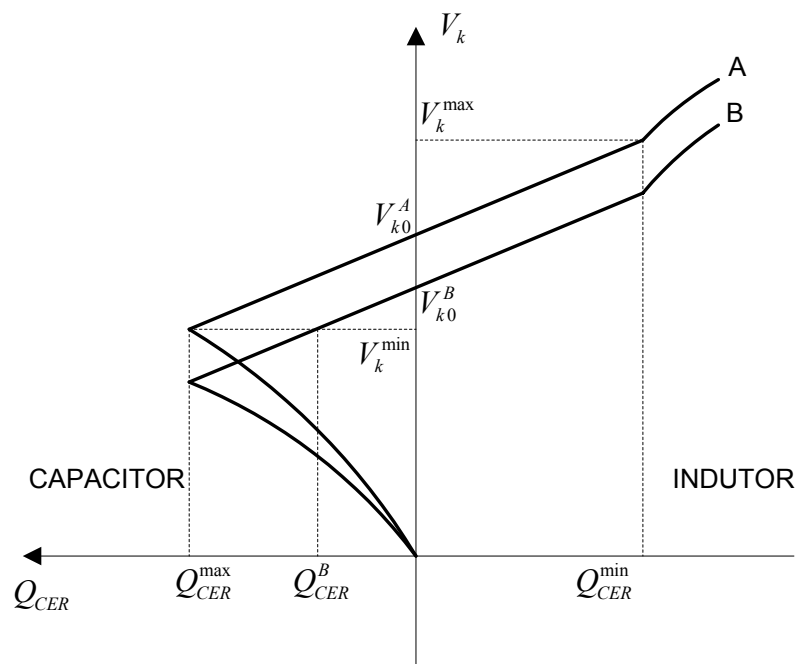


Figura III.1 - Deslocamento vertical da característica do CER.

Na Figura III.1, a curva A corresponde à tensão de referência V_{k0}^A e a curva B corresponde à tensão de referência V_{k0}^B . Para a tensão de referência V_{k0}^A , quando a tensão da barra controlada é igual a V_k^{\min} , o compensador opera no limite capacitivo Q_{CER}^{\max} . Porém, se a tensão de referência do CER for reduzida para V_{k0}^B , quando a tensão da barra controlada for igual ao mesmo valor V_k^{\min} , o compensador estará operando com Q_{CER}^B , ao invés de Q_{CER}^{\max} . Com essa redução evita-se, portanto, a operação do CER no limite capacitivo para esta condição operativa. Analogamente, um aumento da tensão de referência do CER pode evitar a operação deste equipamento no limite indutivo se a tensão da barra controlada for igual a V_k^{\max} .

O deslocamento da curva característica apresentado na Figura III.1 mostra que a regulação da tensão de referência do CER permite controlar os níveis de compensação estática no sistema em regime permanente. Daí surge o seguinte questionamento: qual é o melhor ajuste deste parâmetro necessário para proporcionar a compensação estática de potência reativa mais eficiente possível? (i) Será o valor determinado pelos estudos dinâmicos?; (ii) Será o valor obtido pelo fluxo de potência convencional?; ou (iii) Será 1,0 pu?

A metodologia proposta para determinar o ajuste ótimo da tensão de referência do CER tem como objetivo responder a estas questões, visando eficiência na utilização do equipamento em regime permanente. Como consequência desta eficiência, ocorre uma redução de investimentos em outras fontes de potência reativa.

Por outro lado, o ajuste ótimo dos limites do CER é importante para a especificação de novos equipamentos. Portanto, esta especificação também deve levar em consideração a necessidade de suporte de potência reativa no sistema em regime permanente. Com este objetivo, a metodologia proposta para determinar o ajuste ótimo dos limites do CER, aliada ao ajuste ótimo da tensão de referência, visa obter um valor mínimo para a especificação do equipamento e a utilização eficiente do mesmo.

III.3 Representação do CER no Problema de FPO

Um problema geral de otimização não linear pode ser escrito como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \quad f(\bar{x}) \\
 & \text{s.a.} \\
 & \quad h(\bar{x}) = 0 \\
 & \quad \bar{x}^{\min} \leq \bar{x} \leq \bar{x}^{\max}
 \end{aligned} \tag{III.1}$$

Onde:

- \bar{x} Representa o vetor de variáveis de otimização;
- $f(\bar{x})$ Representa a função objetivo do problema;
- $\bar{h}(\bar{x})$ Representa o vetor de restrições de igualdade do problema;
- $\bar{x}^{\min}, \bar{x}^{\max}$ Representam os vetores de limites inferiores e superiores de \bar{x} , respectivamente.

Para análise de sistemas elétricos de potência as variáveis do vetor \bar{x} representam os ângulos nodais, os módulos das tensões nas barras, as gerações de potência ativa e reativa nos geradores, os taps dos transformadores, os ângulos de defasamento dos transformadores defasadores e as alocações de potência reativa no sistema. A modelagem do CER no problema de FPO inclui a variável de otimização deste dispositivo (b_{CER}) no vetor de variáveis \bar{x} .

Nesta dissertação adotou-se como técnica de solução do FPO a metodologia primal-dual de pontos interiores [52]. O Apêndice A apresenta uma descrição detalhada deste método de solução.

A seguir, serão apresentadas as principais restrições que fazem parte da formulação deste problema.

III.3.1 Restrições de Balanço de Potência

No problema de FPO formulado em (III.1) o vetor de restrições $\bar{h}(\bar{x})$ deve incluir as equações estáticas de fluxo de carga ativa e reativa em todas as barras do sistema.

A restrição de balanço de potência ativa de uma barra i é dada por:

$$PG_i - PL_i - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} = 0 \quad (\text{III.2})$$

Onde:

PG_i Representa a geração de potência ativa na barra i (MW);

PL_i Representa a carga ativa instalada na barra i ;

P_{ij} Representa o fluxo de potência ativa no ramo $i - j$ (MW).

O fluxo de potência ativa no ramo $i - j$ é dado pela expressão geral:

$$P_{ij} = (a_{ij} \cdot V_i)^2 g_{ij} - (a_{ij} \cdot V_i) \cdot V_j \cdot g_{ij} \cdot \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) + \quad \forall (i, j) \in R \\ - (a_{ij} \cdot V_i) \cdot V_j \cdot b_{ij} \cdot \sin(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \quad (\text{III.3})$$

Onde:

- V_i, V_j Representam os módulos das tensões das barras i e j ;
- θ_{ij} Representa a diferença angular entre as barras i e j , ou seja, $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$;
- g_{ij} Representa a condutância série do ramo $i - j$;
- b_{ij} Representa a susceptância série do ramo $i - j$;
- a_{ij} Representa o tape do transformador do ramo $i - j$;
- φ_{ij} Representa a defasagem angular no ramo $i - j$, dada por transformador defasador;
- R Representa o conjunto de ramos ou circuitos da rede elétrica.

A restrição de balanço de potência reativa da barra i é dada por:

$$QG_i + b_{CER} \cdot V_i^2 - QL_i - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} = 0 \quad (III.4)$$

Destaca-se que o segundo termo da equação (III.4) $(b_{CER} \cdot V_i^2)$ corresponde à compensação de potência reativa fornecida pelo CER na barra i .

O fluxo de potência reativa no ramo $i - j$ é dado pela expressão geral:

$$Q_{ij} = -(a_{ij} \cdot V_i)^2 \cdot (b_{ij} + b_{ij}^{sh}) + (a_{ij} \cdot V_i) \cdot V_j \cdot b_{ij} \cdot \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) - (a_{ij} \cdot V_i) \cdot V_j \cdot g_{ij} \cdot \sin(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \quad \forall (i, j) \in R \quad (III.5)$$

Onde:

b_{ij}^{sh} Representa a susceptância em derivação do ramo $i - j$.

III.3.2 Restrições da Modelagem do CER

No problema de FPO formulado em (III.1) o vetor de restrições $\bar{h}(\bar{x})$ deve incluir a restrição (II.9) para a modelagem do CER, ou seja:

$$V_{k0} - V_k + r_{CER} \cdot b_{CER} \cdot V_t^2 = 0 \quad (III.6)$$

As restrições de canalização do problema (III.1) devem incluir a restrição da variável de otimização b_{CER} , ou seja:

$$b_{CER}^{\min} \leq b_{CER} \leq b_{CER}^{\max} \quad (III.7)$$

III.3.3 Formulação do Problema

Tendo em vista as principais restrições que compõem o problema de FPO incluindo a modelagem tradicional do CER, este problema é formulado como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } f(\bar{x}) \\
 & \text{s.a.} \\
 & PG_i - PL_i - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} = 0 \quad (\lambda p_i) \\
 & QG_i + b_{CER} \cdot V_i^2 - QL_i - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} = 0 \quad (\lambda q_i) \\
 & V_{k0} - V_k + r_{CER} \cdot b_{CER} \cdot V_t^2 = 0 \quad k \in \Omega_{\tau} \quad (\lambda_{CER}) \\
 & PG_i^{\min} \leq PG_i \leq PG_i^{\max} \\
 & QG_i^{\min} \leq QG_i \leq QG_i^{\max} \\
 & V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \\
 & b_{CER}^{\min} \leq b_{CER} \leq b_{CER}^{\max}
 \end{aligned} \tag{III.8}$$

Onde:

- λp_i Representa o multiplicador de Lagrange associado à restrição de balanço de potência ativa da barra i;
- λq_i Representa o multiplicador de Lagrange associado à restrição de balanço de potência reativa da barra i;
- λ_{CER} Representa o multiplicador de Lagrange associado à restrição de igualdade do CER;
- PG_i^{\min}, PG_i^{\max} Representam os limites inferior e superior de geração de potência ativa na barra i, respectivamente;
- QG_i^{\min}, QG_i^{\max} Representam os limites inferior e superior de geração de potência reativa na barra i, respectivamente;
- V_i^{\min}, V_i^{\max} Representam os limites operacionais inferior e superior de tensão na barra i, respectivamente.

Tradicionalmente nesta formulação, a tensão de referência do CER V_{k0} e os limites b_{CER}^{\min} e b_{CER}^{\max} são considerados constantes. Deste modo, a metodologia proposta para o ajuste ótimo dos parâmetros deste dispositivo consiste basicamente em adicionar estes parâmetros ao vetor de variáveis \bar{x} do FPO.

III.4 Ajuste Ótimo do CER com Análise de Contingência

Um dos objetivos do ajuste ótimo dos parâmetros do CER é evitar interrupções no fornecimento de energia elétrica no sistema operando em regime de contingência. Deste modo, é necessário realizar a análise de contingências em conjunto com o FPO para efetuar o ajuste proposto.

O problema de FPO com análise de contingências engloba as variáveis de estado e de controle do sistema para todas as topologias de rede geradas pelas contingências em análise, incluindo a topologia base correspondente à condição normal de operação. Os controles são ajustados na análise da topologia base e este ajuste deve manter o funcionamento do sistema para toda uma lista de contingências.

Este método é denominado planejamento preventivo [53], no qual os controles são previamente ajustados visando evitar efeitos indesejáveis para o sistema, como interrupções no fornecimento, devido à ocorrência de determinadas contingências.

Estes efeitos indesejáveis podem surgir, por exemplo, devido à falta de suporte de potência reativa em pontos críticos da rede. Desse modo, o objetivo da análise da topologia base é ajustar os controles disponíveis⁶, buscando minimizar os investimentos em alocação de potência reativa. Já o objetivo da análise das contingências é verificar se os ajustes e investimentos realizados na topologia base são suficientes para suportar as contingências de uma determinada lista.

A solução deste problema está sujeita a um conjunto de restrições que devem ser

⁶ Geração de potência ativa, tensão em barra de geração, tape de transformador, ângulo de defasamento, etc.

atendidas em todas as condições operativas. Desse modo, existem objetivos e restrições para análise da topologia base e para a análise das contingências. Levando-se em consideração todas as observações anteriores, a formulação geral do problema de ajuste ótimo do CER com análise de contingência pode ser dada como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \quad f_b(\bar{x}_1) + f_c(\bar{x}_2) \\
 & \text{s.a.} \\
 & \quad h_b(\bar{x}_1) = 0 \\
 & \quad h_c(\bar{x}_2) = 0 \quad \forall c \in L \\
 & \quad \bar{x}_1^{\text{-min}} \leq \bar{x}_1 \leq \bar{x}_1^{\text{-max}} \\
 & \quad \bar{x}_2^{\text{-min}} \leq \bar{x}_2 \leq \bar{x}_2^{\text{-max}}
 \end{aligned} \tag{III.9}$$

Onde:

- \bar{x}_1 Representa o conjunto de variáveis de otimização na topologia base;
- \bar{x}_2 Representa o conjunto de variáveis de otimização nas contingências;
- $f_b(\bar{x}_1)$ Representa a função objetivo para a análise topologia base;
- $f_c(\bar{x}_2)$ Representa a função objetivo para a análise de uma contingência da lista;
- $\bar{h}_b(\bar{x}_1)$ Representa o conjunto de restrições de igualdade do problema para a análise da topologia base;
- $\bar{h}_c(\bar{x}_2)$ Representa o conjunto de restrições de igualdade do problema para a análise de uma contingência da lista;
- L Representa a lista de contingências.

A formulação do FPO com análise de contingência como um único problema de otimização, conforme (III.9), conduz a um aumento do número de variáveis. Este aumento pode exigir um grande esforço computacional, dependendo da dimensão do sistema e do número de contingências da lista.

III.4.1 Técnica de Solução

Para resolver o problema de grande dimensão identificado anteriormente, será utilizada a técnica de decomposição matemática de Benders [54][55]. Para tanto, o problema (III.9) é dividido em subproblemas de dimensões menores. Outro fator que justifica a opção pela decomposição de Benders é a possibilidade de inserção da metodologia proposta em programas comerciais que utilizam esta técnica de solução. O Apêndice B apresenta os conceitos e a formulação detalhada desta técnica de decomposição.

A aplicação da decomposição de Benders ao ajuste ótimo do CER com análise de contingências resulta em dois subproblemas. Um deles corresponde à análise da topologia base da rede, sendo denominado subproblema de investimento. O outro corresponde à análise das contingências da lista, sendo denominado subproblema de operação.

O esquema de solução do problema de ajuste ótimo do CER com análise de contingências por meio da decomposição matemática de Benders pode ser ilustrado como na Figura III.2 [35][56]:

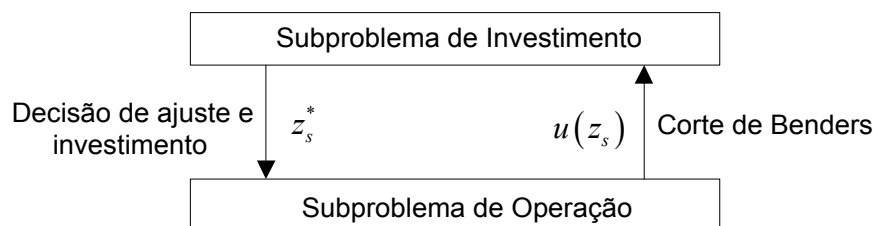


Figura III.2 - Esquema de solução por decomposição de Benders.

Neste esquema, a solução do subproblema de investimento fornece a decisão ótima sobre os controles e investimentos em alocação de potência reativa (z_s^*) para que o

subproblema de operação seja viável. Caso este subproblema não seja viável, é construída a restrição de corte de Benders ($u(z_s)$). Neste caso, o subproblema de investimento é executado novamente para o reajuste das variáveis de decisão z_s , visando a viabilidade do sistema em regime de contingência.

As variáveis de decisão z_s incluem os parâmetros de ajuste do CER, as gerações de potência ativa nos geradores, as tensões nas barras de geração, os tapes e os ângulos de defasamento dos transformadores e as alocações de potência reativa no sistema.

A seguir, será apresentada a formulação de cada um dos dois subproblemas resultantes da técnica de decomposição de Benders adotada.

III.4.2 Subproblema de Investimento

O subproblema de investimento é um problema de otimização não linear escrito como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } f_b(\bar{x}_1) \\
 & \text{s.a.} \\
 & \quad \bar{h}_b(\bar{x}_1) = 0 \\
 & \quad \bar{x}_1^{\min} \leq \bar{x}_1 \leq \bar{x}_1^{\max}
 \end{aligned} \tag{III.10}$$

O conjunto de restrições $\bar{h}_b(\bar{x}_1)$ incluem as equações estáticas de fluxo de carga nas barras e a equação do CER. As restrições de canalização por sua vez incluem as restrições para as variáveis b_{CER} e V_{k0} associadas à modelagem do CER. A seguir, serão apresentadas as características peculiares à função objetivo e às restrições que compõem este subproblema.

III.4.2.1 Função Objetivo

A função objetivo referente ao subproblema de investimento corresponde à

minimização do custo de investimento em alocação de potência reativa associada ao investimento em compensação estática proveniente do CER, ou seja:

$$f_b(x_1) = \sum_{i \in C} cQA_i \cdot |QA_i| + \frac{I}{2} \cdot \sum_{\Omega_{CER}} c_{CER} \cdot b_{CER}^2 \quad (\text{III.11})$$

Onde:

QA_i	Representa a alocação de potência reativa na barra i , através da instalação de bancos de capacitores e/ou indutores;
cQA_i	Representa o custo de alocação de potência reativa na barra i ;
c_{CER}	Representa o custo de investimento em compensação estática de potência reativa proveniente do CER;
Ω_{CER}	Representa o conjunto de todos os CERs do sistema;
C	Representa o conjunto de barras candidatas à alocação de potência reativa.

O custo c_{CER} representa o preço da potência reativa (US\$/KVA_r) dos capacitores e indutores que compõem o CER. Já o custo cQA_i representa o preço da potência reativa dos bancos de capacitores e/ou indutores instalados nas barras pertencentes ao conjunto C . O Apêndice C apresenta maiores detalhes a respeito destes custos.

