

FERRAMENTA PARA MAXIMIZAÇÃO DE CARGA NA FASE FLUENTE DE
RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Eduardo Martins Viana

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

Dr. Nelson Martins, Ph.D. – Cepel

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

Prof. André Luis Marques Marcato, D.Sc. - UFJF

JUIZ DE FORA, MG - BRASIL

AGOSTO 2008

VIANA, EDUARDO MARTINS

Ferramenta para Maximização de
Carga na Fase Fluente de Recomposição de
Sistemas Elétricos [Juiz de Fora] 2008

XIII, 118 p. 29,7 cm (UFJF, M.Sc.,
Engenharia Elétrica, 2008)

Dissertação – Universidade Federal de
Juiz de Fora

1. Recomposição de Sistemas Elétricos
2. Fluxo de Potência Ótimo
3. Decomposição de Benders

I. UFJF II. Título (Série)

Dedico este trabalho aos meus pais.

Agradecimentos

A Deus, criador de todas as coisas.

Aos meus pais Rubens e Suzana pelo apoio em todos os momentos, e por serem os principais responsáveis por tudo que conquistei até hoje. À minha irmã Lídia, pelo apoio e pela torcida.

À minha namorada Tátilla Lima do Amaral, pelo amor, carinho, compreensão e incentivo dado nestes dois anos.

Aos colegas do curso de mestrado que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Edimar José de Oliveira, pela orientação, confiança e dedicação ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao pesquisador Nelson Martins, pelas sugestões dadas ao longo deste trabalho.

Aos professores André Luis Marques Marcato e José Luiz Rezende Pereira, pela participação na banca examinadora e pelas contribuições dadas ao trabalho.

À UFJF / CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

À Universidade Federal de Viçosa, pela excelência no ensino.

“O conhecimento chega, mas a sabedoria demora.”

(Alfred Tennyson)

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

FERRAMENTA PARA MAXIMIZAÇÃO DE CARGA NA FASE FLUENTE DE RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Eduardo Martins Viana

Agosto / 2008

Orientador: Edimar José de Oliveira, D.Sc.

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho propõe uma metodologia para auxiliar os estudos relacionados à recomposição fluente de sistemas elétricos de potência. Nesta fase inicial de recomposição, o sistema de potência encontra-se estruturado em longos corredores de transmissão e a definição de uma configuração de reatores constitui uma das estratégias adotadas para a eliminação de sobretensões. A ferramenta proposta, baseada em um modelo de otimização, visa o estabelecimento de procedimentos de rede que conduza a uma configuração mínima de reatores conectados ao sistema e a máxima tomada de carga durante esta fase de recomposição. Os diversos cenários de recomposição fluente, correspondentes à energização de novos trechos de linhas de transmissão, são representados através de subproblemas. A técnica de decomposição de Benders associada à metodologia primal-dual de pontos interiores é utilizada para solução do problema de otimização não-linear proposto. São realizados estudos de caso em ramos de recomposição fluente do Sistema Elétrico Brasileiro interligado para verificar a eficácia da metodologia. Os resultados obtidos são comparados com outros métodos propostos na literatura.

Abstract of Dissertation presented to UFJF as a partial fulfillment of the requirements for degree of Master of Electrical Engineering (M.E.E.)

LOAD MAXIMIZATION TOOL FOR ELECTRIC SYSTEM FLUENT RESTORATION

Eduardo Martins Viana

August / 2008

Supervisor: Edimar José de Oliveira, D.Sc.

Department: Electrical Engineering

This work proposes a methodology to help the studies related to electric power systems fluent restoration. At this early restoration stage, power system is structured in long transmission corridors and the reactors set definition is one of the adopted strategies for overvoltages disposal. The proposed tool, based on an optimization model, aims the network procedures establishment leading to a minimum reactors configuration connected to the system and maximum load pick-up during this restoration phase. The various fluent restoration scenarios, corresponding to new transmission lines sections inrush, are represented by sub problems. Benders decomposition technique associated to primal-dual interior points methodology is used to solve the proposed nonlinear optimization problem. Case studies are conducted in fluent restoration branches of Brazilian Electric interconnected System to verify the methodology effectiveness. The results are compared with other proposed methods in the literature.

Sumário

Capítulo I.....	1
Introdução.....	1
I.1 Considerações Iniciais.....	1
I.2 Objetivo da Dissertação.....	4
I.3 Publicações Decorrentes da Dissertação.....	4
I.4 Estrutura da Dissertação.....	5
Capítulo II.....	7
Recomposição de Sistemas de Potência.....	7
II.1 Considerações Iniciais.....	7
II.2 Revisão Bibliográfica.....	7
II.3 Filosofia de Recomposição do Sistema Elétrico Brasileiro.....	12
II.3.1 Diretrizes para a Recomposição Fluente.....	14
II.4 Estudos Elétricos de Recomposição do SIN.....	17
II.5 Controle de Sobretensões na Recomposição do SIN.....	18
II.6 Conclusões.....	20
Capítulo III.....	21
Metodologia Proposta.....	21
III.1 Considerações Iniciais.....	21
III.2 Identificação do Problema.....	21
III.3 Técnica de Solução.....	23
III.4 Descrição dos Modelos Adotados.....	26
III.4.1 Modelagem das Máquinas Síncronas.....	27
III.4.2 Modelagem da Curva de Capabilidade.....	28
III.4.3 Modelagem dos Reguladores de Tensão.....	30
III.4.4 Modelagem dos Compensadores Síncronos.....	32
III.4.5 Modelagem dos Reatores.....	32
III.4.6 Modelagem do Compensador Estático de Reativos.....	33
III.5 Modelagem do Subproblema 1.....	35
III.5.1 Função Objetivo.....	35
III.5.2 Restrições de Balanço de Potência Ativa e Reativa.....	36
III.5.3 Restrições da Modelagem das Máquinas Síncronas.....	37
III.5.4 Restrições da Curva de Capabilidade.....	37
III.5.5 Restrição da Modelagem do AVR.....	38
III.6 Modelagem do Subproblema 2.....	38
III.6.1 Função Objetivo.....	38
III.6.2 Restrições de Balanço de Potência Ativa e Reativa.....	39
III.6.3 Restrições de Modelagem das Máquinas Síncronas.....	40

III.6.4 Restrições da Curva de Capabilidade.....	40
III.6.5 Limites de Tensão.....	41
III.7 Modelagem do Subproblema 3	41
III.7.1 Função Objetivo	41
III.7.2 Restrições de Balanço de Potência Ativa e Reativa	41
III.7.3 Restrições de Modelagem das Máquinas Síncronas.....	42
III.7.4 Restrições da Curva de Capabilidade.....	42
III.7.5 Restrição da Modelagem do AVR.....	43
III.7.6 Limites de Tensão.....	43
III.8 Montagem do Corte de Benders	43
III.9 Algoritmo de Solução	46
III.10 Exemplo Tutorial.....	47
III.11 Conclusões	62
Capítulo IV	64
Estudo de Casos.....	64
IV.1 Considerações Iniciais.....	64
IV.2 Área Ilha Solteira	64
IV.3 Área Jupia	71
IV.4 Área Rio de Janeiro	75
IV.5 Área Rio de Janeiro – Com Compensador Síncrono	78
IV.6 Área Norte Rio de Janeiro.....	82
IV.7 Área Norte Rio de Janeiro – Com o CER.....	85
IV.8 Conclusões.....	89
Capítulo V	91
Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	91
V.1 Considerações Finais	91
V.2 Propostas de Desenvolvimentos Futuros.....	92
Apêndice A	93
Formulação do Problema	93
A.1 Considerações Iniciais	93
A.2 Formulação Proposta	93
Apêndice B.....	95
Modelagem de Máquinas Síncronas	95
B.1 Considerações Iniciais.....	95
B.2 Modelo Fonte de Tensão Atrás da Reatância	95
B.3 Curva de Capabilidade	97
B.3.1 Limite de Corrente de Armadura	97
B.3.2 Limite da Máquina Primária	98
B.3.3 Limite de Excitação Máxima.....	98
B.3.4 Limite de Excitação Mínima	103
B.3.5 Limite de Estabilidade Estática.....	104
Apêndice C.....	111
Dados dos Sistemas Elétricos	111
C.1 Considerações Iniciais	111
C.2 Área Ilha Solteira	111
C.3 Área Jupia	112
C.4 Área Rio de Janeiro	112
C.5 Área Norte Rio de Janeiro	113

Lista de Figuras

Figura II.1 – Esquema de Rejeição de Carga.....	18
Figura II.2 – Rejeição de carga sem auto-excitação.....	19
Figura II.3 – Rejeição de carga com auto-excitação.....	20
Figura III.1 – Corredor de Recomposição Fluente.....	22
Figura III.2 – Cenários de Recomposição Fluente.....	22
Figura III.3 – Solução em Regime Permanente e Regime Dinâmico.....	24
Figura III.4 – Esquema de Solução por Decomposição de Benders.....	26
Figura III.5 – Representação da Curva de Capabilidade.....	30
Figura III.6 – Representação esquemática do AVR.....	31
Figura III.7 – Representação esquemática de reatores de linha.....	33
Figura III.8 – Característica do Compensador Estático de Reativos em regime permanente.....	34
Figura III.9 – Fluxograma da Metodologia Proposta.....	46
Figura III.10 – Exemplo Tutorial – Corredor de Água Vermelha.....	47
Figura III.11 – Cenários de Recomposição – Água Vermelha.....	48
Figura III.12 – Exemplo Tutorial – Ponto de Operação do Gerador.....	49
Figura III.13 – Água Vermelha - Tomada de Carga e Alocação de Reatores.....	60
Figura III.14 – Água Vermelha – Alocação de Potência Reativa Fictícia.....	60
Figura III.15 – Água Vermelha - Tensão de referência do AVR do gerador 1.....	61
Figura IV.1 – Área Ilha Solteira.....	65
Figura IV.2 – Ilha Solteira – Cenários de Recomposição.....	65
Figura IV.3 – Ilha Solteira – Tomada de Carga e Alocação de Reatores – Simulação 1.....	67
Figura IV.4 – Ilha Solteira – Tensão de Referência do AVR do gerador 1 – Simulação 1.....	68
Figura IV.5 – Ilha Solteira – Alocação de Potência Reativa Fictícia – Simulação 1.....	68
Figura IV.6 – Ilha Solteira – Tomada de Carga e Alocação de Reatores – Simulação 2.....	70
Figura IV.7 – Ilha Solteira – Tensão de Referência do AVR do gerador 1 – Simulação 2.....	71
Figura IV.8 – Ilha Solteira – Alocação de Potência Reativa Fictícia – Simulação 2.....	71
Figura IV.9 – Área Jupia.....	72
Figura IV.10 – Jupia – Cenários de Recomposição.....	72
Figura IV.11 – Jupia – Tomada de Carga e Alocação de Reatores.....	74
Figura IV.12 – Jupia – Tensão de referência do AVR.....	74
Figura IV.13 – Jupia – Alocação de Potência Reativa Fictícia.....	75
Figura IV.14 – Área Rio de Janeiro.....	76
Figura IV.15 – Área Rio de Janeiro – Tomada de Carga e Alocação de Reatores.....	77
Figura IV.16 – Área Rio de Janeiro – Tensão de Referência do AVR.....	77
Figura IV.17 – Área Rio de Janeiro – Alocação de Potência Reativa Fictícia.....	78
Figura IV.18 – Área Rio de Janeiro com Compensador Síncrono.....	78
Figura IV.19 – Área Rio de Janeiro – Último cenário.....	79

Figura IV.20 – Área Rio de Janeiro com Compensador Síncrono - Tomada de Carga e Alocação de Reatores.....	81
Figura IV.21 – Área Rio de Janeiro com Compensador Síncrono – Tensão de Referência do AVR.....	81
Figura IV.22 – Área Rio de Janeiro com Compensador Síncrono – Alocação de Potência Reativa Fictícia.....	81
Figura IV.23 – Área Norte Rio de Janeiro.....	82
Figura IV.24 – Área Norte Rio de Janeiro – Tomada de Carga e Alocação de Reatores.....	84
Figura IV.25 – Área Norte Rio de Janeiro – Tensão de referência do AVR.....	84
Figura IV.26 – Área Norte Rio de Janeiro – Alocação de Potência Reativa Fictícia.....	85
Figura IV.27 – Área Norte Rio de Janeiro CER.....	85
Figura IV.28 – Área Norte Rio de Janeiro – Penúltimo cenário.....	86
Figura IV.29 - Área Norte Rio de Janeiro – Último cenário.....	86
Figura IV.30 – Área Norte Rio de Janeiro CER – Tomada de Carga e Alocação de Reatores.....	88
Figura IV.31 – Área Norte Rio de Janeiro CER – Tensão de referência do AVR.....	88
Figura IV.32 – Área Norte Rio de Janeiro CER – Alocação de Potência Reativa Fictícia.....	88
Figura B.1 – Diagrama Fasorial da Máquina Síncrona.....	95
Figura B.2 – Limite de Corrente de Armadura.....	98
Figura B.3 – Limite da Máquina Primária.....	98
Figura B.4 – Limite de Excitação Máxima.....	103
Figura B.5 – Limite de Excitação Mínima.....	104
Figura B.6 – Limite de Estabilidade Estática – Pólos Salientes.....	104
Figura B.7 – Limite de Estabilidade Estática.....	110

Lista de Tabelas

Tabela II.1 – Níveis de Tensão Aceitáveis em Regime Permanente para Estudos de Recomposição das Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste.....	17
Tabela III.1 – Dados de Circuito do Sistema Teste.....	47
Tabela III.2 – Solução Subproblema 1 – Iteração 1.....	48
Tabela III.3 – Geração Subproblema 1 – Iteração 1.....	48
Tabela III.4 – Solução Subproblema 2 – Iteração 1 – Cenário 1.....	49
Tabela III.5 – Solução Subproblema 2 – Iteração 1 – Cenário 2.....	50
Tabela III.6 – Solução Subproblema 2 – Iteração 1 – Cenário 3.....	51
Tabela III.7 – Solução Subproblema 2 – Iteração 1 – Cenário 4.....	52
Tabela III.8 – Solução Subproblema 2 – Iteração 1 – Cenário 5.....	53
Tabela III.9 – Solução Subproblema 3 – Iteração 1 – Cenário 1.....	54
Tabela III.10 – Solução Subproblema 3 – Iteração 1 – Cenário 2.....	54
Tabela III.11 – Solução Subproblema 3 – Iteração 1 – Cenário 3.....	55
Tabela III.12 – Solução Subproblema 3 – Iteração 1 – Cenário 4.....	55
Tabela III.13 – Solução Subproblema 3 – Iteração 1 – Cenário 5.....	56
Tabela III.14 – Solução Subproblema 1 – Iteração 2.....	57
Tabela III.15 – Geração Subproblema 1 – Iteração 2.....	58
Tabela III.16 – Potência Reativa – Subproblema 1 – Iteração 3.....	58
Tabela III.17 – Reatores de Linha – Subproblema 1 – Iteração 3.....	58
Tabela III.18 – Solução Final para o Exemplo Tutorial.....	59
Tabela III.19 – Geração Final para o Exemplo Tutorial.....	59
Tabela III.20 – Reatores de Linha Final para o Exemplo Tutorial.....	59
Tabela IV.1 – Solução Ilha Solteira – Iteração 1 – Simulação 1.....	66
Tabela IV.2 – Geração Ilha Solteira – Iteração 1 – Simulação 1.....	66
Tabela IV.3 – Solução Ilha Solteira – Final – Simulação 1.....	67
Tabela IV.4 – Geração Ilha Solteira – Final – Simulação 1.....	67
Tabela IV.5 – Reatores de Linha Ilha Solteira – Final – Simulação 1.....	67
Tabela IV.6 – Solução Ilha Solteira – Iteração 1 – Simulação 2.....	69
Tabela IV.7 – Geração Ilha Solteira – Iteração 1 – Simulação 2.....	69
Tabela IV.8 – Solução Ilha Solteira – Final – Simulação 2.....	70
Tabela IV.9 – Geração Ilha Solteira – Final – Simulação 2.....	70
Tabela IV.10 – Reatores de Linha Ilha Solteira – Final – Simulação 2.....	70
Tabela IV.11 – Solução Jupuí – Iteração 1.....	73
Tabela IV.12 – Geração Jupuí – Iteração 1.....	73
Tabela IV.13 – Reatores de Linha Jupuí – Iteração 1.....	73
Tabela IV.14 – Solução Jupuí – Final.....	73
Tabela IV.15 – Geração Jupuí – Final.....	74

Tabela IV.16 – Reatores de Linha Jupia – Final.....	74
Tabela IV.17 – Área Rio de Janeiro – Final.....	76
Tabela IV.18 – Geração Área Rio de Janeiro – Final.....	76
Tabela IV.19 – Área Rio de Janeiro – Reatores de Linha - Final.....	76
Tabela IV.20 – Área Rio de Janeiro – Compensador Síncrono – Iteração 1.....	79
Tabela IV.21 – Geração Área Rio de Janeiro – Compensador Síncrono – Iteração 1.....	79
Tabela IV.22 – Área Rio de Janeiro com Compensador Síncrono – Final.....	80
Tabela IV.23 – Geração Área Rio de Janeiro com Compensador Síncrono – Final.....	80
Tabela IV.24 – Área Rio de Janeiro com Compensador Síncrono – Reatores de Linha – Final..	80
Tabela IV.25 – Área Norte Rio de Janeiro – Iteração 1.....	82
Tabela IV.26 – Geração Área Norte Rio de Janeiro – Iteração 1.....	83
Tabela IV.27 – Área Norte Rio de Janeiro – Reatores de Linha – Iteração 1.....	83
Tabela IV.28 – Área Norte Rio de Janeiro – Final.....	83
Tabela IV.29 – Geração Área Norte Rio de Janeiro – Final.....	83
Tabela IV.30 – Área Norte Rio de Janeiro – Reatores de Linha - Final.....	84
Tabela IV.31 – Área Norte Rio de Janeiro CER – Iteração 1.....	86
Tabela IV.32 – Geração Área Norte Rio de Janeiro CER – Iteração 1.....	86
Tabela IV.33 – Área Norte Rio de Janeiro CER – Reatores de Linha – Iteração 1.....	87
Tabela IV.34 – Área Norte Rio de Janeiro CER – Final.....	87
Tabela IV.35 – Geração Área Norte Rio de Janeiro CER – Final.....	87
Tabela IV.36 – Área Norte Rio de Janeiro CER – Reatores de Linha – Final.....	87
Tabela C.1 – Dados de Circuito – Área Ilha Solteira.....	111
Tabela C.2 – Dados de Circuito – Área Jupia.....	112
Tabela C.3 – Dados de Circuito – Área Rio de Janeiro.....	112
Tabela C.4 – Dados de Circuito – Área Norte Rio de Janeiro.....	113

Capítulo I

Introdução

I.1 Considerações Iniciais

Os sistemas de potência têm aumentado cada vez mais em tamanho e complexidade devido ao crescimento das interconexões. Entretanto, exposto a restrições econômicas e ambientais para expansão, estes sistemas têm operado cada vez mais próximos aos seus limites. O aumento crescente da dimensão do sistema aliado à operação próximo aos seus limites torna significativamente maior o risco de falhas no sistema elétrico. Entre tais falhas podem-se destacar sobrecarga em equipamentos, defeitos em linhas de transmissão, barramentos, perdas de geração, etc. Uma série de falhas pode afastar o sistema do ponto de operação original ou retirá-lo completamente de operação, ocasionando o blecaute. Após a ocorrência de um blecaute inicia-se o processo de recomposição do sistema elétrico, cujo objetivo é atingir no menor tempo possível as condições normais de operação (Wu *et alii*, 1988) e (Adibi, 2000).

A preocupação com os prejuízos causados por blecautes em sistemas de energia elétrica conduz aos crescentes estudos de recomposição de sistemas de potência. Nestes estudos tem-se como objetivo determinar a melhor maneira de se conduzir o sistema elétrico de um estado degradado ao seu estado inicial onde o suprimento de energia aos consumidores é normal e os limites operacionais são respeitados (Santos, 1998) e (Santos *et alii*, 2004).

O processo de recomposição de sistemas de potência é um processo complexo que envolve inúmeros fatores tais como estudos de fluxo de carga, estudos de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos (Gomes *et alii*, 2002). Uma característica inerente ao processo de recomposição é o aspecto multi-estágio do problema, sendo o objetivo em cada estágio, a minimização

da carga não atendida. O problema de recomposição envolve ainda a definição de quais equipamentos serão necessários no atendimento a um grupo de cargas de cada estágio. Em uma tentativa de formulação matemática, percebe-se que o problema de recomposição é um problema não-linear, multi-objetivo, multi-estágio, envolvendo variáveis contínuas e discretas (Wu *et alii*, 1988), (Alves, 2007) e (Alves *et alii*, 2007). Diante disto, ainda não foi possível a formulação de um método analítico que englobe todos os aspectos citados e solucione integralmente o problema de recomposição. Atualmente, o que se encontra na literatura técnica da área são trabalhos focados em aspectos específicos do problema de recomposição.

De uma forma geral, os estudos de recomposição estão diretamente ligados ao crescimento do setor elétrico e no Brasil, isto não foi diferente. Até a década de 70, o sistema da região sul era dependente do recebimento de energia da região sudeste com uma interligação muito fraca em 230 kV (Gomes *et alii*, 2003b) e (Gomes *et alii*, 2004). Esta configuração causou um elevado número de distúrbios severos no sistema, resultando no desenvolvimento de um esquema de corte de carga por subfrequência, para evitar o colapso na região Sul. Enquanto as empresas da região Sul sentiam a necessidade de adoção de procedimentos descentralizados para um restabelecimento de carga mais eficiente, outras empresas adotavam os procedimentos centralizados, à exceção de FURNAS que adotava procedimentos descentralizados desde 1982.

Entre 1984 e 1985, ocorreram três grandes blecautes no sistema da região Sudeste, causando desligamento em áreas importantes, com interrupção de mais de 10 GW de carga. Durante a recomposição do sistema, nestas ocasiões, foram observadas diversas dificuldades decorrentes da adoção de procedimentos centralizados de recomposição, tais como estrangulamento das comunicações entre Centros de Operação, dificuldade de conhecimento da configuração do sistema pós-distúrbios, elevadas sobretensões entre outros. Em 1989 foi criada uma força tarefa para estabelecer a filosofia e os critérios para a recomposição do Sistema Interligado Nacional (SIN). Os procedimentos de rede desenvolvidos na ocasião foram implantados em todas as empresas da região sul, sudeste e centro-oeste. Mesmo assim, em 1996 e 1997 ocorreram novos blecautes na região sudeste, motivando a revisão e atualização das estratégias de recomposição.

Desenvolveu-se a filosofia básica na qual as empresas que possuem os recursos de geração iniciem a recomposição de forma planejada e estruturada, para que as energizações forneçam aos operadores das subestações, informações do montante de geração que poderão disponibilizar para alimentar as cargas a serem restabelecidas na sua área. Esse processo de recomposição pode fluir sem a necessidade de comunicação entre os centros de operação e/ou operadores. Desta forma o processo de recomposição do SIN ficou estruturado em duas etapas, denominadas fase fluente e fase coordenada.

A fase fluente corresponde ao início do processo de recomposição, onde é suposto que o sistema está completamente desenergizado. Nesta fase cabe aos operadores tomar as decisões seguindo um conjunto de instruções encontradas nos manuais de operação, havendo mínima comunicação entre os operadores envolvidos (ONS, 2001). Nesta fase é definida a compatibilização de carga e geração das áreas geoeletricas e a transição entre fase fluente e coordenada ocorre quando as empresas controladoras da geração e transmissão de uma área geoeletrica informam ao Centro de Operação o término da execução de procedimentos pré-estabelecidos.

A fase coordenada envolve o fechamento de anéis ou paralelos entre as áreas estabelecidas na recomposição fluente. Durante estes fechamentos, podem ocorrer esforços torsionais nos eixos dos geradores (Martins *et alii*, 2008) e (Oliveira *et alii*, 2004). Os impactos causados pelo fechamento em anel são proporcionais à diferença angular entre os pólos dos disjuntores que efetuarão o fechamento do anel (Martins *et alii*, 2008). Essa grandeza é conhecida na literatura como *standing phase angle* (SPA). Os fechamentos realizados com alto valor de SPA são perigosos, pois podem causar danos às unidades geradoras mais próximas do ponto de fechamento em anel.

A recomposição do sistema inicia-se a partir de usinas hidrelétricas equipadas com *black-start*, que são aquelas com capacidade de auto-restabelecimento e independem de fonte externa para colocar em operação suas unidades geradoras. A partir do número mínimo de unidades geradoras *black-start* determina-se a disponibilidade inicial de geração de uma área geoeletrica (Gomes *et alii*, 2003b). Durante a fase fluente de recomposição, têm-se corredores energizados radialmente e os procedimentos adotados visam a recomposição de áreas geoeletricas sempre compatibilizando carga e geração.

Nesta fase de recomposição, o sistema encontra-se em uma configuração radial que pode resultar em elevadas sobretensões sustentadas, decorrentes da energização de longas linhas de transmissão (Adibi *et alii*, 1999). Estas sobretensões devem ser controladas utilizando-se os recursos do sistema, tais como a capacidade de absorção de reativos da máquina, os reatores shunt do sistema, ajuste de taps de transformadores e tomadas de carga (Adibi *et alii*, 1992). Desta forma, deve ser definida uma configuração mínima de reatores conectados, capazes de viabilizar o processo de recomposição mantendo a tensão em limites aceitáveis.

Durante a fase fluente, outro aspecto importante é a definição do montante de carga que pode ser seguramente tomada. Atualmente, na filosofia de recomposição do SIN, este montante é definido a partir do número de unidades geradoras consideradas no processo de recomposição juntamente com a impedância de configuração mínima da área geoeletrica (ONS, 2001).

A determinação da configuração mínima de reatores conectados ao sistema e o montante de carga a ser tomada, é um problema complexo que envolve diversas simulações em programas de fluxo de potência e de rejeição de carga em programas de transitórios eletromecânicos. A definição da configuração mínima de reatores é feita no processo de tentativa e erro, com base na experiência do operador e ainda não existe uma metodologia para determinação otimizada da configuração destes equipamentos no sistema.

I.2 Objetivo da Dissertação

Tendo em vista a experiência já adquirida pela equipe de pesquisadores da Universidade Federal de Juiz de Fora em (Martins *et alii*, 2008) e (Oliveira *et alii*, 2004) sobre o tema de recomposição de sistemas elétricos, esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para auxílio à recomposição fluente de sistemas elétricos. A metodologia é capaz de determinar a configuração mínima de reatores conectados ao sistema a fim de viabilizar o corredor de recomposição. Adicionalmente, a metodologia proposta determina também o montante máximo de carga que pode ser seguramente tomada durante a fase fluente da recomposição. Tal configuração visa o controle de sobretensões decorrentes da energização de linhas de transmissão de extra alta tensão nos diversos cenários de recomposição. A ferramenta proposta é baseada em fluxo de potência ótimo, resolvido pelo método primal-dual de pontos interiores (Granville *et alii*, 1994) e (Wright, 1997).

I.3 Publicações Decorrentes da Dissertação

- [A] EDUARDO M. VIANA, E. J. OLIVEIRA, N. MARTINS, L. W. OLIVEIRA, J. L. R. PEREIRA, “Metodologia para Identificação de Corredor de Reforço no Sistema de Transmissão Considerando os Impactos nas Máquinas Síncronas Durante Chaveamentos” artigo a ser apresentado no XI SEPOPE – Simpósio dos Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Belém, PA, Março, 2009.
- [B] EDUARDO M. VIANA, E. J. OLIVEIRA, N. MARTINS, L. W. OLIVEIRA, J. L. R. PEREIRA, “Ferramenta para Auxílio à Recomposição Fluente de Sistemas Elétricos”, artigo a ser apresentado no XI SEPOPE – Simpósio dos Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Belém, PA, Março, 2009.

- [C] EDUARDO M. VIANA, E. J. OLIVEIRA, N. MARTINS, L. W. OLIVEIRA, J. L. R. PEREIRA, “Influência da Curva de Capabilidade de Geradores e do Ganho Estático de Reguladores de Tensão no Planejamento de Potência Reativa” artigo a ser apresentado no XI SEPOPE – Simpósio dos Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Belém, PA, Março, 2009.
- [D] EDUARDO M. VIANA, E. J. OLIVEIRA, N. MARTINS, L. W. OLIVEIRA, J. L. R. PEREIRA, “Controle Secundário de Tensão com Representação do AVR” artigo a ser apresentado no XVII CBA – Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora, MG, Setembro, 2008.
- [E] EDUARDO M. VIANA, E. J. OLIVEIRA, N. MARTINS, L. W. OLIVEIRA, J. L. R. PEREIRA, “Otimização da Fase Fluente de Recomposição de Sistemas Elétricos”, artigo a ser apresentado no XVII CBA – Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora, MG, Setembro, 2008.
- [F] E. J. OLIVEIRA, EDUARDO M. VIANA, N. MARTINS, J. L. R. PEREIRA, A. L. M. MARCATO, “Optimization Model to Power System Restoration Process”, artigo a ser submetido ao IEEE Transactions on Power Systems, 2008.

I.4 Estrutura da Dissertação

Além deste capítulo, esta dissertação contém mais quatro capítulos e um apêndice. O Capítulo II apresenta os principais aspectos que envolvem a recomposição de sistemas de potência. São apresentados os problemas e as metodologias de solução propostas na literatura. O enfoque deste capítulo é dado a trabalhos que tratam da recomposição do SIN, e trabalhos embasados em técnicas de otimização. São apresentados também as diretrizes e critérios de recomposição fluente adotadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) no Setor Elétrico Brasileiro.

No Capítulo III são descritas a formulação, a modelagem do problema e a metodologia de solução proposta. O capítulo apresenta ainda um exemplo tutorial a fim de ilustrar a método proposto.

No Capítulo IV são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a utilização da metodologia proposta. São testados corredores de recomposição do Sistema Interligado Nacional.

Finalizando, no Capítulo V são apresentadas as principais conclusões do trabalho, e também as sugestões para trabalhos futuros, tendo em vista os desenvolvimentos realizados.

No Apêndice A é mostrado a formulação do problema de recomposição fluente estudado neste trabalho.

No Apêndice B é mostrada a modelagem de máquinas síncronas adotada, e são desenvolvidas as equações utilizadas, referentes aos limites da curva de capacidade.

No Apêndice C são mostrados os dados elétricos dos sistemas utilizados nas simulações.

Capítulo II

Recomposição de Sistemas de Potência

II.1 Considerações Iniciais

Conforme exposto no Capítulo I, não existe uma ferramenta para solução integral do problema de recomposição de sistemas de potência. Existem diversos trabalhos na literatura focando o problema da recomposição de sistemas elétricos, principalmente utilizando técnicas de inteligência artificial e em menor número, trabalhos utilizando técnicas de otimização. Durante o desenvolvimento deste trabalho, a pesquisa sobre recomposição de sistemas de potência esteve focada em trabalhos baseados em técnicas de otimização e trabalhos focados na recomposição do sistema elétrico brasileiro. Portanto este capítulo faz uma revisão dos trabalhos mais recentes envolvendo os aspectos de recomposição de interesse desta dissertação. O baixo número de trabalhos publicados em relação à recomposição da malha principal do SIN reflete a necessidade de desenvolvimento de novas metodologias para recomposição deste sistema. Adicionalmente, são apresentados os critérios de recomposição adotados pelo ONS.

II.2 Revisão Bibliográfica

Uma apresentação dos principais aspectos envolvidos na recomposição de sistemas elétricos é feita em (Adibi *et alii*, 1991). Segundo o autor, estes problemas podem ser divididos em diversos grupos funcionais tais como: balanço de potência reativa, tensões transitórias de chave-

amentos, balanço de carga e geração, tomada de carga, seqüência ótima de entrada em operação de unidades geradoras e etc. É feita uma breve descrição sobre cada problema envolvido na recomposição. É feita também uma consideração sobre a fase de planejamento de recomposição de sistemas elétricos, onde o treinamento de operadores é essencial para tomada de ações efetivas durante a recomposição do sistema. Através de uma revisão de vários planos de recomposição, são mostrados os principais itens contidos no desenvolvimento de um plano de recomposição de sistemas de potência. Finalmente, são mostradas as potencialidades da aplicação de sistemas especialistas em estudos de recomposição, e a importância do treinamento de operadores.

Em (Adibi *et alii*, 1992) são descritas ações para o controle de sobretensões durante o processo de recomposição. Tais sobretensões são controladas através da absorção da potência reativa das linhas de transmissão a vazio. Isso pode ser feito através da utilização de geradores com capacidade suficiente de subexcitação, conexão de cargas reativas, conexão de reatores shunt, remoção de capacitores shunt, operação dos transformadores em posições de taps que não causem sobretensões durante a energização de linhas de transmissão e manutenção de um baixo perfil de tensão nos geradores. A impossibilidade de realização dessas tarefas pode causar desequilíbrio de potência reativa causando auto-excitação nos geradores participantes do processo de recomposição. Este trabalho não faz menção à recomposição do sistema em estágios, apenas cita os métodos de redução de sobretensões.

Em (Huang *et alii*, 1991) é apresentada uma metodologia para o planejamento de recomposição de sistemas elétricos em regime permanente baseado em um algoritmo de otimização. Os autores destacam as vantagens da energização independente dos subsistemas de forma a agilizar a recomposição, processo bastante semelhante à recomposição fluente do SIN. Segundo esta referência, um subsistema é reenergizado em vários estágios, cada um correspondendo ao chaveamento uma nova seção do circuito como um transformador, uma linha de transmissão, um reator ou uma carga. Cada estágio consiste em um novo sistema, com novas restrições operacionais e têm-se como variáveis de controle, a tensão de geração, os taps de transformadores, os reatores conectados e a carga tomada. Os autores destacam a importância de se minimizar o número de variáveis de controle em cada estágio e desta forma uma variável ajustada em um estágio é mantida fixa para cada estágio subsequente. Os autores destacam também a dificuldade de se ajustar a tensão de geração de forma que todas as restrições sejam satisfeitas em estágios subsequentes de recomposição, e citam que isto é feito em um processo de tentativa e erro.

Em (Huang *et alii*, 1995) é mostrado a aplicação de um plano de recomposição baseado em técnicas de otimização ao sistema Hydro-Québec, no Canadá. Neste trabalho, os diversos estágios de recomposição, correspondentes à energização de elementos do sistema, são tratados

em um único problema de otimização, e resolvidos simultaneamente. Desta forma, é possível obter um valor único para as variáveis de controle que são mantidas fixas durante a recomposição. Neste trabalho, os reatores, e os blocos de carga são tratados como variáveis contínuas e não se consideram os taps de transformadores como variáveis de controle.

Em (Adibi *et alii*, 1999) é apresentada uma metodologia para avaliação de sobretensões transitórias e de regime permanente durante a energização de linhas de transmissão no processo de recomposição. É definido o valor mínimo de carga a ser conectada no final da linha de transmissão e também o comprimento máximo de linha a ser energizada, de forma a eliminar possíveis sobretensões.

Em (Ketabi *et alii*, 2000) é proposto um método para o cálculo dinâmico do incremento de carga a ser conectada nos estágios iniciais da recomposição. O método proposto permite o cálculo da variação da frequência para um incremento de carga, ou o cálculo do incremento de carga a partir de um valor mínimo de frequência. O modelo proposto é baseado em fluxo de potência dinâmico, com o cálculo do incremento de carga feito a partir das equações dinâmicas que modelam o sistema. É adotado o modelo ZIP de carga com a consideração da variação da carga com a frequência. Adicionalmente, é descrita a importância da consideração dos limites de geração de potência reativa em um estudo de recomposição.

Em (Ketabi *et alii*, 2001) é apresentada uma metodologia para a determinação da seqüência de partida de unidades geradoras durante a recomposição. O método proposto é baseado em um algoritmo de *backtracking* para determinação do instante de partida das unidades, visando a maximização da capacidade de fornecimento de energia durante o período de recomposição. São consideradas restrições de potência ativa, reativa restrições de tempo e de rampa para as unidades geradoras. O fornecimento de energia à unidades que não sejam *black-start* é feito pelas unidades *black-start* através dos caminhos do sistema de transmissão que apresentam menores susceptâncias shunt, sendo esta restrição incorporada ao problema.

Em (Ketabi *et alii*, 2002) é desenvolvido uma metodologia para investigação de sobretensões harmônicas comuns nos estágios iniciais de recomposição. É proposto um índice de avaliação das sobretensões harmônicas causadas por operações de chaveamentos, baseado na impedância equivalente da barra, nas tensões pré-chaveamento, e nas características do transformador. É proposto também outro índice de sensibilidade, que mostra a variação da impedância de barra em relação a uma variação da admitância de barra. Este índice mostra qual a decisão a ser tomada entre, conexão de reatores shunt e cargas, conexão de outra unidade geradora ou redução da ten-

são de geração, para a redução de sobretensões harmônicas. Neste trabalho, as ações de controle são essencialmente as mesmas usadas no controle de sobretensões sustentadas.

Em (Yunhai *et alii*, 2002) o processo de recomposição é dividido em duas fases, denominadas energização série e energização paralela. A energização série corresponde ao início da recomposição onde são energizadas algumas barras prioritárias. Nesta fase há pouca disponibilidade de potência reativa e a capacidade de ajuste de tensão e frequência é limitada. Na energização paralela, as barras prioritárias já estão energizadas e o objetivo é conectar as áreas formadas na energização série. Para a energização série é utilizada uma versão modificada do algoritmo de Bellman-Ford, que determina um caminho mínimo em um grafo cujas arestas possuam valores. Neste caso, foram utilizadas as susceptâncias shunt dos circuitos como custos das arestas. Assim, esta metodologia apresenta apenas o caminho de menor susceptância não sendo consideradas as variáveis de controle disponíveis. Desta forma não foram considerados os suporte de potência reativa proporcionada por reatores shunt, tomadas de carga, ajuste de taps e ajustes na tensão de geração.

Em (Cheng *et alii*, 2004) é proposto um método de controle de sobretensões durante os estágios iniciais de recomposição. É proposto um índice de determinação da ação de controle mais eficaz, entre ajuste da tensão de geração, ajuste de taps de transformadores, conexão de reatores em derivação e tomadas de carga. Os índices são classificados conforme eficácia sobre o controle de tensão e são aplicados em ordem decrescente de eficácia do controle. Os autores destacam a importância da representação da curva de capacidade em um estudo da fase inicial da recomposição, apesar de não considerá-la no estudo.

Em (Sforza *et alii*, 2002) são apresentados os principais procedimentos de recomposição adotados no sistema elétrico da Itália. São consideradas que algumas unidades hidráulicas têm capacidade de *black-start* e que a maioria das unidades térmicas tem capacidade de rejeição total de carga. Desta forma o plano adotado divide a rede em subáreas, cada uma contendo uma ou mais unidades hidráulicas, uma ou duas unidades térmicas, linhas conectando as unidades hidráulicas e térmicas, e subestações com conexão ao sistema de transmissão para suprimento de cargas. A recomposição se inicia de forma independente nas subáreas, e quando estas atingem uma configuração estável, é feita sincronização das áreas restabelecidas, processo semelhante à recomposição do SIN.

Em (ONS, 2001) são descritas as diretrizes para estudos de recomposição do Sistema Interligado Nacional, onde são definidos os critérios para estudos elétricos de recomposição. O principal enfoque destas diretrizes são os estudos de regime permanente, efetuados para avaliação

da configuração do sistema nas diversas etapas de recomposição e verificação de carregamento de equipamentos pré e pós-manobra. São estabelecidos os critérios para definição do montante máximo de tomada de carga e também os níveis de tensão aceitáveis durante a recomposição do Sistema Interligado Nacional.

Em (Penante *et alii*, 2001) são mostrados os procedimentos da recomposição fluente no sistema Nordeste do Brasil após um blecaute com perda de carga de 1000 MW. É descrita a eficácia da filosofia de recomposição dividida em fase fluente e fase coordenada, entretanto foi mostrada a dificuldade de se estabelecer o montante máximo de carga a ser tomada na fase fluente. Foi descrito pelos autores que um montante superior ao permitido, ocasionava instabilidade de tensão e a conseqüente saída da instalação, atrasando o processo de recomposição da área.

Em (Gomes *et alii*, 2003a) são apresentadas algumas medidas tomadas em decorrência dos blecautes no Sistema Elétrico Brasileiro, ocorridos em 1999 e 2002. É feita uma revisão sobre os planos contra blecautes adotados na França e no Canadá. No trabalho são mostrados os pilares adotados pelo ONS para evitar blecautes: ações para minimizar probabilidades de grandes distúrbios, ações para minimizar a propagação de distúrbios e ações para diminuir o tempo de recomposição.

Em (Gomes *et alii*, 2003b) são mostrados os principais critérios adotados pelo ONS para a recomposição do Sistema Elétrico Brasileiro. É feita uma apresentação de dois grandes blecautes ocorridos no SIN em 1999 e 2002. São apresentadas as causas destes distúrbios e os prejuízos causados na forma de carga não atendida e tempo de restabelecimento do sistema. Por fim são apresentadas as melhorias realizadas no SIN após estes distúrbios. Entre estas melhorias está o aumento dos recursos de potência reativa através da instalação de novos reatores, instalação de *black-start* em unidades geradoras, e definição de novas áreas de geração hidráulica para recomposição fluente.

Em (Gomes *et alii*, 2002) e (Gomes *et alii*, 2004) são mostrados os principais procedimentos de recomposição da área Rio de Janeiro. São efetuados estudos de fluxo de potência, estudos de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos. As simulações de fluxo de potência são realizadas em cada estágio do processo de recomposição, para verificação do carregamento de equipamentos e dos níveis de tensão em regime permanente. As simulações de transitórios eletromecânicos são utilizadas para avaliação dos torques transitórios durante o fechamento de anéis. A determinação do número de unidades geradoras, do número mínimo de reatores e da máxima carga tomada é feita através de estudos de rejeição de carga em programas de transitórios eletro-

mecânicos através de procedimentos de tentativa e erro. Nestes trabalhos são apresentadas ainda alternativas de recomposição desta área utilizando o sistema da região sul do Brasil.

Em (Alves, 2007) é proposta uma metodologia para determinação de rotas de recomposição fluente do SIN. A metodologia apresentada é baseada no conceito de buscas em grafos, e no conceito de espaço de estados. O conceito de espaço de estados está relacionado à representação do universo de soluções decorrentes da explosão combinatorial do problema de recomposição fluente. O espaço de estados engloba soluções viáveis ou não cabendo ao algoritmo de busca a avaliação da viabilidade destas soluções através de funções de validação, neste caso o fluxo de potência. Inicialmente são fornecidos ao algoritmo de busca, os dados da rede elétrica em estudo, sendo definidas duas barras: a barra de geração, denominada barra raiz, e uma barra final, denominada barra objetivo, onde se deseja atender uma determinada carga do sistema. É utilizado um algoritmo de pesquisa em grafos, denominado busca em largura, para determinação do menor caminho entre a barra de geração e a barra objetivo. Uma vez determinada o caminho entre barra de geração e a barra objetivo, é feita a expansão do espaço de estados, gerando-se as alternativas de recomposição fluente em ordem crescente de número de unidades geradoras, suporte de potência reativa e tomada de cargas. A metodologia proposta avalia cada alternativa gerada através do fluxo de potência e descarta as alternativas inviáveis, restando ao final do processo uma rota de recomposição entre a barra de geração e a barra objetivo. A metodologia apresentada permite a recomposição de corredores a vazio ou com tomada de carga ao final do processo, sendo o montante definido previamente. Uma deficiência desta metodologia é a utilização do montante fixo de carga, visto que na prática não se sabe o valor da carga que pode ser fornecida pelo corredor e desta forma o montante máximo deve ser determinado. Outra deficiência da metodologia é a definição prévia da tensão de geração no processo de recomposição. Na prática, este valor é fixo durante todo o processo de recomposição, mas deve ser ajustado automaticamente em um valor ótimo. Estas deficiências podem ser facilmente contornadas com a utilização do fluxo de potência ótimo, em substituição a fluxo de potência convencional.

II.3 Filosofia de Recomposição do Sistema Elétrico Brasileiro

O crescimento do Sistema Interligado Nacional tornou mais complexa a operação em tempo real e também a recomposição deste sistema. Desta forma, os procedimentos de recomposição adotados no Brasil evoluíram em conjunto com o crescimento do sistema elétrico e os procedimentos antes feitos de forma centralizada passaram a ser feitos de forma descentralizada.

Os procedimentos de recomposição de todas as empresas do Setor Elétrico Brasileiro eram feitos de forma centralizada pelos Centros de Operação e os operadores somente executavam as instruções, se reportando ao Centro de Operação em caso de qualquer ocorrência. Este esquema de recomposição não era suficientemente ágil, e algumas empresas já sentiam necessidade de procedimentos descentralizados para agilizar o restabelecimento de carga.

A filosofia de recomposição então em uso no Brasil evoluiu até que no final da década de 1980, foram estabelecidos novos critérios para a recomposição do SIN. Foi estabelecido um processo descentralizado, onde as empresas detentoras dos recursos de geração iniciam o processo de recomposição fornecendo aos operadores de subestações informações sobre o montante de potência disponível para suprimento de cargas.

Esse processo de recomposição poderá fluir sem a necessidade de comunicação entre os Centros de Operação e operadores envolvidos, até o momento que restrições operativas impeçam sua continuidade.

Desta forma, definiu-se que a recomposição do sistema se processará em duas fases denominadas Recomposição Fluente e Recomposição Coordenada.

A Recomposição Fluente corresponde à primeira fase da recomposição e ocorre sem a interferência dos Centros de Operação. Nesta fase, cabe aos operadores a execução de procedimentos pré-determinados e permitem a recomposição de áreas geoeletricas, sempre compatibilizando carga e geração em uma configuração mínima de rede.

O início do processo de recomposição é feito a partir de usinas hidráulicas com capacidade de auto-restabelecimento. Com a partida e sincronização de unidades geradoras através de uma configuração mínima do sistema de transmissão preferencial, estas unidades são capazes de restabelecer cargas prioritárias. A partir do número mínimo de unidades geradoras, pode-se determinar disponibilidade inicial de geração em cada área geoeletrica. Nesta fase têm-se corredores energizados radialmente.

A transição entre fase fluente e a fase coordenada ocorre à medida que as empresas controladoras da geração e da transmissão de uma área geoeletrica informam ao Centro de Operação o término da execução dos procedimentos pré-estabelecidos da recomposição fluente.

A Recomposição Coordenada é efetuada pelos Centros de Operação e envolve o fechamento de paralelos entre áreas restabelecidas na recomposição fluente e a tomada de carga adicional pelas áreas geoeletricas, de forma a levar o sistema à sua configuração inicial pré-distúrbio.

Esta fase tem início somente após as áreas geelétricas restabelecidas na recomposição fluente apresentarem uma situação estável, com frequência estabilizada, ausência de sobrecargas em equipamentos e níveis de tensões compatíveis com a configuração da rede.

A adoção da recomposição descentralizada trouxe como grande benefício a possibilidade de execução dos procedimentos de recomposição fluente simultaneamente em várias áreas, restabelecendo importantes centros de carga de forma independente, agilizando o processo de recomposição (Gomes *et alii*, 2003b).

II.3.1 Diretrizes para a Recomposição Fluente

Pode-se dizer que o sucesso do processo de recomposição de um sistema elétrico está diretamente ligado à eficácia da execução dos procedimentos de recomposição fluente. Para isso, algumas diretrizes estabelecidas pelo ONS em (ONS, 2001) devem ser observadas durante os estudos realizados nesta fase. De forma geral estas diretrizes estão relacionadas à observação dos parâmetros elétricos da rede durante o processo de recomposição. Entre estas diretrizes, as mais importantes são listadas a seguir:

- Para cada procedimento prioritário de recomposição fluente devem estar estabelecidas a tensão de partida e o número mínimo de unidades geradoras necessárias para a usina de auto-restabelecimento;
- Na recomposição fluente deve ser atendida uma parcela de carga prioritária previamente estabelecida em seu máximo, compatível com a geração, transmissão e transformação disponíveis;
- Dentro de cada área geelétrica devem estar definidos os montantes máximos de potência que podem ser utilizados para o atendimento da carga prioritária;
- Durante os estudos de recomposição utilizam-se corredores energizados radialmente, com potências de curto reduzidas, diferentemente da condição normal de operação com o sistema completo e malhado;
- Levar em consideração as condições extremas de carga (cargas pesada e leve), para garantir a viabilidade da recomposição em qualquer horário.
- As usinas hidráulicas devem manter o maior número possível de unidades geradoras sincronizadas durante a recomposição, quando não houver restrições.

- Para evitar sobretensões no sistema, no caso de blecautes, deverão ser desligados os bancos de capacitores e os taps de transformadores comutados para uma posição que não implique em sobretensões no sistema.
- Cada instalação deverá utilizar os seus recursos locais para o controle da tensão nos níveis necessários ao restabelecimento. Os recursos de capacitores e/ou compensadores síncronos ou estáticos não são considerados em princípio como critérios gerais para o controle de tensão durante a recomposição, a menos que estejam definidas suas utilizações nos procedimentos operacionais.

A disponibilidade inicial de geração em uma área geoeletrica é definida com base no número de unidades geradoras conectadas em paralelo em cada usina da área geoeletrica. Para cada usina da área de auto-restabelecimento considera-se, como critério geral, uma unidade geradora em manutenção. Desta forma, tem-se $(n - 1)$ unidades geradoras conectadas em paralelo. Assim, para as $(n - 1)$ unidades geradoras disponíveis nas usinas de auto-restabelecimento, a partir das quais se recompõe a área geoeletrica, tem-se como potência inicialmente disponível, o valor calculado pela equação (II.1), estabelecida em (ONS, 2001).

$$P_{disp} = 0,8(n - 1)P_n \quad (II.1)$$

Onde:

- P_n Potência nominal da unidade geradora.
 n Número de unidades geradoras na usina.
 P_{disp} Potência ativa disponível na usina.

Deve-se considerar também que existe um número mínimo de unidades geradoras a ser conectadas em paralelo. Este número mínimo é definido a partir de estudos elétricos, com finalidade de evitar a ocorrência de auto-excitação quando ocorre rejeição de carga para determinadas condições críticas de rede. Neste caso, o termo $(n - 1)$ da equação (II.1) fica substituído por este número mínimo.

A partir destas considerações, definem-se os critérios para o montante de carga que pode ser tomado na fase fluente de recomposição. O primeiro critério define que o montante de carga a ser suprida seja a capacidade inicial das usinas de restabelecimento e o segundo critério é que o montante seja inferior ao valor inicial dado pela equação (II.1).

A tomada do montante máximo de carga estabelecido para a fase fluente da recomposição deve ocorrer em degraus, de forma que em cada degrau não haja variação de tensão maior

que 5% da tensão nominal de operação nem variação de frequência do sistema fora da faixa de 56,5 a 66,0 Hz para usinas hidráulicas. A situação ideal é que a tomada fluente de carga se dê em degraus com valores de 20 a 50% da potência inicialmente disponibilizada.

O intervalo de tempo entre tomadas de carga consecutivas na recomposição fluente, em uma mesma área geoeétrica, é um parâmetro importante no que diz respeito à segurança do procedimento de recomposição. Assim, as tomadas de carga consecutivas não devem ser feitas em intervalo de tempo inferior a 1 minuto, para possibilitar a estabilização das oscilações de tensão e frequência através dos reguladores de tensão e velocidade das unidades geradoras.

Durante a recomposição fluente os corredores de transmissão devem ser energizados radialmente sem exceder os limites máximos de tensão definidos na Tabela II.1 em qualquer barra do corredor, admitindo-se que nenhuma carga tenha sido tomada. Nesta configuração o sistema está sujeito à ocorrência de sobretensões que devem ser eliminadas utilizando-se os recursos disponíveis no sistema tais como a potência reativa dos geradores, os reatores shunt, ajuste de taps e tomadas de carga. A potência reativa disponibilizada pelas usinas é calculada com base na curva de capacidade das unidades geradoras participantes da recomposição.

Esta disponibilidade de fornecimento de potência reativa por parte das usinas, juntamente com as características de impedância da configuração mínima de área geoeétrica considerada, permite determinar o limite de carga prioritária a ser atendido, em função do controle de tensão durante a fase fluente. Esta configuração pode determinar um valor para o montante máximo de tomada fluente de carga inferior à potência ativa inicialmente disponibilizada pelas usinas. Isto decorre da necessidade de se manter os níveis de tensão na área de auto-restabelecimento dentro de limites aceitáveis entre o seu valor máximo e mínimo, durante a fase fluente da recomposição.

As faixas de tensão permitidas em regime permanente durante a recomposição fluente do SIN dependem do nível de tensão de operação. Para as regiões sul, sudeste e centro-oeste do SIN, estes valores são mostrados na Tabela II.1, estabelecida em (ONS, 2001).

Tabela II.1 – Níveis de Tensão Aceitáveis em Regime Permanente para Estudos de Recomposição das Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste.

Tensão (kV)	Fase Fluente (%)		Fase Coordenada (%)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
≤ 138	90	110	90	110
230	90	110	90	110
345	90	110	90	110
440	90	110	90	110
500	90	110	90	110
525	85	105	90	105
765	90	104,6	90	104,6

Em regime dinâmico são aceitáveis tensões de 0,85 a 1,25 pu.

Durante o processo de recomposição o comportamento da carga é desconhecido e desta forma o ONS recomenda que as cargas sejam representadas integralmente por potência constante e com fator de potência entre 0,85 e 0,95.

Além da limitação imposta pela configuração mínima de rede, o carregamento de equipamentos do sistema de transmissão também pode limitar o montante de carga a ser tomado, embora este não seja um fator crítico quando o sistema se encontra em uma fase inicial de recomposição com reduzida capacidade de geração.

II.4 Estudos Elétricos de Recomposição do SIN

O processo de recomposição do SIN é efetuado utilizando-se estudos de fluxo de potência, e somente após o estudo de regime permanente são realizados estudos de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos. Os dois primeiros estudos são responsáveis, inicialmente, pela definição dos montantes máximos de tomada de carga, e da configuração mínima de reatores.

O principal critério de recomposição é obtido de estudos de fluxo de potência que são feitos para analisar as condições do sistema nas diversas etapas e configurações da recomposição, verificando os perfis de tensão, os carregamentos em equipamentos e a capacidade das unidades geradoras do sistema nas situações pré-manobra e pós-manobra.

Os estudos de estabilidade eletromecânica são feitos para analisar o comportamento das oscilações de frequência e de tensão durante manobras de energização de linhas de transmissão, de transformadores em vazio e nas tomadas e rejeição de carga. Nesses estudos, devem-se levar em conta os reguladores de tensão e de velocidade das unidades geradoras nas usinas de auto-restabelecimento (ONS, 2001). Quando do fechamento de paralelos ou de anéis, também devem

ser investigadas as sobretensões dinâmicas, os aspectos torsionais nas máquinas, bem como a manutenção da estabilidade eletromecânica do sistema.

Os estudos de transitórios eletromagnéticos são realizados na atividade de planejamento da operação, e definem as tensões máximas de energização dos equipamentos. Nesta atividade, o enfoque é dado aos surtos de manobra de equipamentos, tais como: energização de linhas de transmissão e transformadores e rejeições de carga.

II.5 Controle de Sobretensões na Recomposição do SIN

Na recomposição do Sistema Interligado Nacional o processo de determinação da configuração mínima de reatores, da máxima tomada de carga e a determinação do número mínimo de unidades geradoras, é feito através de estudos em regime permanente e estudos dinâmicos de rejeição de carga. Estes estudos visam determinar as solicitações de tensão impostas aos equipamentos e analisar medidas operativas quando da ocorrência de perda de carga (D'Ajuz *et alii*, 1987).

Em um estudo de rejeição de carga, um ou mais geradores são deixados conectados à linha de transmissão quando uma carga é repentinamente desconectada. Um exemplo de rejeição de carga é mostrado na Figura II.1, onde a abertura do disjuntor coloca o sistema em tensões elevadas devido ao efeito Ferranti.

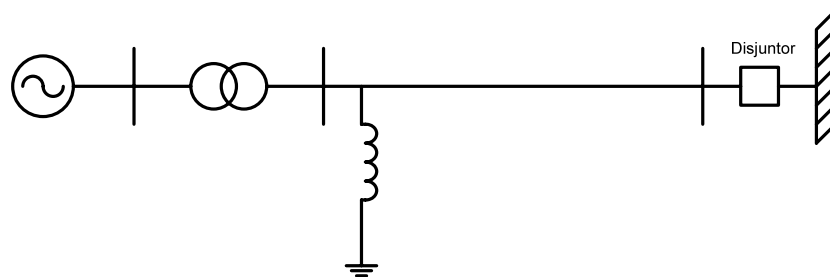


Figura II.1 – Esquema de Rejeição de Carga.

As sobretensões resultantes são caracterizadas por um crescimento instantâneo no instante de rejeição, seguida por um crescimento gradual. Em geral, as sobretensões resultantes do fenômeno de rejeição de carga, têm uma forma senoidal à frequência industrial, sendo influenciadas pelo comprimento das linhas e pelo grau de compensação shunt da linha (D'Ajuz *et alii*, 1987). A elevação da tensão e a máxima tensão atingida é função da potência reativa das linhas de transmissão e dos controles do gerador, como regulador de velocidade e sistema de excitação. Consi-

dera-se que a tensão interna do gerador permanece constante no instante subsequente à rejeição (antes da atuação dos reguladores de tensão).

Após um período transitório em que as sobretensões resultantes são função apenas das características do sistema, os reguladores de velocidade e de tensão atuarão no sentido de restabelecer condições normal de operação. A Figura II.2 mostra uma curva da tensão terminal de uma máquina síncrona após a rejeição de carga, sem ocorrência da auto-excitação.

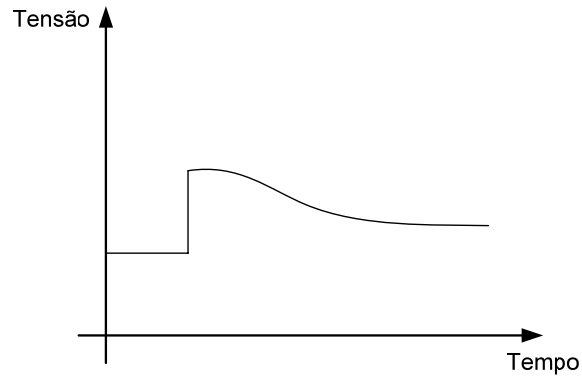


Figura II.2 – Rejeição de carga sem auto-excitação.

Após a rejeição de carga, pode ocorrer o fenômeno da auto-excitação que consiste do aumento descontrolado da tensão terminal da máquina. Esta condição aparece quando a quantidade de potência reativa fornecida pelo sistema é maior que a capacidade de absorção de reativos das máquinas conectadas.

Uma condição para a ocorrência de auto-excitação é que a reatância capacitiva do sistema, X_c , seja menor que a reatância síncrona de eixo quadratura da máquina, ou seja, $X_c < X_q$, (Hu *et alii*, 1999). A auto-excitação poderia ocorrer também quando a reatância capacitiva do sistema fosse menor do que a reatância síncrona de eixo direto, $X_c < X_d$. No entanto, como o regulador de tensão atua reduzindo o enlace de fluxo¹ de eixo direto, a auto-excitação não ocorre até que $X_c < X_q$.

A Figura II.3 mostra uma curva da tensão terminal de uma máquina síncrona após a rejeição de carga, onde ocorre a auto-excitação após a rejeição de carga. Uma forma de se tornar o sistema mais robusto quanto à ocorrência de auto-excitação é conexão de maior número de geradores e reatores, para absorção dos reativos excedentes da rede.

¹ Enlace de fluxo: O enlace de fluxo por segundo é definido como o produto da indutância do enrolamento pela corrente que neste circula e é muito utilizado no equacionamento dos modelos das máquinas síncronas devido às simplificações das equações e a facilidade para representação do fenômeno da saturação.

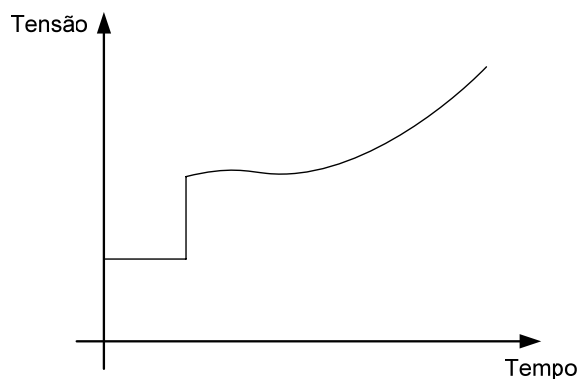


Figura II.3 – Rejeição de carga com auto-excitação.

Nos estudos de recomposição do SIN, são realizadas simulações de rejeição de carga, nos diversos cenários de recomposição fluente, e a alocação de unidades geradoras e de reatores shunt é feita de forma manual, através de tentativa e erro, até que todos os cenários de recomposição sejam viáveis e robustos quanto à auto-excitação. Uma vez definida a configuração mínima de reatores, define-se também o montante de carga que pode ser tomada.

Em um longo corredor de transmissão com diversas possibilidades de compensação de potência reativa, a determinação de uma configuração mínima de reatores através de um processo de tentativa e erro, tal como é feito atualmente, pode se tornar inviável.

II.6 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas as principais questões que devem ser levadas em conta em um estudo de recomposição fluente. Foi apresentada a importância da manutenção de níveis adequados de tensão durante um processo de recomposição, sendo mostradas também as diversas estratégias de controle de tensão propostas na literatura. A inabilidade de execução dos procedimentos adequados na fase fluente pode implicar na inviabilização do processo de recomposição.