III.4.2.2 Restrições de Balanço de Potência

A equação estática de fluxo de carga ativa do subproblema (III.10) foi apresentada em (III.2). A equação de fluxo de carga reativa por sua vez deve incorporar a alocação de potência reativa QA_i , ou seja:

$$QG_i + QA_i + b_{CER} \cdot V_i^2 - QL_i - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} = 0 \quad (III.12)$$

III.4.2.3 Restrições da Modelagem do CER

A modelagem do CER no FPO inclui a equação deste dispositivo (III.6) no vetor de restrições $\overline{h}_b(\overline{x}_1)$ do subproblema (III.10). Considerando-se a barra i como a barra terminal do CER, a equação (III.6) pode ser rescrita como:

$$\begin{aligned} V_{k0} - V_k + r_{CER} \cdot b_{CER} \cdot V_i^2 &= 0 \\ k \in \Omega_i \end{aligned} \quad (III.13)$$

Quanto às restrições de canalização do subproblema (III.10), esta mesma modelagem inclui as restrições de limites para as variáveis b_{CER} e V_{k0} . Neste estágio efetua-se a abertura dos limites do CER, b_{CER}^{\min} e b_{CER}^{\max} . Assim, a restrição para a variável b_{CER} é escrita como:

$$-99,99 \leq b_{CER} \leq 99,99 \quad (III.14)$$

Isto é realizado com o propósito de permitir a livre obtenção da variável de investimento b_{CER} , ou seja, sem restrições de limites. No entanto, o custo c_{CER} é associado a esta variável conforme (III.11).

A restrição de canalização para a tensão de referência do CER V_{k0} , por sua vez, é dada por:

$$V_{k0}^{\min} \leq V_{k0} \leq V_{k0}^{\max} \quad (III.15)$$

Onde:

$V_{k0}^{\min}, V_{k0}^{\max}$ Representam os limites inferior e superior da tensão de referência do CER.

Os limites V_{k0}^{\min} e V_{k0}^{\max} são especificados de acordo com os limites operacionais de tensão da barra controlada, como por exemplo 0,95 e 1,05 pu.

III.4.3 Subproblema de Operação

O subproblema de operação é um problema de otimização não linear escrito como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \quad f_c(\bar{x}_2, z_s^*) \\
 & \text{s.a.} \\
 & \quad \bar{h}_c(\bar{x}_2, z_s^*) = 0 \\
 & \quad \bar{x}_2^{\min} \leq \bar{x}_2 \leq \bar{x}_2^{\max}
 \end{aligned} \tag{III.16}$$

Onde z_s^* representa as variáveis de decisão ajustadas no subproblema de investimento e constantes no subproblema de operação.

O vetor de restrições $\bar{h}_c(\bar{x}_2, z_s^*)$ inclui as equações estáticas de fluxo de carga nas barras e a restrição de igualdade do CER. As restrições de canalização por sua vez incluem a restrição para variável b_{CER} . A seguir, serão apresentadas as características peculiares à função objetivo e às restrições que compõem este subproblema.

III.4.3.1 Função Objetivo

O objetivo do subproblema de operação é a viabilidade do sistema em regime de

contingência. Para tanto, neste subproblema todas as barras do sistema são especificadas como candidatas à alocação fictícia de potência reativa. Isto é necessário para garantir a convergência do problema caso a contingência seja inviável. Portanto, a função objetivo referente ao subproblema de operação corresponde à minimização do custo de investimento em alocação fictícia de potência reativa em todas as barras do sistema, ou seja:

$$f_c(\bar{x}_2) = \sum_{i \in B} cQAf_i \cdot |QAf_i| \quad \forall c \in L \quad (\text{III.17})$$

Onde:

- QAf_i Representa a alocação fictícia de potência reativa na barra i ;
- $cQAf_i$ Representa o custo de alocação fictícia de potência reativa na barra i ;
- B Representa o conjunto de todas as barras do sistema, neste estágio especificadas como candidatas a alocação fictícia de potência reativa.

Se na solução deste subproblema o somatório $\sum_{i \in B} QAf_i = 0$, a contingência em análise é viável. Porém, se $\sum_{i \in B} QAf_i \neq 0$ a operação do sistema em regime desta contingência é inviável. Neste caso, deve-se construir a restrição de Benders conforme será visto em item subsequente.

III.4.3.2 Restrições de Balanço de Potência

As restrições de balanço de potência sofrem alterações devido as variáveis de decisão z_s que são constantes z_s^* neste subproblema. Considerando-se as tensões das barras de geração V_i e as alocações de potência reativa QA_i como variáveis de decisão, as equações (III.2) e (III.4) podem ser rescritas respectivamente como:

$$\begin{aligned}
 & PG_i - PL_i - \\
 & \sum_{j \in \Omega_i} (V_i^{*2} \cdot g_{ij} - V_i^* \cdot V_j \cdot g_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} - V_i^* \cdot V_j \cdot b_{ij} \cdot \sin \theta_{ij}) \quad \forall (i, j) \in R \quad (III.18)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & QG_i + QA_i^* + QAf_i + b_{CER} \cdot V_i^{*2} - QL_i - \\
 & \sum_{j \in \Omega_i} (-V_i^{*2} \cdot b_{ij} + V_i^* \cdot V_j \cdot b_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} - V_i^* \cdot V_j \cdot g_{ij} \cdot \sin \theta_{ij}) \quad \forall (i, j) \in R \quad (III.19)
 \end{aligned}$$

Onde:

V_i^* Valor da tensão V_i calculado no subproblema de investimento;

QA_i^* Valor da variável QA_i calculado no subproblema de investimento.

Destaca-se que a restrição (III.19) inclui a potência reativa fictícia (QAf_i) do subproblema de operação.

III.4.3.3 Restrições da Modelagem do CER

O vetor de restrições $\overline{h_c}(\overline{x_2}, \overline{z_s}^*)$ do subproblema (III.16) deve incluir a equação (III.6) considerando-se a tensão de referência do CER V_{k0} e a tensão da barra de geração V_i constantes. Deste modo, a equação (III.6) pode ser rescrita como:

$$\begin{aligned}
 & V_{k0}^* - V_k + r_{CER} \cdot b_{CER} \cdot V_i^{*2} = 0 \\
 & k \in \Omega_i \quad (III.20)
 \end{aligned}$$

Onde:

V_{k0}^* Valor da variável V_{k0} calculado no subproblema de investimento.

A restrição de canalização para a variável b_{CER} do subproblema (III.16) é escrita de acordo com o valor desta variável calculado no subproblema de investimento, pois este valor determina os limites b_{CER}^{\min} e b_{CER}^{\max} no subproblema de operação, ou seja:

(i) Se $b_{CER}^* < 0$:

$$b_{CER}^* \leq b_{CER} \leq 0 \quad (III.21)$$

Onde:

b_{CER}^* Valor da variável b_{CER} calculado no subproblema de investimento.

(ii) Se $b_{CER}^* > 0$:

$$0 \leq b_{CER} \leq b_{CER}^* \quad (III.22)$$

III.4.4 Montagem do Corte de Benders

Sempre que ocorrer alocação fictícia de potência reativa no subproblema de operação, deve-se montar a restrição de corte de Benders para o subproblema de investimento. As variáveis que recebem corte são aquelas constantes no subproblema de operação calculadas no subproblema de investimento, ou seja, as variáveis z_s^* . Esta seção apresenta a formulação desta restrição considerando-se como variáveis de decisão as

variáveis de ajuste do CER, as tensões das barras de geração e as alocações de potência reativa no sistema. Outras variáveis também podem ser consideradas nesta formulação.

A expressão correspondente ao corte de Benders pode ser encontrada em detalhes no Apêndice B. Esta expressão é rescrita em (III.23):

$$\sum_{m \in I} \left[\sum_{s \in \Omega z_s} \left[\sum_{r \in \Omega z_R} (\pi_{mr} \cdot Ez_{sr}) \cdot z_s \right] \right] \geq \sum_{m \in I} \left[w_m + \sum_{s \in \Omega z_s} \left[\sum_{r \in \Omega z_R} (\pi_{mr} \cdot Ez_{sr}) \cdot z_s^* \right] \right] \quad (III.23)$$

Onde:

π_{mr} Representa o valor do multiplicador de Lagrange obtido do subproblema de operação para a contingência m, associado com a restrição r;

Ez_{sr} Representa a derivada parcial da restrição r em relação a z_s ;

w_m Representa o valor da função objetivo obtido do subproblema de operação para a contingência m;

I Representa o conjunto de contingências inviáveis no subproblema de operação;

Ωz_s Representa o conjunto de variáveis de decisão z_s ;

Ωz_R Representa o conjunto de restrições do subproblema de operação que contém o parâmetro z_s^* .

O somatório $\sum_{r \in \Omega z_R} (\pi_{mr} \cdot Ez_{sr})$ é obtido para cada variável que recebe corte z_s , sendo denominado coeficiente de Benders em relação a z_s , denotado por CBz_s . Para a contingência m este coeficiente é dado por:

$$CBz_{sm} = \sum_{r \in \Omega_{zR}} (\pi_{mr} \cdot Ez_{sr}) \quad (III.24)$$

A seguir serão apresentados os coeficientes de Benders em relação às variáveis de ajuste do CER, as quais contribuem no corte de Benders.

➤ Tensão de Referência do CER:

O coeficiente de Benders em relação a variável V_{k0} para a contingência m é dado por:

$$CBV_{k0m} = \lambda_{CERm} \cdot E_{V_{k0}} \quad (III.25)$$

Onde:

λ_{CERm} Representa o valor de λ_{CER} obtido para a contingência m ;

$E_{V_{k0}}$ Representa a derivada parcial da restrição (III.20) em relação a V_{k0}^* .

Derivando-se a equação (III.20) em relação a V_{k0}^* , obtém-se:

$$E_{V_{k0}} = 1 \quad (III.26)$$

➤ Limites do CER:

O coeficiente de Benders em relação à variável de investimento b_{CER} é dado por:

$$\begin{aligned} CBb_{CERm} &= \pi_{ICERm} \cdot E_{ICER} \quad \text{para } b_{CER}^* < 0 \\ CBb_{CERm} &= \pi_{uCERm} \cdot E_{uCER} \quad \text{para } b_{CER}^* > 0 \end{aligned} \quad (III.27)$$

Onde:

π_{ICERm} Representa o multiplicador de Lagrange associado à restrição de canalização do limite inferior de b_{CER} obtido para a contingência m;

π_{uCERm} Representa o multiplicador de Lagrange associado à restrição de canalização do limite superior de b_{CER} obtido para a contingência m;

E_{ICER} Representa a derivada parcial da restrição (III.21) em relação a b_{CER}^* ;

E_{uCER} Representa a derivada parcial da restrição (III.22) em relação a b_{CER}^* .

Derivando-se as restrições (III.21) e (III.22) em relação a b_{CER}^* , obtém-se respectivamente:

$$E_{ICER} = -1 \quad (III.28)$$

$$E_{uCER} = -1 \quad (III.29)$$

Os coeficientes de Benders em relação às tensões das barras de geração (V_i) e às alocações de potência reativa no sistema (QA_i) para a contingência m são dados por CBV_{im} e $CBQA_{im}$, respectivamente. A formulação para a obtenção destes coeficientes é análoga à apresentada anteriormente.

De acordo com as variáveis de decisão consideradas no problema de ajuste do CER, a expressão (III.23) é escrita como:

$$\begin{aligned} \sum_{m \in I} (CBV_{k0m} \cdot V_{k0} + CBb_{CERm} \cdot b_{CER} + CBV_{im} \cdot V_i + CBQA_{im} \cdot QA_i) \geq \\ \sum_{m \in I} (w_m + CBV_{k0m} \cdot V_{k0}^* + CBb_{CERm} \cdot b_{CER}^* + CBV_{im} \cdot V_i^* + CBQA_{im} \cdot QA_i^*) \end{aligned} \quad (III.30)$$

O corte de Benders dado pela expressão (III.30) deve ser adicionado ao subproblema de investimento como uma restrição do FPO sempre que houver alocação fictícia de potência reativa no subproblema de operação. Para isto, é necessário converter esta restrição de desigualdade em uma restrição de igualdade, através da adição de uma variável de folga ao problema, ou seja:

$$\begin{aligned} \sum_{m \in I} (Y_{CB} - CBV_{k0m} \cdot V_{k0} - CBb_{CERm} \cdot b_{CER} - CBV_{im} \cdot V_i - CBQA_{im} \cdot QA_i) + \\ \sum_{m \in I} (w_m + CBV_{k0m} \cdot V_{k0}^* + CBb_{CERm} \cdot b_{CER}^* + CBV_{im} \cdot V_i^* + CBQA_{im} \cdot QA_i^*) = 0 \end{aligned} \quad (III.31)$$

Onde:

Y_{CB} Representa a variável de folga associada à restrição do corte de Benders.

A restrição de canalização para a variável de folga Y_{CB} é:

$$Y_{CB} \geq 0 \quad (III.32)$$

A formulação do subproblema de investimento considerando a restrição de corte de Benders é dada por:

$$\begin{aligned}
& \text{Min } f_b(\bar{x}_1) \\
& \text{s.a.} \\
& h_b(\bar{x}_1) = 0 \\
& \bar{x}_1^{\text{-min}} \leq \bar{x}_1 \leq \bar{x}_1^{\text{-max}} \\
& Y_{CB} - \sum_{m \in I} (CBV_{k0m} \cdot V_{k0} - CBb_{CERm} \cdot b_{CER} - CBV_{im} \cdot V_i - CBQA_{im} \cdot QA_i + \\
& w_m + CBV_{k0m} \cdot V_{k0}^* + CBb_{CERm} \cdot b_{CER}^* + CBV_{im} \cdot V_i^* + CBQA_{im} \cdot QA_i^*) = 0 \quad (\lambda_{CB}) \\
& Y_{CB} \geq 0
\end{aligned} \tag{III.33}$$

Onde:

λ_{CB} Representa o multiplicador de Lagrange associado à restrição do corte de Benders.

Tendo em vista a formulação dos subproblemas de investimento e operação e da restrição de Benders, o item subsequente apresenta o algoritmo de solução do problema de ajuste ótimo do CER.

III.4.5 Algoritmo de Solução

O fluxograma do algoritmo proposto para solução do problema de ajuste ótimo dos parâmetros do CER utilizando decomposição de Benders é apresentado na Figura III.3.

O algoritmo consiste primeiramente na entrada de dados do sistema, leitura da lista de contingências e na inicialização do contador de iterações h . A partir daí entra-se no “loop” do programa e os seguintes passos são executados: (i) **Solução do subproblema de investimento**: Na primeira vez que este subproblema é resolvido, a restrição correspondente ao corte de Benders não é considerada na sua formulação. Os valores obtidos correspondentes às variáveis de ajuste do CER e demais variáveis de decisão do

sistema são passados como constantes para o passo seguinte; (ii) **Solução do subproblema de operação**: Este subproblema é resolvido para cada contingência da lista. Caso ocorra alocação fictícia de potência reativa em alguma barra do sistema, significa que a contingência em análise não é viável. Neste caso será construído o corte de Benders; (iii) **Montagem do Corte de Benders**: A formulação é dada pela equação (III.31). Esta equação será inserida no subproblema de investimento como uma restrição adicional. Seguindo, o contador de iterações h é incrementado e volta-se ao passo (i). O processo continua até que a alocação de potência reativa fictícia, Q_{Af} , seja inferior a uma tolerância ε em todas as barras do sistema para todas as contingências da lista. Quando isto ocorre, o programa converge e os resultados são impressos.

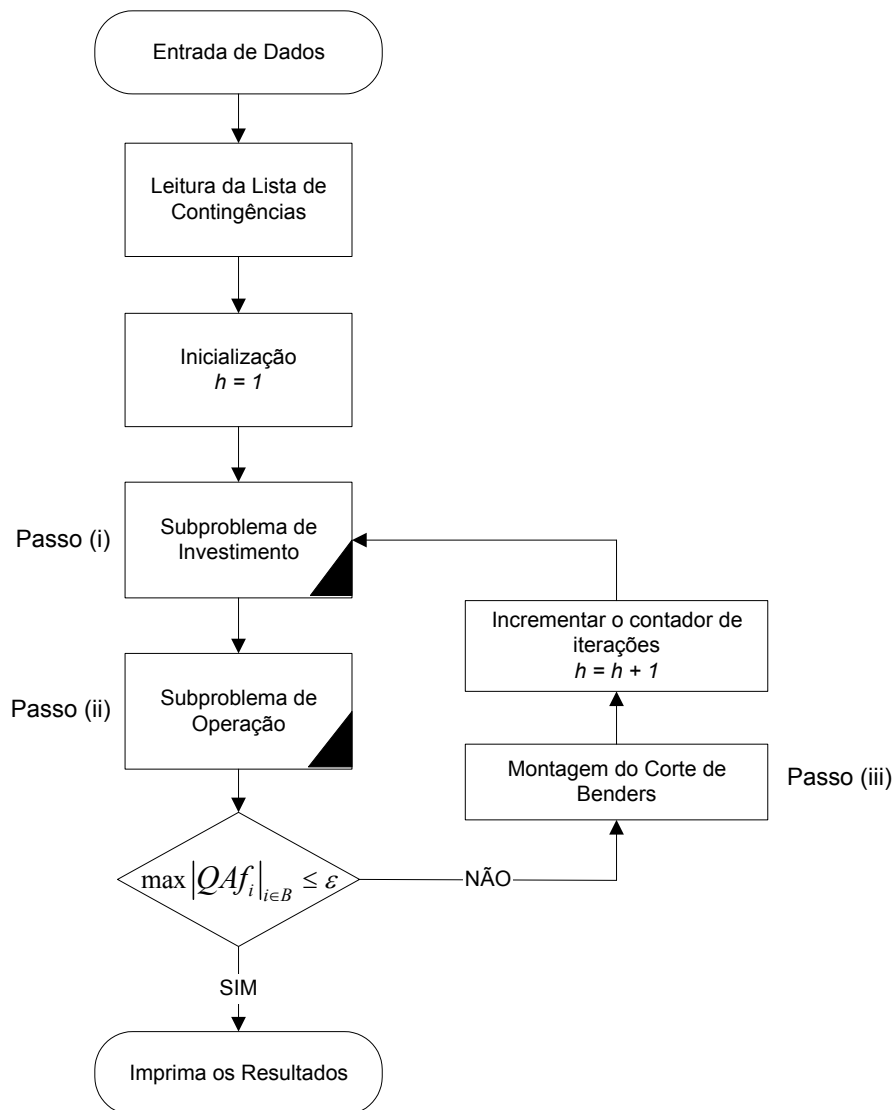


Figura III.3 - Fluxograma do algoritmo proposto.