Foram apresentados ainda as principais diretrizes e critérios estabelecidos pelo ONS na recomposição da malha principal do SIN e as metodologias atualmente empregadas para estudos de recomposição fluente deste sistema. Mostrou-se a inexistência de uma metodologia de determinação automática de configurações mínimas de rede.

Desta forma, uma metodologia que fosse capaz de determinar de forma automática a configuração mínima de reatores e o montante de carga que pode ser suprida, auxiliaria os operadores no complicado processo de recomposição, reduzindo o tempo gasto no restabelecimento da carga.

Capítulo III

Metodologia Proposta

III.1 Considerações Iniciais

Conforme apresentado no Capítulo II, não existe uma metodologia para determinação automática da configuração mínima de reatores conectados durante a recomposição fluente. No caso do sistema brasileiro, nos estudos de recomposição fluente são aplicados esquemas de rejeição de carga buscando a definição desta configuração de reatores, não necessariamente ótima.

Neste capítulo é mostrada a metodologia desenvolvida neste trabalho, visando a determinação automática da configuração mínima de reatores e da máxima tomada de carga. Neste capítulo são mostrados os modelos adotados e a técnica de solução utilizada.

III.2 Identificação do Problema

O problema de recomposição fluente consiste em determinar uma configuração mínima de rede capaz de atender uma carga denominada prioritária. Deve ser definida uma seqüência de chaveamento de equipamentos para que possa ser estabelecido o corredor de recomposição fluente, onde a utilização de reatores deve ser mínima. Como exemplo, seja o corredor de recomposição apresentado na Figura III.1.

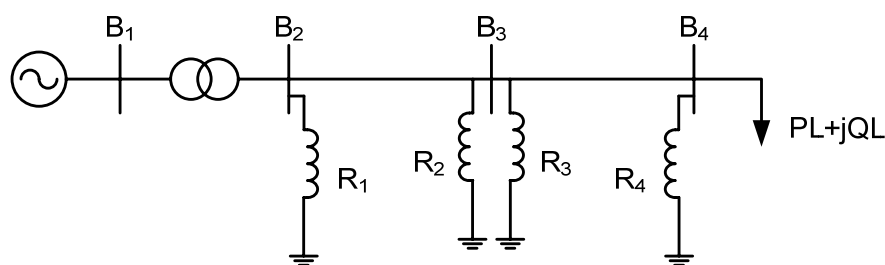


Figura III.1 – Corredor de Recomposição Fluente.

Seja a energização do corredor $B_1 - B_4$ para a recomposição de uma área geoeletrica, com tomada de carga na barra B_4 . O corredor deverá ser energizado e as sobretensões resultantes devem ser controladas utilizando-se a potência reativa fornecida pelos reatores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 . É necessário estabelecer também o valor do montante de carga que pode ser conectado no final do corredor em B_4 . Além disto, é necessária também a determinação da tensão de geração em B_1 para que o processo de recomposição fluente possa ser efetuado com segurança.

Um cenário ideal seria a tomada de carga em B_4 sem a necessidade de conexão de reatores ao sistema, o que possibilitaria uma elevada tomada de carga. Entretanto a energização sem reatores pode não ser possível, já que as energizações são feitas em estágios, e em cada estágio as tensões devem ser controladas utilizando os reatores disponíveis.

Para a recomposição do corredor, são criados diversos cenários, que são essencialmente novos sistemas, com novas variáveis e novas restrições. Para satisfazer estas condições, o operador pode controlar tensão de geração, reatores conectados e a carga tomada. No entanto, durante a recomposição, estes ajustes devem ser minimizados, como forma de agilizar o processo de recomposição. Isto significa que as variáveis ajustadas em uma etapa devem ser mantidas fixas nas etapas subsequentes. Para isto, na metodologia proposta devem ser representados todos os cenários de recomposição. A Figura III.2 mostra os cenários de recomposição do corredor B_1 - B_4 .

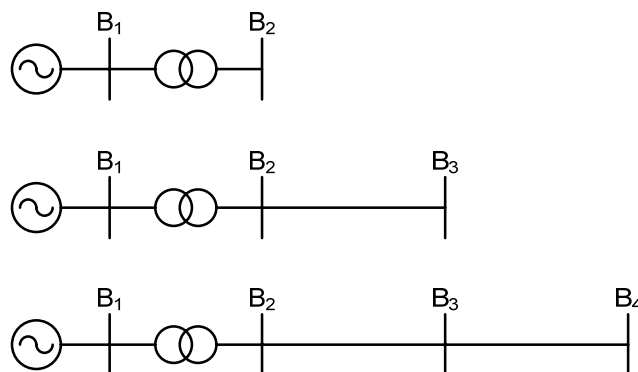


Figura III.2 – Cenários de Recomposição Fluente.

Considerando os reatores do corredor $B_1 - B_4$, existem 2^4 possibilidades de conexão. No caso de um corredor de maiores dimensões com várias opções de compensação reativa, a simulação de todas as possibilidades, tal como é feito atualmente, seria inviável. Desta forma, busca-se uma metodologia capaz de determinar de forma automática a localização dos reatores, para o controle de sobretensões.

Ainda durante a recomposição fluente, é prática comum o ajuste da tensão de geração em seu valor mínimo, normalmente 0,900 pu, como forma de limitar as sobretensões resultantes durante a energização de longas linhas de transmissão (Adibi *et alii*, 1992). Entretanto, este ajuste, certamente limitará o montante de carga que poderá ser fornecida pelo corredor. Desta forma, necessita-se de um ajuste ótimo deste parâmetro de tal forma que seja possível atender a máxima carga e ainda limitar as sobretensões resultantes em caso de rejeição de carga.

Nesta fase da recomposição, a máxima carga que pode ser seguramente tomada é limitada em função do controle de sobretensões no caso de rejeição de carga (Gomes *et alii*, 2002) e (Gomes *et alii*, 2004). Nos estudos de recomposição do SIN, isto é feito através de tentativa e erro simulando rejeições de carga em um programa de transitórios eletromecânicos, em cada estágio de recomposição.

Nota-se que no processo de recomposição fluente existem três variáveis críticas, o montante de carga tomada, o número de reatores conectados e a tensão de geração. Outro fator importante é a seqüência de energização das linhas de transmissão e reatores. Desta forma, necessita-se de uma metodologia para otimização dos recursos disponíveis durante esta fase de recomposição, visando sempre o atendimento à maior carga possível. Existe ainda outro aspecto durante a recomposição fluente que é a definição do número mínimo de máquinas conectadas para o estabelecimento do corredor de recomposição, porém este fato não é contemplado neste trabalho, sendo sempre admitido $n-1$ unidades geradoras conectadas ou o número mínimo utilizado para a área geoeletrica conforme critérios do ONS (ONS, 2001).

III.3 Técnica de Solução

Com o número de unidades geradoras definido, e considerando a não ocorrência de auto-excitação, a definição da configuração mínima de reatores pode ser feita com base nas sobretensões instantâneas decorrentes da perda de carga. Estas sobretensões ocorrem no instante imediatamente após a perda de carga, onde os reguladores das máquinas do sistema ainda não atuaram.

Desta forma seria necessário o conhecimento do estado da rede no ponto imediatamente após a rejeição de carga.

Este ponto de solução é caracterizado pelas tensões internas dos geradores serem constantes (D'Ajuz *et alii*, 1987) devido à suposição de que a constante de tempo do enrolamento de campo é infinita (Elgerd, 1976). O ponto de solução da rede neste instante é calculado com base nas condições do sistema antes da rejeição de carga, obtido pela solução do fluxo de potência em regime permanente.

Imediatamente após a rejeição de carga, as tensões sofrem uma elevação instantânea, sem a ação dos reguladores de tensão que ocorrem em período subsequente. Decorrido algum tempo, caso não ocorra a auto-excitação, o sistema entra em regime permanente, após a ação dos reguladores de tensão e de velocidade. A Figura III.3 mostra estes três instantes de tempo, o regime permanente pré-rejeição de carga, o regime dinâmico imediatamente após a rejeição e o regime permanente após a atuação dos reguladores de tensão, onde as tensões terminais das máquinas são controladas.

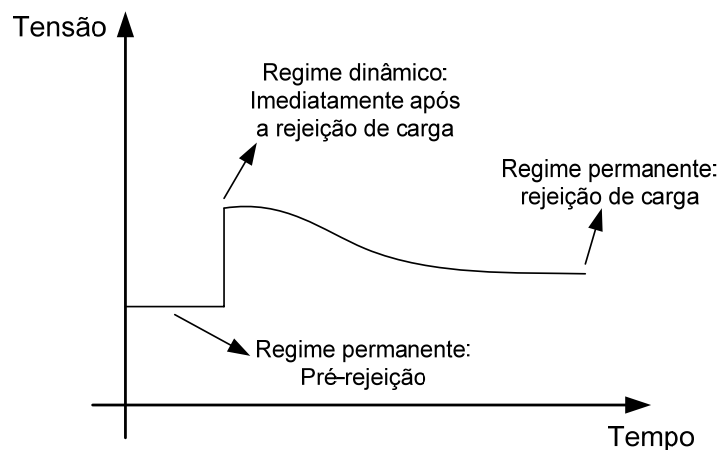


Figura III.3 – Solução em Regime Permanente e Regime Dinâmico.

Considerando os aspectos apresentados, a formulação do FPO proposta consiste na solução do fluxo de potência ótimo em três instantes: (i) antes da rejeição de carga; (ii) imediatamente após a rejeição de carga e (iii) em novo regime permanente após a rejeição de carga, que representa os cenários de recomposição.

Se o objetivo fosse apenas definir os reatores conectados e a carga tomada, seria necessária apenas a representação dos instantes (i) e (ii) no fluxo de potência ótimo. Entretanto, como se busca também a definição da tensão de geração há necessidade de representação do instante (iii), que corresponde ao regime permanente, onde as tensões de geração são controladas. Definindo-se a tensão de geração considerando este novo regime permanente, encontra-se um valor de ten-

são que será mantido fixo durante todo o processo de recomposição. A configuração mínima de reatores definida, deve ser viável também neste novo regime permanente.

Levando-se em conta que no problema de recomposição são considerados vários cenários, o problema de otimização apresentado torna-se de grande dimensão. No Apêndice A é mostrada a formulação do problema como um único problema de otimização, considerando os aspectos apresentados.

Entretanto, a natureza do problema permite a sua solução por decomposição em subproblemas, pois existem três problemas distintos a serem resolvidos, como pode ser visto na Figura III.3. Neste caso, haverá dois subproblemas para cada cenário de recomposição, um dinâmico e um de regime permanente.

Neste trabalho foi adotada a decomposição em três subproblemas. A técnica utilizada para realização da decomposição foi a decomposição matemática de Benders descrita em (Benders, 1962), também utilizada nos trabalhos (Granville *et alii*, 1994), (Oliveira *et alii*, 2003) e (Oliveira *et alii*, 2008). Esta técnica já foi anteriormente utilizada com sucesso para representação de situações de fechamento de anéis elétricos no sistema de potência, como pode ser visto em (Martins *et alii*, 2008).

A solução do problema de determinação da configuração mínima de reatores pode ser vista como um problema de viabilidade já que o objetivo é a alocação ótima de reatores para que cada cenário de recomposição fluente seja viável, não resultando em sobretensões decorrentes da energização de linhas de transmissão.

A solução proposta por meio da técnica de decomposição de Benders é mostrada na Figura III.4. O problema original é dividido em três subproblemas, sendo que em cada cenário de recomposição são representados os dois instantes, dinâmico e o regime permanente.

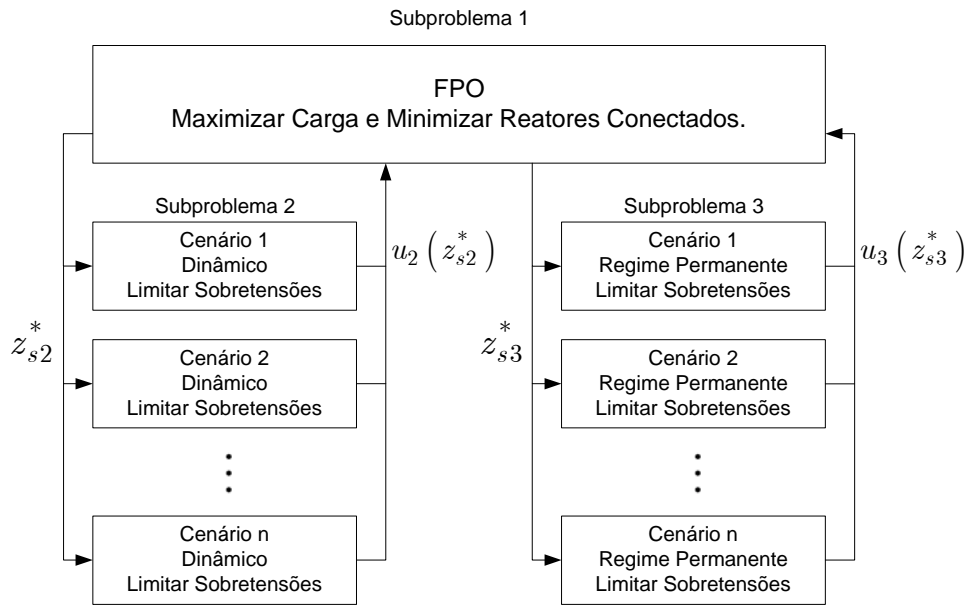


Figura III.4 – Esquema de Solução por Decomposição de Benders.

Ainda sem entrar no equacionamento do problema, na Figura III.4 o subproblema 1 corresponde ao sistema completo, fornecendo a máxima carga, com um número reduzido de reatores conectados. A partir desta configuração são simuladas, rejeições de carga correspondendo aos diversos cenários de recomposição, em regime dinâmico e em regime permanente, subproblemas 2 e 3 respectivamente, onde o objetivo é limitar sobretensões do sistema a vazio.

No esquema apresentado na Figura III.4, o subproblema 1 fornece os valores ótimos z_{s2}^* e z_{s3}^* para que os subproblemas 2 e 3 sejam viáveis. Os subproblemas 2 e 3 enviam restrições de Benders $u_2(z_{s2}^*)$ e $u_3(z_{s3}^*)$ ao subproblema 1, quando os cenários de recomposição não forem viáveis. As restrições de Benders atuam no sentido de alterar as decisões sobre reatores conectados, tensões de geração e carga tomada. O processo continua até que todos os cenários de recomposição sejam viáveis, estabelecendo uma configuração mínima de rede capaz de viabilizar o processo de recomposição fluente.

III.4 Descrição dos Modelos Adotados

Nesta seção serão descritos todos os modelos utilizados neste estudo, modelo das máquinas síncronas, curva de capacidade, reguladores de tensão, reatores, compensador síncrono e compensador estático de reativos.

III.4.1 Modelagem das Máquinas Síncronas

As máquinas síncronas são modeladas como fonte de tensão constante E'' atrás da reatância subtransitória de eixo direto e eixo quadratura X_d'' e X_q'' tal como em estudos dinâmicos. Este modelo representa as máquinas de pólos salientes encontradas na geração hidráulica e usadas no processo de recomposição.

O modelo de tensão atrás da reatância permite modelar a máquina síncrona no instante imediatamente após a rejeição de carga, já que neste instante a tensão e ângulo internos são fixos. Assim, as máquinas são vistas pela rede como uma fonte de tensão constante $E\angle\delta$ atrás da reatância subtransitória X_d'' e X_q'' , cujo valor é calculado pelas condições pré-rejeição de carga.

Este modelo permite ainda determinar o valor do ângulo da tensão interna, utilizado no modelo da curva de capacidade. Para máquinas de pólos salientes, tem-se a potência ativa e reativa gerada dadas por (III.1) e (III.2), respectivamente.

$$PG = \frac{Ea''V_t}{X_d''} \sin(\delta - \theta) + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_d''} \right) \sin 2(\delta - \theta) \quad (\text{III.1})$$

$$QG = \frac{Ea''V_t}{X_d''} \cos(\delta - \theta) - \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q''} + \frac{1}{X_d''} \right) + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_d''} \right) \cos 2(\delta - \theta) \quad (\text{III.2})$$

Onde:

PG	Potência Ativa Gerada.
QG	Potência Reativa Gerada.
V_t	Tensão Terminal da Máquina.
θ	Ângulo da Tensão Terminal da Máquina.
Ea''	Tensão Interna da Máquina.
δ	Ângulo da Tensão Interna da Máquina.
X_d''	Reatância Subtransitória de Eixo Direto.
X_q''	Reatância Subtransitória de Eixo Quadratura.

As equações (III.1) e (III.2) quando inseridas na formulação do subproblema 1, determina a tensão atrás da reatância subtransitória para a condição pré-rejeição de carga e quando estas mesmas equações são inseridas na formulação do subproblema 2 com valores fixos da tensão atrás da reatância subtransitória, tem-se o ponto imediatamente após a rejeição de carga, onde ocorrem as sobretensões instantâneas. Estas equações quando inseridas no subproblema 3, per-

mitem modelar as variáveis internas da máquina, necessárias para o modelo de curva de capacidade e para o modelo de controle de tensão utilizado.

III.4.2 Modelagem da Curva de Capacidade

As máquinas síncronas têm capacidade limitada de fornecer ou absorver potência reativa, limitada por sua curva de capacidade. Tradicionalmente em estudos de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo, estes limites são considerados fixos, independentes da potência ativa gerada e da tensão terminal da máquina. Neste caso, normalmente tem-se limites pessimistas de geração de potência reativa para os geradores. Entretanto, em estudos de recomposição um modelo mais detalhado é requerido.

A curva de capacidade da máquina síncrona é definida como uma região factível de operação dependente de sua potência ativa, potência reativa e da tensão terminal (Nilsson *et alii*, 1994) e (Huatuco, 2006). Esta curva é definida em um plano de potência reativa *versus* potência ativa gerada (plano PG-QG), sendo composta por cinco limites. Tais limites são funções dos parâmetros básicos das máquinas: reatância de eixo direto X_d , reatância de eixo de quadratura X_q , tensão terminal V_t , potência aparente nominal S_{nom} , potência mecânica máxima dada pela máquina primária $P_{mec_{max}}$, e ângulo interno δ . O equacionamento completo das restrições da curva de capacidade pode ser encontrado no Apêndice B, onde estão desenvolvidas as equações referentes a cada limite da curva. Durante a realização deste trabalho, o desenvolvimento e aplicação deste modelo ao fluxo de potência ótimo resultaram na publicação:

- [C] EDUARDO M. VIANA, E. J. OLIVEIRA, N. MARTINS, L. W. OLIVEIRA, J. L. R. PEREIRA, “Influência da Curva de Capacidade de Geradores e do Ganho Estático de Reguladores de Tensão no Planejamento de Potência Reativa” artigo a ser apresentado no XI SEPOPE – Simpósio dos Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Belém, PA, Março, 2009.

O limite de corrente de armadura é considerado na literatura (Lof *et alii*, 1995) como o lugar geométrico para a corrente de armadura máxima constante, o qual corresponde a um círculo com centro na origem do plano PG-QG. A equação deste círculo é dada por:

$$PG^2 + QG^2 = (V_t I_{a_{max}})^2 \quad (III.3)$$

Onde:

$I_{a_{max}}$ Máxima Corrente de Armadura Permissível.

A máxima capacidade da máquina primária é representada no plano PG-QG através de uma reta paralela ao eixo QG e passando pelo ponto $Pmec_{\max}$.

$$PG = Pmec_{\max} \quad (III.4)$$

As equações (III.3) e (III.4) são obtidas de maneira direta (Monticelli *et alii*, 2000). Os três limites restantes da curva de capacidade são representados por equações analíticas (Lof *et alii*, 1995) obtidas da manipulação das equações de potência dadas por (III.1) e (III.2). Estas manipulações e a determinação destes limites são mostradas no Apêndice A. O limite de excitação máxima corresponde à máxima corrente que pode ser fornecida ao rotor da máquina sem que haja deterioração dos enrolamentos de campo. Desta forma, este limite é representado em função da tensão interna máxima da máquina sendo estabelecido pela equação (III.5).

$$PG^2 + \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)^2 = \left(\frac{V_t E_{a_{\max}}}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right)^2 \quad (III.5)$$

Onde:

X_d Reatância Síncrona de eixo direto.

X_q Reatância Síncrona de eixo quadratura.

$E_{a_{\max}}$ Tensão interna máxima, determinada pela tensão máxima de campo.

O limite de excitação mínima é uma curva concêntrica com a curva do limite de excitação máxima e corresponde ao lugar geométrico da corrente de excitação mínima constante. Esta curva é obtida de (III.5) apenas substituindo o termo $E_{a_{\max}}$ pelo termo $E_{a_{\min}}$. Desta forma tem-se o limite definido pela equação (III.6).

$$PG^2 + \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)^2 = \left(\frac{V_t E_{a_{\min}}}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right)^2 \quad (III.6)$$

Onde:

$E_{a_{\min}}$ Tensão interna mínima, determinada pela tensão mínima de campo.

A tensão interna do gerador é proporcional à tensão de campo, se for desprezado o efeito de saturação, e o valor mínimo desta tensão exerce um papel importante na capacidade de absorção de reativos da máquina, sendo este valor dependente do tipo de sistema de excitação da máquina. Sistemas que apresentam capacidade de corrente de campo negativa têm melhor desempenho em estudos de rejeição de carga (Mello *et alii*, 1975).

Na literatura encontram-se trabalhos (Lof *et alii*, 1995) e (Passos F^o, 2000) que tratam o limite de estabilidade do gerador como um limite linear onde o valor mínimo de geração é função do ângulo interno máximo. Para uma máquina de pólos salientes, este ângulo máximo não é fixo, mas sim, uma função da excitação da máquina. Desta forma, o limite de estabilidade em regime permanente, é representado como a potência ativa máxima PG que pode ser gerada em função da potência reativa QG . Considerando este fato, o limite de estabilidade estática é representado pela equação (III.7) e equacionado no Apêndice B.

$$PG^2 = - \frac{\left(\frac{V_t^2}{X_q} + QG \right)^3}{\left(\frac{V_t^2}{X_d} + QG \right)} \quad (\text{III.7})$$

O limite representado por (III.7) é certamente a restrição mais importante da curva de capacidade a ser modelada neste estudo de recomposição fluente, visto que esta restrição limita a absorção de reativos pelos geradores, devido à energização de linhas a vazão. Tendo definido todos os limites da curva de capacidade é possível representar graficamente esta curva.

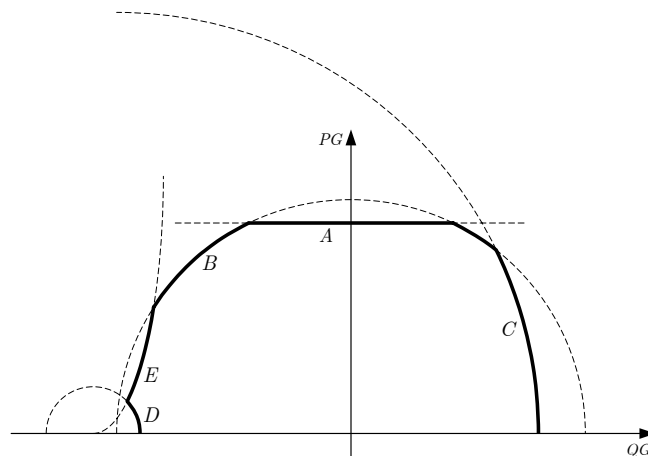


Figura III.5 – Representação da Curva de Capacidade.

Na Figura III.5, a região delimitada pelas curvas A, B, C, D, E definem a região de operação da máquina síncrona. Estas curvas correspondem respectivamente aos limites da máquina primária, corrente de armadura, excitação máxima, excitação mínima e estabilidade estática.

III.4.3 Modelagem dos Reguladores de Tensão

A função básica de um sistema de excitação de uma máquina síncrona é fornecer corrente ao enrolamento de campo, controlando a tensão terminal para uma operação satisfatória do sistema de potência (Kundur, 1994). As funções de controle disponíveis em um sistema de excita-

ção incluem tensão e fluxo de potência reativa. O controle pelo sistema de excitação é efetuado quando o gerador encontra-se dentro dos limites de geração de potência reativa, dado pela curva de capacidade (Roman *et alii*, 2005). Existem vários modelos de sistemas de excitação para estudos em sistemas de potência recomendados pelo IEEE em (IEEE, 1992).

Um modelo simplificado de AVR (*Automatic Voltage Regulator*) tem como variáveis de entrada a tensão terminal da máquina V_t e a tensão de referência V_{ref} e tem como variável de saída a tensão interna da máquina E_a .

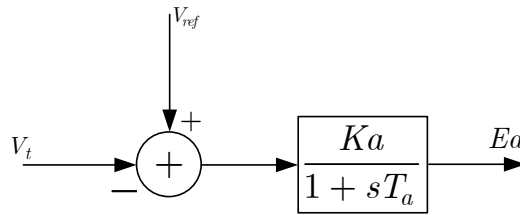


Figura III.6 – Representação esquemática do AVR.

Para este regulador a saída é dada pela equação (III.8).

$$E_a = \frac{K_a}{1 + sT_a}(V_{ref} - V_t) \quad (III.8)$$

Onde:

- K_a Ganho estático do regulador de tensão, neste trabalho adotado o valor de 200.
- T_a Constante de tempo do regulador de tensão.
- V_{ref} Tensão de referência do regulador de tensão.

Desmembrando a equação (III.8), tem-se:

$$E_a + \dot{E}_a T_a = K_a(V_{ref} - V_t) \quad (III.9)$$

Em regime permanente, no ponto de equilíbrio, tem-se que $\dot{E}_a = 0$, desta forma chega-se à equação (III.10).

$$E_a = K_a(V_{ref} - V_t) \quad (III.10)$$

Esta equação descreve o modelo do AVR em regime permanente, estabelecendo um acoplamento entre tensão terminal e tensão interna da máquina (Machado *et alii*, 2004). Para a inclusão do efeito do regulador no problema do FPO, a equação dinâmica do regulador no ponto de equilíbrio é adicionada às equações algébricas do fluxo de potência. Durante o desenvolvimento deste trabalho, a modelagem deste equipamento, resultou em duas publicações:

- [C] EDUARDO M. VIANA, E. J. OLIVEIRA, N. MARTINS, L. W. OLIVEIRA, J. L. R. PEREIRA, “Influência da Curva de Capabilidade de Geradores e do Ganho Estático de Reguladores de Tensão no Planejamento de Potência Reativa” artigo a ser apresentado no XI SEPOPE – Simpósio dos Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Belém, PA, Março, 2009.
- [D] EDUARDO M. VIANA, E. J. OLIVEIRA, N. MARTINS, L. W. OLIVEIRA, J. L. R. PEREIRA, “Controle Secundário de Tensão com Representação do AVR” artigo a ser apresentado no XVII CBA – Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora, MG, Setembro, 2008.

III.4.4 Modelagem dos Compensadores Síncronos

Os compensadores síncronos são excelentes equipamentos de controle de tensão em sistemas elétricos (Almeida *et alii*, 2005). Neste trabalho, os compensadores síncronos também são modelados como fonte de tensão constante E'' atrás da reatância subtransitória X_d'' , porém este equipamento fornece apenas potência reativa e a potência ativa gerada é igual a zero. Apesar deste equipamento não ser explicitamente utilizado em um processo de recomposição (ONS, 2001), neste trabalho o equipamento será modelado no problema de FPO, com objetivo de mostrar os benefícios de utilização deste dispositivo na fase fluente de recomposição.

III.4.5 Modelagem dos Reatores

Os reatores de barra são modelados como impedância constante sendo que a potência reativa entregue por existe dispositivo é função do quadrado da tensão aplicada, conforme equação (III.11).

$$Q_{shb}^k = b_{shb}^k V_k^2 \quad (\text{III.11})$$

Onde:

Q_{shb}^k Potência reativa fornecida pelo reator.

b_{shb}^k Susceptância do reator de barra.

V_k^2 Tensão aplicada ao reator.

Os reatores de linha também são modelados como impedância constante. Este dispositivo funciona em conjunto com as linhas de transmissão de forma que só entram em operação

através da recomposição da linha. A Figura III.7, mostra a representação esquemática deste equipamento em uma linha k-m.

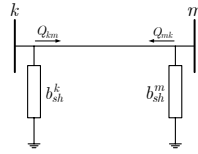


Figura III.7 – Representação esquemática de reatores de linha.

A potência reativa fornecida por este dispositivo é dada por:

$$Q_{shl}^k = b_{shl}^k V_k^2 \quad (III.12)$$

$$Q_{shl}^m = b_{shl}^m V_m^2 \quad (III.13)$$

O fluxo de reativos entre as barras é dado por:

$$Q_{km} = -(b_{km} + b_{km}^{sh}) V_k^2 - V_k V_m [g_{km} \text{sen}(\theta_{km}) - b_{km} \text{cos}(\theta_{km})] \quad (III.14)$$

$$Q_{mk} = -(b_{km} + b_{km}^{sh}) V_m^2 + V_k V_m [g_{km} \text{sen}(\theta_{km}) + b_{km} \text{cos}(\theta_{km})] \quad (III.15)$$

A modelagem deste equipamento no problema é feita somando-se a potência reativa entregue ao fluxo de reativos da linha. Desta forma, tem-se:

$$Q_{km} = -(b_{km} + b_{km}^{sh}) V_k^2 - V_k V_m [g_{km} \text{sen}(\theta_{km}) - b_{km} \text{cos}(\theta_{km})] + Q_{shl}^k \quad (III.16)$$

$$Q_{mk} = -(b_{km} + b_{km}^{sh}) V_m^2 + V_k V_m [g_{km} \text{sen}(\theta_{km}) + b_{km} \text{cos}(\theta_{km})] + Q_{shl}^m \quad (III.17)$$

Desta forma, as equações de fluxo de reativos na linha, são alteradas para levar em conta os reatores de linha. Este modelo é adequado para representação da operação deste dispositivo, que só entra em operação após a recomposição da linha de transmissão.

III.4.6 Modelagem do Compensador Estático de Reativos

O Compensador Estático de Reativos (CER) é um equipamento formado por capacitores e indutores shunt controlado pelo chaveamento contínuo de tiristores. O CER pode ser visto como uma reatância shunt variável, fornecendo ou absorvendo potência reativa do sistema (Oliveira, 2005), dentro de um limite específico.

O CER é um equipamento importante para controle da tensão nodal, com rápida capacidade de resposta, e por isso utilizado em pontos críticos do sistema de transmissão.

Normalmente em estudo de fluxo de potência, o CER é representado como uma barra PV com uma susceptância variável, mas esta representação pode conduzir a erros caso o CER esteja operando próximo aos seus limites (IEEE, 1995) e (Ambriz-Perez *et alii*, 2000). Desta forma foram propostos pelo IEEE em (IEEE, 1995) modelos de CER indicados para o estudo de fluxo de potência e estudos dinâmicos.