O valor da tolerância ε , critério de viabilidade adotado neste trabalho é igual a 10^{-2} pu, ou seja, 1 MVar.

III.5 Exemplo Numérico

Nesta seção, a metodologia proposta para o ajuste ótimo dos parâmetros do CER será aplicada à análise de um sistema teste de 4 barras e 4 ramos. Esta análise consiste no ajuste de um CER na barra 3 para controle de tensão da barra 2 em 1,00 pu. Este sistema possui uma unidade geradora na barra 1 com capacidade de 50,0 MW dentro de uma faixa de -50,0 a +50,0 MVar, alimentando uma carga na barra 4 no valor de 30,0 MW e 18,0 MVar. A barra 3 é interligada à barra 2 através do transformador de acoplamento TA e a barra 4 é candidata à alocação de potência reativa. A topologia base deste sistema é mostrada na Figura III.4.

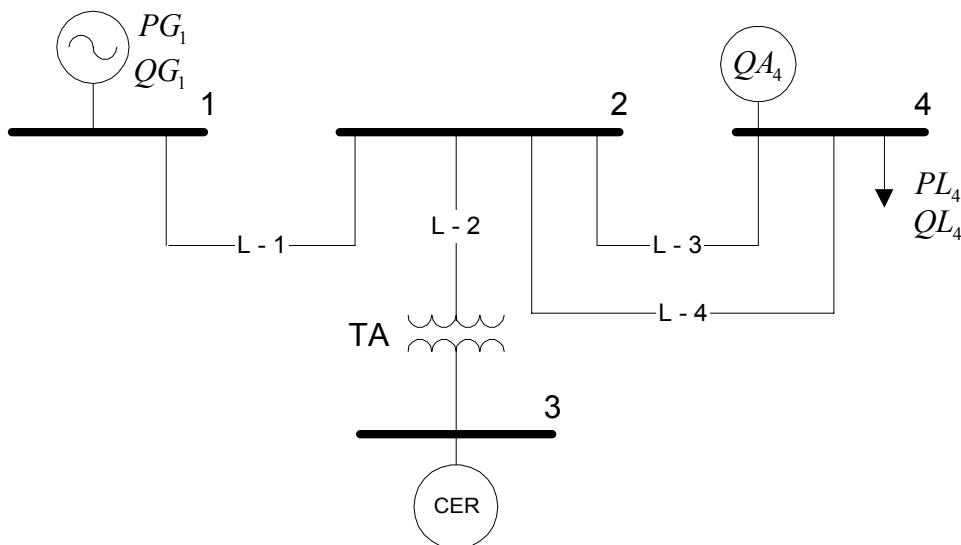


Figura III.4 - Topologia base do sistema de 4 barras.

Os custos da alocação de potência reativa na barra 4 e da compensação desenvolvida pelo CER na barra 3 são de 10 US\$ / KVar conforme Apêndice C. Os limites inicialmente especificados para o CER são de -99,99 e 99,99 MVar e a sua tensão de referência é inicialmente especificada em 1,00 pu, que é o valor especificado para controle na barra 2. Os limites operacionais de tensão nas barras são 0,97 e 1,03 pu.

Os dados de circuitos deste sistema são apresentados na Tabela III.1.

Tabela III.1 – Dados de circuitos do sistema teste.

Circuito	De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Fluxo Limite (pu)
1	1	2	1,0	10,0	50,0
2	2	3	2,0	20,0	50,0
3	2	4	2,0	20,0	50,0
4	2	4	2,0	20,0	50,0

Neste exemplo, será efetuado o ajuste da tensão de referência e dos limites do CER para viabilizar a operação do sistema quando ocorre o desligamento do circuito L-4. Para tanto, serão discutidos os resultados dos subproblemas de investimento e de operação para este caso.

Subproblema de Investimento – Iteração 1:

Este subproblema corresponde ao passo (i) do fluxograma da Figura III.3. Como é a primeira vez que este passo é executado, não há restrições de Benders incluídas ao problema de FPO. Neste passo (i), as restrições de canalização associadas ao CER são:

$$\begin{aligned} -99,99 &\leq b_{CER} \leq 99,99 \\ 0,97 &\leq V_{k0} \leq 1,03 \end{aligned} \quad (\text{III.34})$$

Destaca-se que os valores -99,99 e 99,99 associados à variável b_{CER} foram adotados com o propósito de permitir a obtenção da potência solicitada do CER sem restrições de limites tendo em vista que estes limites serão obtidos neste passo. Já os limites da tensão de referência do CER (V_{k0}) são os limites operacionais de tensão na barra controlada (barra 2).

Como o sistema está em suas condições normais de operação, não há alocação de potência reativa e também não há compensação desenvolvida pelo CER. Assim, a tensão

de referência deste dispositivo permanece especificada em 1,00 pu.

A Tabela III.2 apresenta os resultados obtidos nesta iteração:

Tabela III.2 – Resultados do Subproblema de Investimento : Iteração 1.

Barra	V (pu)	QA (pu)	QA (MVar)	b_{CER} (pu)	Q_{CER} (MVar)	V_{k0} (pu)
1	1,022	-	-	-	-	-
2	1,000	-	-	-	-	-
3	1,000	-	-	1,3e-03	0,13	1,000
4	0,978	0	0	-	-	-

O valor de b_{CER} na Tabela III.2 corresponde a uma potência reativa desenvolvida pelo CER de valor desprezível, tendo em vista que é inferior à tolerância, $\varepsilon = 10^{-2}$ pu, adotada neste trabalho como critério de viabilidade. A tensão de referência, V_{k0} , permaneceu ajustada em 1,00 pu. Ou seja, o sistema em condições normais de operação não solicita potência do CER. O próximo passo é verificar se estes resultados atendem ao sistema operando em regime de contingência através da solução do subproblema de operação.

Subproblema de Operação – Iteração 1:

Este subproblema corresponde ao passo (ii) do fluxograma da Figura III.3. Neste subproblema as variáveis z_s , que assumem os valores calculados no subproblema anterior tornando-se constantes, são:

- A tensão de referência do CER $V_{k0}^* = 1,000$ pu;
- A tensão da barra de geração $V_1^* = 1,022$ pu;
- A alocação de potência reativa na barra 4 $QA_4^* = 0$.

Já o valor calculado da susceptância do CER no passo (i) (b_{CER}^*) define os limites deste equipamento no passo (ii), ou seja, no passo (ii) a restrição de canalização deste

dispositivo é dada por:

$$0 \leq b_{CER} \leq 1,3 \cdot 10^{-3} \quad (\text{III.35})$$

Deste modo, os resultados obtidos neste passo são apresentados na Tabela III.3:

Tabela III.3 – Resultados do Subproblema de Operação : Iteração 1.

Barra	V (pu)	QAf (pu)	QAf (MVar)	b_{CER} (pu)	Q_{CER} (MVar)	λ_{CER}	$\pi_{u_{CER}}$
1	1,022	0	0	-	-	-	-
2	1,000	-1,9e-02	-1,85	-	-	-	-
3	0,991	-4,6e-02	-4,60	3,3e-04	3,2e-02	-19,37	-0,54
4	0,970	7,4e-02	7,44	-	-	-	-

Para acomodar a solução imposta pelo problema de investimento, a solução do subproblema de operação sem o circuito L-4 tornou-se possível devido à alocação de potência reativa fictícia no sistema, veja (QAf) na coluna 4 da tabela. Ou seja, sem a utilização deste artifício o problema de operação não teria solução. Entretanto, a solução obtida não é viável.

Montagem do Corte de Benders – Iteração 1:

Como a operação do sistema sem a linha L-4 não é viável para o ajuste dos controles efetuado no subproblema de investimento dados pela Tabela III.2, torna-se necessária a obtenção da restrição de Benders através da execução do passo (iii) do fluxograma da Figura III.3. A seguir serão calculados os coeficientes de Benders em relação às variáveis de decisão V_{k0} e b_{CER} .

- Cálculo do coeficiente de Benders em relação a V_{k0} :

O coeficiente de Benders em relação à variável V_{k0} é dado pela equação (III.25)

onde $E_{V_{k0}} = 1$ e o multiplicador λ_{CER} é obtido da Tabela III.3. Assim, este coeficiente é dado por:

$$CBV_{k0} = -19,37 \quad (III.36)$$

➤ Cálculo do coeficiente de Benders em relação a b_{CER} :

O coeficiente de Benders em relação à variável b_{CER} é dado pela equação (III.27) para $b_{CER}^* > 0$ onde $E_{u_{CER}} = -1$ e o multiplicador $\pi_{u_{CER}}$ é obtido da Tabela III.3. Assim, este coeficiente é dado por:

$$CBb_{CER} = 0,54 \quad (III.37)$$

Já os coeficientes de Benders em relação a V_1 e a QA_4 são $CBV_1 = -9,76$ e $CBQA_4 = 0,99$, respectivamente.

O valor da função objetivo obtido do passo (ii) (w_m) é de 0,14 pu. Com este valor e com os coeficientes de Benders em relação às variáveis de decisão consideradas neste problema, a restrição de Benders (III.31) é escrita como:

$$Y_{CB} + 19,37 \cdot V_{k0} - 0,54 \cdot b_{CER} + 9,76 \cdot V_1 - 0,99 \cdot QA_4 + 0,14 - 19,37 \cdot V_{k0}^* + 0,54 \cdot b_{CER}^* - 9,76 \cdot V_1^* + 0,99 \cdot QA_4^* = 0 \quad (III.38)$$

Substituindo os valores $V_{k0}^* = 1,000$ pu, $b_{CER}^* = 1,3 \cdot 10^{-3}$ pu, $V_1^* = 1,022$ pu e $QA_4^* = 0$ calculados no passo (i), obtém-se:

$$Y_{CB} + 19,37 \cdot V_{k0} - 0,54 \cdot b_{CER} + 9,76 \cdot V_1 - 0,99 \cdot QA_4 + 9,53 = 0 \quad (III.39)$$

Incorporando a restrição de Benders (III.39) ao subproblema de investimento, este passa a ser formulado como:

$$\begin{aligned} &Min \quad f_b(\bar{x}_1) \\ &s.a. \\ &\quad \bar{h}_b(\bar{x}_1) = 0 \\ &\quad \bar{x}_1^{\min} \leq \bar{x}_1 \leq \bar{x}_1^{\max} \\ &\quad Y_{CB} + 19,37 \cdot V_{k0} - 0,54 \cdot b_{CER} + 9,76 \cdot V_1 - 0,99 \cdot QA_4 + 9,53 = 0 \quad (\lambda_{CB}) \\ &\quad Y_{CB} \geq 0 \end{aligned} \quad (III.40)$$

Então, o passo (i) é novamente executado correspondendo à solução do subproblema (III.40). As variáveis de decisão z_x são reajustadas e este processo se repete até que a operação do sistema sem o circuito L-4 seja viável no passo (ii). Assim, o problema converge na 4ª iteração entre os passos (i) e (ii). Ou seja, são necessários três cortes de Benders para a convergência deste problema.

A seguir serão apresentados os resultados da última execução do programa.

Subproblema de Investimento – Última Iteração (Iteração 4):

A Tabela III.4 apresenta os resultados obtidos da 4ª execução do passo (i):

Tabela III.4 – Resultados do Subproblema de Investimento : Iteração 4.

Barra	V (pu)	QA (pu)	QA (MVar)	b _{CER} (pu)	Q _{CER} (MVar)	V _{k0} (pu)
1	1,030	-	-	-	-	-
2	1,014	-	-	-	-	-
3	1,027	-	-	6,0e-02	6,35	1,015
4	0,993	0	0	-	-	-

Com os valores da Tabela III.4, a solução do subproblema de operação obtida da 4ª execução do passo (ii) é viável. Assim, a convergência deste problema é alcançada.

Para alcançar a viabilidade, os cortes de Benders atuaram no subproblema de investimento elevando a compensação de potência reativa solicitada do CER de zero para 6,35 MVar e a tensão de referência deste equipamento de 1,000 para 1,015 pu. Isto significa que para atender a operação do sistema sem o circuito L-4, o CER da barra 3 deve ser especificado com uma capacidade de pelo menos 6,35 MVar capacitivos devendo ser ajustado na tensão de referência de 1,015 pu.

Uma outra simulação foi realizada com este sistema mantendo-se a tensão de referência e os limites do CER constantes no subproblema de investimento, ou seja, sem a aplicação da metodologia proposta, a fim de apresentar as vantagens dos ajustes deste equipamento. Nesta análise, os limites foram especificados em -10,0 e 10,0 MVar. A Tabela III.5 apresenta os resultados desta simulação.

Tabela III.5 – Resultados do Subproblema de Investimento sem ajuste do CER.

Barra	V (pu)	QA (pu)	QA (MVar)	b_{CER} (pu)	Q_{CER} (MVar)	V_{k0} (pu)
1	1,013	-	-	-	-	-
2	1,000	-	-	-	-	-
3	1,003	-	-	1,6e-02	1,60	1,000
4	0,986	7,5e-02	7,48	-	-	-

Nesta simulação, foi solicitada do CER uma compensação no valor de 1,60 MVar e foi necessário um investimento em alocação de 7,48 MVar na barra 4 para atender o sistema sem o circuito L-4, somando um investimento de 9,08 MVar. Como o investimento de acordo com a metodologia proposta foi de 6,35 MVar, a aplicação desta metodologia resulta em uma economia de 2,73 MVar.

III.6 Conclusões

Neste capítulo, foram apresentados a formulação e o algoritmo para a solução do problema de FPO com análise de contingências, incluindo o ajuste ótimo dos parâmetros do CER.

A tensão de referência do CER foi incluída no conjunto de variáveis de otimização do subproblema de investimento. A função objetivo deste subproblema acomodou o custo de investimento em compensação estática de reativos. Desta forma, o ajuste da potência reativa desenvolvida pelo CER determinou as dimensões deste equipamento no subproblema de operação. Para os casos nos quais a solução deste subproblema não é viável, foi mostrada a montagem da restrição de Benders incluindo as variáveis de ajuste do CER e a inclusão desta restrição no subproblema de investimento.

Finalmente, este capítulo apresentou um exemplo numérico com o propósito de ilustrar passo a passo o algoritmo proposto e os benefícios proporcionados pela metodologia proposta.

Em uma análise mais ampla, deve-se realizar simulações para o sistema em regime de carga leve e de carga pesada, a fim de determinar as capacidades máximas de compensação indutiva e capacitiva do CER. Estas simulações serão realizadas nos estudos de casos do Capítulo 4.

Capítulo IV

Estudo de Casos

IV.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados obtidos através da aplicação da metodologia proposta para o ajuste ótimo da tensão de referência do CER e para a especificação do mesmo. Para tanto, serão utilizados dois sistemas testes conhecidos na literatura especializada, os sistemas IEEE-14 e IEEE-118, e o sistema elétrico de potência brasileiro. Os resultados apresentados serão comparados com aqueles obtidos sem o ajuste do CER, de modo a explorar as vantagens da metodologia proposta. Os dados complementares destes sistemas encontram-se no Apêndice D.

IV.2 Sistema IEEE-14

Este sistema é composto por 14 barras, 20 circuitos e 5 unidades de geração. As análises propostas neste sistema consistem no ajuste dos parâmetros de um CER na barra 4 para controle de tensão da barra 9 em 1,00 pu. A topologia base deste sistema é mostrada na Figura IV.1:

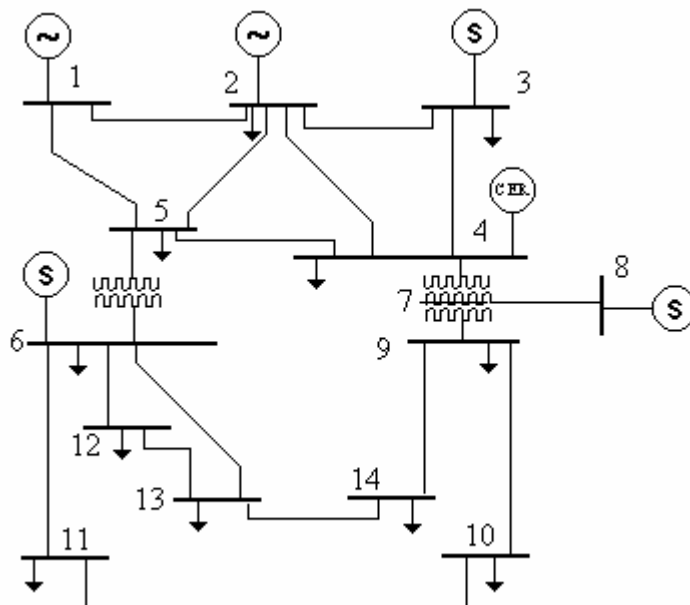


Figura IV.1 - Sistema IEEE-14.

Os limites de tensão nas barras deste sistema são 0,95 pu e 1,05 pu. O ajuste do CER da barra 4 será efetuado para atender a lista de contingências da Tabela IV.1.

Tabela IV.1 – Lista de contingências IEEE-14.

Contingência	Tipo	Local
1	Geração	2
2	Geração	3
3	Circuito	6 – 13
4	Circuito	9 – 10

Neste caso, para testar a metodologia proposta de ajuste do CER, serão realizadas as análises a seguir.

IV.2.1 Análise 1:

Esta análise considera o CER previamente instalado na barra 4. Neste caso, como se trata de um equipamento já existente no sistema, o objetivo é somente o ajuste ótimo da tensão de referência deste equipamento, que possui uma faixa de operação de -30 MVar a

+30 MVar. Para tanto o sistema será considerado operando com carga pesada, ou seja, com 145% do seu carregamento normal, e todas as barras serão consideradas como candidatas à alocação de potência reativa ao custo de 10 US\$/KVar. Este valor foi obtido no endereço http://www.iesa.com.br/financeiro/financeiro_iesa.asp.

Este problema converge na 4^a iteração do algoritmo da Figura III.3, ou seja, os resultados obtidos após a primeira execução do passo (i) ($h=1$) não atendem ao sistema em regime das contingências analisadas no passo (ii). Então o passo (i) é novamente executado para reajuste dos controles, dentre os quais se destaca a tensão de referência do CER, até que todas as contingências da lista sejam viáveis ($h=4$).