Em regime permanente, o comportamento do CER é descrito na Figura III.8 que estabelece a relação entre a tensão controlada e a compensação de potência reativa fornecida pelo equipamento.

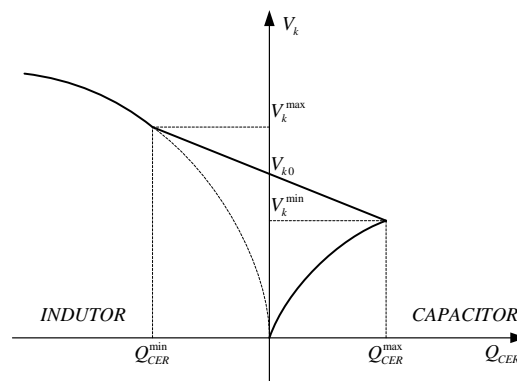


Figura III.8 – Característica do Compensador Estático de Reativos em regime permanente.

Como pode ser visto na Figura III.8, o CER apresenta três regiões distintas de operação. A faixa linear desta curva característica pode ser equacionada como:

$$V_k = V_{k0} + r_{cer} Q_{cer} \quad (III.18)$$

Onde:

- V_{k0} Tensão de Referência do CER.
- V_k Tensão da barra controlada pelo CER.
- r_{cer} Inclinação da faixa linear do CER, na Figura III.8.
- Q_{cer} Potência reativa fornecida pelo CER.

A relação entre a compensação de potencia reativa do CER e a susceptância do equipamento, b_{cer} , e dada por:

$$Q_{cer} = b_{cer} V_t^2 \quad (III.19)$$

Onde:

- V_t Tensão da barra terminal do CER.
- b_{cer} Susceptância do CER.

Quando um dos limites Q_{cer}^{\min} ou Q_{cer}^{\max} é atingido, o CER é tratado como uma susceptância fixa em derivação.

O CER é um equipamento que apresenta uma resposta muito rápida no controle de tensão. Desta forma, este elemento pode ser um dispositivo eficaz de controle de tensão durante um processo de recomposição. Mesmo com esta característica, o Compensador Estático de Reativos, não é considerado elemento de controle de tensão, segundo critérios estabelecidos pelo ONS, a não ser em operações muito específicas. No entanto, neste trabalho o CER será utilizado para avaliação do controle de tensão e da tomada de carga na fase fluente.

III.5 Modelagem do Subproblema 1

O subproblema 1 consiste em determinar o estado da rede antes da rejeição de carga, considerando o sistema suprindo a máxima carga. Nesta etapa determina-se a máxima carga que pode ser suprida e o número mínimo de reatores conectados.

III.5.1 Função Objetivo

Nesta etapa, a função objetivo consiste de três parcelas, maximização da carga atendida, e na minimização do número de reatores conectados, sendo reatores de barra e reatores de linha. Desta forma, tem-se:

$$Max \sum_{k \in \Omega_{\alpha}} C_{\alpha_k} \alpha_k + Min \sum_{k \in \Omega_b} C_{QA_k} QA_k + Min \sum_{k \in \Omega_l} C_{QA_{km}} QA_{km} \quad (III.20)$$

Onde:

- C_{α_k} Custo do carregamento na barra k, adotado o valor de 1.
- α_k Carregamento da barra k.
- Ω_{α} Conjunto de barras para máximo carregamento.
- C_{QA_k} Custo da alocação de reatores de barra na barra k, adotado o valor de 5.
- QA_k Potência reativa do reator de barra.
- Ω_b Conjunto de barras candidatas à alocação de reatores.
- $C_{QA_{km}}$ Custo da alocação de reatores de linha na linha k-m, adotado o valor de 5.
- QA_k Potência reativa do reator de linha.
- Ω_l Conjunto de linhas candidatas à alocação de reatores.

A definição dos custos foi feita através de uma análise de sensibilidade, simulando-se vários valores de custos. Os valores absolutos em si não são críticos, somente a relação entre eles. Portanto, chega-se a conclusão que os valores de custos associados ao carregamento devem ser menores que os custos da alocação de reatores, pois o interesse é atender a máxima carga, sendo conectado o menor número de reatores possível. Desta forma, o requisito para os custos é que $C_{\alpha_k} < C_{QA_k}, C_{QA_{km}}$.

III.5.2 Restrições de Balanço de Potência Ativa e Reativa

As restrições de balanço de potência ativa e reativa são as equações estáticas de fluxo de carga, as quais são formuladas de forma que o somatório das potências injetadas em uma barra seja igual a zero.

$$PG_k - \sum_{m \in \Omega_l} P_k^{linha\ m} - (1 + \alpha_k) PL_k = 0 \quad (III.21)$$

Onde:

- PG_k Potência ativa gerada na barra k.
- $P_k^{linha\ m}$ Fluxo de potência ativa na linha k-m.
- PL_k Carga ativa na barra k.
- α_k Carregamento na barra k.
- Ω_l Conjunto de barras adjacentes à barra k.

$$QG_k - \sum_{m \in \Omega_l} Q_k^{linha\ m} - (1 + \alpha_k) QL_k - Q_{shb}^k + Q_{CER}^k = 0 \quad (III.22)$$

Onde:

- QG_k Potência reativa gerada na barra k.
- $Q_k^{linha\ m}$ Fluxo de potência reativa na linha k-m.
- QL_k Carga ativa na barra k.
- Q_{shb}^k Potência reativa fornecida por reatores conectados à barra k.
- Q_{CER}^k Potência reativa fornecida pelo CER conectado à barra k.

A potência reativa fornecida pelos reatores de linha está incorporada ao termo $Q_k^{linha\ m}$, conforme apresentado na seção III.4.5.

III.5.3 Restrições da Modelagem das Máquinas Síncronas

As equações (III.1) e (III.2) são inseridas no FPO permitindo o cálculo da tensão atrás da reatância subtransitória das máquinas, no instante da rejeição de carga. Reescrevendo estas equações, tem-se:

$$PGX_d''X_q'' - Ea''V_t \sin(\delta - \theta)X_q'' - 0,5V_t^2(X_d'' - X_q'')\sin 2(\delta - \theta) = 0 \quad (III.23)$$

$$QGX_d''X_q'' - Ea''V_t \cos(\delta - \theta)X_q'' + 0,5V_t^2(X_d'' + X_q'') - 0,5V_t^2(X_d'' - X_q'')\cos 2(\delta - \theta) = 0 \quad (III.24)$$

III.5.4 Restrições da Curva de Capabilidade

As restrições da curva de capabilidade definem a região de operação da máquina síncrona e desta forma as restrições mostradas na seção III.4.2 entram como restrições de canalização, substituindo as tradicionais restrições $QG_{\min} \leq QG \leq QG_{\max}$ utilizadas no fluxo de potência ótimo. Desta forma tem-se:

- Máxima corrente de armadura:

$$PG^2 + QG^2 \leq (V_t I_{a_{\max}})^2 \quad (III.25)$$

- Capacidade da máquina primária:

$$PG \leq P_{\max} \quad (III.26)$$

- Excitação Máxima:

$$PG^2 + \left(QG + \frac{V^2}{X_q}\right)^2 \leq \left(\frac{V_t E_{a_{\max}}}{X_d} + V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cos(\delta - \theta)\right)^2 \quad (III.27)$$

- Excitação Mínima:

$$PG^2 + \left(QG + \frac{V^2}{X_q}\right)^2 \geq \left(\frac{V_t E_{a_{\min}}}{X_d} + V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cos(\delta - \theta)\right)^2 \quad (III.28)$$

- Limite de Estabilidade Estática:

$$PG^2 \left(\frac{V^2}{X_d} + QG\right) \leq -\left(\frac{V^2}{X_q} + QG\right)^3 \quad (III.29)$$

III.5.5 Restrição da Modelagem do AVR

A representação do AVR neste subproblema tem como objetivo o cálculo da tensão de referência para o subproblema 3. Esta tensão de referência será o valor desejado para a tensão terminal da máquina em regime permanente de rejeição de carga. Na prática, este valor é ajustado e mantido fixo durante todo o processo de recomposição. No subproblema 1, a tensão de referência V_{ref} é uma variável de otimização. A equação (III.30) é inserida no subproblema 1.

$$E_a - K_a (V_{ref} - V_t) = 0 \quad (III.30)$$

O elevado ganho K_a assegura que o erro de regime permanente entre a tensão de referência V_{ref} e a tensão terminal V_t seja pequeno.

III.6 Modelagem do Subproblema 2

O subproblema 2 consiste, em determinar o estado da rede imediatamente após a rejeição de carga, instante t_{0+} , sendo necessário solucionar as equações de rede em cada cenário de rejeição, considerando-se as tensões e ângulos internos das máquinas fixos nos valores calculados no subproblema 1. Neste subproblema, não é representado o AVR, visto que neste instante o equipamento ainda não atuou.

III.6.1 Função Objetivo

A função objetivo do subproblema 2 é a minimização de alocação de potência reativa fictícia nos cenários de recomposição. Tal alocação tem por objetivo a convergência dos cenários de recomposição e ocorre para manter a tensão dentro dos limites, evitando sobretensões decorrentes do sistema a vazio. A ocorrência de alocação fictícia em qualquer cenário analisado indica que a recomposição do corredor com os reatores conectados no subproblema 1, é inviável, e na prática ocorreriam sobretensões.

$$Min \sum_{k \in \Omega_{nb}} C_{QF_k} QF_k \quad (III.31)$$

Onde:

C_{QF_k} Custo de alocação de potência reativa fictícia na barra k, valor adotado 10.

QF_k Potência reativa fictícia alocada na barra k.

Ω_{nb} Conjunto de barras candidatas à alocação de potência reativa fictícia, neste caso todas as barras são candidatas.

Novamente foi feita uma análise de sensibilidade na questão dos custos da função objetivo, em relação ao subproblema 1. Definiu-se que valor adotado para o custo de alocação de potência reativa fictícia deve ser maior do que o custo da alocação feita no subproblema 1, já que a alocação de reatores deve ser feita no subproblema 1, e no subproblema 2 a alocação ocorre apenas para convergência do problema. Portanto, tem-se $C_{QA_k}, C_{QA_{km}} < C_{QF_k}$.

III.6.2 Restrições de Balanço de Potência Ativa e Reativa

As restrições de balanço de potência ativa e reativa são as mesmas do subproblema 1, com a diferença apenas das variáveis de decisão que são fixas neste estágio.

$$PG_k - \sum_{m \in \Omega_l} P_k^{linha\ m} - (1 + \alpha_k^*) PL_k = 0 \quad (III.32)$$

$$QG_k - \sum_{m \in \Omega_l} Q_k^{linha\ m} - (1 + \alpha_k^*) QL_k - Q_{shb}^k + Q_{CER}^k - QF_k = 0 \quad (III.33)$$

Na equação (III.33) o termo Q_{shb}^k corresponde à potência reativa fornecida pelos reatores alocados no subproblema 1, e desta forma tem-se $Q_{shb}^k = b_{shb}^{k*} V_k^2$. Novamente, os reatores de linha estão incorporados no termo $Q_k^{linha\ m}$, dados por $Q_{shl}^k = b_{shl}^{k*} V_k^2$ para o lado da barra k e $Q_{shl}^m = b_{shl}^{m*} V_m^2$ para o lado da barra m, conforme seção III.4.5. O termo QF_k corresponde à alocação de potência reativa fictícia na barra k.

Desta forma tem-se:

- α_k^* Carregamento obtido na barra k no subproblema 1, fixo no subproblema 2.
- b_{shb}^{k*} Susceptância do reator de barra alocado na barra k no subproblema 1, fixo no subproblema 2.
- b_{shl}^{k*} Susceptância do reator de linha alocado na linha k-m do lado da barra k no subproblema 1, fixo no subproblema 2.
- b_{shl}^{m*} Susceptância do reator de linha alocado na linha k-m do lado da barra m no subproblema 1, fixo no subproblema 2.

III.6.3 Restrições de Modelagem das Máquinas Síncronas

Neste subproblema, a inserção das equações das máquinas com tensão e ângulo interno fixos, obtidos do subproblema 1, representa o ponto imediatamente após a rejeição de carga, instante t_{0+} . Desta forma, tem-se:

$$PGX_d''X_q'' - Ea^*V_t \sin(\delta^* - \theta) X_q'' - 0,5V_t^2 (X_d'' - X_q'') \sin 2(\delta^* - \theta) = 0 \quad (\text{III.34})$$

$$QGX_d''X_q'' - Ea^*V_t \cos(\delta^* - \theta) X_q'' + 0,5V_t^2 (X_d'' + X_q'') - 0,5V_t^2 (X_d'' - X_q'') \cos 2(\delta^* - \theta) = 0 \quad (\text{III.35})$$

Onde:

Ea^* Tensão Interna da Máquina, obtida do subproblema 1, fixa no subproblema 2.

δ^* Ângulo Interno da Máquina, obtido do subproblema 1, fixo no subproblema 2.

III.6.4 Restrições da Curva de Capabilidade

As restrições da curva de capabilidade são as mesmas do subproblema 1. Desta forma, tem-se:

$$PG^2 + QG^2 \leq (V_t I_{a_{\max}})^2 \quad (\text{III.36})$$

$$PG \leq P_{\max} \quad (\text{III.37})$$

$$PG^2 + \left(QG + \frac{V^2}{X_q} \right)^2 \leq \left(\frac{V_t E_{a_{\max}}}{X_d} + V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta^* - \theta) \right)^2 \quad (\text{III.38})$$

$$PG^2 + \left(QG + \frac{V^2}{X_q} \right)^2 \geq \left(\frac{V_t E_{a_{\min}}}{X_d} + V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta^* - \theta) \right)^2 \quad (\text{III.39})$$

$$PG^2 \left(\frac{V^2}{X_d} + QG \right) \leq - \left(\frac{V^2}{X_q} + QG \right)^3 \quad (\text{III.40})$$

Onde:

δ^* Ângulo interno da máquina, obtido do subproblema 1, fixo no subproblema 2.

III.6.5 Limites de Tensão

O subproblema 2 corresponde ao primeiro ponto da curva do regime dinâmico de rejeição de carga. Em estudos de recomposição são permitidas tensões na faixa de 0,85 a 1,25 pu para regimes transitórios em estudos de estabilidade eletromecânica segundo critérios da ONS estabelecidos em (ONS, 2001). Desta forma tem-se $V_{\min} = 0,85$ pu e $V_{\max} = 1,25$ pu.

III.7 Modelagem do Subproblema 3

O subproblema 3 representa o cenário de rejeição de carga em regime permanente, onde já ocorreu a atuação dos reguladores e a tensão terminal da máquina é controlada, considerando que não houve o fenômeno da auto-excitação. Neste subproblema, os limites de tensão são mais rigorosos que no subproblema 2, e o AVR é considerado para o controle da tensão terminal da máquina.

III.7.1 Função Objetivo

Neste subproblema, a função objetivo também é a minimização de alocação de potência reativa fictícia nos cenários de recomposição, tal como no subproblema 2. A ocorrência de alocação em qualquer cenário no subproblema 3 indica que a recomposição do corredor com a tensão de referência ajustada no subproblema 1 e com os reatores conectados no subproblema 1, é inviável.

$$\text{Min} \sum_{k \in \Omega_{nb}} C_{QF_k} QF_k \quad (\text{III.41})$$

Onde:

- C_{QF_k} Custo de alocação de potência reativa fictícia na barra k, valor adotado 10.
- QF_k Potência reativa fictícia alocada na barra k.
- Ω_{nb} Conjunto de barras candidatas à alocação de potência reativa fictícia, neste caso todas as barras são candidatas.

III.7.2 Restrições de Balanço de Potência Ativa e Reativa

As restrições de balanço de potência ativa e reativa são as mesmas restrições do subproblema 2, descritas na seção III.6.2.

$$PG_k - \sum_{m \in \Omega_l} P_k^{linha\ m} - (1 + \alpha^*) PL_k = 0 \quad (III.42)$$

$$QG_k - \sum_{m \in \Omega_l} Q_k^{linha\ m} - (1 + \alpha_k^*) QL_k - Q_{sh}^k + Q_{CER}^k - QF_k = 0 \quad (III.43)$$

III.7.3 Restrições de Modelagem das Máquinas Síncronas

As restrições de máquinas síncronas são as mesmas apresentadas na seção III.4.1, com a diferença que neste subproblema as mesmas são modeladas com as reatância síncronas ao invés da reatância subtransitória. A utilização das reatâncias síncronas deve-se ao fato de que em regime permanente, as reatâncias subtransitórias não mais atuam, restando somente as reatâncias síncronas. A finalidade destas equações neste subproblema é a representação das variáveis internas das máquinas, necessárias no modelo de curva de capacidade e do regulador de tensão. Desta forma, tem-se:

$$PGX_d X_q - EaV_t \sin(\delta - \theta) X_q - 0,5V_t^2 (X_d - X_q) \sin 2(\delta - \theta) = 0 \quad (III.44)$$

$$QGX_d X_q - EaV_t \cos(\delta - \theta) X_q + 0,5V_t^2 (X_d + X_q) - 0,5V_t^2 (X_d - X_q) \cos 2(\delta - \theta) = 0 \quad (III.45)$$

III.7.4 Restrições da Curva de Capacidade

As restrições de capacidade são as mesmas dos subproblemas 1 e 2, com a diferença de que o ângulo interno das máquinas não é fixo. Desta forma, tem-se:

$$PG^2 + QG^2 \leq (V_t I_{a_{\max}})^2 \quad (III.46)$$

$$PG \leq P_{\max} \quad (III.47)$$

$$PG^2 + \left(QG + \frac{V^2}{X_q} \right)^2 \leq \left(\frac{V_t E a_{\max}}{X_d} + V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right)^2 \quad (III.48)$$

$$PG^2 + \left(QG + \frac{V^2}{X_q} \right)^2 \geq \left(\frac{V_t E a_{\min}}{X_d} + V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right)^2 \quad (III.49)$$

$$PG^2 \left(\frac{V^2}{X_d} + QG \right) \leq - \left(\frac{V^2}{X_q} + QG \right)^3 \quad (III.50)$$

III.7.5 Restrição da Modelagem do AVR

A finalidade de representação do AVR neste subproblema é a modelagem do controle de tensão do gerador em regime permanente. Em regime permanente o AVR controla a tensão terminal no valor de referência V_{ref}^* obtida no subproblema 1, segundo a equação (III.51).

$$E_a - K_a (V_{ref}^* - V_t) = 0 \quad (III.51)$$

O elevado ganho K_a assegura que o erro em regime permanente entre V_{ref} e V_t seja pequeno, e desta forma o valor da tensão terminal do gerador V_t é aproximadamente o valor calculado de V_{ref} no subproblema 1. Este controle encontra-se ativo quando os limites de geração de potência reativa estão dentro dos limites dados pela curva de capacidade (Roman *et alii*, 2005).

III.7.6 Limites de Tensão

Em regime permanente, os níveis de tensão permitidos são mais rigorosos que os níveis permitidos em regime dinâmico, neste caso dependem do nível de tensão do sistema, e são dados na Tabela II.1.

III.8 Montagem do Corte de Benders

A injeção de potência reativa fictícia nos subproblemas 2 e 3 indicam que as decisões de operação no subproblema 1 não são viáveis para a recomposição fluente do corredor. Desta forma, a decisão sobre o número de reatores, a tensões de referência dos AVR's, e tomada de carga devem ser alterados. Sempre que isto ocorre, é gerado um corte de Benders que é incorporado ao subproblema 1.

As variáveis que recebem o corte de Benders são aquelas que passam fixas para os subproblemas 2 e 3. Estas variáveis são diferentes para cada subproblema e os cortes são montados separadamente. Para o subproblema 2 tem-se a tensão interna, ângulo interno das máquinas, reatores conectados e carga tomada. Para o subproblema 3, tem-se a tensão de referência do AVR, reatores conectados e carga tomada.

A expressão do corte de Benders é formulada como (Benders, 1962):

$$\sum_{m \in N} \left[\sum_{s \in \Omega_{2s}} \left[\sum_{r \in \Omega_{2r}} (\lambda_{mr} E z_{sr}) z_s \right] \right] \geq \sum_{m \in N} \left[w_m + \sum_{s \in \Omega_{2s}} \left[\sum_{r \in \Omega_{2r}} (\lambda_{mr} E z_{sr})^* z_s \right] \right] \quad (III.52)$$

Onde:

- λ_{mr} Coeficiente de Lagrange da restrição r , no cenário m .
- Ez_{sr} Derivada parcial da restrição r em relação a z_s .
- w_m Valor da função objetivo no cenário m .
- N Lista de cenários inviáveis.
- Ωz_s Conjunto de variáveis de decisão z_s .
- Ωz_r Conjunto de restrições que contem a variável de decisão z_s^* .

Os termos $\lambda_{mr}Ez_{sr}$ serão chamados de coeficiente do Benders $CBen$ e calculados separadamente para cada variável que recebe o corte. A partir destes termos é calculado o somatório $\sum_{m \in \Omega z_r} (\lambda_{mr}Ez_{sr})$, que corresponde ao somatório dos coeficientes $CBen$ obtidos diversos cenários.

Tem-se para estes coeficientes:

➤ **Tensão Interna das Máquinas**

Derivando as equações (III.34) e (III.35) em relação a Ea^{**} e multiplicando cada uma por seus respectivos coeficientes de Lagrange, obtém-se:

$$CBen_{Ea_i''} = -\lambda p_i V_t \text{sen}(\delta - \theta) X_q'' - \lambda q_i V_t \text{cos}(\delta - \theta) X_q'' \quad (III.53)$$

Onde:

- λp_i Coeficiente de Lagrange da equação (III.34).
- λq_i Coeficiente de Lagrange da equação (III.35).

➤ **Ângulo da Tensão Interna das Máquinas**

Derivando as equações (III.34), (III.35), (III.38) e (III.39) em relação a δ^* e multiplicando cada uma por seus respectivos coeficientes de Lagrange, obtém-se:

$$\begin{aligned} CBen_{\delta_i} = & -\lambda p_i \left(Ea^* V_t \text{cos}(\delta^* - \theta) X_q'' - V_t^2 (X_d'' - X_q'') \text{cos}(2(\delta^* - \theta)) \right) + \\ & + \lambda q_i \left(Ea^* V_t \text{sen}(\delta^* - \theta) X_q'' + V_t^2 (X_d'' - X_q'') \text{sen}(2(\delta^* - \theta)) \right) + \\ & + \lambda e m_i \left(2 \left(\frac{V_t Ea_{\max}}{X_d} + V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{cos}(\delta^* - \theta) \right) \left(V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen}(\delta^* - \theta) \right) \right) \\ & + \lambda s e_i \left(2 \left(\frac{V_t Ea_{\min}}{X_d} + V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{cos}(\delta^* - \theta) \right) \left(V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen}(\delta^* - \theta) \right) \right) \end{aligned} \quad (III.54)$$

Onde:

- $\lambda e m_i$ Coeficiente de Lagrange da equação (III.38).

λ_{se_i} Coeficiente de Lagrange da equação (III.39).

➤ **Reatores de Barra**

Derivando-se a equação (III.33) em relação a b_{shb}^{k*} , e multiplicando pelo seu respectivo multiplicador de Lagrange, tem-se:

$$CBen_{b_{shb}^k} = -\lambda q_k V_k^2 \quad (III.55)$$

➤ **Reatores de Linha**

Derivando-se a equação (III.33) em relação a b_{shl}^{k*} e a b_{shl}^{m*} , e multiplicando pelos seus respectivos multiplicadores de Lagrange, tem-se:

$$CBen_{b_{shl}^k} = -\lambda q_k V_k^2 \quad (III.56)$$

$$CBen_{b_{shl}^m} = -\lambda q_m V_m^2 \quad (III.57)$$

➤ **Carregamento**

Derivando as equações (III.32) e (III.33) em relação a α^* e multiplicando cada uma por seus respectivos coeficientes de Lagrange, obtém-se:

$$CBen_{\alpha} = -\lambda p_k PL_k - \lambda q_k QL_k \quad (III.58)$$

➤ **Tensão de Referência do AVR**

Derivando-se a equação (III.51) em relação a V_{ref}^* , e multiplicando pelo seu respectivo multiplicador de Lagrange, tem-se:

$$CBen_{V_{ref}} = -\lambda r_k Ka_k \quad (III.59)$$

De acordo com as variáveis de decisão consideradas neste problema, tem-se para o corte de Benders a expressão dada por (III.60).

$$\sum_{m \in N} \left[CBen_{V_{ref}} V_{ref} + CBen_{Ea} Ea + CBen_{\delta} \delta + CBen_{b_{shb}} b_{shb} + CBen_{b_{shl}} b_{shl} + CBen_{\alpha} \alpha \right] \geq \sum_{m \in N} \left[w_2 + CBen_{V_{ref}} V_{ref}^* + CBen_{Ea} Ea^* + CBen_{\delta} \delta^* + CBen_{b_{shb}} b_{shb}^* + CBen_{b_{shl}} b_{shl}^* + CBen_{\alpha} \alpha^* \right] \quad (III.60)$$

Destaca-se que os subproblemas 2 e 3 geram um único corte, sendo que cada um deles contribui com suas respectivas variáveis de decisão.

III.9 Algoritmo de Solução

A metodologia proposta pode ser esquematizada no fluxograma mostrado na Figura III.9.

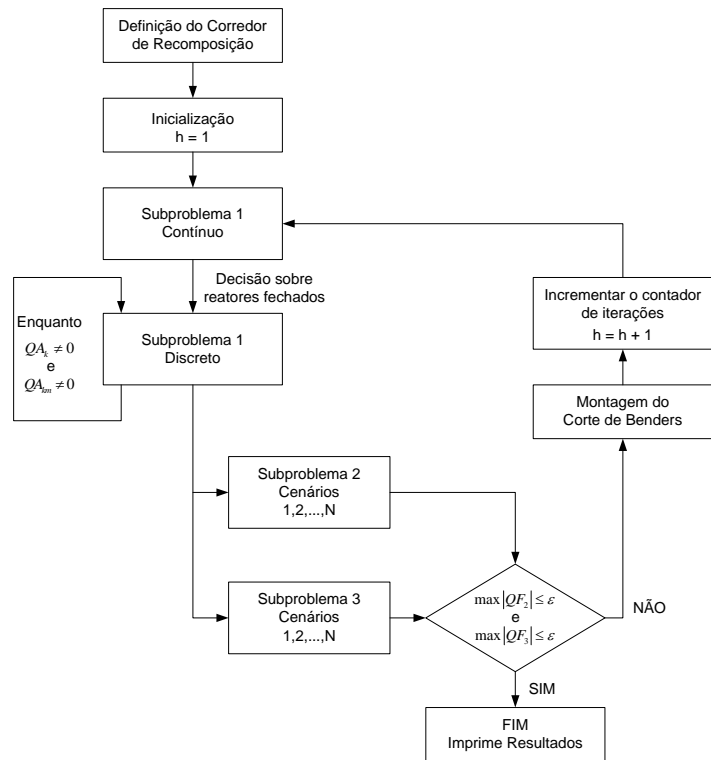


Figura III.9 – Fluxograma da Metodologia Proposta.

O valor da tolerância ε , critério de viabilidade adotado neste trabalho é igual a 0,01 pu, ou seja, 1 MVar.

Neste ponto deve ser feita uma observação a respeito do subproblema 1. Este subproblema é dividido em duas etapas, sendo uma contínua e outra discreta. Na etapa contínua a função objetivo é a mínima alocação de potência reativa, em barras e circuitos, conforme seção III.5.1. Após esta etapa, é escolhido o valor de alocação de potência reativa que mais se aproxima da capacidade nominal do reator de barra ou de linha, para que este reator seja fechado. Com este reator conectado, simula-se novamente a mesma função objetivo de alocação de potência reativa, constituindo a etapa discreta do fluxograma da Figura III.9. Caso haja alocação de potência reativa, conecta-se o próximo reator, caso contrário passa-se aos subproblemas 2 e 3. Esse processo continua até que não haja mais reatores a serem conectados.

III.10 Exemplo Tutorial

Nesta seção é apresentado um exemplo de aplicação da metodologia proposta para recomposição fluente. O sistema é apresentado na Figura III.10 e será utilizado como exemplo ilustrativo para apresentação dos principais aspectos da modelagem proposta. Este sistema corresponde ao corredor de recomposição de Água Vermelha apresentado em (Alves, 2007) que se inicia nesta usina e vai até a subestação de Sumaré. Para esta área geoeletrica o ONS utiliza três unidades geradoras sincronizadas em Água Vermelha e o suporte de potência reativa é proporcionado por um reator de linha de 180 MVar entre Água Vermelha e Ribeirão Preto, na subestação de Ribeirão Preto e um reator de barra de 100 MVar na subestação de Sumaré.

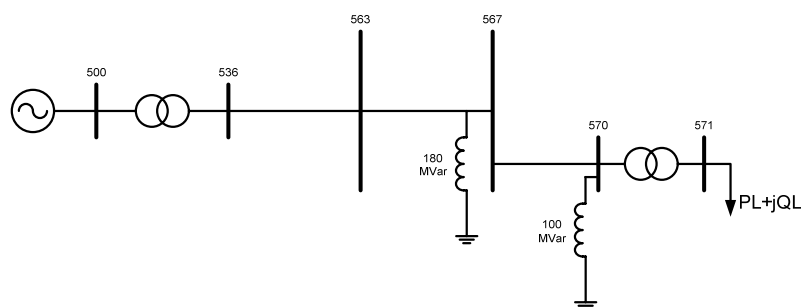


Figura III.10 – Exemplo Tutorial – Corredor de Água Vermelha.

O sistema apresentado é constituído de seis barras com duas opções de suporte de potência reativa, fornecida por um reator de barra e um reator de linha. Os dados deste sistema são mostrados a seguir.

Tabela III.1 – Dados de Circuito do Sistema Teste.

Circuito	De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (MVar)
1	500	536	0,00	0,82	0,00
2	536	563	0,41	5,64	304,12
3	563	567	0,22	3,03	163,37
4	567	570	0,03	0,34	19,21
5	570	571	0,00	4,66	0,00

Os geradores têm capacidade de 232,7 MW, com reatâncias $X_d = 91,0$, $X_q = 57,0$, $X_d'' = 18,0$, $X_q'' = 12,0$ na base de 250 MVA. O regulador de tensão modelado conforme a seção III.4.3, possui o ganho estático K_a igual a 200. Os limites de reativos são dados com base na curva de capacidade.

Neste exemplo, serão avaliados todos os cenários de recomposição para definição da configuração mínima de reatores, ajuste da tensão de geração e definição do montante máximo

de carga a ser tomada. Serão testados os cinco cenários de recomposição, mostrados na Figura III.11.

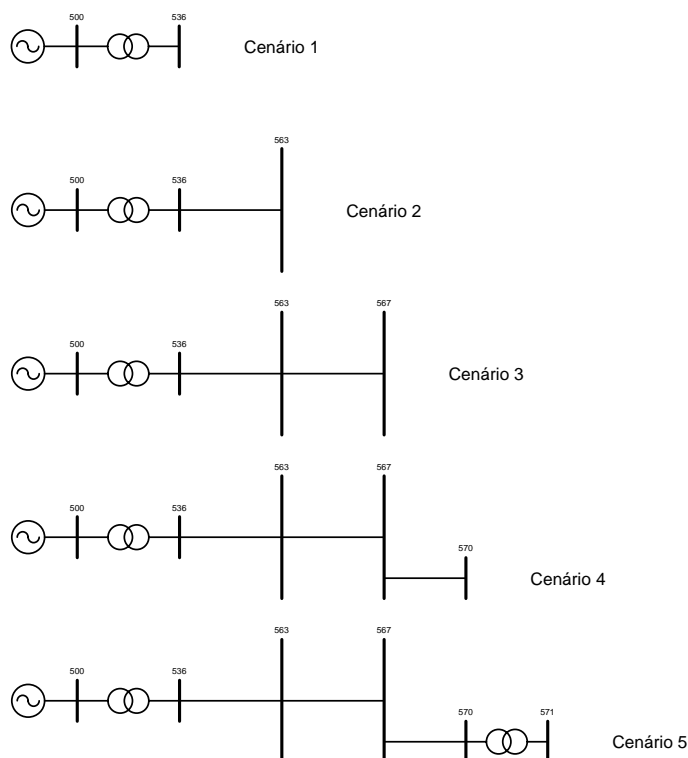


Figura III.11 – Cenários de Recomposição – Água Vermelha.

➤ Subproblema 1 – Iteração 1

Seguindo as etapas de solução da metodologia proposta, como ilustrado no fluxograma da Figura III.9, a solução do subproblema 1 é obtida e apresentada nas Tabelas III.2 e III.3.

Tabela III.2 – Solução Subproblema 1 – Iteração 1.

Barra	Tensão (pu)	QA (pu)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
500	1,085	0,0	-	-
536	1,098	0,0	-	-
563	1,100	0,0	-	-
567	1,042	0,0	-	-
570	1,033	0,0	-	-
571	0,900	0,0	427,296	140,580

Tabela III.3 – Geração Subproblema 1 – Iteração 1.

Gerador	Ea''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
1	1,054	3,484	146,2175	-52,9085	1,091
2	1,054	3,484	146,2175	-52,9085	1,091
3	1,054	3,484	146,2175	-52,9085	1,091

Nesta etapa foi obtida a máxima carga na barra 571 e não houve reatores conectados. A carga conectada à barra 571 obedece ao critério de tensão mínima de 0,900 pu. A tensão de referência do AVR ficou ajustada em um valor elevado 1,091 pu, como forma de suprir a máxima carga ao sistema. Nesta etapa, o algoritmo ainda não considera os cenários de recomposição e desta forma, não se sabe a influência deste ajuste nas sobretensões resultantes nestes cenários. A tensão de referência do AVR não foi ajustado em um valor mais elevado devido a limitação de tensão imposta pela barra 563, que atingiu o limite superior de 1,100 pu.

O próximo passo é verificação da viabilidade dos cenários de recomposição, em regime dinâmico e em regime permanente. A Figura III.12 mostra o ponto de operação do gerador 1 na primeira execução do subproblema 1.

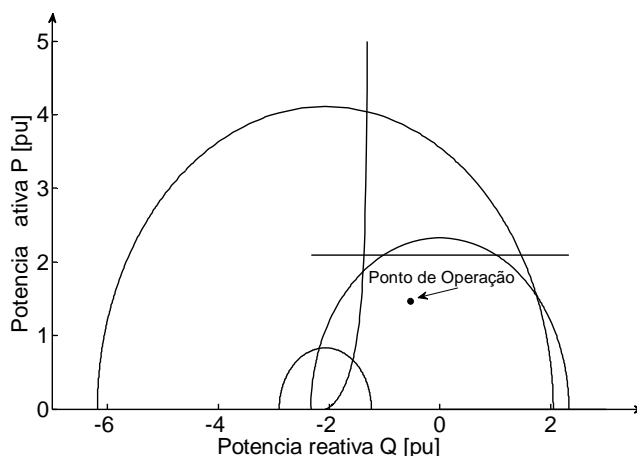


Figura III.12 – Exemplo Tutorial – Ponto de Operação do Gerador.

➤ Subproblema 2 – Iteração 1

O cenário 1 corresponde à uma rejeição de carga na barra 536. A Tabela III.4 mostra os resultados obtidos.

Tabela III.4 – Solução Subproblema 2 – Iteração 1 – Cenário 1.

Barra	Tensão (pu)	QF (pu)
500	1,054	0,0
536	1,054	0,0

Neste cenário não houve alocação de potência reativa fictícia, logo não há montagem do corte de Benders.

O cenário 2 corresponde à uma rejeição de carga na barra 563. A Tabela III.5 mostra os resultados obtidos.

Tabela III.5 – Solução Subproblema 2 – Iteração 1 – Cenário 2.

Barra	Tensão (pu)	QF (pu)
500	1,134	0,0
536	1,162	0,0
563	1,250	26,7297

Neste cenário a tensão da barra 563 atingiu o seu limite superior e desta forma houve alocação de potência reativa. Esta alocação ocorre para manter as tensões dentro dos limites impostos pelo FPO. Na prática isto equivale à ocorrência de sobretensões na barra 563. Isto indica que este cenário não é viável e desta forma, monta-se o corte de Benders, conforme mostrado na subseção III.8.

Para o reator de barra:

$$CBen_{v_{shb}^k} = 0,0 \quad (III.61)$$

Carregamento:

$$CBen_{\alpha} = 0,0 \quad (III.62)$$

Reatores de linha:

$$CBen_{v_{sl}^k} = 9,9981 \quad (III.63)$$

Tensão Interna do Gerador:

$$CBen_{E_{a1}''} = -31,0651 \quad (III.64)$$

$$CBen_{E_{a2}''} = -31,0651 \quad (III.65)$$

$$CBen_{E_{a3}''} = -31,0651 \quad (III.66)$$

Ângulo Interno:

$$CBen_{\delta_1} = -0,0030 \quad (III.67)$$

$$CBen_{\delta_2} = -0,0030 \quad (III.68)$$

$$CBen_{\delta_3} = -0,0030 \quad (III.69)$$

O cenário 3 corresponde à uma rejeição de carga na barra 567. A Tabela III.6 mostra os resultados obtidos.

Tabela III.6 – Solução Subproblema 2 – Iteração 1 – Cenário 3.

Barra	Tensão (pu)	QF (pu)
500	1,134	0,0
536	1,162	0,0
563	1,250	105,0777
567	1,249	85,0245

Neste caso monta-se o corte de Benders.

Para o reator de barra:

$$CBen_{shb}^k = 0,0 \quad (III.70)$$

Carregamento:

$$CBen_{\alpha} = 0,0 \quad (III.71)$$

Reatores de linha:

$$CBen_{shl}^k = 9,9995 \quad (III.72)$$

Tensão Interna do Gerador:

$$CBen_{Ea_1} = -31,0695 \quad (III.73)$$

$$CBen_{Ea_2} = -31,0695 \quad (III.74)$$

$$CBen_{Ea_3} = -31,0695 \quad (III.75)$$

Ângulo Interno:

$$CBen_{\delta_1} = -0,0030 \quad (III.76)$$

$$CBen_{\delta_2} = -0,0030 \quad (III.77)$$

$$CBen_{\delta_3} = -0,0030 \quad (III.78)$$

O cenário 4 corresponde à uma rejeição de carga na barra 570. A Tabela III.7 mostra os resultados obtidos.

Tabela III.7 – Solução Subproblema 2 – Iteração 1 – Cenário 4.

Barra	Tensão (pu)	QF (pu)
500	1,134	0,0
536	1,162	0,0
563	1,250	103,9362
567	1,248	89,5294
570	1,248	15,8453

Monta-se o corte de Benders.

Para o reator de barra:

$$CBen_{v_{sub}^k} = 9,9966 \quad (III.79)$$

Carregamento:

$$CBen_{\alpha} = 0,0 \quad (III.80)$$

Reatores de linha:

$$CBen_{v_{shl}^k} = 9,9995 \quad (III.81)$$

Tensão Interna dos Geradores:

$$CBen_{E_{a1}''} = -31,0695 \quad (III.82)$$

$$CBen_{E_{a2}''} = -31,0695 \quad (III.83)$$

$$CBen_{E_{a3}''} = -31,0695 \quad (III.84)$$

Ângulo Interno:

$$CBen_{\delta_1} = -0,0030 \quad (III.85)$$

$$CBen_{\delta_2} = -0,0030 \quad (III.86)$$

$$CBen_{\delta_3} = -0,0030 \quad (III.87)$$

O cenário 5 corresponde à uma rejeição de carga na barra 571. A Tabela III.8 mostra os resultados obtidos.

Tabela III.8 – Solução Subproblema 2 – Iteração 1 – Cenário 5.

Barra	Tensão (pu)	QF (pu)
500	1,134	0,0
536	1,162	0,0
563	1,250	104,5480
567	1,249	86,2715
570	1,248	18,4379
571	1,193	0,0

Monta-se o corte de Benders.

Para o reator de barra:

$$CBen_{v_{sh}^k} = 9,9947 \quad (\text{III.88})$$

Carregamento:

$$CBen_{\alpha} = 0,2476 \quad (\text{III.89})$$

Reatores de linha:

$$CBen_{v_{shl}^k} = 9,9995 \quad (\text{III.90})$$

Tensão Interna dos Geradores:

$$CBen_{E_{a1}^n} = -31,0695 \quad (\text{III.91})$$

$$CBen_{E_{a2}^n} = -31,0695 \quad (\text{III.92})$$

$$CBen_{E_{a3}^n} = -31,0695 \quad (\text{III.93})$$

Ângulo Interno:

$$CBen_{\delta_1} = -0,0030 \quad (\text{III.94})$$

$$CBen_{\delta_2} = -0,0030 \quad (\text{III.95})$$

$$CBen_{\delta_3} = -0,0030 \quad (\text{III.96})$$

➤ **Subproblema 3 – Iteração 1**

Após a execução de todos os cenários no subproblema 2, executa-se o subproblema 3 que corresponde ao regime permanente. Neste subproblema, as tensões de referência dos AVR's são fixas no valor obtido no subproblema 1.

O cenário 1 corresponde à uma rejeição de carga na barra 536. A Tabela III.9 mostra os resultados obtidos.

Tabela III.9 – Solução Subproblema 3 – Iteração 1 – Cenário 1.

Barra	Tensão (pu)	QF (pu)
500	1,085	0,0
536	1,085	0,0

O cenário 2 corresponde à uma rejeição de carga na barra 563. A Tabela III.10 mostra os resultados obtidos.

Tabela III.10 – Solução Subproblema 3 – Iteração 1 – Cenário 2.

Barra	Tensão (pu)	QF (pu)
500	1,086	0,0
536	1,100	0,0
563	1,100	152,2157

Monta-se o corte de Benders.

Para o reator de barra:

$$CBen_{sb}^k = 0,0 \quad (III.97)$$

Carregamento:

$$CBen_{\alpha} = 0,0 \quad (III.98)$$

Reatores de linha:

$$CBen_{shl}^k = 9,9995 \quad (III.99)$$

Tensão de Referência do AVR:

$$CBen_{V_{ref}^1} = -342,4179 \quad (III.100)$$

$$CBen_{V_{ref}^2} = -342,4179 \quad (III.101)$$

$$CBen_{V_{ref}^3} = -342,4179 \quad (III.102)$$

O cenário 3 corresponde à uma rejeição de carga na barra 567. A Tabela III.11 mostra os resultados obtidos.

Tabela III.11 – Solução Subproblema 3 – Iteração 1 – Cenário 3.

Barra	Tensão (pu)	QF (pu)
500	1,086	0,0
536	1,100	0,0
563	1,100	230,4110
567	1,099	85,0534

Monta-se o corte de Benders.

Para o reator de barra:

$$CBen_{b_{sh}^k} = 0,0 \quad (III.103)$$

Carregamento:

$$CBen_{\alpha} = 0,0 \quad (III.104)$$

Reatores de linha:

$$CBen_{b_{shl}^k} = 9,9948 \quad (III.105)$$

Tensão de Referência do AVR:

$$CBen_{V_{ref}^1} = -323,0464 \quad (III.106)$$

$$CBen_{V_{ref}^2} = -323,0464 \quad (III.107)$$

$$CBen_{V_{ref}^2} = -323,0464 \quad (III.108)$$

O cenário 4 corresponde à uma rejeição de carga na barra 570. A Tabela III.12 mostra os resultados obtidos.

Tabela III.12 – Solução Subproblema 3 – Iteração 1 – Cenário 4.

Barra	Tensão (pu)	QF (pu)
500	1,086	0,0
536	1,100	0,0
563	1,100	229,2697
567	1,099	88,9803
570	1,098	16,4116

Monta-se o corte de Benders.

Para o reator de barra:

$$CBen_{v_{shb}^k} = 9,9921 \quad (\text{III.109})$$

Carregamento:

$$CBen_{\alpha} = 0,0 \quad (\text{III.110})$$

Reatores de linha:

$$CBen_{v_{shl}^k} = 9,9982 \quad (\text{III.111})$$

Tensão de referência do AVR:

$$CBen_{V_{ref}^1} = -321,5574 \quad (\text{III.112})$$

$$CBen_{V_{ref}^2} = -321,5574 \quad (\text{III.113})$$

$$CBen_{V_{ref}^3} = -321,5574 \quad (\text{III.114})$$

O cenário 5 corresponde à uma rejeição de carga na barra 571. A Tabela III.13 mostra os resultados obtidos.

Tabela III.13 – Solução Subproblema 3 – Iteração 1 – Cenário 5.

Barra	Tensão (pu)	QF (pu)
500	1,086	0,0
536	1,100	0,0
563	1,100	229,6465
567	1,098	87,3781
570	1,098	17,8110
571	1,050	0,0

Monta-se o corte de Benders.

Para o reator de barra:

$$CBen_{v_{shb}^k} = 9,9915 \quad (\text{III.115})$$

Carregamento:

$$CBen_{\alpha} = 0,2778 \quad (\text{III.116})$$

Reatores de linha:

$$CBen_{shl}^k = 9,9984 \quad (III.117)$$

Tensão de referência do AVR:

$$CBen_{V_{ref}^1} = -340,9928 \quad (III.118)$$

$$CBen_{V_{ref}^2} = -340,9928 \quad (III.119)$$

$$CBen_{V_{ref}^3} = -340,9928 \quad (III.120)$$

Após a simulação de todos os cenários e obtenção de todos os coeficientes dos cortes de Benders, calcula-se o termo $\sum_{m \in \Omega_{z_r}} (\lambda_{mr} E z_{sr})$ que corresponde ao coeficiente obtido de todos os cenários, e gera-se um único corte que será incorporado ao subproblema 1.

$$\begin{aligned} &124,2735Ea_1'' + 124,2735Ea_2'' + 124,2735Ea_3'' + 0,0120\delta_1 + 0,0120\delta_2 + 0,0120\delta_3 + \\ &1328,0V_{ref}^1 + 1328,0V_{ref}^2 + 1328,0V_{ref}^3 - 39,9749b_{shb} - 79,9876b_{shl} - 0,5254\alpha \geq \\ &177,2578 + 124,2735Ea_1'' + 124,2735Ea_2'' + 124,2735Ea_3'' + 0,0120\delta_1^* + 0,0120\delta_2^* + 0,0120\delta_3^* + \\ &1328,0V_{ref}^{1*} + 1328,0V_{ref}^{2*} + 1328,0V_{ref}^{3*} - 39,9749b_{shb}^* - 79,9876b_{shl}^* - 0,5254\alpha^* \end{aligned} \quad (III.121)$$

Substituindo os valores $V_{ref}^{1*} = 1,091$, $V_{ref}^{2*} = 1,091$, $V_{ref}^{3*} = 1,091$, $Ea_1'' = 1,054$, $Ea_2'' = 1,054$, $Ea_3'' = 1,054$, $\delta_1^* = 0,0608$, $\delta_2^* = 0,0608$, $\delta_3^* = 0,0608$, $b_{shb}^* = 0,0$, $b_{shl}^* = 0,0$, $\alpha^* = 41,72$ tem-se:

$$\begin{aligned} &124,2735Ea_1'' + 124,2735Ea_2'' + 124,2735Ea_3'' + 0,0120\delta_1 + 0,0120\delta_2 + 0,0120\delta_3 + \\ &1328,0V_{ref}^1 + 1328,0V_{ref}^2 + 1328,0V_{ref}^3 - 39,9749b_{shb} - 79,9876b_{shl} - 0,5254\alpha \geq 4894,8 \end{aligned} \quad (III.122)$$

O Subproblema 1 é novamente executado com a nova restrição imposta por (III.122).

➤ Subproblema 1 – Iteração 2

Com a restrição de Benders incorporada ao subproblema 1, este retorna como resultados, os valores mostrados nas Tabelas III.14 e III.15.

Tabela III.14 – Solução Subproblema 1 – Iteração 2.

Barra	Tensão (pu)	QA (pu)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
500	1,045	0,0	-	-
536	1,060	0,0	-	-
563	1,080	0,0	-	-
567	1,032	0,0	-	-
570	1,024	0,0	-	-
571	0,900	0,0	391,289	128,734

Tabela III.15 – Geração Subproblema 1 – Iteração 2.

Gerador	Ea''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
1	1,007	3,455	133,7358	-61,0917	1,050
2	1,007	3,455	133,7358	-61,0917	1,050
3	1,007	3,455	133,7358	-61,0917	1,050

Na tentativa de reduzir as sobretensões, o algoritmo reduziu a tensão de referência do regulador para 1,050 pu. A tomada de carga reduziu de 427,296 MW para 391,289 MW.

Novamente, são testados todos os cenários, na segunda iteração. A execução destes cenários retornou a restrição de Benders (III.123).

$$93,2130Ea_1'' + 93,2130Ea_2'' + 93,2130Ea_3'' + 0,0120\delta_1 + 0,0120\delta_2 + 0,0120\delta_3 + 187,1469V_{ref}^1 + 187,1469V_{ref}^2 + 187,1469V_{ref}^3 - 39,9869b_{shb} - 69,9955b_{shl} - 0,5797\alpha \geq 987,5451 \quad (III.123)$$

A execução do subproblema 1 com os dois cortes, dados por (III.122) e (III.123), resulta na alocação potência reativa mostrada na Tabela III.16.

Tabela III.16 – Potência Reativa – Subproblema 1 – Iteração 3.

Circuito	De	Para	Valor (MVar)	Valor (MVar)
2	536	563	0,0	25,554

Esta corresponde à etapa contínua do subproblema 1 do algoritmo. Após a obtenção dos valores da Tabela III.16, o algoritmo seleciona automaticamente o reator mais viável para fechamento, e conecta esta unidade, conforme apresentado na seção III.9. Esta etapa corresponde à etapa discreta do algoritmo, Figura III.9. Neste caso o reator da linha 536-563 tem capacidade de 180 MVar, e o algoritmo automaticamente conecta esta unidade ao sistema. Desta forma, tem-se:

Tabela III.17 – Reatores de Linha – Subproblema 1 – Iteração 3.

Circuito	De	Para	Valor (MVar)	Valor (MVar)
2	536	563	0,0	180,0

Com este reator conectado, segue-se a simulação dos diversos cenários nos subproblemas 2 e 3. Nesta configuração ainda foi necessário mais um corte de Benders para a convergência global do algoritmo. Este novo corte é dado por (III.124).

$$96,9706V_{ref}^1 + 96,9706V_{ref}^2 + 96,9706V_{ref}^3 - 19,9949b_{shb} - 20,5453b_{shl} - 0,3338\alpha \geq 272,0589 \quad (III.124)$$

A execução do subproblema 1 com os cortes (III.122), (III.123) e (III.124) gera uma nova solução capaz de atender a todos os cenários, convergindo o problema.

A Tabela III.18 mostra o resultado final do sistema, com tensões, e carga tomada na barra 571.

Tabela III.18 – Solução Final para o Exemplo Tutorial.

Barra	Tensão (pu)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
500	0,941	-	-
536	0,957	-	-
563	0,977	-	-
567	0,977	-	-
570	0,974	-	-
571	0,900	177,957	58,548

A Tabela III.19 mostra os valores de geração e a tensão de referência do AVR para o sistema convergido.

Tabela III.19 – Geração Final para o Exemplo Tutorial.

Gerador	E_a''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
1	0,899	1,924	60,1108	-57,2124	0,946
2	0,899	1,924	60,1108	-57,2124	0,946
3	0,899	1,924	60,1108	-57,2124	0,946

A Tabela III.20 mostra os reatores de linha necessários para o estabelecimento do corredor de recomposição.

Tabela III.20 – Reatores de Linha Final para o Exemplo Tutorial.

Circuito	De	Para	Reator (MVar)	Reator (MVar)
2	536	563	0,0	180,0

A seguir é apresentado o comportamento do sistema durante o processo iterativo de Benders. A Figura III.13 mostra a evolução do processo de alocação de reatores e da tomada de carga. Inicialmente o sistema tende a tomar mais carga, sem a necessidade de reatores, mas esta configuração não atende a todos os cenários de recomposição fluente. Ao final do processo, após a simulação dos cenários, tem-se uma menor tomada de carga e maior alocação de reatores, sendo possível estabelecer o processo de recomposição fluente.

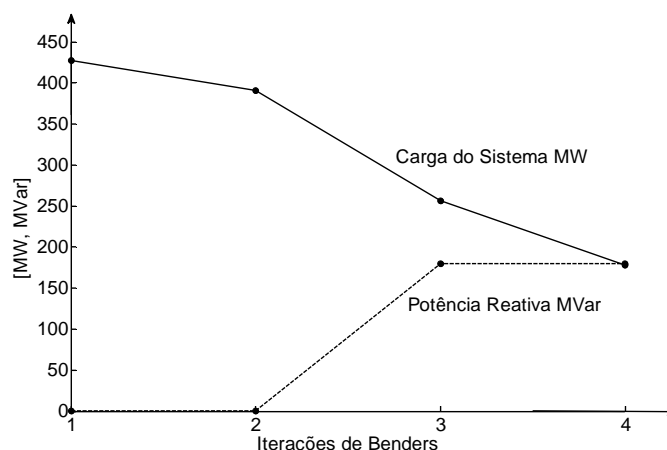


Figura III.13 – Água Vermelha - Tomada de Carga e Alocação de Reatores.

A Figura III.14 mostra a alocação de potência reativa fictícia nos cenários de recomposição durante a convergência do algoritmo. Inicialmente, como o sistema toma maior carga com número reduzido de reatores, as sobretensões resultantes nos diversos cenários de recomposição são elevadas, necessitando maior potência reativa fictícia para a convergência. À medida que o algoritmo evolui sendo conectados mais reatores, e a tensão de referência do AVR é reduzida, as alocações fictícias nos cenários são reduzidas gradualmente até a convergência do algoritmo. No subproblema 2, correspondente ao período dinâmico, a convergência ocorre primeiro devido ao fato dos limites de tensão serem menos severos.

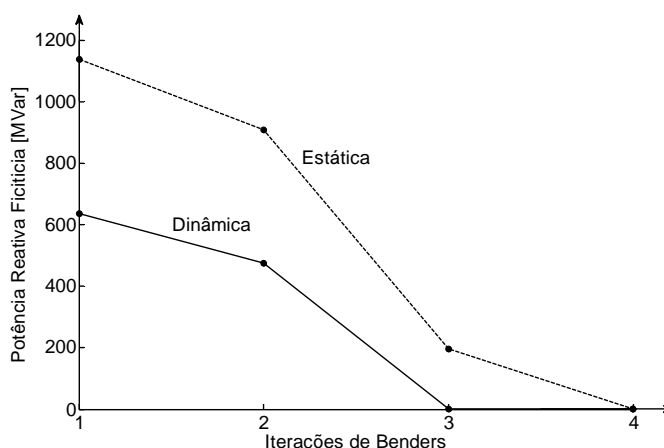


Figura III.14 – Água Vermelha – Alocação de Potência Reativa Fictícia.

A Figura III.15 mostra a evolução do ajuste da tensão de referência do AVR. Inicialmente, a tensão de referência do AVR é ajustada em um valor elevado, como forma de maximizar a carga atendida. Durante a evolução do algoritmo, com a representação dos diversos cenários de recomposição, este valor tende a diminuir, como forma de minimizar as sobretensões resultantes no sistema à vazão. Desta forma a tensão de referência fica ajustada em um valor ótimo.

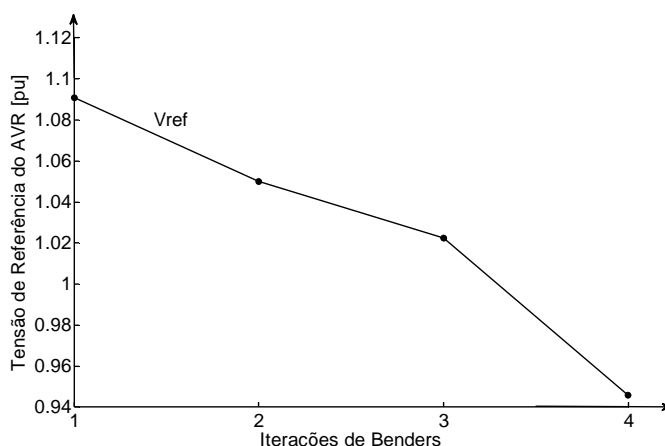


Figura III.15 – Água Vermelha - Tensão de referência do AVR do gerador 1.

Na terceira iteração do algoritmo, o reator de linha de 180 MVar já está conectado, Figura III.13, e o subproblema 2, referente ao regime dinâmico já está convergido, conforme mostrado na Figura III.14. Caso a definição dos reatores fosse feita considerando-se somente o subproblema 2, o algoritmo já estaria convergido. Entretanto não seria obtido o valor de referência do AVR, que somente pode ser calculada considerando o subproblema 3.

O subproblema 3, referente ao regime permanente de rejeição de carga, ainda não está convergido na terceira iteração, necessitando mais ajustes no sistema. Neste caso, o algoritmo reduz a tensão de referência dos AVR's, conforme Figura III.15, sem a necessidade de conexão de mais reatores ao sistema, Figura III.13.

Neste ponto é feita uma consideração sobre a necessidade de representação dos vários cenários de recomposição. A representação somente do pior cenário, que corresponde ao quinto cenário do exemplo apresentado, poderia levar a um resultado sub-ótimo, com menos reatores conectados ou reatores de menor capacidade. Neste caso não se consideraria, os diversos cenários presentes durante o processo de recomposição, e o sistema elétrico estaria sujeito a elevadas sobretensões no caso de rejeição de carga em qualquer barra do sistema, inviabilizando o corredor de recomposição fluente.

Destaca-se, que o pior cenário, corresponde ao corredor recomposto em vazio, antes do processo de tomada de carga. A convergência deste cenário, junto com os demais, indica a viabilidade de recomposição fluente do sistema a vazio tal como é especificado pelo ONS. Na prática, após a definição desta configuração do corredor, é iniciado o processo de tomada de carga.

Para o exemplo apresentado, correspondente à área de recomposição de Água Vermelha, foram obtidos resultados superiores ao encontrado na literatura como pode ser visto em (Alves, 2007). Nesta referência, a tensão de geração é mantida fixa em 0,909 pu, e o montante de carga

tomada foi de $100+j32,9$ MVA, com a conexão do reator de linha de 180,0 MVar. A formulação apresentada permitiu a definição de um montante de carga superior ao encontrado na literatura e permitiu ainda o ajuste automático da tensão de referência do AVR. O valor de tensão de geração encontrado pela metodologia proposta é o maior valor permitido para a energização do corredor sem ocorrência de sobretensões, atendendo a todos os cenários de recomposição. O ajuste adequado deste parâmetro permitiu a elevação da tomada de carga se comparado ao método proposto na literatura.

Após a definição de todas as variáveis do processo de recomposição, pode-se proceder ao desmembramento dos resultados em uma seqüência de procedimentos a serem executados para recomposição fluente da área geoeletrica. Desta forma, tem-se:

1. Ajuste da tensão de geração de Água Vermelha em 0,946 pu, barra 500.
2. Energização do transformador elevador, 500 – 536.
3. Energização da linha 536 – 563.
4. Conexão do Reator de 180,0 MVar na linha 563 – 567, lado da barra 567.
5. Energização da linha 563 – 567.
6. Energização da linha 567 – 570.
7. Energização da linha 570 - 571.
8. Tomada de carga de $177,957+j58,548$ MVA na barra 571.

A execução destes procedimentos permite a recomposição da área geoeletrica apresentada.

III.11 Conclusões

Este capítulo apresentou o problema de recomposição fluente, e também a metodologia proposta para a solução deste problema. Foram mostrados os modelos utilizados e a decomposição do problema de recomposição em subproblemas, representando cada cenário de recomposição fluente.

A metodologia proposta permitiu o ajuste adequado das variáveis de controle no processo de recomposição. A tensão de partida das unidades geradoras foi definida de forma automática, ao contrário de outras metodologias presentes na literatura, onde é relatada a dificuldade de ajuste deste parâmetro para atendimento de todos os cenários de recomposição.

Esta formulação permitiu também a definição automática da configuração mínima de reatores conectados ao sistema para estabelecimento do corredor de recomposição. Esta configuração se faz necessária para manter as tensões dentro dos limites indicados para a recomposição fluente. Na prática esta definição é feita com base em procedimentos de tentativa e erro.

Adicionalmente, a metodologia proposta determinou o montante de carga a ser tomada na recomposição fluente, parâmetro de maior interesse no processo de recomposição. A definição do montante de carga é feita considerando-se a configuração de rede imposta pelos reatores conectados.

Desta forma, a metodologia apresentada permitiu a definição da configuração mínima de rede para o estabelecimento do corredor de recomposição fluente, considerando-se as variáveis mais importantes no processo de recomposição.

Por fim, neste capítulo, foi apresentado um exemplo numérico para exemplificação da metodologia proposta.

Capítulo IV

Estudo de Casos

IV.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação da metodologia proposta em corredores de recomposição do SIN. As simulações dos sistemas apresentados foram conduzidas utilizando-se o software Matlab, no qual a metodologia proposta foi implementada. Os dados elétricos dos sistemas simulados encontram-se no Apêndice C.

IV.2 Área Ilha Solteira

A usina hidrelétrica de Ilha Solteira tem potência instalada de 3444 MW distribuídos em vinte unidades geradoras sendo quatro com capacidade de 181 MW, onze unidades de 175 MW e cinco unidades de 179 MW. Parte da potência gerada é transmitida em 440 kV à subestação de Araraquara (Alves, 2007). O corredor de recomposição em estudo inicia-se na usina de Ilha Solteira e termina na grande São Paulo, entregando potência em 88 kV.