A Tabela IV.2 apresenta os resultados desta simulação. A coluna 2 (V_{k0}) é referente à tensão de referência do CER e a coluna 3 (Q_{CER}) corresponde à compensação desenvolvida pelo equipamento.

Tabela IV.2 – Análise 1 IEEE-14.

Barra	V_{k0} (pu)	Q_{CER} (MVar)
4	1,0301	18,14

Estes resultados mostram que para garantir a operação viável do sistema operando com carga pesada e em regime de contingência, a tensão de referência do CER (V_{k0}) deve ser ajustada em 1,0301 pu. Com este ajuste, o CER desenvolve uma compensação capacitiva de 18,14 MVar.

Uma outra simulação foi realizada com este sistema mantendo-se a tensão de referência do CER constante em 1,00 pu, ou seja, sem a aplicação da metodologia proposta. A Tabela IV.3 apresenta os resultados desta simulação. A coluna 4 desta tabela (QA) mostra a alocação de potência reativa no sistema.

Tabela IV.3 – Análise 1 IEEE-14 : sem o ajuste de V_{k0} .

Barra	V_{k0} (pu)	Q_{CER} (MVar)	QA (MVar)
4	1,0000	-19,69	-
13	-	-	4,41

A partir destes resultados observa-se que sem o ajuste da tensão de referência do CER (V_{k0}), este equipamento absorve 19,69 MVar do sistema, sendo para isto necessária uma alocação (QA) de 4,41 MVar na barra 13.

Comparando-se os resultados obtidos das duas simulações anteriores, verifica-se que o ajuste ótimo da tensão de referência (V_{k0}) anulou o suporte de potência reativa (QA) no sistema. Adicionalmente, ocorreu um redespacho de potência das unidades de geração deste sistema, dentro dos seus limites operacionais. A Tabela IV.4 mostra as potências geradas nestas unidades antes ($V_{k0} = 1,00$ pu) e após este ajuste ($V_{k0} = 1,0301$ pu).

Tabela IV.4 – Resultados de geração IEEE-14.

Gerador	Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (MVar)	
	$V_{k0} = 1,00$ pu	$V_{k0} = 1,0301$ pu	$V_{k0} = 1,00$ pu	$V_{k0} = 1,0301$ pu
Barra 1	133,66	97,36	8,97	-26,07
Barra 2	80,98	61,17	42,88	36,04
Barra 3	69,72	95,65	25,23	38,50
Barra 6	92,91	81,17	17,56	1,74
Barra 8	7,55	45,15	7,10	7,14
Σ	384,82	380,5	101,74	57,35

Observa-se que o balanço total de potência ativa no sistema é pouco alterado com o ajuste de V_{k0} . Já o balanço total de potência reativa é reduzido, visto que o CER deixa de absorver 19,69 MVar e passa a gerar 18,14 MVar em consequência deste ajuste. Houve uma melhora dos níveis de tensão no sistema, o que conduziu a uma diminuição das

perdas. Estes aspectos podem ser melhor explorados considerando-se as curvas de capacidade das máquinas. No entanto, esta abordagem não será tratada neste trabalho.

Para verificar o comportamento dinâmico do CER antes e depois do ajuste de V_{k0} através da metodologia proposta, a contingência 3 da lista será simulada tendo em vista que esta contingência é a mais rigorosa. Para tanto serão utilizados parâmetros típicos de máquinas síncronas, regulador de tensão, regulador de velocidade e modelo do CER.

A Figura IV.2 mostra o comportamento da tensão controlada pelo CER (V_9) no instante da ocorrência da contingência, ou seja, em 2 segundos, sem o ajuste de V_{k0} .

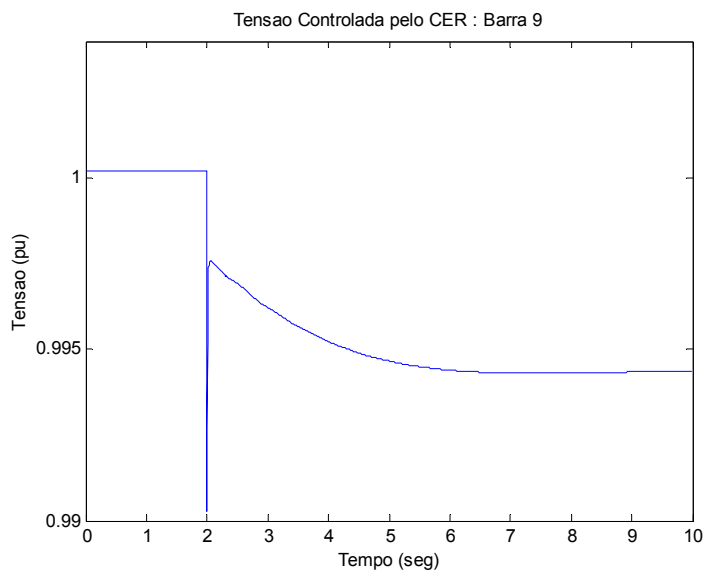


Figura IV.2 - Tensão controlada sem o ajuste de V_{k0} : IEEE-14.

Observa-se que antes da contingência a tensão controlada era mantida no valor de referência ($V_{k0} = 1,00$ pu) e após a contingência esta tensão foi reduzida a um valor de aproximadamente 0,994 pu.

Esta mesma contingência também foi simulada considerando-se a tensão de referência do CER ajustada através da metodologia proposta, como mostra a Figura IV.3:

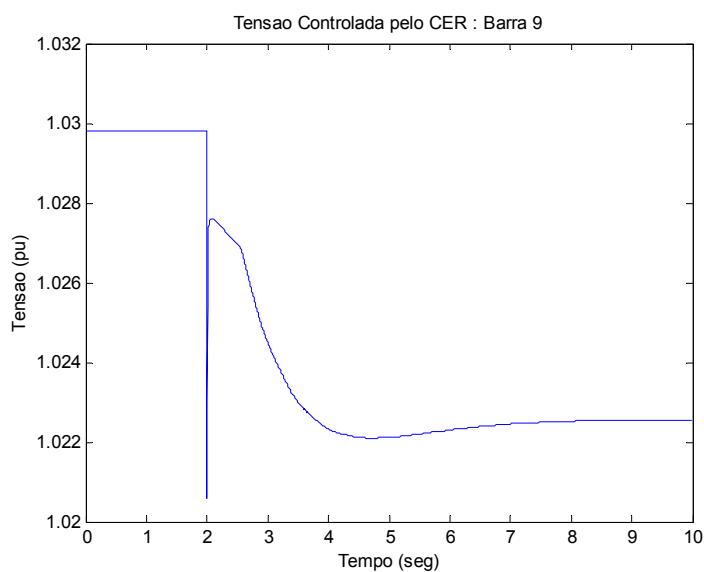


Figura IV.3 - Tensão controlada com o ajuste de V_{k0} : IEEE-14.

As Figura IV.4 e Figura IV.5 mostram as compensações desenvolvidas pelo CER em resposta a contingência simulada nas duas condições anteriores, ou seja, antes e depois do ajuste de V_{k0} .

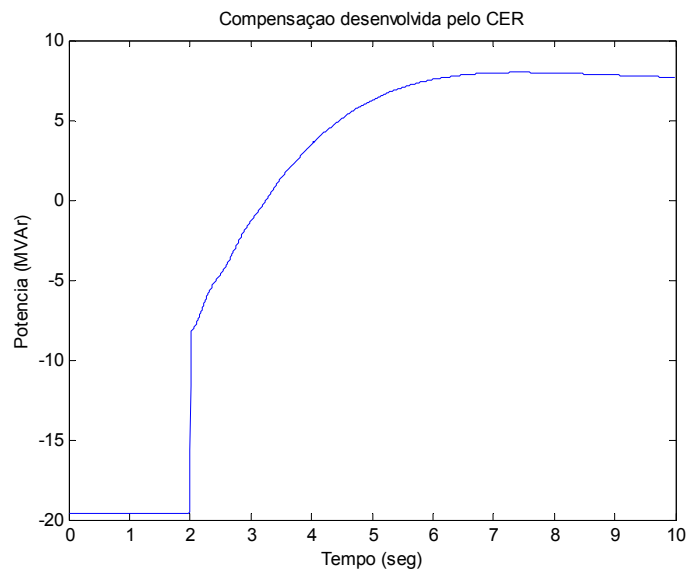


Figura IV.4 - Compensação desenvolvida sem o ajuste de V_{k0} : IEEE-14.

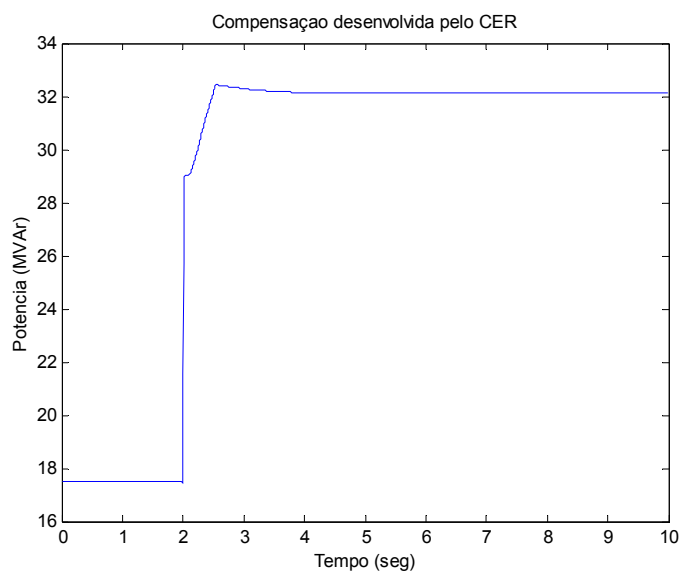


Figura IV.5 - Compensação desenvolvida com o ajuste de V_{k0} : IEEE-14.

Verifica-se que o CER manteve o seu comportamento em regime dinâmico após o ajuste de V_{k0} proposto visto que a tensão controlada foi estabilizada em torno de 6

segundos (4 segundos após a ocorrência da contingência), tal como foi obtido sem este ajuste. Além disso, com o ajuste de V_{k0} , a compensação desenvolvida pelo CER foi estabilizada em torno de 4 segundos (2 segundos após a ocorrência da contingência), tempo inferior ao obtido sem este ajuste (de 6 segundos aproximadamente). Em outras palavras, o ajuste ótimo de V_{k0} em regime permanente não afeta negativamente o comportamento dinâmico do CER.

Outro aspecto que pode ser observado é a melhoria do perfil de tensão da barra 9 em regime de contingência devido ao ajuste proposto.

IV.2.2 Análise 2:

Esta análise não considera o CER previamente existente no sistema. Neste caso, trata-se de um problema de investimento em compensação estática de reativos. Sendo assim, o objetivo é a determinação das dimensões deste equipamento para especificação do mesmo, através do ajuste ótimo dos seus limites, juntamente com o ajuste ótimo da sua tensão de referência. Para tanto, será associado um custo à potência desenvolvida pelo CER no valor de 10 US\$/KVAR. Como se trata de um problema de investimento exclusivamente em compensação estática de reativos, a princípio nenhuma barra será considerada como candidata à alocação (QA).

Primeiramente o sistema será considerado operando com carga pesada e um valor de tensão de referência (V_{k0}) será obtido nesta condição. A Tabela IV.5 apresenta os resultados obtidos desta simulação:

Tabela IV.5 – Análise 2 IEEE-14 : carga pesada.

Barra	V_{k0} (pu)	Q_{CER} (MVar)
4	1,0284	15,92

De acordo com estes resultados, para garantir a operação viável do sistema operando com carga pesada e em regime de contingência o CER deve possuir uma

capacidade mínima de compensação capacitiva de 15,92 MVar, devendo ser ajustado na tensão de referência (V_{k0}) de 1,0284 pu.

Em uma outra simulação, o sistema será considerado operando com carga leve, ou seja, com 75% do seu carregamento normal, e um outro valor de tensão de referência (V_{k0}) será obtido nesta condição. A Tabela IV.6 apresenta os resultados obtidos desta simulação:

Tabela IV.6 – Análise 2 IEEE-14 : carga leve.

Barra	V_{k0} (pu)	Q_{CER} (MVar)
4	1,0025	-1,20

Ou seja, para garantir a operação viável do sistema operando com carga leve e em regime de contingência, o CER deve possuir uma capacidade mínima de compensação indutiva de 1,20 MVar. Para esta condição operativa, o equipamento deve ter sua tensão de referência (V_{k0}) ajustada em 1,0025 pu.

Esta análise permitiu determinar o limite capacitivo do CER (15,92 MVar), através da simulação do sistema com carga pesada e o limite indutivo deste equipamento (1,20 MVar) através da simulação do sistema com carga leve. É válido ressaltar que em cada uma destas duas condições operativas, a tensão de referência (V_{k0}) deve ser ajustada em valores diferentes, ou seja:

- $V_{k0} = 1,0284$ pu para o sistema operando com carga pesada;
- $V_{k0} = 1,0025$ pu para o sistema operando com carga leve.

Deste modo, a Tabela IV.7 apresenta a faixa de operação deste compensador estático:

Tabela IV.7 – Faixa de operação CER IEEE-14.

CER	Limite Indutivo (MVar)	Limite Capacitivo (MVar)
Barra 4	1,20	15,92

Tendo em vista que a faixa de operação do CER foi estabelecida em regime permanente, o valor total do banco de capacitores e o valor do indutor que compõem o compensador estático podem ser especificados conhecendo-se a configuração desejada para este equipamento. Esta configuração deve levar em consideração o desempenho desejado do equipamento em regime dinâmico, podendo ser:

- RCT-CF: Reator controlado a tiristor em paralelo com banco fixo de capacitores;
- RCT-CCT: Reator controlado a tiristor em paralelo com capacitor chaveado a tiristor.

A seguir, será realizada uma outra simulação com o propósito de ajuste ótimo dos limites do CER, considerando-se o sistema operando com carga pesada e a tensão de referencia (V_{k0}) constante em 1,00 pu. O objetivo é demonstrar a importância do ajuste ótimo conjunto da tensão e dos limites deste equipamento. A Tabela IV.8 apresenta os resultados obtidos desta simulação:

Tabela IV.8 – Análise 2 IEEE-14 : carga pesada sem o ajuste de V_{k0} .

Barra	V_{k0} (pu)	Q_{CER} (MVar)	QA (MVar)
4	1,000	16,28	-
13	-	-	4,06
14	-	-	1,60
Σ	-	16,28	5,66

Para possibilitar a convergência deste problema, foi necessária uma alocação (QA)

total de 5,66 MVA_r no sistema, além da compensação de 16,28 MVA_r desenvolvida pelo CER.

Comparando-se os resultados da Tabela IV.5 com os resultados da Tabela IV.8, verifica-se que o ajuste dos limites do CER juntamente com o ajuste ótimo da tensão de referência (V_{k0}) reduz os investimentos em potência reativa no sistema, se comparado com o ajuste dos limites sem o ajuste ótimo da tensão do CER. Ou seja, a especificação deste equipamento deve levar em consideração a tensão de referência do mesmo.

IV.3 Sistema IEEE-118

Este sistema é composto por 118 barras, 186 circuitos e 49 unidades de geração. Os dados deste sistema podem ser obtidos no endereço eletrônico www.ee.washington.edu/research/pstca. Este estudo consiste no ajuste ótimo e coordenado dos parâmetros de 3 compensadores estáticos de reativos, citados a seguir:

- CER 1: Instalado na barra 30 para controle de tensão da barra 17 em 0,995 pu.
- CER 2: Instalado na barra 44 para controle de tensão desta barra em 0,985 pu;
- CER 3: Instalado na barra 52 para controle de tensão desta barra em 0,957 pu.

Os valores de tensão para controle foram obtidos no endereço eletrônico citado. Os limites de tensão nas barras deste sistema são 0,95 pu e 1,05 pu. O ajuste dos compensadores estáticos será realizado visando a viabilidade do sistema em regime de contingência. A lista das contingências simuladas é apresentada na Tabela IV.9.

Tabela IV.9 – Lista de contingências IEEE-118.

Contingência	Tipo	Local
1	Geração	24
2	Geração	34
3	Circuito	22 – 23
4	Circuito	34 – 43
5	Circuito	53 – 54

As análises serão conduzidas seguindo o mesmo raciocínio adotado no caso estudado anteriormente (IEEE-14). Entretanto, o objetivo deste estudo é demonstrar a robustez da metodologia proposta, quando aplicada ao ajuste coordenado de vários compensadores estáticos.

IV.3.1 Análise 1:

Esta análise considera os 3 compensadores estáticos previamente existentes no sistema e o objetivo é somente o ajuste ótimo e coordenado das tensões de referência (V_{k0}) destes equipamentos, que possuem faixa de operação de -60,0 MVar a +60,0 MVar. Para tanto, o sistema será considerado operando com carga pesada, ou seja, com 130% do seu carregamento normal, e todas as barras serão consideradas como candidatas à alocação de potência reativa ao custo de 10 US\$/KVar. A Tabela IV.10 apresenta os resultados obtidos desta simulação:

Tabela IV.10 –Análise 1 IEEE-118.

Barra	V_{k0} (pu)	Q_{CER} (MVar)
30	1,0317	31,94
44	1,0004	12,24
52	0,9960	24,00

A solução obtida indica que para garantir a operação viável do sistema operando com carga pesada e em regime de contingência, as tensões de referência (V_{k0}) devem ser ajustadas nos valores apresentados na coluna 2.

Uma outra simulação foi realizada neste sistema, mantendo-se as tensões de referência (V_{k0}) constantes nos valores especificados para controle, com o propósito de explorar os benefícios dos ajustes destes parâmetros. A Tabela IV.11 apresenta os resultados desta simulação:

Tabela IV.11 – Análise 1 IEEE-118 : sem o ajuste de V_{k0} .

Barra	V_{k0} (pu)	Q_{CER} (MVar)	QA (MVar)
30	0,9950	-53,48	-
44	0,9850	-1,76	-
52	0,9570	-21,25	-
22	-	-	5,26
53	-	-	15,80
Σ	-	-76,49	21,06

A última linha desta tabela (Σ) apresenta o somatório dos valores absolutos das potências desenvolvidas pelos compensadores estáticos (Q_{CER}) (coluna 3) e das alocações de potência reativa (QA) no sistema (coluna 4).