O suporte de potência reativa deste corredor é proporcionado por um reator de linha de 180 MVar, e um reator manobrável de barra de 180 MVar, ambos na subestação de Araraquara. Existe ainda um reator manobrável de 90 MVar na linha de transmissão Araraquara - Santo Ângelo e um reator de barra de 90 MVar na subestação Santo Ângelo. Segundo (Alves, 2007) este reator só é utilizado em situações de indisponibilidade do reator de linha. A Figura IV.1 mostra esta área geoeletrica. Para a recomposição desta área são utilizadas três máquinas em Ilha Solteira.

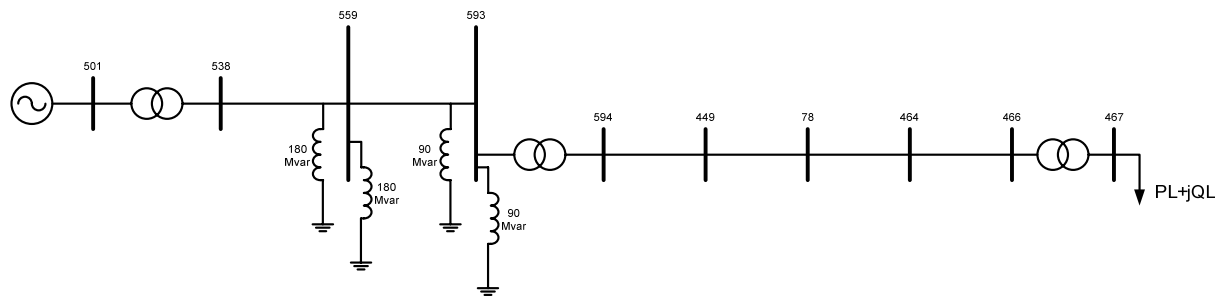


Figura IV.1 – Área Ilha Solteira.

Na Figura IV.1 deseja-se maximizar a carga na barra 467. A Figura IV.2 mostra os cenários de recomposição simulados para este sistema. São nove cenários da barra inicial 501 até a barra final 467.

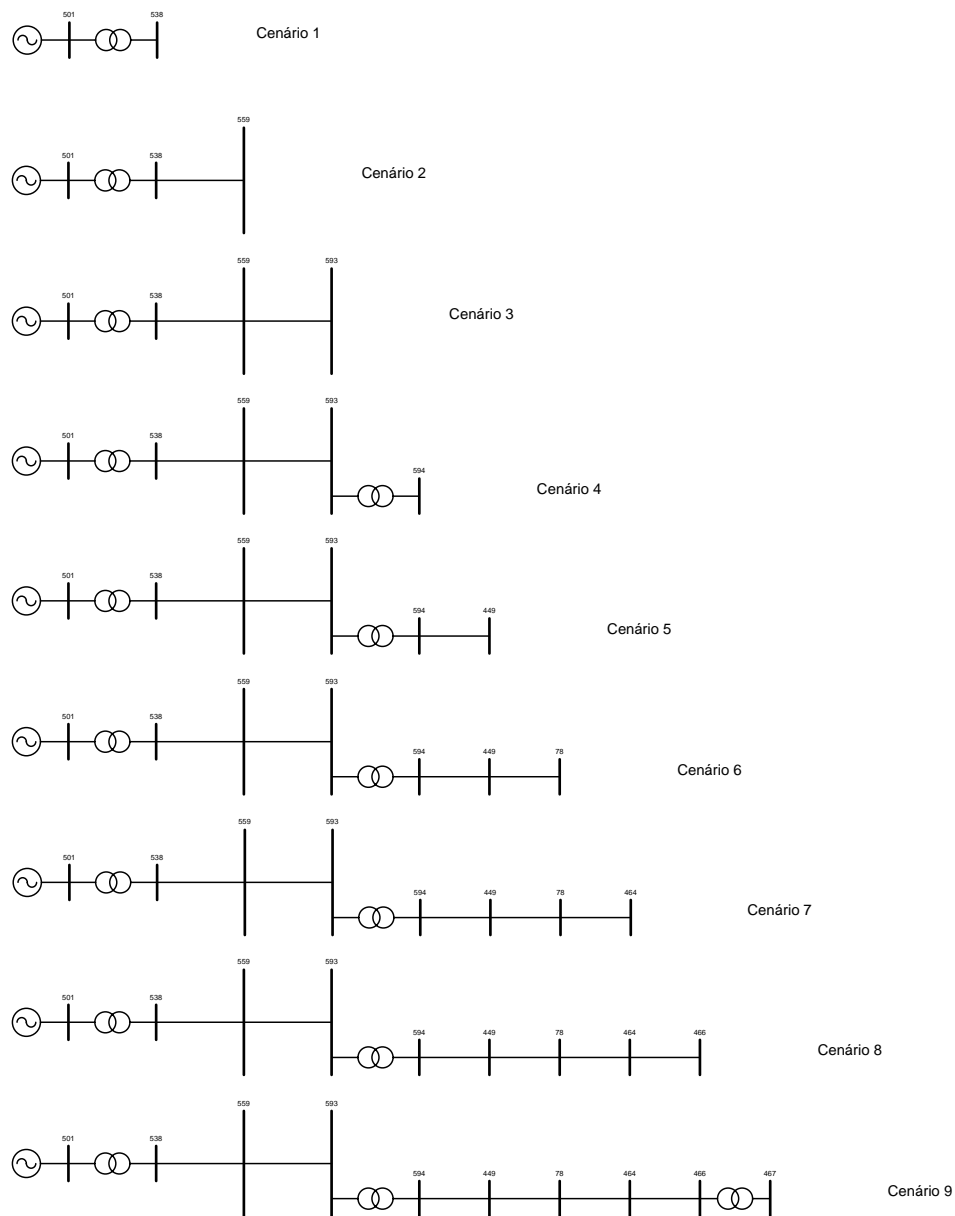


Figura IV.2 – Ilha Solteira – Cenários de Recomposição.

Para este sistema, serão efetuadas duas simulações: (i) Sem utilizar o reator de barra de 90 MVar como opção de suporte de potência reativa. Será utilizado o limite de tensão de 0,80 a 1,10 pu, para comparação dos resultados com a referência (Alves, 2007), que utiliza este limite. (ii) Simulação adotando como opção de suporte de potência reativa o reator de 90 MVar da barra de Santo Ângelo, barra 594 na Figura IV.1. Neste caso serão adotados para as tensões os limites de 0,90 a 1,10 pu, conforme ONS.

➤ **Simulação 1**

A primeira execução do subproblema 1 retornou um valor de carga de 371,963+j122,376 MVA na barra 467, sem nenhum reator conectado. As Tabelas IV.1 e IV.2 mostram os resultados para a primeira execução do subproblema 1.

Tabela IV.1 – Solução Ilha Solteira – Iteração 1 – Simulação 1.

Barra	Tensão (pu)	Reator (MVar)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
501	1,012	0,0	-	-
538	1,024	0,0	-	-
559	1,100	0,0	-	-
593	1,013	0,0	-	-
594	0,993	0,0	-	-
449	0,980	0,0	-	-
78	0,959	0,0	-	-
464	0,929	0,0	-	-
466	0,924	0,0	-	-
467	0,800	0,0	371,963	122,376

Tabela IV.2 – Geração Ilha Solteira – Iteração 1 – Simulação 1.

Gerador	E_a''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
1	0,928	5,523	130,1703	-103,7944	1,016
2	0,928	5,523	130,1703	-103,7944	1,016
3	0,928	5,523	130,1703	-103,7944	1,016

Os resultados da simulação dos nove cenários de recomposição da área Ilha Solteira, são mostrados a seguir nas Tabelas IV.3, IV.4 e IV.5, com resultados referentes à tensões em barras e reatores de linha, variáveis de geração e reatores de linha conectados. Estes resultados foram obtidos com cinco iterações do algoritmo de Benders.

Tabela IV.3 – Solução Ilha Solteira – Final – Simulação 1.

Barra	Tensão (pu)	Reator (MVar)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
501	0,969	0,0	-	-
538	0,972	0,0	-	-
559	0,913	180,0	-	-
593	0,884	0,0	-	-
594	0,878	0,0	-	-
449	0,874	0,0	-	-
78	0,866	0,0	-	-
464	0,854	0,0	-	-
466	0,853	0,0	-	-
467	0,800	0,0	183,718	60,443

Tabela IV.4 – Geração Ilha Solteira – Final – Simulação 1.

Gerador	E_a''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
1	0,944	2,771	62,9555	-29,3864	0,974
2	0,944	2,771	62,9555	-29,3864	0,974
3	0,944	2,771	62,9555	-29,3864	0,974

Tabela IV.5 – Reatores de Linha Ilha Solteira – Final – Simulação 1.

Circuito	De	Para	Valor (MVar)	Valor (MVar)
2	538	559	0,0	180,0
3	559	593	0,0	90,0

São mostrados a seguir, nas Figuras IV.3, IV.4 e IV.5, o comportamento das variáveis de decisão ao longo do processo iterativo. Na primeira iteração, tem-se o cenário ideal de recomposição que corresponde a uma tomada de carga elevada sem conexão de reatores como pode ser visto na Figura IV.3. Porém esta configuração não atende a todos os cenários, e desta forma ao longo do processo, o algoritmo reduz a carga tomada e conecta mais reatores ao sistema.

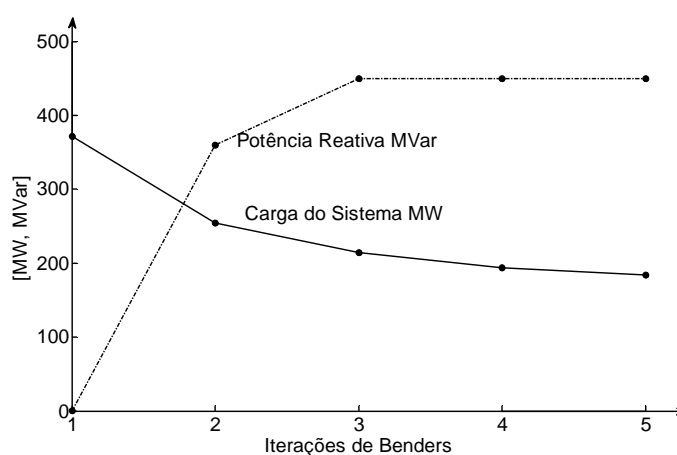


Figura IV.3 – Ilha Solteira – Tomada de Carga e Alocação de Reatores – Simulação 1.

A Figura IV.4 mostra a evolução da tensão de referência do AVR durante o processo iterativo.

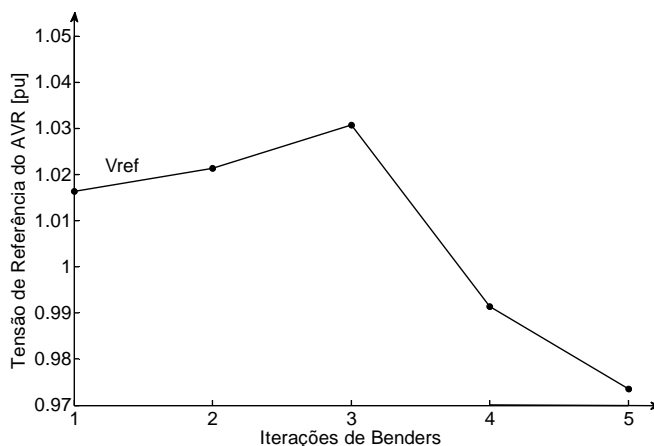


Figura IV.4 – Ilha Solteira – Tensão de Referência do AVR do gerador 1 – Simulação 1

A Figura IV.5 mostra a alocação de potência reativa fictícia durante a convergência do algoritmo.

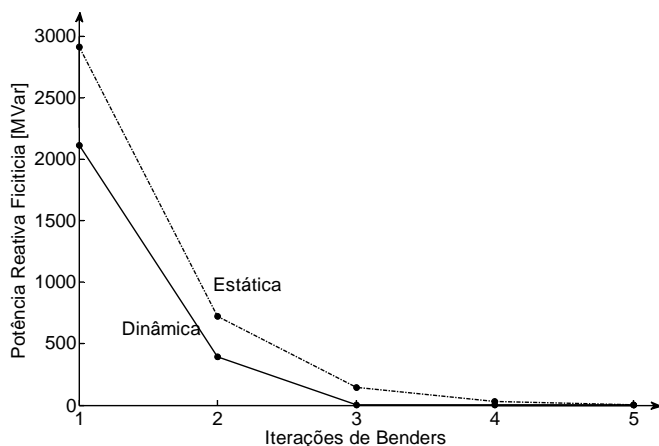


Figura IV.5 – Ilha Solteira – Alocação de Potência Reativa Fictícia – Simulação 1.

Os resultados obtidos nesta simulação foram superiores aos encontrados em (Alves, 2007). Foram encontrados os mesmos reatores conectados, com um montante de carga tomada de $183,718+j60,443$ MVA, enquanto que em (Alves, 2007) o montante de carga tomada foi de $160+j52,6$ MVA. A elevação no montante de tomada de carga ocorreu principalmente devido ao fato da tensão de geração ser definida de forma otimizada. Neste caso, o valor encontrado foi de 0,974 pu, enquanto que em (Alves, 2007) utiliza-se o valor fixo de 0,900 pu, o que certamente limita a tomada fluente de carga.

➤ **Simulação 2**

Nesta simulação considera-se o reator de barra de 90 MVar como opção de suporte de potência reativa. Neste caso, a primeira execução do subproblema 1 retornou um valor de carga de $346,577+j114,024$ MVA na barra 467, e apenas um reator de barra de 180,0 MVar, na barra 593, mostrados na Tabela IV.6

Tabela IV.6 – Solução Ilha Solteira – Iteração 1 – Simulação 2.

Barra	Tensão (pu)	Reator (MVar)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
501	1,065	0,0	-	-
538	1,075	0,0	-	-
559	1,100	180,0	-	-
593	1,060	0,0	-	-
594	1,046	0,0	-	-
449	1,037	0,0	-	-
78	1,022	0,0	-	-
464	0,999	0,0	-	-
466	0,995	0,0	-	-
467	0,900	0,0	346,577	114,024

A Tabela IV.7 mostra os valores de geração para a iteração 1. As tensões de referência das três máquinas foram ajustadas em 1,070 pu.

Tabela IV.7 – Geração Ilha Solteira – Iteração 1 – Simulação 2.

Gerador	E_a''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
1	0,986	0,0786	119,88	-85,5579	1,070
2	0,986	0,0786	119,88	-85,5579	1,070
3	0,986	0,0786	119,88	-85,5579	1,070

Não houve a alocação de reatores de linha. Seguindo, a simulação dos nove cenários, apresentou convergência após seis iterações do algoritmo de Benders. Os resultados são mostrados nas Tabelas IV.8, IV.9 e IV.10.

Tabela IV.8 – Solução Ilha Solteira – Final – Simulação 2.

Barra	Tensão (pu)	Reator (MVar)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
501	0,953	0,0	-	-
538	0,963	0,0	-	-
559	0,999	0,0	-	-
593	0,956	90,0	-	-
594	0,953	0,0	-	-
449	0,951	0,0	-	-
78	0,946	0,0	-	-
464	0,938	0,0	-	-
466	0,937	0,0	-	-
467	0,900	0,0	155,810	51,262

A Tabela IV.9 mostra os valores de geração para o sistema convergido.

Tabela IV.9 – Geração Ilha Solteira – Final – Simulação 2.

Gerador	E_a''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
1	0,867	0,0439	53,0683	-79,0583	0,958
2	0,867	0,0439	53,0683	-79,0583	0,958
3	0,867	0,0439	53,0683	-79,0583	0,958

Houve alocação de dois reatores de linha, mostrados na Tabela IV.10.

Tabela IV.10 – Reatores de Linha Ilha Solteira – Final – Simulação 2.

Circuito	De	Para	Valor (MVar)	Valor (MVar)
2	538	559	0,0	180,0
3	559	593	0,0	90,0

A processo de tomada de carga e alocação de reatores durante o processo iterativo é mostrado na Figura IV.6, e a evolução da tensão de referência do AVR é mostrada na Figura IV.7. A alocação de potência reativa fictícia durante a convergência é mostrada na Figura IV.8.

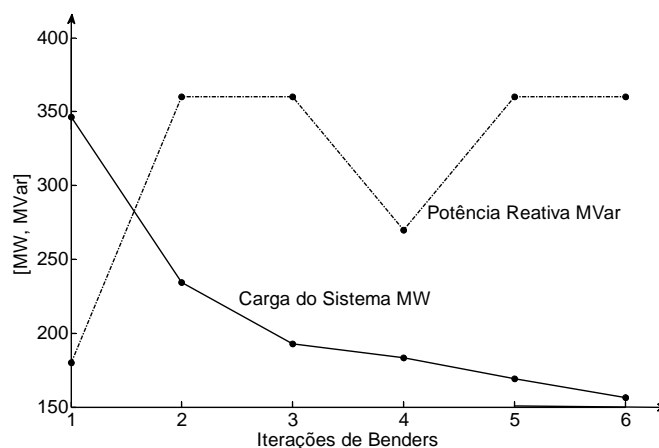


Figura IV.6 – Ilha Solteira – Tomada de Carga e Alocação de Reatores – Simulação 2.

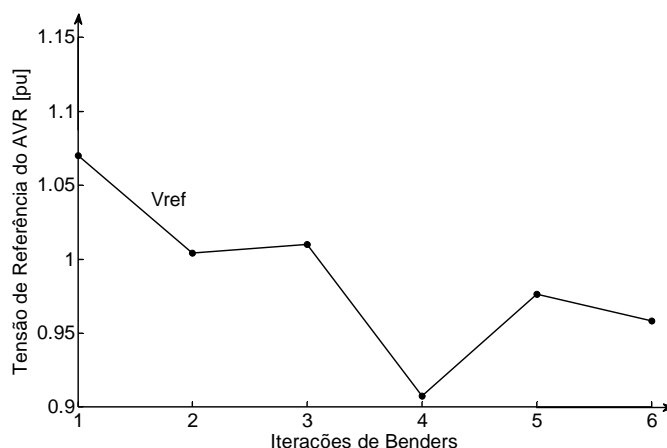


Figura IV.7 – Ilha Solteira – Tensão de Referência do AVR do gerador 1 – Simulação 2.

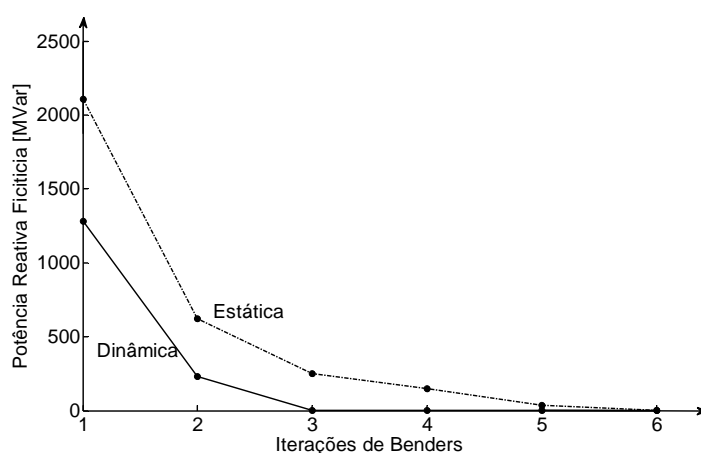


Figura IV.8 – Ilha Solteira – Alocação de Potência Reativa Fictícia – Simulação 2.

A simulação considerando-se o reator da barra da barra Santo Ângelo apresentou resultados satisfatórios, sendo necessário menor suporte de potência reativa fornecida por reatores, e possibilitou uma pequena elevação no montante de carga tomada. Desta forma, tem-se uma nova opção de recomposição da área, quando da indisponibilidade do reator de barra de 180,0 MVar.

IV.3 Área Jupiá

A usina de Jupiá tem potência instalada de 1551,2 MW distribuída em quatorze unidades geradoras de 110,8 MW. Parte da potência gerada é transmitida à subestação de Bauru em 440 kV (Alves, 2007). Este corredor de recomposição mostrado na Figura IV.9 inicia-se na usina de Jupiá e termina na grande São Paulo atendendo carga em 88 kV.

O suporte de potência reativa deste corredor é proporcionado por um reator de linha 180 MVar, e um reator de barra também de 180 MVar, ambos na subestação de Bauru. Existe também um reator de linha de 90 MVar, na linha de transmissão Bauru – Cabreúva, linha 561-584 na

Figura IV.9, e um reator manobrável de barra de 90 MVar, ambos na subestação de Cabreúva, barra 584. Existe ainda dois reatores de 60 MVar na subestação de Anhangüera 230 kV, barra 423 na Figura IV.9. A recomposição desta área geoeétrica é feita utilizando-se duas máquinas em Jupia.

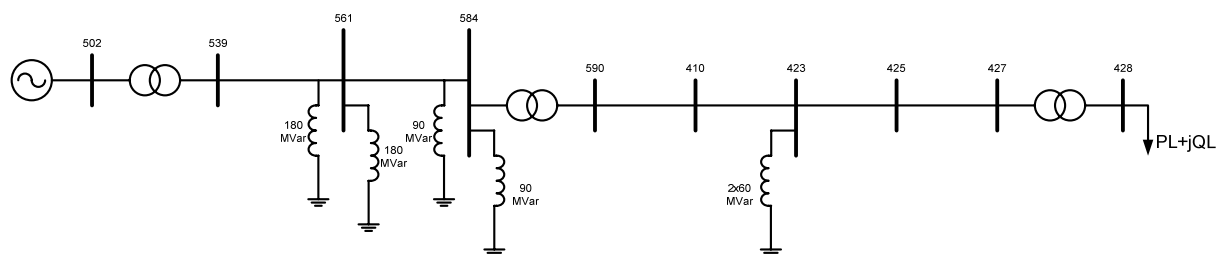


Figura IV.9 – Área Jupia.

Na Figura IV.10 estão apresentados os cenários de recomposição da área Jupia.

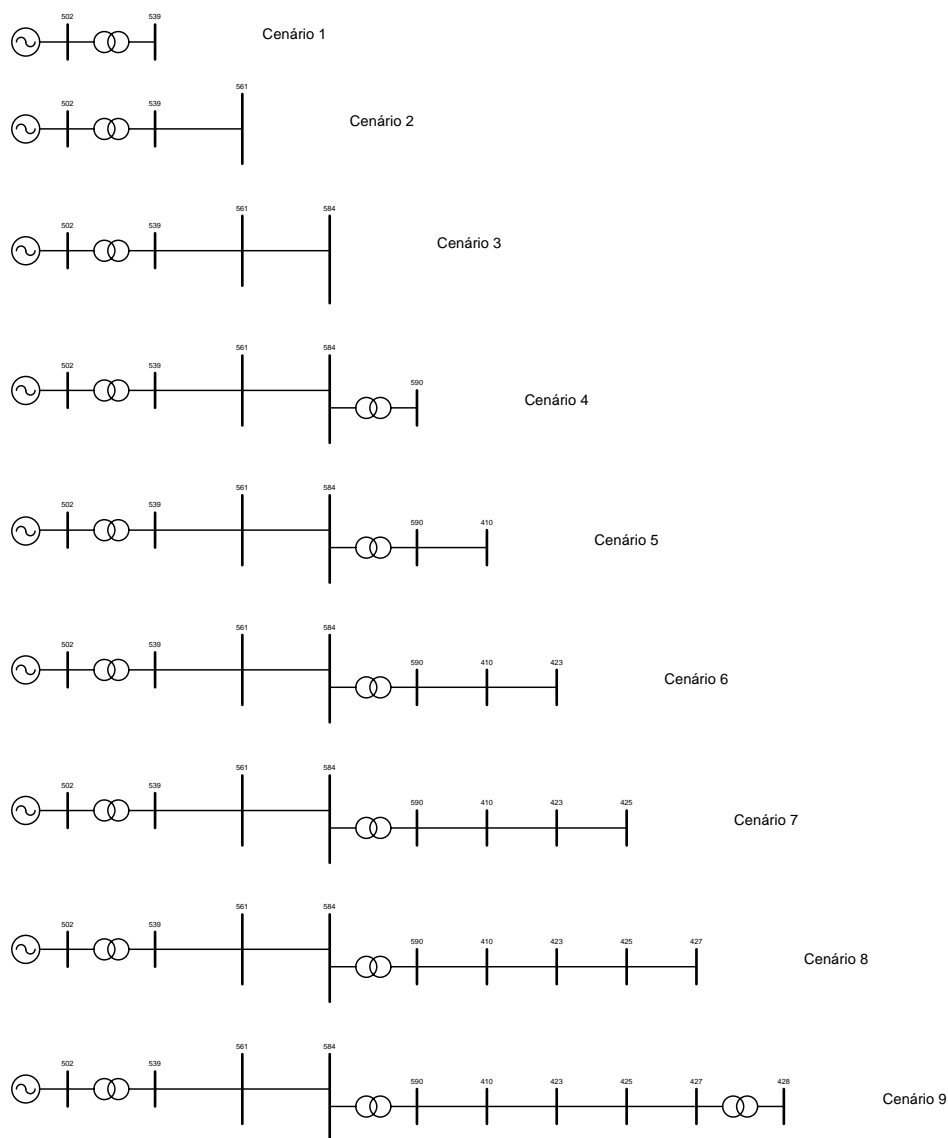


Figura IV.10 – Jupia – Cenários de Recomposição.

A seguir nas Tabelas IV.11, IV.12 e IV.13 são mostrados os resultados da primeira execução do subproblema 1.

Tabela IV.11 – Solução Jupιά – Iteração 1.

Barra	Tensão (pu)	Reator (MVar)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
502	1,095	0,0	-	-
539	1,098	0,0	-	-
561	1,029	180,0	-	-
584	1,014	90,0	-	-
590	1,010	0,0	-	-
410	0,994	0,0	-	-
423	0,985	0,0	-	-
425	0,981	0,0	-	-
427	0,974	0,0	-	-
428	0,900	0,0	240,739	67,359

A Tabela IV.12 mostra os valores de geração para a primeira iteração.

Tabela IV.12 – Geração Jupιά – Iteração 1.

Gerador	E_a''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
1	1,074	5,033	105,4664	-22,5288	1,100
2	1,074	5,033	105,4664	-22,5288	1,100

Reatores de linha conectados:

Tabela IV.13 – Reatores de Linha Jupιά – Iteração 1.

Circuito	De	Para	Valor (MVar)	Valor (MVar)
2	539	561	0,0	180,0

Seguindo, as simulações dos diversos cenários de recomposição, após quatro cortes de Benders, resultou nos valores mostrados na Tabela IV.14.

Tabela IV.14 – Solução Jupιά – Final.

Barra	Tensão (pu)	Reator (MVar)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
502	1,050	0,0	-	-
539	1,052	0,0	-	-
561	0,978	180,0	-	-
584	0,953	90,0	-	-
590	0,954	0,0	-	-
410	0,951	0,0	-	-
423	0,949	0,0	-	-
425	0,948	0,0	-	-
427	0,945	0,0	-	-
428	0,900	0,0	134,056	44,105

A Tabela IV.15 mostra os valores de geração para o sistema convergido.

Tabela IV.15 – Geração Jupιά – Final.

Gerador	Ea''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
1	1,037	3,548	68,7703	-12,8644	1,055
2	1,037	3,542	68,6711	-12,7197	1,055

Houve alocação de dois reatores de linha mostrados na Tabela IV.16.

Tabela IV.16 – Reatores de Linha Jupιά – Final.

Circuito	De	Para	Valor (MVar)	Valor (MVar)
2	539	561	0,0	180,0
3	561	584	0,0	90,0

Nas Figuras IV.11, IV.12 e IV.13 são mostradas a evolução da carga e da alocação de reatores no processo iterativo, o ajuste na tensão de referência, e a potência reativa fictícia.

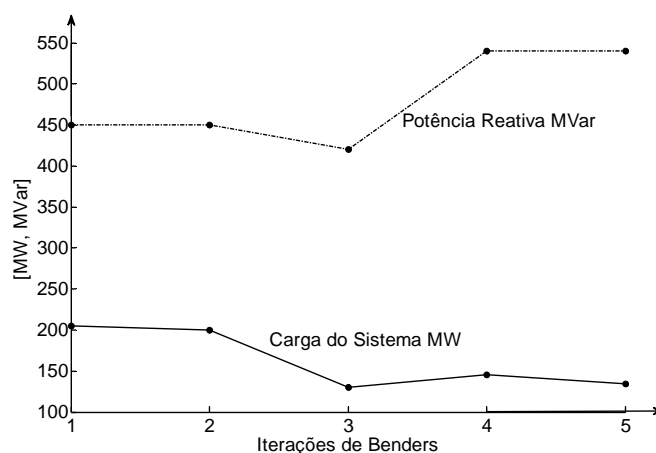


Figura IV.11 – Jupιά – Tomada de Carga e Alocação de Reatores.

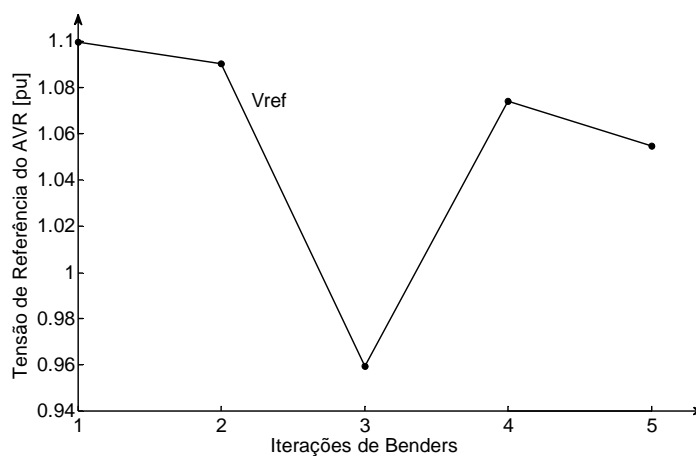


Figura IV.12 – Jupιά – Tensão de referência do AVR.

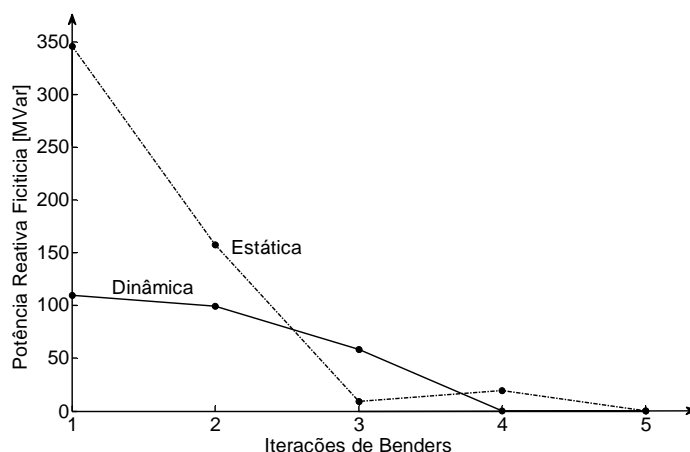


Figura IV.13 – Jupiá – Alocação de Potência Reativa Fictícia.