Pode-se verificar das duas simulações anteriores que o ajuste das tensões de referência (V_{k0}) anulou o suporte de potência reativa (QA) total no sistema. Este resultado mostra a importância do ajuste coordenado da tensão de referência de todos os compensadores estáticos do sistema.

Para mostrar que o ajuste ótimo da tensão de referência (V_{k0}) em regime permanente não prejudica o desempenho dinâmico dos compensadores estáticos deste sistema, será simulada a seguir a contingência 5 da lista tendo em vista que esta contingência é a mais rigorosa. Para não estender muito a análise, somente serão apresentadas as curvas obtidas para o CER da barra 52.

A Figura IV.6 mostra o comportamento da tensão controlada por este compensador (V_{52}) no instante da ocorrência da contingência, ou seja, em 2 segundos, sem o ajuste de V_{k0} .

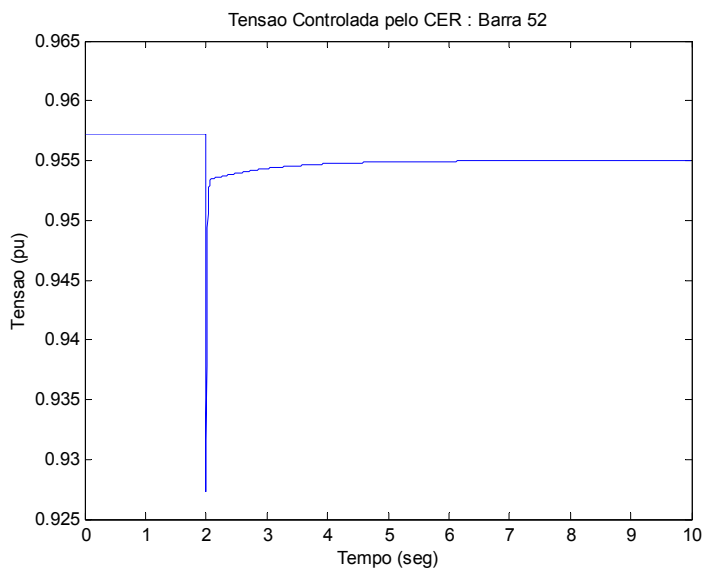


Figura IV.6 - Tensão controlada sem o ajuste de V_{k0} : IEEE-118.

Esta mesma contingência também foi simulada no sistema considerando-se as tensões de referência V_{k0} ajustadas através da metodologia proposta, veja Tabela IV.10. A Figura IV.7 mostra o comportamento da tensão controlada, V_{52} , com o ajuste de V_{k0} :

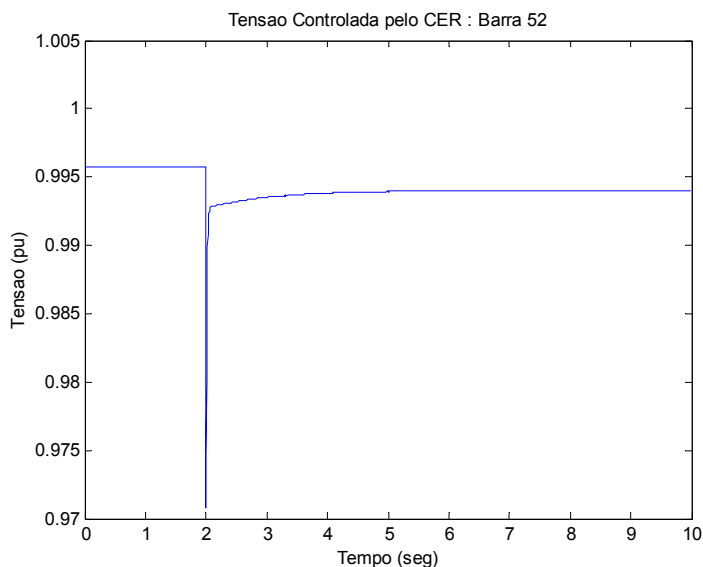


Figura IV.7 - Tensão controlada com o ajuste de V_{k0} : IEEE-118.

Observa-se que antes da contingência, a tensão controlada, V_{52} , era mantida no

valor de referência ($V_{k0} = 0,9570$ pu), veja Tabela IV.11, enquanto que durante a contingência esta tensão foi reduzida a 0,955 pu.

A Figura IV.8 apresenta a compensação desenvolvida pelo CER da barra 52 quando este equipamento opera com a tensão V_{k0} pré-especificada, ou seja, sem o ajuste ótimo, enquanto que a Figura IV.9 apresenta esta mesma compensação depois deste ajuste.

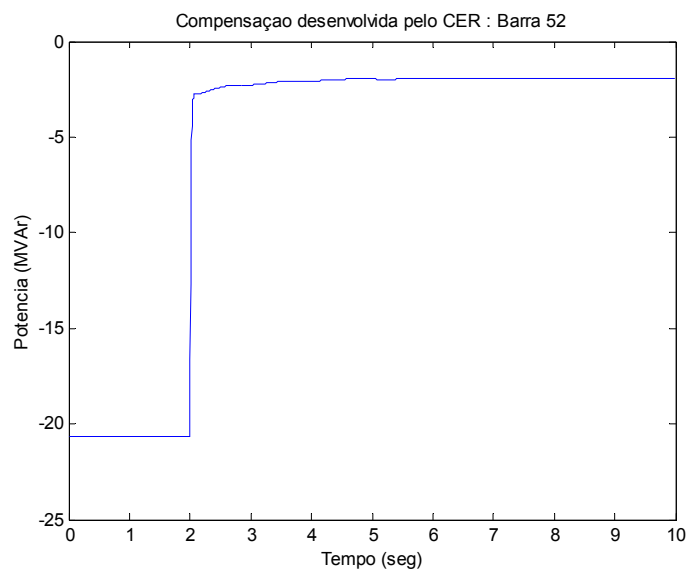


Figura IV.8 - Compensação desenvolvida sem o ajuste de V_{k0} : IEEE-118.

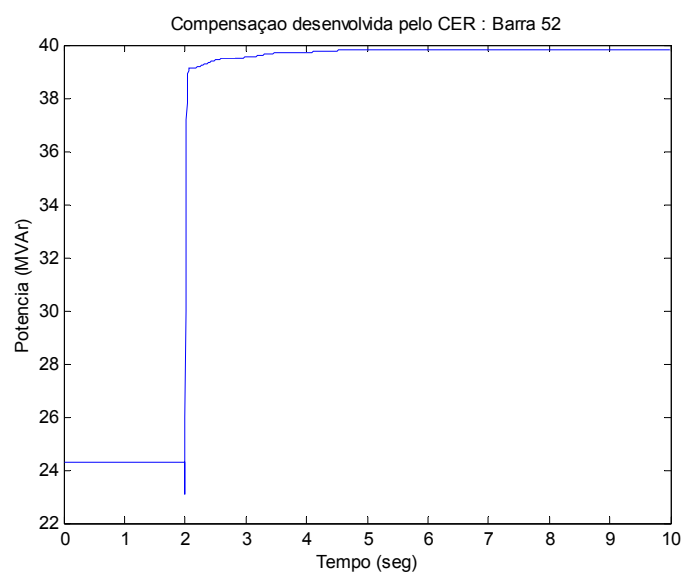


Figura IV.9 - Compensação desenvolvida com o ajuste de V_{k0} : IEEE-118.

Verifica-se que este compensador estático manteve o seu comportamento em regime dinâmico após o ajuste de V_{k0} proposto visto que a tensão controlada foi estabilizada em torno de 5 segundos (3 segundos após a ocorrência da contingência), tal como foi obtido sem este ajuste. Além disto, as compensações desenvolvidas tanto antes como depois do ajuste foram estabilizadas em torno de 5 segundos.

Observa-se também que o ajuste proposto conduziu a um melhor perfil de tensão na barra 52 para a operação do sistema em contingência.

IV.3.2 Análise 2:

O objetivo desta análise é a determinação dos limites dos compensadores estáticos existentes neste sistema juntamente com o ajuste ótimo das tensões de referência (V_{k0}) destes equipamentos. Para tanto, será associado um custo à potência desenvolvida por estes compensadores no valor de 10 US\$/KVAR. A princípio, nenhuma barra será considerada como candidata à alocação de potência reativa (QA).

Primeiramente o sistema será considerado operando com carga pesada e um valor de tensão de referência (V_{k0}) será obtido para cada CER nesta condição. A Tabela IV.12 apresenta os resultados desta simulação:

Tabela IV.12 – Análise 2 IEEE-118 : carga pesada.

Barra	V_{k0} (pu)	Q_{CER} (MVar)
30	1,0347	2,81
44	1,0006	11,26
52	0,9841	25,86

A coluna 3 (Q_{CER}) desta tabela apresenta as capacidades mínimas exigidas dos 3 compensadores estáticos para garantir uma operação viável do sistema operando com carga pesada e em regime de contingência. Para tanto, estes equipamentos devem ter suas tensões de referência (V_{k0}) ajustadas nos valores apresentados na coluna 2.

Em uma outra simulação, o sistema será considerado em operação com carga leve, ou seja, com 75% do seu carregamento normal. Para esta outra condição operativa, será obtido um outro valor de tensão de referência (V_{k0}) para cada CER deste sistema. A Tabela IV.13 apresenta os resultados desta simulação:

Tabela IV.13 – Análise 2 IEEE-118 : carga leve.

Barra	V_{k0} (pu)	Q_{CER} (MVar)
30	1,0091	-1,00
44	1,0113	-2,05
52	0,9778	2,01

Ou seja, para garantir a operação viável do sistema operando com carga leve e em regime de contingência, os compensadores estáticos devem ter suas tensões de referência (V_{k0}) ajustadas nos valores apresentados na coluna 2 desta tabela.

Tendo em vista os resultados da Tabela IV.12 e os resultados da Tabela IV.13, verifica-se que a simulação do sistema com carga pesada permitiu determinar os limites capacitivos dos 3 compensadores estáticos deste sistema. Já a simulação do sistema em carga leve conduziu à determinação dos limites indutivos dos compensadores das barras 30 e 44. Deste modo, a Tabela IV.14 apresenta as faixas de operação destes equipamentos para regime permanente:

Tabela IV.14 – Faixa de Operação dos CERs IEEE-1118.

CER	Limite Indutivo (MVar)	Limite Capacitivo (MVar)
Barra 30	-1,00	2,81
Barra 44	-2,05	11,26
Barra 52	0	25,86

Observa-se que o CER da barra 52 não necessita de capacidade de compensação indutiva em regime permanente. Entretanto, esta capacidade pode ser necessária em regime dinâmico.

Tendo em vista que as faixas de operação dos compensadores estáticos foram estabelecidas, o valor do banco de capacitores e o valor do indutor que compõem estes equipamentos podem ser especificados através de suas configurações (RCT-CF ou RCT-CCT).

A seguir, será realizada uma outra simulação para o ajuste ótimo dos limites dos compensadores estáticos deste sistema considerando-o em operação com carga pesada. Entretanto, nesta simulação as tensões de referência (V_{k0}) serão constantes, ou seja, não serão ajustadas através da metodologia proposta. A Tabela IV.15 apresenta os resultados obtidos desta simulação:

Tabela IV.15 – Análise 2 IEEE-118 : carga pesada sem o ajuste de V_{k0} .

Barra	V_{k0} (pu)	Q_{CER} (MVar)	QA (MVar)
30	0,995	-2,12	-
44	0,985	8,38	-
52	0,957	-4,60	-
22	-	-	7,72
53	-	-	16,61
Σ	-	15,10	24,33

Para possibilitar a convergência deste problema, foi necessária uma alocação (QA) total de 24,33 MVar no sistema, além da compensação (Q_{CER}) total desenvolvida pelos 3 compensadores de 15,10 MVar.

Comparando-se os resultados da Tabela IV.12 com os resultados da Tabela IV.15, verifica-se que o ajuste coordenado dos limites dos compensadores estáticos deste sistema em conjunto com o ajuste ótimo de suas tensões de referência anula o investimento em fontes adicionais de potência reativa (QA), o qual é necessário quando estes limites são ajustados sem o ajuste das tensões destes equipamentos.

IV.4 Sistema Interligado Brasileiro

Este sistema real é composto por 2860 barras, 4486 circuitos e 284 unidades de geração. A análise proposta consiste somente no ajuste ótimo e coordenado das tensões de referência dos 12 compensadores estáticos de reativos existentes neste sistema, não abordando a especificação de novos equipamentos. Por se tratar de um sistema real e de grande porte, foi necessária utilização de uma linguagem computacional de alto desempenho, que utilize técnicas de esparsidade para a solução da matriz hessiana do FPO. Para tanto, a metodologia de ajuste proposta foi implementada em um programa comercial denominado FLUPOT do CEPEL, utilizando-se a linguagem de programação FORTRAN.

Os 12 CERs deste sistema são:

- CER 1: Instalado na barra 5 localizada no município de Barro Alto no Estado de Goiás, sob controle de Furnas, para controle de tensão da barra 159 neste mesmo município em 1,040 pu;
- CER 2: Instalado na barra 6 próxima à cidade de Goiás, sob controle de Furnas, para controle de tensão da barra 71 nesta mesma localidade em 1,017 pu;
- CER 3: Instalado na barra 83 localizada no município de Campos no Estado do Rio de Janeiro, sob controle de Furnas, para controle de tensão desta barra em 1,040 pu;
- CER 4: Instalado na barra 1240 localizada na cidade de Ouro Preto no Estado de Minas Gerais, sob controle da CEMIG, para controle de tensão desta barra em 1,050 pu;
- CER 5: Instalado na barra 1446 localizada na cidade de Cuiabá no Estado de Mato Grosso, sob controle da Eletronorte, para controle de tensão desta barra em 1,000 pu;
- CER 6: Instalado na barra 4221 localizada em Milagres no Estado do Ceará, sob controle da CHESF, para controle de tensão desta barra em 1,036 pu;

- CER 7: Instalado na barra 4225 localizada na cidade de Fortaleza no Estado do Ceará, sob controle da CHESF, para controle de tensão desta barra em 0,995 pu;
- CER 8: Instalado na barra 4244 localizada na cidade de Campina Grande no Estado da Paraíba, sob controle da CHESF, para controle de tensão desta barra em 1,030 pu;
- CER 9: Instalado na barra 4276 localizada em Funil no Estado da Bahia, sob controle da CHESF, para controle de tensão desta barra em 1,010 pu;
- CER 10: Instalado na barra 4332 na cidade de São Luis no Estado do Maranhão, sob controle da Eletronorte, para controle de tensão desta barra em 1,005 pu;
- CER 11: Instalado na barra 4585 localizada em Bom Jesus da Lapa no Estado da Bahia, sob controle da CHESF, para controle de tensão desta barra em 1,010 pu;
- CER 12: Instalado na barra 5282 localizada em Rurópolis no Estado do Pará, sob controle da Eletronorte, para controle de tensão desta barra em 0,970 pu.

Os valores das tensões de controle assim como os demais dados referentes a este sistema foram obtidos de um arquivo de dados no padrão do programa ANAREDE no endereço http://www.ons.org.br/ons/sin/base_de_dados.htm. A Figura IV.10 ilustra o sistema interligado e as localidades destes 12 CERs:

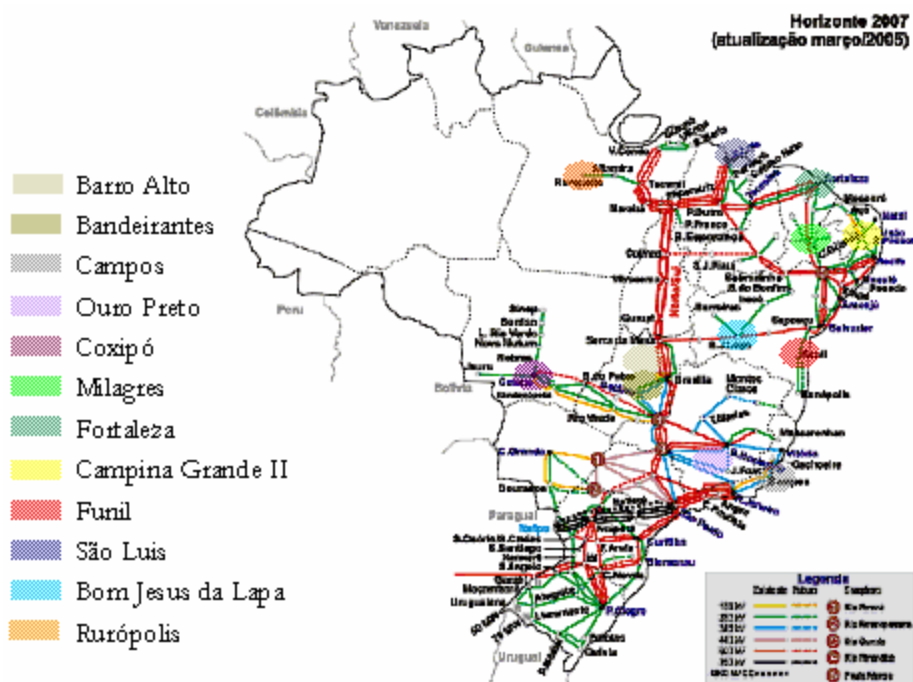


Figura IV.10 – Sistema Interligado Brasileiro e localidades dos CERs.

O ajuste destes 12 compensadores será realizado visando a viabilidade do sistema em regime de contingência. A Tabela IV.16 apresenta a lista das contingências simuladas.

Tabela IV.16 – Lista de contingências Sistema Interligado Brasileiro.

Contingência	Tipo	Local
1	Circuito	4200 – 4600
2	Circuito	1455 – 1444
3	Circuito	1973 – 152
4	Circuito	4587 – 43
5	Circuito	1098 – 141
6	Circuito	4505 – 4506
7	Circuito	4597 – 4052
8	Circuito	4232 – 4732
9	Circuito	4225 – 4218
10	Circuito	4226 – 4526

As simulações consideram este sistema nos níveis normais de carregamento e o custo de alocação de potência reativa (QA) é de 10 US\$/KVAR para todas as barras.

A metodologia de ajuste das tensões de referência (V_{k0}) proposta nesta dissertação será testada neste sistema real através dos resultados obtidos em duas condições de simulação: (i) Condição-1: A simulação é realizada através da metodologia proposta para o ajuste ótimo das tensões de referência (V_{k0}); (ii) Condição-2: A simulação é realizada de maneira tradicional, ou seja, mantendo-se as tensões de referência (V_{k0}) constantes e iguais aos valores especificados para controle.