Para este corredor não é descrita na literatura o montante de carga que pode ser conectada na recomposição fluente.

IV.4 Área Rio de Janeiro

O principal procedimento de recomposição desta área baseia-se na usina de Marimbondo e no sistema de transmissão 500 kV conectando esta usina à área Rio de Janeiro, e também do sistema de 138 kV da LIGHT (Gomes *et alii*, 2003b). Esta usina possui oito unidades geradoras com capacidade de 186 MW. A potência gerada é transmitida em 500 kV à subestação de Araraquara através de dois circuitos de transmissão Marimbondo – Araraquara. O suporte de potência reativa é proporcionada por dois reatores de linha de 73,4 MVar, um em cada circuito, existe também outro reator de 73,4 MVar no circuito Araraquara – Poços de Caldas, ambos na subestação de Araraquara. Existe também um reator de linha de 136,0 MVar no circuito Poços de Caldas – Itajubá. Existe ainda Um reator de barra de 136,0 MVar e um reator de linha na linha Cachoeira Paulista – Adrianópolis ambos na subestação de Cachoeira Paulista. Por fim, existe um reator de barra de 136,0 MVar e um reator de linha na linha Cachoeira Paulista – Adrianópolis ambos na subestação de Adrianópolis. Esta área geoeletrica é mostrada na Figura IV.14.

Para a recomposição desta área, o ONS considera um mínimo de cinco unidades geradoras conectadas em Marimbondo (Gomes *et alii*, 2002) e (Gomes *et alii*, 2004).

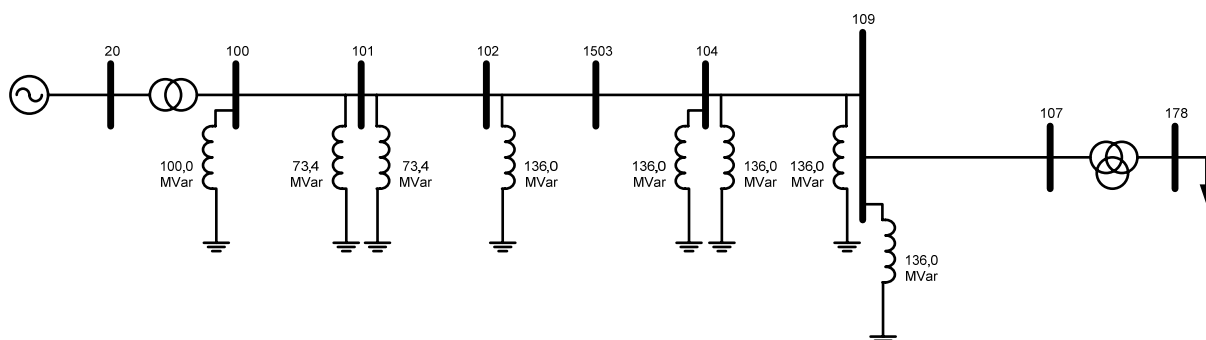


Figura IV.14 – Área Rio de Janeiro.

Para este sistema, são testados oito cenários de recomposição fluente. São apresentados os resultados finais nas Tabelas IV.17, IV.18 e IV.19.

Tabela IV.17 – Área Rio de Janeiro – Final.

Barra	Tensão (pu)	Reator (MVar)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
20	0,925	0,0	-	-
100	0,949	0,0	-	-
101	0,980	0,0	-	-
102	0,976	0,0	-	-
104	0,951	0,0	-	-
107	0,911	0,0	-	-
109	0,913	136,0	-	-
178	0,900	0,0	173,547	39,815
1503	0,965	0,0	-	-

A Tabela IV.27 mostra os valores de geração para o sistema convergido.

Tabela IV.18 – Geração Área Rio de Janeiro – Final.

Gerador	E_a''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
1	0,884	1,462	35,3081	-42,2192	0,929
2	0,884	1,462	35,3081	-42,2192	0,929
3	0,884	1,462	35,3081	-42,2192	0,929
4	0,884	1,462	35,3081	-42,2192	0,929
5	0,884	1,462	35,3081	-42,2192	0,929

Reatores de linha conectados.

Tabela IV.19 – Área Rio de Janeiro – Reatores de Linha - Final.

Circuito	De	Para	Valor (MVar)	Valor (MVar)
2	100	101	0,0	73,4
4	102	1503	136,0	0,0
6	104	109	136,0	136,0

O evolução da tomada de carga, da potência reativa suprida pelos reatores são apresentados na Figura IV.15.

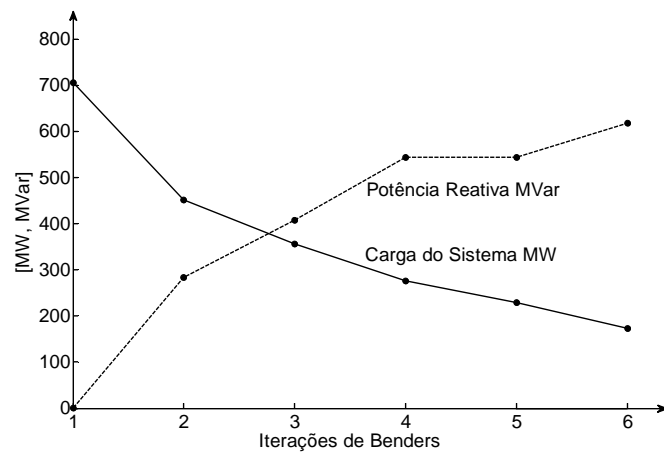


Figura IV.15 – Área Rio de Janeiro – Tomada de Carga e Alocação de Reatores.

Na Figura IV.16 é mostrado o ajuste da tensão de referência do AVR.

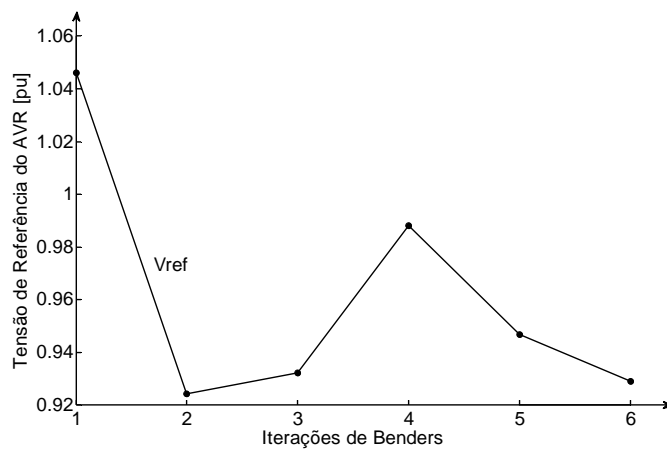


Figura IV.16 – Área Rio de Janeiro – Tensão de Referência do AVR.

Na Figura IV.17 é mostrada a convergência do algoritmo, em termos de alocação de potência reativa fictícia.

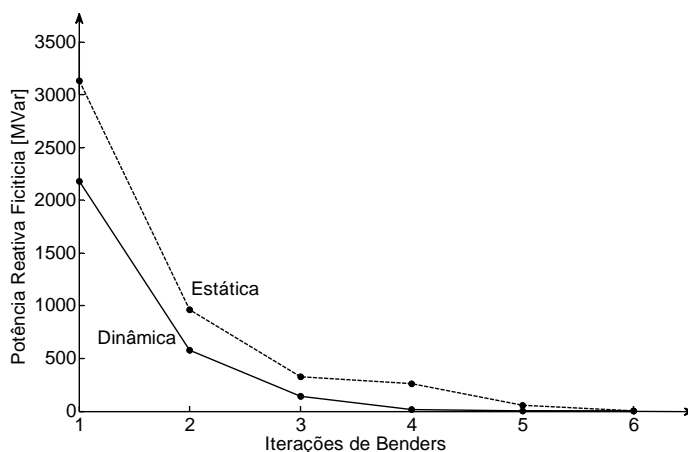


Figura IV.17 – Área Rio de Janeiro – Alocação de Potência Reativa Fictícia.

Para este sistema, é relatado na literatura (Gomes *et alii*, 2002), uma carga tomada de 130 MW, sem compensação de potência reativa fornecida pelo compensador síncrono de Grajaú. A utilização do compensador síncrono é mostrada a seguir.

IV.5 Área Rio de Janeiro – Com Compensador Síncrono

Este sistema corresponde ao mesmo sistema da seção anterior, acrescido do compensador síncrono na subestação de Grajaú, conforme Figura IV.18. Neste caso o compensador síncrono será utilizado para avaliação da tomada de carga em Grajaú. Nos procedimentos do ONS, este equipamento não é considerado como elemento de controle de tensão na fase fluente, sendo no caso da Área Rio de Janeiro, utilizado para aumento do montante de carga tomada. Segundo a referência (Gomes *et alii*, 2004) este equipamento é utilizado após a carga prioritária ser restaurada.

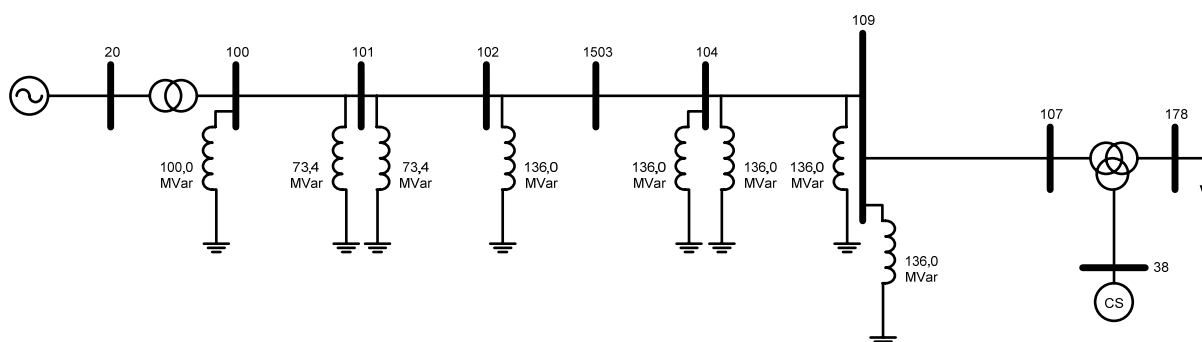


Figura IV.18 – Área Rio de Janeiro com Compensador Síncrono.

Neste sistema serão testados todos os cenários de recomposição, tal como na seção anterior, sendo que no ultimo cenário o compensador síncrono estará presente como elemento de suporte de potência reativa. Desta forma, tem-se este cenário mostrado na Figura IV.19.

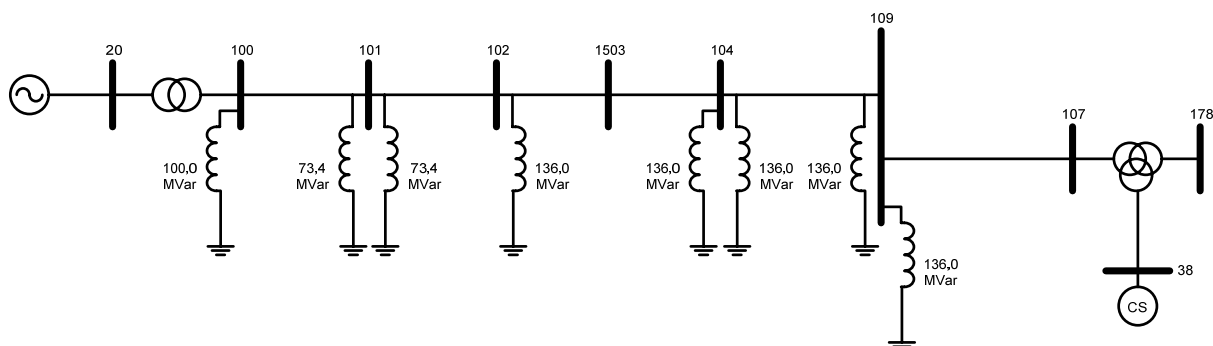


Figura IV.19 – Área Rio de Janeiro – Último cenário.

A configuração mostrada na Figura IV.19 corresponde à conexão do compensador síncrono antes do início da tomada de carga. As Tabelas IV.20 e IV.21 mostram os resultados da primeira iteração do subproblema 1.

Tabela IV.20 – Área Rio de Janeiro – Compensador Síncrono – Iteração 1.

Barra	Tensão (pu)	Reator (MVar)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
20	1,064	0,0	-	-
38	1,059	0,0	-	-
100	1,078	0,0	-	-
101	1,100	0,0	-	-
102	1,100	0,0	-	-
104	1,078	0,0	-	-
107	1,027	0,0	-	-
109	1,040	0,0	-	-
178	1,009	0,0	865,346	198,528
1503	1,087	0,0	-	-

A Tabela IV.21 mostra os valores de geração para primeira iteração.

Tabela IV.21 – Geração Área Rio de Janeiro – Compensador Síncrono – Iteração 1.

Gerador	E_a''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
CS	1,229	-63,741	0,00	199,9965	1,065
1	1,057	5,576	182,2841	-20,7285	1,070
2	1,057	5,576	182,2841	-20,7285	1,070
3	1,057	5,576	182,2841	-20,7285	1,070
4	1,057	5,576	182,2841	-20,7285	1,070
5	1,057	5,576	182,2841	-20,7285	1,070

Não houve reatores conectados nesta etapa. Devido ao compensador síncrono, a tomada de carga no subproblema 1 atingiu $865,346 + j195,528$ MVA, com o compensador síncrono operando em sua capacidade máxima de reativos, 200 MVar.

O resultado final obtido após nove iterações do algoritmo é mostrado a seguir, nas Tabelas IV.22, IV.23 e IV.24.

Tabela IV.22 – Área Rio de Janeiro com Compensador Síncrono – Final.

Barra	Tensão (pu)	Reator (MVar)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
20	0,924	0,0	-	-
38	0,979	0,0	-	-
100	0,939	0,0	-	-
101	0,952	0,0	-	-
102	0,941	0,0	-	-
104	0,923	136,0	-	-
107	0,905	0,0	-	-
109	0,900	136,0	-	-
178	0,925	0,0	396,450	90,953
1503	0,933	0,0	-	-

A Tabela IV.23 mostra os valores finais de geração.

Tabela IV.23 – Geração Área Rio de Janeiro com Compensador Síncrono – Final.

Gerador	E_a''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
CS	1,163	-38,193	0,00	199,996	0,985
1	0,903	3,350	81,8425	-24,5490	0,928
2	0,903	3,350	81,8425	-24,5490	0,928
3	0,903	3,350	81,8425	-24,5490	0,928
4	0,903	3,350	81,8425	-24,5490	0,928
5	0,903	3,350	81,8425	-24,5490	0,928

Os reatores de linha conectados são mostrados na Tabela IV.24.

Tabela IV.24 – Área Rio de Janeiro com Compensador Síncrono – Reatores de Linha – Final.

Circuito	De	Para	Valor (MVar)	Valor (MVar)
3	101	102	73,4	0,0
4	102	1503	136,0	0,0
6	104	109	0,0	136,0

A Figura IV.20 mostra a evolução da carga tomada e da potência reativa alocada.

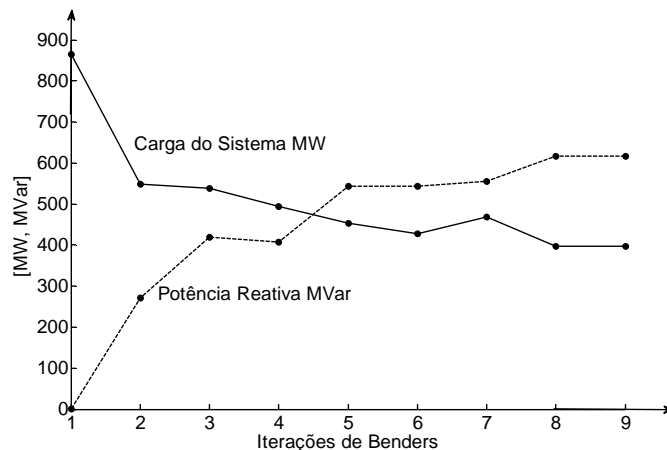


Figura IV.20 – Área Rio de Janeiro com Compensador Síncrono - Tomada de Carga e Alocação de Reatores.

A Figura IV.21 mostra o ajuste da tensão de referência do AVR.

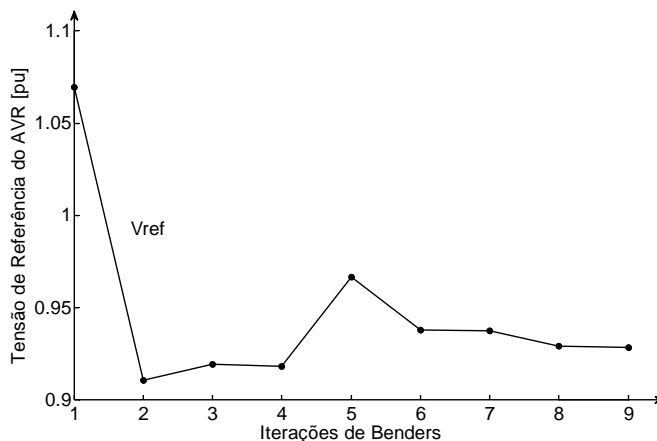


Figura IV.21 – Área Rio de Janeiro com Compensador Síncrono – Tensão de Referência do AVR.

A Figura IV.22 mostra a alocação de potência reativa fictícia durante a convergência do algoritmo.

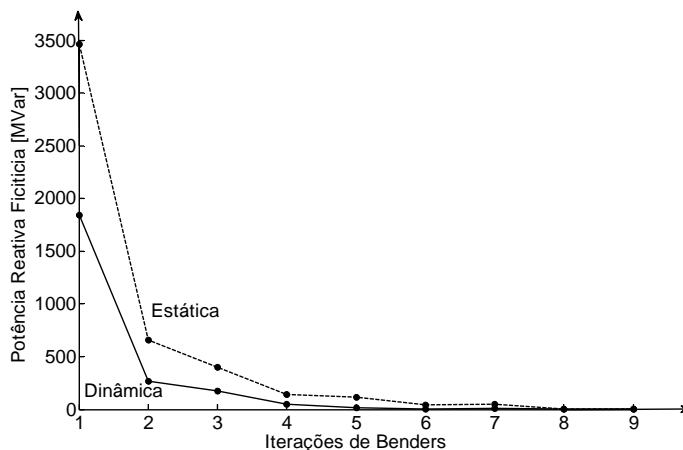


Figura IV.22 – Área Rio de Janeiro com Compensador Síncrono – Alocação de Potência Reativa Fictícia.

A utilização do compensador síncrono como opção de recomposição permitiu elevação do montante de carga tomada se comparada ao caso sem o compensador. Neste caso a tomada de carga atingiu o valor de 396 MW, enquanto que na literatura (Gomes *et alii*, 2002) este valor foi de 310 MW. Para este caso foi encontrado o mesmo valor de suporte de potência reativa que o caso apresentado na seção anterior.

IV.6 Área Norte Rio de Janeiro

Foi criado um sistema para o teste da metodologia na área norte do Rio de Janeiro. Esse sistema consiste da área Rio mostrada na seção IV.4, acrescido de mais alguns ramos, até a barra de Campos 138 kV. Este sistema tem várias opções de suporte de potência reativa, mostrados na Figura IV.23.

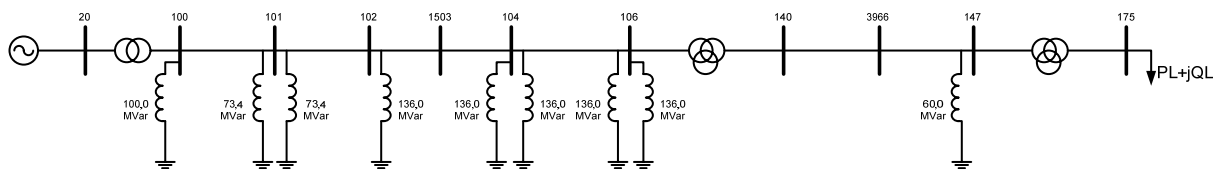


Figura IV.23 – Área Norte Rio de Janeiro.

As Tabelas IV.25, IV.26 e IV.27 mostram os resultados da primeira iteração do subproblema 1.

Tabela IV.25 – Área Norte Rio de Janeiro – Iteração 1.

Barra	Tensão (pu)	Reator (MVar)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
20	0,913	0,0	-	-
100	0,963	0,0	-	-
101	1,062	0,0	-	-
102	1,100	0,0	-	-
104	1,081	136,0	-	-
106	1,083	0,0	-	-
140	1,065	0,0	-	-
147	0,954	0,0	-	-
175	0,902	0,0	281,395	92,579
1503	1,094	0,0	-	-
3966	1,000	0,0	-	-

Tabela IV.26 – Geração Área Norte Rio de Janeiro – Iteração 1.

Gerador	Ea''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
1	0,830	2,601	59,2284	-86,0214	0,917
2	0,830	2,601	59,2284	-86,0214	0,917
3	0,830	2,601	59,2284	-86,0214	0,917
4	0,830	2,601	59,2284	-86,0214	0,917
5	0,830	2,601	59,2284	-86,0214	0,917

Tabela IV.27 – Área Norte Rio de Janeiro – Reatores de Linha – Iteração 1.

Circuito	De	Para	Valor (MVar)	Valor (MVar)
6	104	106	136,0	136,0

O algoritmo de Benders convergiu após oito iterações, gerando 7 cortes de Benders. Os resultados são mostrados nas Tabelas IV.28, IV.29 e IV.30.

Tabela IV.28 – Área Norte Rio de Janeiro – Final.

Barra	Tensão (pu)	Reator (MVar)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
20	0,924	0,0	-	-
100	0,953	0,0	-	-
101	0,995	0,0	-	-
102	0,999	0,0	-	-
104	0,981	136,0	-	-
106	0,947	136,0	-	-
140	0,953	0,0	-	-
147	0,917	0,0	-	-
175	0,901	0,0	97,483	32,072
1503	0,993	0,0	-	-
3966	0,941	0,0	-	-

A Tabela IV.29 mostra os valores de geração para o sistema convergido.

Tabela IV.29 – Geração Área Norte Rio de Janeiro – Final.

Gerador	Ea''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
1	0,875	0,834	19,9918	-50,1217	0,928
2	0,875	0,834	19,9918	-50,1217	0,928
3	0,875	0,834	19,9918	-50,1217	0,928
4	0,875	0,834	19,9918	-50,1217	0,928
5	0,875	0,834	19,9918	-50,1217	0,928

A Tabela IV.30 mostra os reatores de linha necessários para a recomposição fluente da área.

Tabela IV.30 – Área Norte Rio de Janeiro – Reatores de Linha - Final.

Circuito	De	Para	Valor (MVar)	Valor (MVar)
2	100	101	0,0	73,4
4	102	1503	136,0	0,0
6	104	106	0,0	136,0
10	3966	147	0,0	60,0

As Figuras IV.24, IV.25 e IV.26 mostram a tomada de carga, a alocação de reatores, o ajuste da tensão de referência e a alocação de potência reativa fictícia durante a convergência do algoritmo.

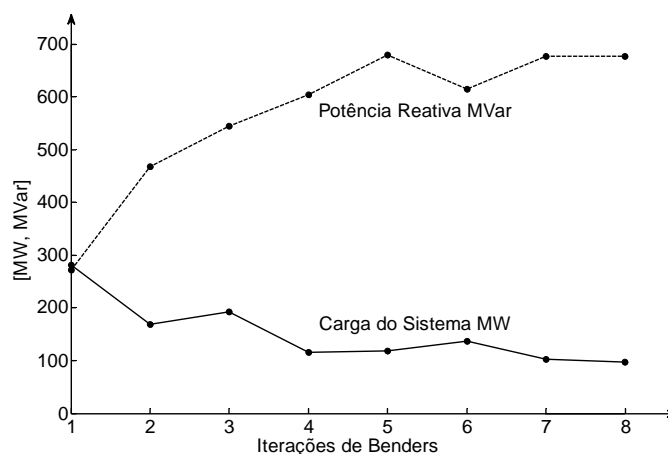


Figura IV.24 – Área Norte Rio de Janeiro – Tomada de Carga e Alocação de Reatores.

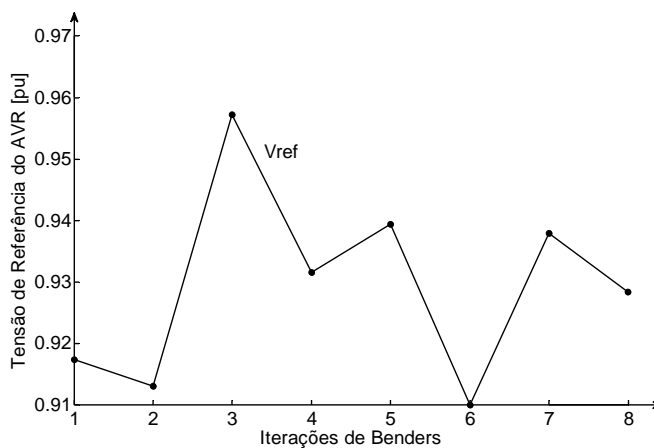


Figura IV.25 – Área Norte Rio de Janeiro – Tensão de referência do AVR.

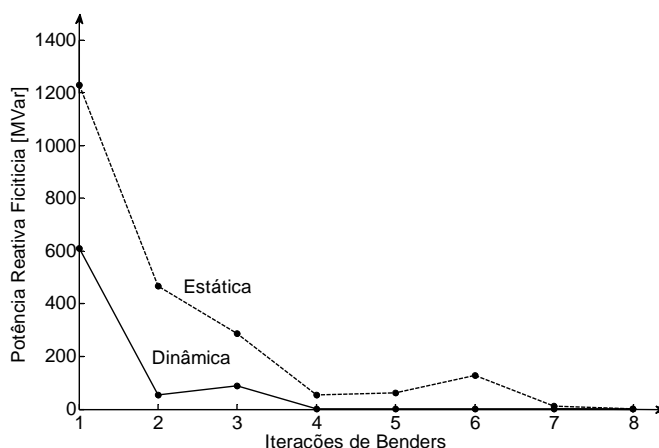


Figura IV.26 – Área Norte Rio de Janeiro – Alocação de Potência Reativa Fictícia.

IV.7 Área Norte Rio de Janeiro – Com o CER

Este caso corresponde ao mesmo caso da seção IV.6, com a diferença que será considerado o Compensador Estático de Reativos existente na barra 345 kV de Campos, conforme pode ser visto na Figura IV.27. Apesar da utilização deste equipamento não estar prevista nos procedimentos da ONS, ele será utilizado para verificação do comportamento do CER como elemento de controle de tensão na recomposição.

O CER deste sistema controla a barra de 345 kV em 1,04 pu sendo este o valor de V_{k0} . Este equipamento tem limites de -60 a 100 MVar.

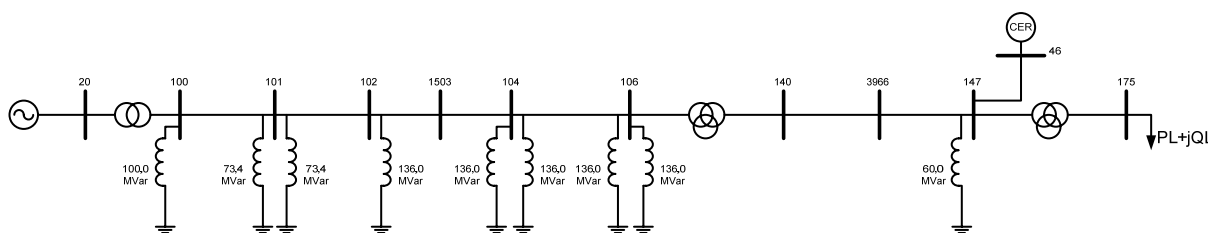


Figura IV.27 – Área Norte Rio de Janeiro CER.

Neste sistema serão testados todos os cenários de recomposição, tal como na seção anterior, sendo que no penúltimo e no último estágio o Compensador Estático de Reativos será considerado. Estes cenários são mostrados nas Figuras IV.28 e IV.29.

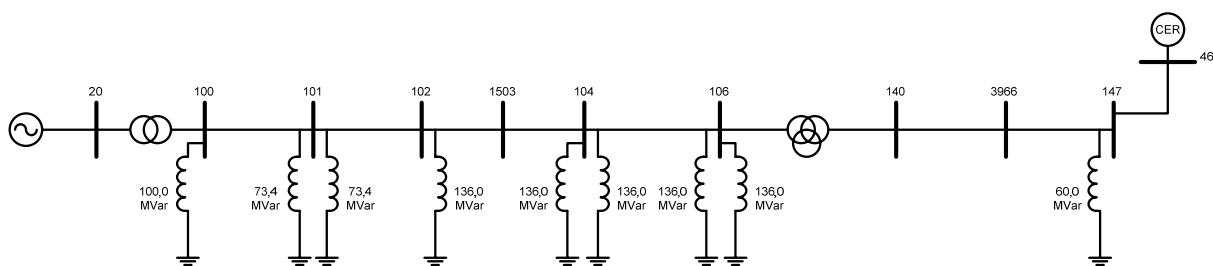


Figura IV.28 – Área Norte Rio de Janeiro – Penúltimo cenário.

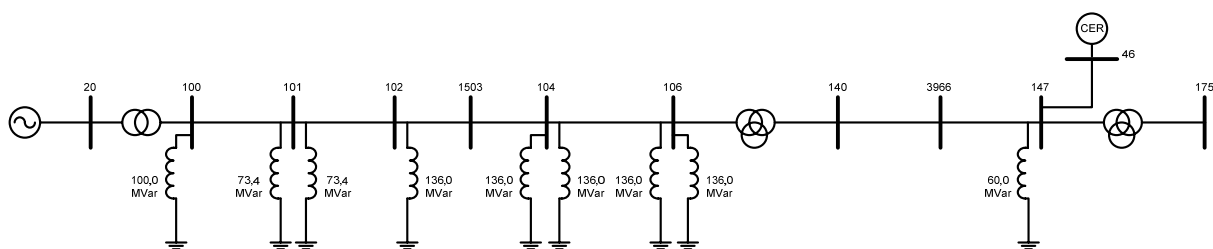


Figura IV.29 - Área Norte Rio de Janeiro – Último cenário.

As Tabelas IV.31, IV.32 e IV.33 mostram os resultados da primeira iteração do subproblema 1.

Tabela IV.31 – Área Norte Rio de Janeiro CER – Iteração 1.

Barra	Tensão (pu)	Reator (MVar)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
20	0,919	0,0	-	-
46	1,001	0,0	-	-
100	0,968	0,0	-	-
101	1,064	0,0	-	-
102	1,100	0,0	-	-
104	1,080	136,0	-	-
106	1,081	0,0	-	-
140	1,064	0,0	-	-
147	0,960	0,0	-	-
175	0,902	0,0	305,397	100,476
1503	1,093	0,0	-	-
3966	1,002	0,0	-	-

Tabela IV.32 – Geração Área Norte Rio de Janeiro CER – Iteração 1.