A Tabela IV.17 apresenta os resultados obtidos da simulação deste sistema na condição-1:

Tabela IV.17 – Resultados do sistema interligado brasileiro : condição-1.

Barra	V_{k0} (pu)	Q_{CER} (MVar)	QA (MVar)
5	1,040	3,7	-
6	1,017	387,5	-
83	1,053	147,1	-
1240	1,017	-92,0	-
1446	0,992	-50,3	-
4221	1,012	-72,4	-
4225	1,048	-32,4	-
4244	1,037	202,4	-
4276	0,988	-99,9	-
4332	1,007	101,4	-
4585	1,051	273,6	-
5282	0,954	21,2	-
69	-	-	-23,7
70	-	-	-76,4
76	-	-	-7,0
126	-	-	9,2
156	-	-	-99,8
1443	-	-	6,6
1911	-	-	-3,8
1913	-	-	-3,9
1915	-	-	-1,4
3015	-	-	-5,2
4127	-	-	29,4
4218	-	-	2,1
4226	-	-	33,4
4227	-	-	1,1
4600	-	-	40,1
4601	-	-	6,9
4605	-	-	3,8
4618	-	-	28,4
6543	-	-	-7,5
8018	-	-	1,6
Σ	-	1483,9	391,3

A última linha desta tabela, (Σ) , apresenta o somatório dos valores absolutos das potências desenvolvidas pelos compensadores estáticos (Q_{CER}) (coluna 3) e das alocações de potência reativa (QA) no sistema (coluna 4).

Estes resultados mostram que para garantir a operação viável deste sistema em regime de contingência, as tensões de referência (V_{k0}) devem ser ajustadas nos valores apresentados na coluna 2. Além da potência reativa total desenvolvida pelos 12 compensadores estáticos (Q_{CER}) , foram ainda necessárias alocações de potência reativa (QA) em diversas barras da rede elétrica. Estas alocações totalizaram um suporte de 391,3 MVar no sistema.

A Tabela IV.18 apresenta os resultados obtidos da simulação deste sistema na condição-2:

Tabela IV.18 – Resultados do sistema interligado brasileiro : condição-2.

Barra	V_{k0} (pu)	Q_{CER} (MVar)	QA (MVar)
5	1,040	3,7	-
6	1,017	387,7	-
83	1,040	86,8	-
1240	1,050	-18,0	-
1446	1,000	-50,3	-
4221	1,036	104,5	-
4225	0,995	140,4	-
4244	1,030	146,4	-
4276	1,010	-69,4	-
4332	1,005	100,8	-
4585	1,010	3,9	-
5282	0,970	24,8	-
69	-	-	-22,1
70	-	-	-79,7
76	-	-	-2,4
126	-	-	5,6
156	-	-	-99,8
1443	-	-	5,9
1911	-	-	-1,9
1913	-	-	-1,9
3015	-	-	-13,1
4127	-	-	37,7
4218	-	-	2,4
4226	-	-	52,2
4227	-	-	1,5
4286	-	-	11,9
4587	-	-	94,8
4600	-	-	6,6
4601	-	-	4,3
4605	-	-	36,3
4686	-	-	4,4
6543	-	-	-7,7
8018	-	-	32,7
Σ	-	1136,7	524,9

Estes resultados mostram que sem o ajuste de V_{k0} foi necessária uma alocação total de 524,9 MVar no sistema. Já com o ajuste deste parâmetro, veja Tabela IV.17, a alocação necessária foi de 391,3 MVar. Sendo assim, este ajuste reduziu o valor da alocação em 133,6 MVar neste sistema. Deste modo, o ajuste da tensão de referência dos 12 compensadores estáticos possibilitou um melhor aproveitamento destes equipamentos e a redução de investimentos em fontes adicionais de potência reativa (QA) no sistema.

Adicionalmente, outras simulações efetuadas neste sistema mostraram que algumas contingências conduzem a não-convergência deste problema. Isto porque algumas contingências são conflitantes, ou seja, não é possível obter um ajuste dos controles e investimentos para atender à ocorrência simultânea das mesmas. Se à lista da Tabela IV.16 for adicionada a retirada do circuito 4588 – 4575, por exemplo, este problema não converge, pois neste caso, esta contingência é conflitante com a contingência 3 desta lista (retirada do circuito 1973 – 152).

IV.5 Conclusões

Este capítulo apresentou os resultados obtidos através da aplicação da metodologia proposta para o ajuste ótimo e coordenado da tensão de referência do CER e para a especificação do mesmo através do ajuste dos seus limites em regime permanente. Para isto, foram utilizados os sistemas testes IEEE-14 e IEEE-118, conhecidos na literatura especializada. Também apresentou o ajuste das tensões de referência dos 12 compensadores estáticos de reativos existentes no sistema elétrico de potência brasileiro interligado.

Para o sistema IEEE-14 foi realizado o ajuste de um CER e para o sistema IEEE-118 realizou-se o ajuste coordenado de três compensadores estáticos, para estes sistemas operando com carga leve e pesada. O ajuste ótimo da tensão de referência do CER possibilitou um melhor aproveitamento deste equipamento, reduzindo a necessidade de investimento em fontes adicionais de potência reativa. Já o ajuste ótimo dos limites permitiu determinar as dimensões mínimas dos compensadores estáticos para a operação viável dos sistemas, implicando em menor custo de investimento. Foram simuladas nestes sistemas retiradas de vários circuitos e perdas de geradores. Verificou-se ainda que o ajuste

ótimo dos compensadores estáticos para regime permanente não prejudicou o desempenho dinâmico destes equipamentos.

Para o sistema interligado brasileiro, o ajuste da tensão de referência dos 12 compensadores estáticos de reativos existentes permitiu uma redução considerável de investimentos em fontes adicionais de potência reativa. Para este ajuste, foram simuladas contingências de vários circuitos da rede elétrica.

Capítulo V

Conclusões

V.1 Conclusões

Esta dissertação apresentou uma nova proposta para o ajuste ótimo e coordenado da tensão de referência do compensador estático de reativos e para a especificação do mesmo em regime permanente. O ajuste ótimo da tensão de referência do CER permitiu a utilização eficiente deste dispositivo, reduzindo a necessidade de investimento em fontes adicionais de suporte de potência reativa nos sistemas elétricos potência estudados. A especificação do CER com o mínimo custo de investimento foi realizada através do ajuste ótimo dos seus limites, permitindo determinar as dimensões mínimas necessárias deste dispositivo. Através do melhor aproveitamento do CER, o ajuste da tensão de referência gerou benefícios econômicos para os sistemas estudados. Estes benefícios foram incrementados quando a este ajuste foi aliado o ajuste dos limites, permitindo a inclusão dos custos de investimento em compensação estática de reativos nas análises dos sistemas. Estes ajustes foram realizados considerando-se contingências nas redes elétricas como retiradas de linhas de transmissão e perdas de geração, visando a operação viável dos sistemas em regime de contingência.

O modelo do CER utilizado representou com fidelidade o comportamento deste dispositivo nos sistemas em regime permanente. Este modelo foi adequadamente modificado de modo a acomodar a metodologia de ajuste proposta. Além disto, utilizou-se uma poderosa ferramenta para a execução dos ajustes propostos, baseada no método de pontos interiores associado à técnica de decomposição matemática de Benders. A metodologia de ajuste proposta foi implementada em um código de produção do CEPEL

(Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), denominado FLUPOT, o que permitiu testá-la em sistemas de dimensões reais, tais como o sistema elétrico de potência brasileiro interligado. Neste sistema, foram ajustadas as tensões de referência dos 12 compensadores estáticos de reativos existentes, o que conduziu a uma economia enorme de investimentos em suporte de potência reativa.

Além do sistema brasileiro, a metodologia de ajuste proposta foi testada nos sistemas IEEE-14 e IEEE-118. Estes sistemas foram simulados em condições extremas de carregamento a fim de determinar as tensões de referência dos compensadores estáticos e as faixas de operação dos mesmos em cada uma destas condições operativas. Em todos eles, o ajuste gerou benefícios econômicos através da redução de investimentos em suporte de potência reativa.

Foi verificado que o ajuste proposto da tensão de referência do CER em regime permanente não prejudica o desempenho dinâmico deste equipamento, através de simulações nos sistemas IEEE-14 e IEEE-118. Nestas simulações, foi constatada uma melhoria dos perfis de tensão das barras controladas em regime de contingência. Além disto, o tempo de estabilização destas tensões em decorrência das contingências simuladas não foi alterado devido ao ajuste proposto.

Deste modo, tendo em vista os resultados obtidos, verifica-se que o ajuste dos parâmetros do CER proposto nesta dissertação mostrou-se como uma poderosa ferramenta para operação e planejamento dos sistemas elétricos de potência, resultando em economia de investimentos e em redução dos custos operacionais em regime permanente.

V.2 Propostas de desenvolvimentos futuros

Seguindo a linha de pesquisa desenvolvida nesta dissertação e tendo em vista os resultados obtidos, alguns tópicos tornam-se promissores como propostas de trabalhos futuros:

- Localização ótima dos compensadores estáticos de reativos no sistema: A localização ótima dos compensadores estáticos de reativos associada ao ajuste ótimo destes dispositivos proposto nesta dissertação pode conduzir a benefícios ainda maiores no que se

refere à redução de investimentos em suporte de potência reativa. Isto porque permitiria determinar os locais de maior de necessidade deste tipo de suporte e assim utilizar o CER de maneira mais eficiente.

- Modelagem das curvas de capacidade das unidades de geração: Verificou-se que o ajuste da tensão de referência do CER conduz a um redespacho de geração ativa e reativa das unidades geradoras dos sistemas. Entretanto, não foi abordado nesta dissertação se estes novos valores de geração são realizáveis do ponto de vista operacional. Para tanto, devem ser consideradas as curvas de capacidade das unidades de geração no problema de ajuste proposto.

- Minimização das perdas: Verificou-se que o ajuste da tensão de referência do CER permitiu reduzir as perdas no sistema, mesmo não sendo este um dos objetivos deste ajuste. Sendo assim, a minimização de perdas no sistema como um dos objetivos do ajuste do CER conduziria a uma redução mais significativa das mesmas, gerando benefícios ainda maiores para o sistema. Para isto, é necessário incluir a parcela correspondente à minimização de perdas na função objetivo do problema de FPO proposto.

- Ajuste do CER em regime dinâmico: O ajuste do CER no sistema elétrico de potência em regime dinâmico através do ajuste dos autovalores deste sistema poderia complementar o ajuste em regime permanente proposto neste trabalho. Além disto, também permitiria determinar o ajuste de outros parâmetros de extrema importância para o desempenho dinâmico do CER, tais como a taxa máxima de resposta permissível para que não ocorram problemas de estabilidade na malha de controle e de ressonâncias com a impedância do sistema.

Apêndice A

Metodologia Primal-Dual de Pontos Interiores

A.1 Introdução

Este apêndice descreve os aspectos computacionais da metodologia primal-dual de pontos interiores [57][58][59] na resolução de problemas de fluxo de potência ótimo (FPO). A motivação desta aplicação deve-se ao bom desempenho mostrado pelos métodos de pontos interiores em programação linear de grande porte, assim como em programação quadrática e convexa. O algoritmo implementado resolve o sistema de equações resultante da formulação primal-dual pelo método de Newton-Raphson com critérios específicos de convergência e ajuste do parâmetro barreira.

A.2 Método de Pontos Interiores

Na década de 80, Karmarkar [60] publicou um algoritmo de “Métodos Projetados” para a resolução de problemas de programação linear. O algoritmo desenvolvido por Karmarkar é significativamente diferente do tradicional método SIMPLEX de George Dantzig. Enquanto o SIMPLEX resolve um problema de programação linear começando em um ponto extremo ao longo da região de solução e salta para um outro ponto extremo melhor e pára, finalmente, em um ponto extremo ótimo, o método de Karmarkar raramente visita pontos extremos antes que um ponto ótimo seja alcançado. Assim, o algoritmo de Karmarkar encontra soluções viáveis no

interior da região de solução, evitando desta forma a complexidade exponencial derivada dos vértices de solução [61]. Devido ao procedimento de busca da solução proposto por Karmarkar, este método foi chamado de “Método de Pontos Interiores” (MPI).

A Figura A.1 mostra como os dois métodos aproximam-se da solução ótima (x_{ot}). Neste exemplo, o algoritmo de MPI requer aproximadamente a mesmo número de iterações que o método SIMPLEX.

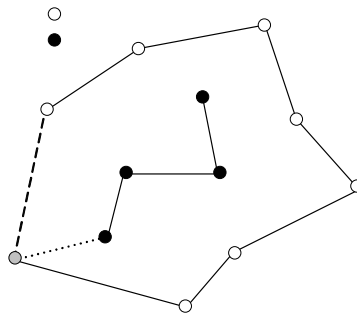


Figura A.1 - Simplex X MPI.

Existe hoje uma experiência acumulada que permite dizer que o método de pontos interiores é competitivo ao SIMPLEX em uma grande quantidade de problemas práticos de programação linear, principalmente em relação a problemas de grande porte. Desta forma, a abordagem do MPI tem atraído a atenção de inúmeros pesquisadores de diversas áreas.

A.3 Formulação do Problema de FPO

Um problema de FPO pode ser formulado como genericamente como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } f(x) \\
 & \text{s.a} \\
 & h(x) = 0 \quad (\lambda) \\
 & l \leq x \leq u \quad (\pi)
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

Onde:

$f(x)$ Função objetivo;

$h(x)$ Restrições referentes às equações de balanço de potência e as restrições funcionais;

l, u Limites inferiores e superiores sobre as variáveis de controle, variáveis de estado e folgas associadas às restrições de canalização.

Com a inclusão de variáveis de folga nas restrições de canalização, o sistema (A.1) resulta no equivalente a:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } f(x) \\
 & \text{s.a} \\
 & h(x) = 0 \quad (\lambda) \\
 & x - sl = l \quad (\pi_l) \\
 & x + su = u \quad (\pi_u) \\
 & sl, su \geq 0
 \end{aligned} \tag{A.2}$$

Podem ser observados que as restrições de desigualdade que aparecem são do tipo (“ ≥ 0 ”), ou seja, as restrições de desigualdade originais foram transformadas em variáveis não negativas, sendo tratadas através de penalização interna. Desta forma, este tipo de restrição pode ser incluída ao problema através de uma função penalidade conhecida como barreira logarítmica ($-\sum \ln(s)$). Com a inclusão da função barreira logarítmica, o

problema original é transformado em uma seqüência de problemas parametrizados pelo parâmetro barreira (μ). Assim, o problema primal (A.2) é escrito como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } f(x) - \mu \sum_{i=1}^n \ln(sl_i) - \mu \sum_{i=1}^n \ln(su_i) \\
 & \text{s.a} \\
 & h(x) = 0 \quad (\lambda) \\
 & x - sl = l \quad (\pi_l) \\
 & x + su = u \quad (\pi_u)
 \end{aligned} \tag{ A.3 }$$

Onde:

N Número de variáveis que possuem restrições de canalização.

Observe que para cada valor do parâmetro barreira, tem-se um novo problema de otimização. Resolver (A.3) é equivalente a achar um ponto no interior da região de solução. O conjunto de pontos obtidos para cada valor de μ define a trajetória de convergência no interior da região viável em relação às restrições de canalização.

A condição de otimalidade do problema original (A.2) será alcançada quando $\mu = 0$. Por este motivo, durante o processo iterativo, deve ser imposto um decréscimo do parâmetro barreira ($\mu_{k+1} < \mu_k$) de tal forma que:

$$\mu_k \rightarrow 0 \text{ quando } k \rightarrow +\infty$$

Assim, quando $\mu = 0$, a função objetivo do problema (A.3) torna-se a função objetivo do problema que se deseja resolver, ou seja, torna-se o problema (A.1). Os processos adotados para o decréscimo do parâmetro barreira dão origem a varias metodologias de pontos interiores. Nesta dissertação, será abordada a metodologia primal-dual de pontos interiores.

Com o objetivo de transformar um determinado problema de otimização sujeito a apenas restrições de igualdade (A.3) em um problema de otimização sem restrições, utiliza-se a função lagrangeana. Esta função é originada através de uma combinação linear entre as restrições do problema (A.3), onde os coeficientes desta combinação são os multiplicadores de Lagrange $(\lambda, \pi_l \text{ e } \pi_u)$. Assim, a função lagrangeana referente ao problema (A.3) pode ser escrita como:

$$L = f(x) - \mu \sum_{i=1}^n \ln(sl_i) - \mu \sum_{i=1}^n \ln(su_i) - \lambda^T \cdot h(x) - \pi_l^T \cdot (x - sl - l) - \pi_u^T \cdot (x + su - u) \quad (\text{A.4})$$

A.4 Resolução do Problema

Para atingir a otimalidade do problema (A.4) deve-se derivar a equação lagrangeana em relação as suas variáveis (primais e duais) e igualar a zero. Fazendo isto tem-se:

$$(\nabla L_x) \quad \nabla f(x) - \lambda^T \nabla h(x) - \pi_1^T - \pi_2^T = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$(\nabla L_\lambda) \quad h(x) = 0 \quad (\text{A.6})$$

$$(\nabla L_{\pi_l}) \quad x - sl - l = 0 \quad (\text{A.7})$$

$$(\nabla L_{\pi_u}) \quad x + su - u = 0 \quad (\text{A.8})$$

$$(\nabla L_{sl}) \quad \mu e = S_l \pi_l \quad (\text{A.9})$$

$$(\nabla L_{su}) \quad \mu e = -S_u \pi_u \quad (\text{A.10})$$

Onde:

S_l e S_u Matrizes diagonais cujos elementos diagonais são as componentes dos vetores s e su respectivamente e $e^T = [1, \dots, 1]$.

Estas seis equações vetoriais determinam a otimalidade do problema (A.3). Observe que os critérios do sinal de π_l e π_u são deduzidos de (A.9) e (A.10), dada a positividade de S_l, S_u, μ . Aplicando a método de Newton-Raphson ao sistema de equações (A.5) a (A.10) para a determinação de $\Delta x, \Delta s_l, \Delta s_u, \Delta \lambda, \Delta \pi_l$ e $\Delta \pi_u$ tem-se:

$$(\nabla^2 f(x) - \lambda \nabla^2 h(x)) \Delta x - \nabla h(x) \Delta \lambda - \Delta \pi_l - \Delta \pi_u = -t \quad (A.11)$$

$$\nabla^T h(x) \Delta x = -h(x) \quad (A.12)$$

$$\Delta x - \Delta s_l = -(x - s_l - l) \quad (A.13)$$

$$\Delta x + \Delta s_u = -(x + s_u - u) \quad (A.14)$$

$$-\Pi_l \Delta s_l - S_l \Delta \pi_l = -(\mu e - S_l \pi_l) \quad (A.15)$$

$$\Pi_u \Delta s_u - S_u \Delta \pi_u = -(\mu e + S_u \pi_u) \quad (A.16)$$

Onde:

Π_l e Π_u Matrizes diagonais cujos elementos diagonais são as componentes dos vetores π_l e π_u respectivamente e, $t = \nabla f(x) - \lambda^T \nabla h(x) - \pi_l - \pi_u$.

Considerando em (A.13) e (A.14) que os pontos são viáveis, isto é, que as variáveis estejam dentro da região de solução, tem-se que:

$$\Delta s_l - \Delta x = 0 \quad (\text{A.17})$$

$$\Delta s_u + \Delta x = 0 \quad (\text{A.18})$$

Substituindo as equações acima em (A.15) e (A.16), obtém-se:

$$\Delta \pi_l = +S_l^{-1}(\mu e - S_l \pi_l - \Pi_l \Delta x) \quad (\text{A.19})$$

$$\Delta \pi_u = -S_u^{-1}(\mu e - S_u \pi_u - \Pi_u \Delta x) \quad (\text{A.20})$$

Substituindo as equações (A.9) e (A.10) nas equações (A.19) e (A.20) respectivamente, tem-se:

$$\Delta \pi_l = +S_l^{-1}(-\Pi_l \Delta x) \quad (\text{A.21})$$

$$\Delta \pi_u = S_u^{-1}(\Pi_u \Delta x) \quad (\text{A.22})$$

Com estas substituições, as incógnitas do problema são Δx e $\Delta \lambda$. Substituindo as expressões de $\Delta \pi_l$ e $\Delta \pi_u$ em (A.11), tem-se:

$$(\nabla^2 f(x) - \lambda^T \nabla^2 h(x) \Delta \pi_l + S_l^{-1} \Pi_l - S_u^{-1} \Pi_u) \Delta x - \nabla h(x) \Delta \lambda = Z \quad (\text{A.23})$$

com:

$$Z = -(\nabla f(x) - \lambda^T \nabla h(x)) + \mu(S_l^{-1}e - S_u^{-1}e) \quad (\text{A.24})$$

Desta forma, o sistema a ser resolvido, dado pelas equações (A.24) e (A.12), é equivalente a:

$$\begin{bmatrix} H & -J^T \\ -J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z \\ h(x) \end{bmatrix} \quad (\text{A.25})$$

com:

$$H = \nabla^2 f(x) - \lambda^T \nabla^2 h(x) + S_l^{-1}\Pi_l - S_u^{-1}\Pi_u \quad (\text{A.26})$$

$$J = \nabla h(x) \quad (\text{A.27})$$

Uma vez calculados Δx e $\Delta \lambda$, os vetores Δs_l e Δs_u são obtidas a partir de (A.17) e (A.18) e os vetores $\Delta \pi_l$ e $\Delta \pi_u$ são obtidos a partir de (A.21) e (A.22). Observe que H e Z representam a Hessiana e o Jacobiano da função lagrangeana associada ao problema somente com restrições de igualdade e mais um termo contendo informações correspondentes ao termo barreira sendo: $(S_l^{-1}\Pi_l - S_u^{-1}\Pi_u)$ em H e $\mu(S_l^{-1}e - S_u^{-1}e)$ em Z.

A.5 Atualização das Variáveis

Diferentemente do fluxo de potência convencional, os incrementos obtidos pela resolução do sistema (A.25) não são incrementados diretamente em sua respectivas variáveis. Assim, é calculado um passo de otimização (α_p) para as variáveis primais e um passo (α_d) para as variáveis duais, dados pelas expressões:

$$\alpha_p = \min \left[\min_{\Delta s < 0} \frac{s_l}{|\Delta s_l|}, \min_{\Delta s < 0} \frac{s_u}{|\Delta s_u|}, 1 \right] \quad (\text{A.28})$$

$$\alpha_d = \min \left[\min_{\Delta \pi < 0} \frac{\pi_l}{|\Delta \pi_l|}, \min_{\Delta \pi < 0} \frac{\pi_u}{|\Delta \pi_u|}, 1 \right] \quad (\text{A.29})$$

Estes passos têm por objetivo não deixar que nenhuma variável, primal ou dual, tenha um valor de incremento (Δ) que a faça violar suas restrições de canalização. Assim, calculados os passos de otimização, atualiza-se as variáveis primais e duais do problema, determinando o próximo ponto da trajetória, onde é utilizado um fator de redução (σ) de passo para evitar singularidades na barreira logarítmica, o valor utilizado na prática para este fator é de 0,99995.

Depois de resolvido o sistema (A.25), utiliza-se as expressões (A.17) e (A.18) para determinar os Δs e através de (A.21) e (A.22), obtém-se os $\Delta \pi$. Então, os novos valores de x, s, λ e π podem ser calculados por:

$$x^{k+1} = x^k + \sigma \alpha_p \Delta x \quad (\text{A.30})$$

$$s^{k+1} = s^k + \sigma \alpha_p \Delta s \quad (\text{A.31})$$

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \sigma \alpha_d \Delta \lambda \quad (\text{A.32})$$

$$\pi^{k+1} = \pi^k + \sigma \alpha_d \Delta \pi \quad (\text{A.33})$$

A.6 Atualização do Parâmetro Barreira e do Gap

Para o processo de otimização convergir para uma resposta correta o parâmetro μ que multiplicada a função barreira logarítmica deve tender a zero no decorrer das iterações,

logo ele deve ser atualizado a cada iteração segundo as equações abaixo:

$$gap = \sum sl \cdot \pi_l - \sum su \cdot \pi_u \quad (A.34)$$

$$\mu = \beta \cdot \frac{gap}{2n} \dots (0 < \beta < 1) \quad (A.35)$$

O valor do gap é um parâmetro de “distância” das variáveis em relação à solução ótima do problema. Assim, o valor da gap vai decrescendo durante o processo e é mínimo quando a solução ótima é alcançada.

O parâmetro β tem como objetivo modificar a direção de busca e com isto, reduzir o número de iteração do FPO. O valor ótimo de β depende do sistema considerado e das condições iniciais do problema. Assim, nesta dissertação optou-se pela utilização de um valor fixo $\beta = 0,1$, uma vez que este valor é muito utilizado na prática [62].

A.7 Algoritmo de Solução do MPI

O algoritmo de solução resultante dos passos descritos anteriormente pode ser resumido como:

Inicialização das variáveis primais e duais.

Montagem da função lagrangeana (A.4).

Cálculo dos termos da matriz Hessiana (A.26) e (A.27) e dos termos do vetor independente (A.6) e (A.24).

Resolução do sistema de equações (A.25).

Cálculo do passo primal (A.28) e dual (A.29).

Atualização das variáveis do problema (A.30) a (A.33).

Cálculo do GAP (A.34) e atualização do parâmetro barreira (A.35).

Teste de otimalidade:

Se $(\mu \leq 5.10^{-4}, gap \leq 5.10^{-4}, \Delta p \leq 1MW, \Delta q \leq 1MW)$ PARE

Senão VOLTE ao passo 2.

onde:

Δp Resíduo do balanço de potência ativa em cada barra do sistema.

Δq Resíduo do balanço de potência reativa em cada barra do sistema.

Se o valor do gap se torna maior que um valor máximo (1×10^8), o processo iterativo deve ser interrompido, indicando que o problema é provavelmente inviável ou mal condicionado.

Apêndice B

Decomposição Matemática de Benders

B.1 Introdução

A decomposição matemática de Benders é uma metodologia para solução de problemas de múltiplas variáveis e de dimensões elevadas. A solução clássica destes problemas, considerando todas as variáveis simultaneamente, exige um grande esforço computacional, inviabilizando, desta forma, tal procedimento. Esta decomposição consiste no particionamento das variáveis, dividindo o problema original em subproblemas de menores dimensões e estabelecendo um fluxo de informações entre eles.

A decomposição de Benders é aplicada em diversos estudos de otimização nos quais se pretende otimizar um índice de desempenho ou obter uma solução viável. Dentre os estudos em que o objetivo é obter uma solução ótima, cita-se o problema de coordenação hidrotérmica cuja finalidade é otimizar o uso dos recursos energéticos. Dentre os estudos de viabilidade destaca-se o problema de análise de contingências em sistemas elétricos de potência cuja finalidade é determinar as ações de ajustes e investimentos necessários para garantir a operação viável do sistema, quando submetido a distúrbios ou falhas. Neste apêndice é mostrada apenas a formulação da decomposição de Benders para estudos de viabilidade, que é a aplicação abordada neste trabalho.

B.2 Formulação Matemática

Dado um problema de otimização não-linear da forma:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f_1(y_1, z_s) + f_2(y_2) && \text{(B.1)} \\ & \text{s.a. } g_1(y_1, z_s) \geq b_1 \\ & \quad g_2(y_2, z_s) \geq b_2 \end{aligned}$$

Este problema pode ser particionado em dois subproblemas, como segue:

Subproblema 1:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f_1(y_1, z_s) && \text{(B.2)} \\ & \text{s.a. } g_1(y_1, z_s) \geq b_1 \end{aligned}$$

Subproblema 2:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f_2(y_2, z_s^*) && \text{(B.3)} \\ & \text{s.a. } g_2(y_2, z_s^*) \geq b_2 \quad (\pi_2) \end{aligned}$$

Onde:

- y_1, y_2 Variáveis que podem assumir valores distintos nos subproblemas 1 e 2;
- z_s Controle presente no subproblema 1;
- z_s^* Valor do controle z_s calculado no subproblema 1 e mantido constante no subproblema 2;

$f_1(y_1, z_s)$ Função objetivo do subproblema 1;

$f_2(y_2, z_s)$ Função objetivo do subproblema 2;

π_2 Valor do coeficiente de Lagrange associado ao subproblema 2;

$g_1(y_1, z_s)$ Restrição do subproblema 1;

$g_2(y_2, z_s)$ Restrição do subproblema 2.

Da execução do subproblema 2, monta-se uma restrição que deve ser adicionada ao subproblema 1. Esta restrição é denominada corte de Benders, mostrada a seguir:

$$\pi_2 \cdot Ez_s \cdot z_s \geq w_2 + \pi_2 \cdot Ez_s \cdot z_s^* \quad (\text{B.4})$$

Onde:

Ez_s Derivada parcial da restrição $g_2(y_2, z_s^*)$ em relação a z_s^* ;

w_2 Valor da função objetivo obtido do subproblema 2.

Expandindo-se a equação (B.4) para mais de um parâmetro z_s^* surgindo em uma ou mais restrições do subproblema 2, esta equação assume a forma:

$$\sum_{s \in \Omega_{z_s}} \left[\sum_{r \in \Omega_{z_r}} (\pi_{2r} \cdot Ez_{sr}) \cdot z_s \right] \geq w_2 + \sum_{s \in \Omega_{z_s}} \left[\sum_{r \in \Omega_{z_r}} (\pi_{2r} \cdot Ez_{sr}) \cdot z_s^* \right] \quad (\text{B.5})$$

Onde:

Ω_{z_S} Conjunto de controles z_s presentes no subproblema 1;

Ω_{z_R} Conjunto de restrições presentes no subproblema 2 que contém o parâmetro z_s^* ;

π_{2r} Valor do coeficiente de Lagrange obtido do subproblema 2 associado com a restrição r ;

Ez_{sr} Derivada parcial da restrição r em relação a z_s .

Sendo assim, o conjunto de equações (B.2) com o corte de Benders assume a forma:

$$\text{Min } f_1(y_1, z_s) \tag{B.6}$$

$$\text{s.a. } g_1(y_1, z_s) \geq b_1$$

$$\sum_{s \in \Omega_{z_S}} \left[\sum_{r \in \Omega_{z_R}} (\pi_{2r} \cdot Ez_{sr}) \cdot z_s \right] \geq w_2 + \sum_{s \in \Omega_{z_S}} \left[\sum_{r \in \Omega_{z_R}} (\pi_{2r} \cdot Ez_{sr}) \cdot z_s^* \right]$$

Apêndice C

Alterações nos Custos de Potência Reativa

C.1 Introdução

Este apêndice apresenta a composição dos custos de investimento em potência reativa no SEP. Primeiramente será detalhado o custo associado ao compensador estático de reativos a fim de adequá-lo à respectiva variável de investimento. Este custo representa o preço da potência reativa dos capacitores e indutores que compõem o CER. Posteriormente será detalhado o custo associado à alocação de potência reativa, através da instalação de bancos de capacitores e/ou indutores. Esta alocação pode ser necessária ao sistema para evitar interrupções no fornecimento de energia e violações dos limites estabelecidos.

C.2 Alteração do Custo do CER

A função objetivo do problema de FPO associada ao investimento em potência reativa no sistema é dada por:

$$f(x) = \sum_{i \in C} c_{QA_i} \cdot |QA_i| + \frac{1}{2} \cdot \sum_{\Omega_{CER}} c_{CER} \cdot b_{CER}^2 \quad (C.1)$$

Onde:

- QA_i Representa a alocação de potência reativa na barra i , através da instalação de bancos de capacitores e/ou indutores;
- cQA_i Representa o custo de alocação de potência reativa na barra i ;
- c_{CER} Representa o custo de investimento em compensador estático de reativos;
- Ω_{CER} Representa o conjunto de todos os CERs do sistema;
- C Representa o conjunto de barras candidatas à alocação de potência reativa.

O custo associado ao CER c_{CER} é dado em (US\$/KVA_r) e a respectiva variável de investimento é a sua susceptância b_{CER} dada em pu-mhos. Além disto em (C.1) c_{CER} é multiplicado pelo quadrado de b_{CER} e o investimento é amortizado em n anos. Desta forma, torna-se necessária a obtenção do custo c_{CER} em $US\$/ pu - mho^2 .ano$.

O custo do CER adotado nesta dissertação é de 10 US\$/KVA_r a serem amortizados em cinco anos com uma taxa de 10% ao ano, o que significa um custo anual de instalação de 2,64 mil US\$/MVA_r.ano. Este valor foi obtido no endereço http://www.iesa.com.br/financeiro/financeiro_iesa.asp.

Como o custo do CER está em função de MVA_r, pode-se calcular o módulo da potência reativa desenvolvida pelo compensador a fim de se obter este custo em US\$/ano. Esta potência em módulo é dada por:

$$|Q_{CER}(MVA_r)| = [b_{CER}(pu) \cdot V_i^2(pu)] \cdot PB \quad (C.2)$$

Onde:

Q_{CER}	Representa a potência reativa desenvolvida pelo CER;
V_t	Representa a tensão da barra terminal do CER;
PB	Representa a potência base do sistema.

Considerando-se $V_t = 1,0 pu$ e $PB = 100 MVA$, o módulo da potência reativa desenvolvida pelo CER é função de b_{CER} , ou seja:

$$|Q_{CER}(MVar)| = 10^2 \cdot b_{CER}(pu) \quad (C.3)$$

Multiplicando-se o custo c_{CER} (2,64 mil US\$/MVar.ano) pelo módulo da potência desenvolvida pelo mesmo, equação (C.3), obtém-se:

$$c_{CER} = 2,64 \cdot 10^5 \cdot b_{CER}(pu) \frac{US\$}{ano} \quad (C.4)$$

Dividindo-se o custo c_{CER} em (C.4) pela susceptância $b_{CER}(pu)$:

$$c_{CER} = 2,64 \cdot 10^5 \frac{US\$}{pu - mho.ano} \quad (C.5)$$

O custo dado por (C.5) é linear, pois a função objetivo associada ao investimento em compensação estática de reativos (US\$/ano) pode ser obtida através da multiplicação deste custo pelo valor susceptância b_{CER} (pu-mho).

Manipulando-se o custo dado por (C.5) conforme (C.6):

$$c_{CER} = 2,64 \cdot 10^5 \frac{US\$}{pu - mho^2 \cdot ano} \cdot pu - mho \quad (C.6)$$

A função objetivo citada é calculada como:

$$c_{CER} \cdot b_{CER} = 2,64 \cdot 10^5 \frac{US\$}{pu - mho^2 \cdot ano} \cdot pu - mho^2 \quad (C.7)$$

O custo procurado ($US\$/ pu - mho^2 \cdot ano$) tem o mesmo valor que o determinado em (C.5), visto que a função objetivo obtida através da multiplicação deste custo em $US\$/ pu - mho^2 \cdot ano$ pelo quadrado da susceptância b_{CER} em $pu - mho^2$ também resulta na expressão (C.7). Logo:

$$c_{CER} = 2,64 \cdot 10^5 \frac{US\$}{pu - mho^2 \cdot ano} \quad (C.8)$$

Na função objetivo dada por (C.1) o produto $c_{CER} \cdot b_{CER}^2$ é dividido por 2. Desta forma, o custo dado por (C.8) deve ser multiplicado por 2, resultando em:

$$c_{CER} = 5,28 \cdot 10^5 \frac{US\$}{pu - mho^2 \cdot ano} \quad (C.9)$$

Entretanto, este custo é muito elevado e afeta o processo de convergência do FPO. A fim de contornar esta dificuldade, os custos envolvidos na solução deste problema são divididos por uma base de custo no valor de 10^5 , conforme equação (C.10):

$$c_{CER} = 5,28 \frac{US\$}{pu - mho^2 \cdot ano} \quad (C.10)$$

C.3 Alteração do Custo de Alocação

O custo associado à alocação de potência reativa cQA_i é dado em (US\$/KVar) enquanto que a respectiva variável de investimento QA_i é dada em pu-MVar. Além disto, o investimento em alocação é amortizado em n anos. Desta forma, é necessária a obtenção do custo cQA_i em $US\$/ (pu - MVar \cdot ano)$.

Assim como o custo associado ao CER, o custo de alocação de potência reativa é de 10 US\$/KVar a serem amortizados em cinco anos com uma taxa de 10% ao ano, o que significa um custo anual de instalação de 2,64 mil US\$/MVar.ano.

Como o custo de alocação está em função de MVar, pode-se calcular o módulo da potência reativa alocada a fim de se obter este custo em US\$/ano. Esta potência em módulo é dada por:

$$|QA_i(MVar)| = [QA_i(pu)] \cdot PB \quad (C.11)$$

Multiplicando-se o custo cQA_i (2,64 mil US\$/MVar.ano) pelo módulo da potência alocada em MVar, equação (C.11), obtém-se:

$$cQA_i = 2,64 \cdot 10^5 \cdot QA_i(pu) \frac{US\$}{ano} \quad (C.12)$$

Dividindo-se o custo cQA_i em (C.12) pela potência reativa alocada $QA_i(pu)$, obtém-se:

$$cQA_i = 2,64 \cdot 10^5 \frac{US\$}{pu - MVar.ano} \quad (C.13)$$

Passando o custo dado por (C.13) para a base de custo adotada (10^5), obtém-se:

$$cQA_i = 2,64 \frac{US\$}{pu - MVar.ano} \quad (C.14)$$

Apêndice D

Sistemas Utilizados

D.1 Introdução

Este apêndice apresenta os dados do sistema elétrico de potência IEEE-14 e os dados complementares do sistema IEEE-118 e do sistema elétrico de potência brasileiro, todos utilizados nesta dissertação. Para o IEEE-14 serão apresentadas três tabelas: (i) dados de geração e carga; (ii) dados de circuitos; (iii) dados dos compensadores estáticos de reativos. Já para o sistema IEEE-118 e o sistema interligado brasileiro, será apresentada a lista de contingências.

D.2 Sistema IEEE-14

Tabela D.1 – Dados de geração e carga IEEE-14.

Barra	Capacidade de Geração (MW)	Capacidade de Geração (MVar)		Carga		Alocação de Potência Reativa (MVar)
		Indutiva	Capacitiva	Ativa	Reativa	
1	500	-9999,0	9999,0	0,0	0,0	-
2	100	-40,0	50,0	21,7	12,7	-
3	100	0,0	40,0	94,2	19,0	-
4	-	-	-	47,8	-3,9	-
5	-	-	-	7,6	1,6	-
6	100	-6,0	24,0	11,2	7,5	-
7	-	-	-	0,0	0,0	-
8	100	-6,0	24,0	0,0	0,0	-
9	-	-	-	29,5	16,6	19,0
10	-	-	-	9,0	5,8	-
11	-	-	-	3,5	1,8	-
12	-	-	-	6,1	1,6	-
13	-	-	-	13,5	5,8	-
14	-	-	-	14,9	5,0	-

Tabela D.2 – Dados de circuitos IEEE-14.

Circuito		Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância em Derivação (%)	Tape
1	2	1,938	5,917	5,280	-
1	5	5,403	22,304	4,920	-
2	3	4,699	19,797	4,380	-
2	4	5,811	17,632	3,400	-
2	5	5,695	17,388	3,460	-
3	4	6,701	17,103	1,280	-
4	5	1,335	4,211	0,000	-
4	7	0,000	20,912	0,000	0,978
4	9	0,000	55,618	0,000	0,969
5	6	0,000	25,202	0,000	0,932
6	11	9,498	19,890	0,000	-
6	12	12,291	25,581	0,000	-
6	13	6,615	13,027	0,000	-
7	8	0,000	17,615	0,000	-
7	9	0,000	11,001	0,000	-
9	10	3,181	8,450	0,000	-
9	14	12,711	27,038	0,000	-
10	11	8,205	19,207	0,000	-
12	13	22,092	19,988	0,000	-
13	14	17,093	34,802	0,000	-

Tabela D.3 – Dados do compensador estático de reativos IEEE-14.

CER	Barra Terminal	Barra Controlada	Limites de Compensação (MVar)	
			Indutiva	Capacitiva
1	4	9	30,0	30,0

D.3 Sistema IEEE-118

Tabela D.4 – Dados dos compensadores estáticos de reativos IEEE-118.

CER	Barra Terminal	Barra Controlada	Limites de Compensação (MVar)	
			Indutiva	Capacitiva
1	30	17	60,0	60,0
2	44	44	60,0	60,0
3	52	52	60,0	60,0

D.4 Sistema Interligado Brasileiro

Tabela D.5 – Dados dos compensadores estáticos de reativos Brasil.

CER	Barra Terminal	Barra Controlada	Limites de Compensação (MVar)	
			Indutiva	Capacitiva
1	5	159	22,0	33,0
2	6	71	50,0	100,0
3	83	83	60,0	220,0
4	1240	1240	86,0	100,0
5	1446	1446	50,0	70,0
6	4221	4221	70,0	100,0
7	4225	4225	140,0	200,0
8	4244	4244	0,0	200,0
9	4276	4276	100,0	200,0
10	4332	4332	100,0	400,0
11	4585	4585	250,0	250,0
12	5282	5282	70,0	150,0

Referências Bibliográficas

- [1] M. R. IRAVANI, L. P. L. DANDENO, D. MARATUKULAM, “Applications of Static Phase Shifters in Power Systems”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, pp. 1600-1608, July 1994.
- [2] N. G. HINGORANI, “Flexible AC Transmission”, IEEE Spectrum, Vol. 30, pp. 40-45, April 1993.
- [3] X.-P. ZHANG, E.J. HANDSCHIN, “Optimal Power Flow Control by Converter Based FACTS Controllers”, AC-DC Power Transmission, 2001. Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 485), 28-30, pp. 250-255, November 2001.
- [4] N. G. HINGORANI, “High Power Electronics and Flexible AC Transmission System”, IEEE Power Engineering Review, Vol. 8, No. 7, pp. 3-4, July 1988.
- [5] N. G. HINGORANI, L. GYUGI, “Understanding FACTS”, The Institution of Electrical and Electronics Engineers, 1999.
- [6] E. J. OLIVEIRA, J. L. R. PEREIRA, I. C. S. JUNIOR, P. A. N. GARCIA, “Wheeling Cost Influence in Hydrothermal Dispatch and Series Compensation Allocation”, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 26/2, pp. 97-102, 2004.
- [7] IEEE SPECIAL STABILITY CONTROLS WORKING GROUP, “Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation”, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 9, pp. 229-240, February 1994.
- [8] E. J. OLIVEIRA, “FACTS: Alocação Ótima e Impacto no Preço da Transmissão”, Proposta de Tese de Doutorado - EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, Brasil, Novembro 1997.
- [9] “The Future of Transmission - Switching to Silicon”, EPRI Journal, Vol.14, No.6, pp. 5-13, June 1989.
- [10] L. GYUGI, “Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators”, Proceedings of the IEEE, Vol. 76, No. 4, April 1988.

- [11] P. KUNDUR, “Power System Stability and Control”, Mc Graw Hill, Inc., 1993.
- [12] M. MOGHAVVEMI, M. O. FARUQUE, “Effects of FACTS Devices on Static Voltage Stability”, TENCON 2000, Proceedings, Vol.: 2, pp. 357-362, September 2000.
- [13] M. NOROOZIAN, N. A. PETERSSON, B. THORVALDSON, A. B. NILSON, C. W. TAYLOR, “Benefits of SVC and STATCOM for Electric Utility Application”, Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003, IEEE PES, Vol.: 3, pp. 1143-1150, September 2003.
- [14] A. C. S. LIMA, “Modelagem Digital de Compensadores Estáticos a RCT com Capacitores Fixos Utilizando o EMTP”, Projeto Submetido à UFRJ Como Parte dos Requisitos Para a Obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista, UFRJ, Rio de Janeiro, Fevereiro 1995.
- [15] E. LERCH, D. POVH, “Performance of FACTS Equipament in Meshed System”, IV SEPOPE, Foz do Iguaçu, Brasil, maio 1994.
- [16] L. GERIN-LAJOIE, G. SCOTT, S. BREAUULT, E. V. LARSEN, D. H. BAKER, A. F. IMECE, “Hydro-Quebec Multiple SVC Application Control Stability Study”, Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol.: 5, Issue: 3, pp. 1543-1551, July 1990.
- [17] S. BOSHOFF, P. V. GOOSEN, D. A. MARSHALL, U. KLEYENSTUBER, “Static VAR Compensation in a Southern African Grid”, AFRICON '92 Proceedings., 3rd AFRICON Conference, 22-24, pp. 147-149, September 1992.
- [18] N. T. HAWKINS, M. J. RAWLINS, “Implementation of an Optimal Control Scheme for MSC and SVC Compensation”, International Practices in Reactive Power Control, IEE Colloquium on, 7, pp. 6/1-6/4, April 1993.
- [19] M. H. BAKER, R.J. Trow, “New FACTS Controllers and How to Assess Them”, Advances in Power System Control, Operation and Management, 1997, APSCOM-97, Fourth International Conference on (Conf. Publ. No. 450), Vol.: 1, 11-14, pp. 42-47, November 1997.
- [20] D. J. HANSON, M. L. WOODHOUSE, C. HORWILL, D. R. MONKHOUSE, M.M. OSBORNE, “STATCOM: A New Era of Reactive Compensation”, Power Engineering Journal [see also Power Engineer] , Vol.: 16, Issue: 3, pp. 151-160, June 2002.
- [21] E. M. JOHN, “Reactive Compensation Tutorial”, Power Engineering Society Winter Meeting, 2002, IEEE, Vol.: 1, 27-31, pp. 515-519, January 2002.
- [22] S. GERBEX, R. CHERKAoui, A. J. GERMOND, “Optimal Location of Multi-Type FACTS Devices in a Power System by Means of Genetic Algorithms”, IEEE

Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 3, pp. 537-544, August 2001.

- [23] D. E. GOLDBERG, “Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [24] P. BHASAPUTRA, W. ONGSAKUL, “Optimal Power Flow With Multi-Type of FACTS Devices by Hybrid TS/SA Approach”, Industrial Technology, 2002, IEEE ICIT '02, 2002 IEEE International Conference on, Vol.: 1, 11-14, pp. 285-290, December 2002.
- [25] P. BHASAPUTRA, W. ONGSAKUL, “Optimal Placement of Multi-Type FACTS Devices by Hybrid TS/SA Approach”, Circuits and Systems, 2003, ISCAS '03, Proceedings of the 2003 International Symposium on, Vol.: 3, pp. 25-28, May 2003.
- [26] F. GLOVER, M. LAGUNA, “Tabu Search”, Kluwer Academic Publishers”, 1997.
- [27] S. KIRKPATRICK, C. D. GELLAT, M. P. VECCHI, “Optimization by Simulated Annealing”, Science, Vol. 220, pp. 671-680, 1983.
- [28] A. BERIZZI, A. SILVESTRI, E. TIRONI, D. ZANINELLI, P. MARANNINO, “Power Flows and Voltage Control in Electric Systems by Traditional and Innovative Devices”, Electrotechnical Conference, 1996, MELECON '96., 8th Mediterranean , Vol.: 3, 13-16, pp. 1620-1626, May 1996.
- [29] Y. MANSOUR, W. XU, F. ALVARADO, C. RINZIN, “SVC Placement Using Critical Modes of Voltage Stability”, IEEE Pica Conference, Scottsdale, AZ, USA, 4-7, pp. 131-137, May 1993.
- [30] C. A. CANIZARES, Z. T. FAUR, “Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse”, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol.: 14, Issue: 1, pp. 158-165, February 1999.
- [31] F. JURADO, J. A. RODRIGUEZ, “Optimal Location of SVC Based on System Loadability and Contingency Analysis”, Emerging Technologies and Factory Automation, 1999, Proceedings, ETFA '99, 1999, 7th IEEE International Conference on, Vol.: 2, 18-21, pp. 1193-1199, October 1999.
- [32] G. M. HUANG, PING YAN, “The Impacts of TCSC and SVC on Power System Load Curtailments”, Power Engineering Society Summer Meeting, 2001, IEEE, Vol.: 1, 15-19, pp. 33-37, July 2001.
- [33] G. M. HUANG, PING YAN, “TCSC and SVC as Re-dispatch Tools for Congestion Management and TTC Improvement”, Power Engineering Society Winter Meeting, 2002, IEEE, Vol.: 1, 27-31, pp. 660-665, Jan. 2002.
- [34] R. PALMA - BEHNKE, L. S. VARGAS, J. R. Perez, J. D. NUNEZ, R. A.

- TORRES, “ OPF With SVC and UPFC Modeling for Longitudinal Systems”, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol.: 19, Issue: 4, pp. 1742-1753, November 2004.
- [35] E. J. OLIVEIRA, J. L. R. PEREIRA, L. M. RIANI, A. L. M. MARCATO, L. W. OLIVEIRA, “Series Compensation Device Allocation under Contingency Constraints”, Powertec 2003, Bologna, Italy, June 2003.
- [36] S. J. WRIGHT, “Primal-Dual Interior Point Methods”, Philadelphia, PA, USA, Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 1997.
- [37] L. M. KIMBALL, K. A. CLEMENTS, P. W. DAVIS, “Stochastic OPF via Bender's Method”, Proceedings of the IEEE, Porto, Vol. 3, pp. 4., 2001.
- [38] A. Y. M. TAKEMOTO, “Modelagem e Controle de um Compensador Estático de Energia Reativa (SVC) Para Compensação de Cintilação Luminosa”, Monografia Submetida à UFJF Como Parte dos Requisitos Para Aprovação na Disciplina Trabalho Final de Curso, UFJF, Juiz de Fora, Dezembro 2003.
- [39] A. C. S. LIMA, S. S. WANDERLEY, R. M. STEPHAN, “Modeling Static Var Compensator Using EMTP”, Proceedings of IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems”, Rio de Janeiro, Brazil, 1995.
- [40] S. TORSENG, “Shunt Connected Reactors and Capacitors Controlled by Thyristors”, IEE Proceedings C, Generation Transmission Distribution, 128, (6), pp. 366-373, 1981.
- [41] G. N. ALLEN, V. E. HENNER, C. T. POPPLE, “Optimization of Static Var Compensators and Switched Shunt Capacitors in a Long Distance Interconnection”, CIGRÉ, paper 38-07, 1988.
- [42] I. A. ENRIMÉZ, Ed., “Static VAR Compensator”, Working Group 38-0 1, Task Force No. 2 on SVC, CIGRÉ, 1986.
- [43] IEEE Special Stability Controls Working Group, “Static VAR Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation”, IEEE Transaction Power Systems, Vol.: 9, No. 1, pp. 229-240, February 1995.
- [44] I. A. HISKEN, C. B. McLEAN, “SVC Behavior under Voltage Collapse Conditions”, IEEE Transactions, PWRS-7 (3), pp. 1078-1087, 1992.
- [45] I. A. ENRIMÉZ, Ed., “Static Var Compensators”, Technical Report of Task Force 2, CIGRÉ, 1986.
- [46] COMMITTEE ON STATIC COMPENSATION, “Static Compensators for Reactive Power Control”, Canadian Electrical Association, 1984.
- [47] H. AMBRIZ-PEREZ, E. ACHA, C. R. FUERTE-ESQUIVEL, “Advanced SVC

Models for Newton-Raphson Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies”, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol.: 15, Issue: 1, pp. 129-136, February 2000.

- [48] R. D. YOUSSEF, “Implicit Generator and SVC Modeling for Contingency Scheduling of Reactive Power Dispatch”, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings- , Vol.: 142 Issue: 5, pp. 527-534, September 1995.
- [49] I. A. HISKEN, D. J. HILL, “Incorporation of SVCs into Energy Function Methods”, IEEE Transactions, PWRS-7 (1), pp. 133-140, 1992.
- [50] E. ACHA, “A Quasi-Newton Algorithm for the Load Flow Solution of Large Networks With FACTS-Controlled Branches”, 28th UPEC Conference, Stafford, UK, pp.153-156, 2 1-23, September 1993.
- [51] C. R. FUERTE-ESQUIVEL, E. ACHA, I. AMBRIZ PEREZ, “Integrated SVC and Step-down Transformer Model for Newton-Raphson Load Flow Studies”, Power Engineering Review, IEEE, Vol.: 20, Issue: 2, pp. 45-46, February 2000.
- [52] E. D. CASTRONUOVO, J. M. CAMPAGNOLO, R. SALGADO, “On the Application of High Performance Computation Techniques to Nonlinear Interior Point Methods”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.: 16, Issue: 3, pp. 325-331, August 2001.
- [53] E. VAAHEDI, Y. MANSOUR, C. FUCHS, S. GRANVILLE, M. D. L. LATORE, H. HAMADANIZADEH, “Dynamic Security Constrained Optimal Power Flow/VAr Planning”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 1, pp. 38-43, February 2001.
- [54] J. F. BENDERS, “Partitioning Procedure for Solving Mixed Variables Programming Problems”, Numerische Mathematics, pp. 238-262, 1962.
- [55] H. M. GEOFFRION, “Generalized Benders Decomposition”, JOTA, Vol.10, 1972.
- [56] S. GRANVILLE, M. C. A. LIMA, “Application of Decomposition Techniques to VAr Planning: Methodological and Computational Aspects”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 4, pp. 1780-1787, November 1994.
- [57] M. J. LATORRE, “Aplicação do Método de Pontos Interiores Primal-Dual para a Resolução do Problema de Fluxo de Potência Ótimo”, Tese de Mestrado, COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.
- [58] S. GRANVILLE, “Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Method”, IEEE/PES, N°93, February 1993.
- [59] S. GRANVILLE, M. C. A. LIMA, “Application of Decomposition Techniques to

Var Planning: Methodological & Computational Aspects”, IEEE/PES, N°94, February 1994.

- [60] N. KARMAKAR, “New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming”, *Combinatorica*, Vol.4, pp.373-395.
- [61] V. KLEE, G. MINTY, “How Good is the Simplex Algorithm?”, In: Sisha, editor, *Inequalities III*, Academia Press, New York, NY, 1972.
- [62] E. D. CASTRONUOVO, “Aplicação do Método de Pontos Interiores no Fluxo de Potência Ótimo Não Linear com Utilização de Processamento de Alto Desempenho”, Tese de Doutorado - UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2001.