Gerador	E_a''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
1	0,839	2,782	64,3483	-84,2779	0,924
2	0,839	2,782	64,3483	-84,2779	0,924
3	0,839	2,782	64,3483	-84,2779	0,924
4	0,839	2,782	64,3483	-84,2779	0,924
5	0,839	2,782	64,3483	-84,2779	0,924

Tabela IV.33 – Área Norte Rio de Janeiro CER – Reatores de Linha – Iteração 1.

Circuito	De	Para	Valor (MVar)	Valor (MVar)
	104	106	136,0	0,0

Neste caso o CER desenvolveu uma potência reativa de 31,28 MVar. Nos cenários de recomposição mostrados na Figura IV.28 e na Figura IV.29 o CER atingiu o limite inferior de geração de reativos no valor de -60 MVar, como forma de absorção dos reativos da rede. Como resultado final, após as simulações dos cenários de recomposição, tem-se os resultados mostrados nas Tabelas IV.34, IV.35 e IV.36.

Tabela IV.34 – Área Norte Rio de Janeiro CER – Final.

Barra	Tensão (pu)	Reator (MVar)	PLmax (MW)	QLmax (MW)
20	0,924	0,0	-	-
46	1,001	0,0	-	-
100	0,952	0,0	-	-
101	0,992	0,0	-	-
102	0,994	0,0	-	-
104	0,976	136,0	-	-
106	0,943	136,0	-	-
140	0,952	0,0	-	-
147	0,928	0,0	-	-
175	0,901	0,0	154,503	50,832
1503	0,988	0,0	-	-
3966	0,947	0,0	-	-

Tabela IV.35 – Geração Área Norte Rio de Janeiro CER – Final.

Gerador	Ea''	δ	P_{Gen}	Q_{Gen}	V_{ref}
1	0,878	1,325	31,8107	-48,1849	0,928
2	0,878	1,325	31,8107	-48,1849	0,928
3	0,878	1,325	31,8107	-48,1849	0,928
4	0,878	1,325	31,8107	-48,1849	0,928
5	0,878	1,325	31,8107	-48,1849	0,928

Tabela IV.36 – Área Norte Rio de Janeiro CER – Reatores de Linha – Final.

Circuito	De	Para	Valor (MVar)	Valor (MVar)
2	100	101	0,0	73,4
4	102	1503	136,0	0,0
6	104	106	0,0	136,0
10	3966	147	0,0	60,0

A potência reativa fornecida elo CER foi de 56,35 MVar.

O processo de tomada de carga e alocação de reatores, ajuste da tensão de referência e alocação de potência reativa fictícia é mostrado nas Figuras IV.30, IV.31 e IV.32.

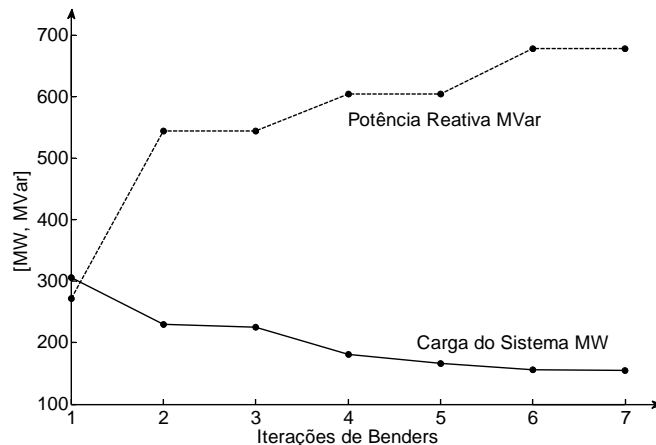


Figura IV.30 – Área Norte Rio de Janeiro CER – Tomada de Carga e Alocação de Reatores.

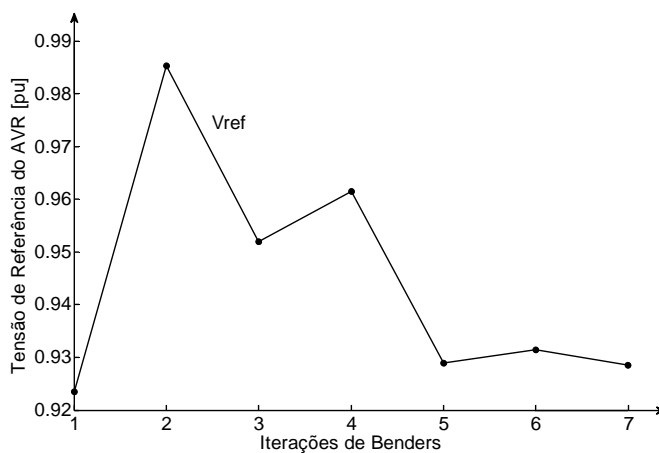


Figura IV.31 – Área Norte Rio de Janeiro CER – Tensão de referência do AVR.

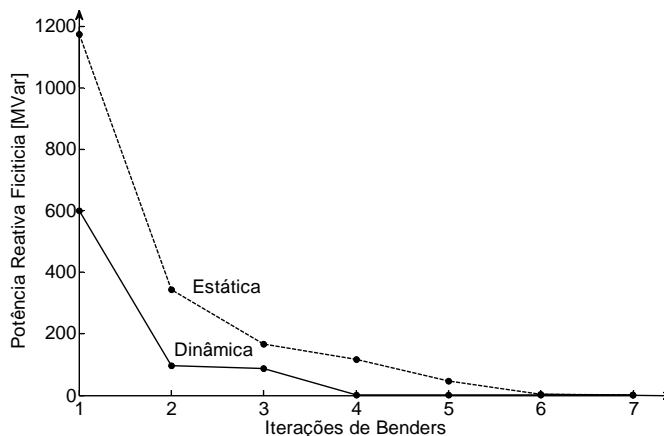


Figura IV.32 – Área Norte Rio de Janeiro CER – Alocação de Potência Reativa Fictícia.

Nota-se que a utilização do CER, permitiu maiores níveis de carregamento ao sistema, não alterando o suporte de potência reativa fornecida pelos reatores, se comparado ao caso sem CER da seção IV.6. Isto ocorre porque o CER fornece potência reativa necessária para melhorar

os níveis de tensão do sistema, e com tensões mais elevadas, é possível um maior montante de carga tomada.

O CER foi capaz de absorver, dentro de suas limitações, a potência reativa gerada pelo corredor em vazio. Na prática, a absorção destes reativos, reduziria as sobretensões no sistema. Além disto, com o CER o algoritmo proposto apresentou convergência em menor número de iterações.

Concluindo, acredita-se que o CER possa se tornar uma importante opção de suporte de potência reativa no processo de recomposição fluente, e poderia ser adotado nas práticas estabelecidas pelo ONS.

IV.8 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos da aplicação da metodologia proposta a ramos reais utilizados na recomposição do sistema elétrico brasileiro. O objetivo foi mostrar o funcionamento da metodologia proposta para determinação da configuração mínima de reatores conectados ao sistema durante a recomposição fluente.

Foram ajustados também a tensão de geração para estabelecimento de uma rota viável de recomposição fluente. A tensão de geração é ajustada através do ajuste do AVR. Além disto, foi determinado o montante de carga que pode ser suprida nesta fase, obedecendo a critérios de tensão mínima.

As metodologias atualmente existentes, não permitem o ajuste da tensão de geração de forma automática. Em estudos de recomposição, este variável é mantida fixa no valor mínimo durante todo o processo. Isto pode não ser adequado, pois certamente limitará a tomada de carga.

A definição da máxima carga é feita em processos de tentativa e erro, requerendo várias simulações computacionais. Com a metodologia proposta foi possível a obtenção direta do montante máximo de carga, com um reduzido número de simulações, respeitando os limites de tensão admitidos na recomposição fluente. O montante foi determinado considerando-se a configuração mínima de reatores. Na ferramenta proposta, os cenários de recomposição foram considerados em um único problema de otimização, buscando eliminar o processo de tentativa e erro de representação destes cenários, atualmente feita nos estudos de recomposição fluente.

A ferramenta proposta neste trabalho teve como objetivo auxiliar os estudos de recomposição fluente determinando, de forma clara, a configuração de rede com um número reduzido de simulações computacionais, eliminando o processo de tentativa e erro tradicionalmente aplicado nestes estudos.

Adicionalmente foram mostrados os potenciais de utilização do Compensador Síncrono e do Compensador Estático de Reativos nesta fase, aumentando o montante de carga tomada permitido na recomposição fluente. No entanto, a presença destes elementos não alterou o número de reatores conectados ao sistema. Apesar do ONS não considerar estes elementos diretamente na fase fluente, as aplicações destes dispositivos mostraram o benefício da utilização dos mesmos. O suporte de potência reativa fornecida por estes equipamentos possibilitaria um melhor controle de tensão do corredor a vazio, e aumentaria o montante de carga restabelecida.

Capítulo V

Conclusões e Desenvolvimentos

Futuros

V.1 Considerações Finais

Este trabalho apresentou uma metodologia para a alocação ótima de reatores no sistema de transmissão durante a fase fluente de recomposição, baseada em fluxo de potência ótimo e decomposição matemática de Benders. A conexão destes reatores ao sistema é realizada para a eliminação das sobretensões decorrentes da energização de linhas de transmissão a vazio.

Os diversos cenários de recomposição foram tratados como subproblemas, analisados sob o aspecto estático e dinâmico, com a modelagem da curva de capacidade e do AVR no problema.

Além da configuração ótima de reatores, a metodologia proposta também foi capaz de determinar a tensão ótima de referência de geração para iniciar os procedimentos de recomposição e ainda o montante máximo de carga que pode ser conectada ao corredor.

A configuração de rede obtida pela metodologia proposta em termos de tensão de geração, reatores conectados e carga tomada pode ser transformada em um conjunto de instruções operativas ou procedimentos de rede, a serem adotados para a recomposição fluente de uma área geoeletrica.

Finalizando, espera-se que a ferramenta proposta possa auxiliar os operadores no complicado processo de recomposição, definindo de forma automática a localização dos reatores para

viabilização do corredor, e fornecendo também o montante de carga que pode ser seguramente tomada.

V.2 Propostas de Desenvolvimentos Futuros

Apresenta-se a seguir algumas sugestões para serem desenvolvidas em trabalhos futuros visando dar continuidade a esta dissertação:

- Definição do número mínimo de unidades geradoras para iniciar o processo de recomposição. Neste trabalho utilizou-se sempre $n-1$ unidades geradoras, conforme critérios do ONS. Entretanto, pode ser considerado um número mínimo de unidades geradoras definidas por critérios de auto-excitação.
- Ajuste otimizado de taps de transformadores. Na prática, os taps são comutados para uma posição que cause menos sobretensões no sistema durante a energização. O ajuste otimizado destes taps melhoraria tanto a tomada de carga quanto as sobretensões.
- Tomadas de carga para viabilização do corredor. Estas tomadas de cargas podem ser necessárias quando ocorre indisponibilidade de algum reator do corredor preferencial de recomposição.
- Avaliação de desempenho de frequência do sistema. Neste trabalho não foi considerado nenhum fenômeno de desempenho de frequência do sistema, mas durante o processo de tomada de carga, este desempenho deve ser verificado.

Apêndice A

Formulação do Problema

A.1 Considerações Iniciais

Neste apêndice é mostrada a formulação do problema de recomposição fluente, proposta neste trabalho, como um único problema de otimização.

A.2 Formulação Proposta

O problema de recomposição fluente pode ser modelado em um único problema de otimização onde o objetivo é a maximização da carga e minimização dos reatores conectados.

$$\text{Max } \alpha_i + \text{Min } \sum_{i \in \Omega_{rb}} QA_i + \sum_{i \in \Omega_{tl}} QA_{ij} \quad (\text{A})$$

sa

$$PG_i^{(-)} - (1 + \alpha_i)PL_i^{(-)} - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}^{(-)} = 0 \quad (\text{A.1})$$

$$QG_i^{(-)} - (1 + \alpha_i)QL_i^{(-)} - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}^{(-)} - QA_i = 0 \quad (\text{A.2})$$

$$PG^{(-)}X_d''X_q'' - EV_t \text{sen}(\delta - \theta^{(-)})X_q'' - 0,5V_t^2(X_d'' - X_q'')\text{sen}2(\delta - \theta^{(-)}) = 0 \quad (\text{A.3})$$

$$QG^{(-)}X_d''X_q'' - EV_t \cos(\delta - \theta^{(-)})X_q'' + 0,5V_t^2(X_d'' + X_q'') - 0,5V_t^2(X_d'' - X_q'')\cos2(\delta - \theta^{(-)}) = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$V \min_i^{(-)} \leq V_i \leq V \max_i^{(-)} \quad (\text{A.5})$$

$$\alpha \geq 0 \quad (\text{A.6})$$

$$PG_i^{(+n)} - (1 + \alpha_i)PL_i^{(+n)} - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}^{(+n)} = 0 \quad (\text{A.7})$$

$$QG_i^{(+n)} - (1 + \alpha_i)QL_i^{(+n)} - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}^{(+n)} - QA_i = 0 \quad (\text{A.8})$$

$$PG^{(+)}X_dX_q - EV_t^{(+)} \text{sen}(\delta - \theta^{(+)})X_q - 0,5(V_t^{(+)})^2(X_d - X_q)\text{sen}2(\delta - \theta^{(+)}) = 0 \quad (\text{A.9})$$

$$QG^{(+)}X_dX_q - EV_t^{(+)} \cos(\delta - \theta^{(+)})X_q + 0,5(V_t^{(+)})^2(X_d + X_q) - 0,5(V_t^{(+)})^2(X_d - X_q)\cos2(\delta - \theta^{(+)}) = 0 \quad (\text{A.10})$$

$$V \min_i^{(+)} \leq V_i \leq V \max_i^{(+)} \quad (\text{A.11})$$

$$PG_i^{(rp)n} - (1 + \alpha_i)PL_i^{(rp)n} - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}^{(rp)} = 0 \quad (\text{A.12})$$

$$QG_i^{(rp)n} - (1 + \alpha_i)QL_i^{(rp)n} - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}^{(rp)n} - QA_i = 0 \quad (\text{A.13})$$

$$PG^{(rp)}X_dX_q - E^{(rp)}V_t \text{sen}(\delta^{(rp)} - \theta^{(rp)})X_q - 0,5V_t^2(X_d - X_q)\text{sen}2(\delta^{(rp)} - \theta^{(rp)}) = 0 \quad (\text{A.14})$$

$$QG^{(rp)}X_dX_q - E^{(rp)}V_t \cos(\delta^{(rp)} - \theta^{(rp)})X_q + 0,5V_t^2(X_d + X_q) - 0,5V_t^2(X_d - X_q)\cos2(\delta^{(rp)} - \theta^{(rp)}) = 0 \quad (\text{A.15})$$

$$V \min_i^{(rp)} \leq V_i \leq V \max_i^{(rp)} \quad (\text{A.16})$$

Onde:

$PG_i^{(-)}, PG_i^{(+)}, PG_i^{(rp)}$	Potência ativa gerada na barra i , antes da rejeição, no instante da rejeição no cenário n , em regime permanente de rejeição no cenário n .
$QG_i^{(-)}, QG_i^{(+)}, QG_i^{(rp)}$	Potência reativa gerada na barra i , antes da rejeição, no instante da rejeição no cenário n , em regime permanente de rejeição no cenário n .
$PL_i^{(-)}, PL_i^{(+)}, PL_i^{(rp)}$	Carga ativa na barra i , antes da rejeição, no instante da rejeição no cenário n , em regime permanente de rejeição no cenário n .
$QL_i^{(-)}, QL_i^{(+)}, QL_i^{(rp)}$	Carga reativa na barra i , antes da rejeição, no instante da rejeição no cenário n , em regime permanente de rejeição no cenário n .
$E, E^{(rp)}$	Tensão interna do gerador, tensão interna em regime permanente.
$V_t, V_t^{(+)}$	Tensão terminal do gerador, tensão terminal no instante da rejeição de carga.
$V \min_i^{(-)}, V \max_i^{(-)}$	Limites de tensão no regime permanente antes da rejeição.
$V \min_i^{(+)}, V \max_i^{(+)}$	Limites de tensão no instante da rejeição.
$V \min_i^{(rp)}, V \max_i^{(rp)}$	Limites de tensão no regime permanente depois da rejeição.
$\theta_i^{(-)}, \theta_i^{(+)}, \theta_i^{(rp)}$	Ângulos das tensões em antes da rejeição, no instante da rejeição e no regime permanente após a rejeição.
α_i	Carregamento na barra i , onde se deseja suprir a máxima carga.
$P_{ij}^{(-)}, P_{ij}^{(+)}, P_{ij}^{(rp)}$	Fluxo de potência ativa no ramo $i-j$, antes da rejeição de carga, no instante da rejeição e no regime permanente após a rejeição.
$Q_{ij}^{(-)}, Q_{ij}^{(+)}, Q_{ij}^{(rp)}$	Fluxo de potência reativa no ramo $i-j$, antes da rejeição de carga, no instante da rejeição e no regime permanente após a rejeição. Estes termos englobam o termo QA_{ij} referente aos reatores de linha.
Ω_i	Conjunto de barras adjacentes à barra i .
Ω_{rb}	Conjunto de barras candidatas à alocação de reatores.
Ω_{rl}	Conjunto de linhas candidatas à alocação de reatores.

Apêndice B

Modelagem de Máquinas Síncronas

B.1 Considerações Iniciais

Este apêndice mostra o modelo de máquina síncrona utilizado no trabalho. São apresentadas as equações internas bem como os limites da curva de capacidade.

B.2 Modelo Fonte de Tensão Atrás da Reatância

A dedução das equações de potência ativa e reativa é feita considerando o diagrama fasorial de operação da máquina síncrona (Monticelli *et alii*, 2000), mostrado na Figura B.1. Este diagrama refere-se à máquina de pólos salientes e considera como referência o ângulo da tensão terminal V_t .

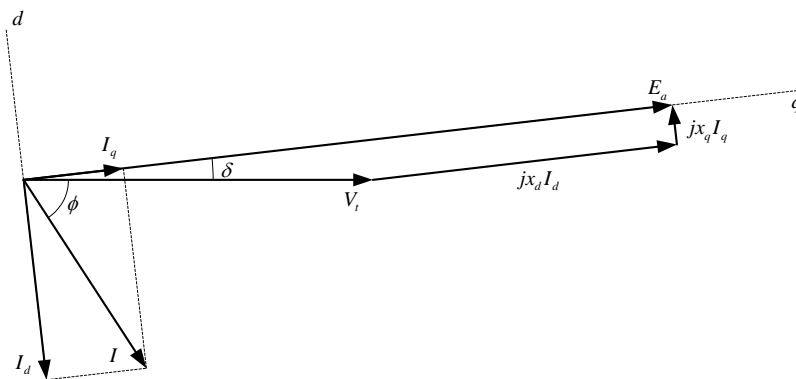


Figura B.1 – Diagrama Fasorial da Máquina Síncrona.

A partir do diagrama fasorial, retiram-se as seguintes identidades:

$$V_t \text{ sen } \delta = X_q I \cos(\varphi + \delta) \quad (\text{B.1})$$

$$Ea - V_t \cos \delta = X_d I \cos(\varphi + \delta) \quad (\text{B.2})$$

Multiplicando-se (B.1) e (B.2) por V_t , tem-se:

$$V_t^2 \text{ sen } \delta = X_q I V_t \cos(\varphi + \delta) \quad (\text{B.3})$$

$$Ea V_t - V_t^2 \cos \delta = X_d I V_t \cos(\varphi + \delta) \quad (\text{B.4})$$

Donde resulta:

$$X_q^{-1} V_t^2 \text{ sen } \delta = I V_t (\cos \delta \cos \varphi - \text{sen } \delta \text{ sen } \varphi) \quad (\text{B.5})$$

$$X_d^{-1} (Ea V_t - V_t^2 \cos \delta) = I V_t (\text{sen } \delta \cos \varphi + \text{sen } \varphi \cos \delta) \quad (\text{B.6})$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} X_q^{-1} V_t^2 \text{ sen } \delta \\ X_d^{-1} (Ea V_t - V_t^2 \cos \delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\text{sen } \delta \\ \text{sen } \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I V_t \cos \varphi \\ I V_t \text{ sen } \varphi \end{bmatrix} \quad (\text{B.7})$$

Os termos $I V_t \cos \varphi$ e $I V_t \text{ sen } \varphi$ são respectivamente as potências ativa PG e reativa QG nos terminais da máquina. Assim:

$$\begin{bmatrix} \cos \delta & -\text{sen } \delta \\ \text{sen } \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PG \\ QG \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_q^{-1} V_t^2 \text{ sen } \delta \\ X_d^{-1} (Ea V_t - V_t^2 \cos \delta) \end{bmatrix} \quad (\text{B.8})$$

Resolvendo-se para PG e QG , tem-se:

$$\begin{bmatrix} PG \\ QG \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \text{sen } \delta \\ -\text{sen } \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_q^{-1} V_t^2 \text{ sen } \delta \\ X_d^{-1} (Ea V_t - V_t^2 \cos \delta) \end{bmatrix} \quad (\text{B.9})$$

Explicitando os termos PG e QG :

$$PG = \frac{V_t^2}{X_q} \text{ sen } \delta \cos \delta + \frac{Ea V_t}{X_d} \text{ sen } \delta - \frac{V_t^2}{X_d} \text{ sen } \delta \cos \delta \quad (\text{B.10})$$

$$QG = -\frac{V_t^2}{X_q} \text{ sen}^2 \delta + \frac{Ea V_t}{X_d} \cos \delta - \frac{V_t^2}{X_d} \cos^2 \delta \quad (\text{B.11})$$

$$QG = \frac{Ea V_t}{X_d} \cos \delta - V_t^2 \left(\frac{\cos^2 \delta}{X_d} + \frac{\text{sen}^2 \delta}{X_q} \right) \quad (\text{B.12})$$

Após manipulações, chega-se a:

$$PG = \frac{EaV_t}{X_d} \text{sen } \delta + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen } 2\delta \quad (\text{B.13})$$

$$QG = \frac{EaV_t}{X_d} \text{cos } \delta - \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{cos } 2\delta \quad (\text{B.14})$$

Admitindo-se que a tensão terminal V_t tenha ângulo de fase θ , chega-se a:

$$PG = \frac{EaV_t}{X_d} \text{sen}(\delta - \theta) + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen } 2(\delta - \theta) \quad (\text{B.15})$$

$$QG = \frac{EaV_t}{X_d} \text{cos}(\delta - \theta) - \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{cos } 2(\delta - \theta) \quad (\text{B.16})$$

B.3 Curva de Capabilidade

A curva de capabilidade é a região de operação da máquina, sendo composta por cinco limites. Três destes limites são obtidos das equações de potência ativa e reativa mostradas na seção anterior. A seguir são deduzidas as equações representativas destes limites.

B.3.1 Limite de Corrente de Armadura

Este limite corresponde a um limite térmico dos enrolamentos da armadura, sendo determinado pela máxima corrente que pode suportar este enrolamento. No plano PG-QG, da curva de capabilidade, corresponde a uma circunferência com centro na origem e raio $V_t I_{a_{\max}}$. A expressão (B.17) descreve esta restrição.

$$PG^2 + QG^2 \leq (V_t I_{a_{\max}})^2 \quad (\text{B.17})$$

A Figura B.2 mostra este limite no plano PG-QG onde $|S|$ é a potência aparente da máquina e φ é o fator de potência.

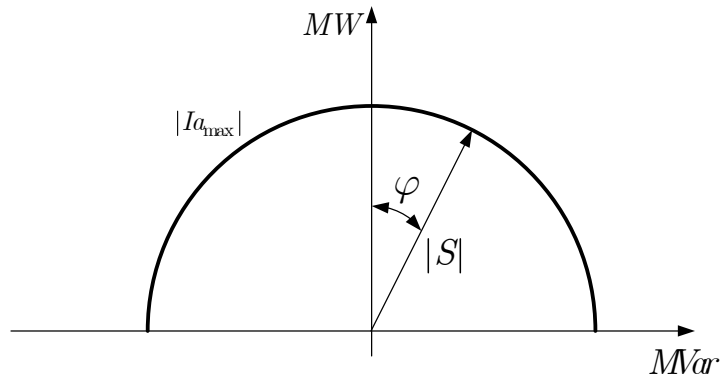


Figura B.2 – Limite de Corrente de Armadura.

B.3.2 Limite da Máquina Primária

Esta é uma limitação determina a quantidade de potência ativa o gerador pode receber da máquina primária. Este limite é imposto como uma reta paralela ao eixo QG no plano PG-QG, passando pelo ponto de potência mecânica máxima $Pmec_{max}$. Desta forma, tem-se a restrição (B.18).

$$PG \leq Pmec_{max} \quad (B.18)$$

A Figura B.3 mostra este limite no plano PG-QG.

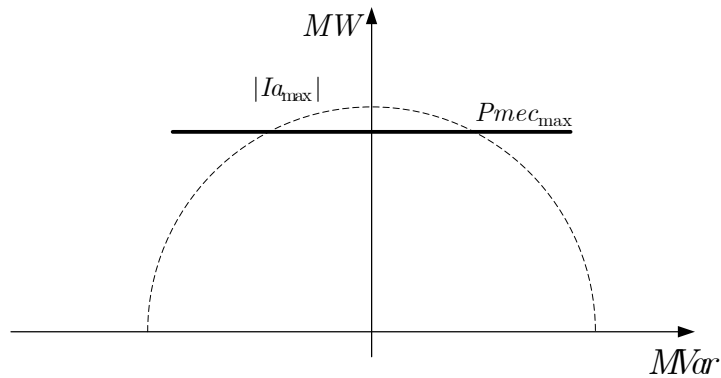


Figura B.3 – Limite da Máquina Primária.

B.3.3 Limite de Excitação Máxima

Assim como o enrolamento da armadura, o enrolamento de campo também possui um limite térmico, definido pela máxima corrente de campo que o enrolamento suporta. Esta limitação é descrita em função da tensão interna máxima Ea_{max} , sendo deduzido a partir das equações (B.15) e (B.16). Desta forma, elevando-se (B.15) ao quadrado obtém-se:

$$\begin{aligned}
 PG^2 &= \left[\frac{EaV_t}{X_d} \text{sen}(\delta - \theta) + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen} 2(\delta - \theta) \right]^2 \\
 PG^2 &= \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 \text{sen}^2(\delta - \theta) + 2 \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right) \text{sen}(\delta - \theta) \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen} 2(\delta - \theta) + \dots \\
 &\dots + \left[\frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen} 2(\delta - \theta) \right]^2 \\
 PG^2 &= \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 \text{sen}^2(\delta - \theta) + 2 \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right) \text{sen}(\delta - \theta) \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) 2 \text{sen}(\delta - \theta) \cos(\delta - \theta) + \dots \\
 &\dots + \left[\frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 (2 \text{sen}(\delta - \theta) \cos(\delta - \theta))^2 \\
 PG^2 &= \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 \text{sen}^2(\delta - \theta) + 2 \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right) V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) (1 - \cos^2(\delta - \theta)) \cos(\delta - \theta) + \dots \\
 &\dots + \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 (1 - \cos^2(\delta - \theta)) \cos^2(\delta - \theta) \\
 PG^2 &= \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 \text{sen}^2(\delta - \theta) + \dots \\
 &\dots + 2 \frac{V_t^3 Ea}{X_d} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) - 2 \frac{V_t^3 Ea}{X_d} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos^3(\delta - \theta) + \dots \\
 &\dots + \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \cos^2(\delta - \theta) - \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \cos^4(\delta - \theta)
 \end{aligned} \tag{B.19}$$

Elevando-se (B.12) ao quadrado obtém-se:

$$\begin{aligned}
 QG^2 &= \left[\frac{V_t Ea}{X_d} \cos(\delta - \theta) - V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) \right]^2 \\
 QG^2 &= \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 \cos^2(\delta - \theta) - 2 \frac{V_t Ea}{X_d} \cos(\delta - \theta) V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) + \dots \\
 &\dots + \left[V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) \right]^2
 \end{aligned} \tag{B.20}$$

A potência aparente S em termos de PG e QG é obtida somando as equações (B.19) e (B.20).

$$\begin{aligned}
 PG^2 + QG^2 = & \\
 & \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 \text{sen}^2(\delta - \theta) + 2 \frac{V_t^3 Ea}{X_d} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) - 2 \frac{V_t^3 Ea}{X_d} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos^3(\delta - \theta) + \dots \\
 & \dots + \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \cos^2(\delta - \theta) - \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \cos^4(\delta - \theta) + \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 \cos^2(\delta - \theta) - \dots \\
 & \dots - 2 \frac{V_t Ea}{X_d} \cos(\delta - \theta) V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) + \left[V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) \right]^2
 \end{aligned}$$

Rearranjando os termos da expressão, tem-se:

$$\begin{aligned}
 PG^2 + QG^2 = & \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 \text{sen}^2(\delta - \theta) + \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 \cos^2(\delta - \theta) + \dots \\
 & \dots + 2 \frac{V_t^3 Ea}{X_d} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) + \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \cos^2(\delta - \theta) - \dots \\
 & \dots - 2 \frac{V_t^3 Ea}{X_d} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos^3(\delta - \theta) - \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \cos^4(\delta - \theta) - \dots \\
 & \dots - 2 \frac{V_t Ea}{X_d} \cos(\delta - \theta) V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) + \left[V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) \right]^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 PG^2 + QG^2 = & \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 (\text{sen}^2(\delta - \theta) + \cos^2(\delta - \theta)) + \dots \\
 & \dots + 2 \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right) V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) + \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \cos^2(\delta - \theta) - \dots \\
 & \dots - 2 \frac{V_t^3 Ea}{X_d} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos^3(\delta - \theta) - \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \cos^4(\delta - \theta) - \dots \\
 & \dots - 2 \frac{V_t Ea}{X_d} \cos(\delta - \theta) V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) + \left[V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) \right]^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 PG^2 + QG^2 = & \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 + 2 \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right) \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right] + \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right]^2 - \dots \\
 & \dots - 2 \frac{V_t^3 Ea}{X_d} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos^3(\delta - \theta) - \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \cos^4(\delta - \theta) - \dots \\
 & \dots - 2 \frac{V_t Ea}{X_d} \cos(\delta - \theta) V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) + \left[V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) \right]^2
 \end{aligned}$$

Agrupando os três primeiros termos do segundo membro da expressão:

$$\begin{aligned}
 PG^2 + QG^2 = & \left[\frac{V_t Ea}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right]^2 - \dots \\
 & \dots - 2 \frac{V_t^3 Ea}{X_d} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos^3(\delta - \theta) - \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \cos^4(\delta - \theta) - \dots \\
 & \dots - 2 \frac{V_t Ea}{X_d} \cos(\delta - \theta) V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) + \left[V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) \right]^2
 \end{aligned}$$

Substituindo na expressão anterior as seguintes identidades trigonométricas:

$$\cos^3(\delta - \theta) = \cos^2(\delta - \theta)\cos(\delta - \theta)$$

$$\cos^4(\delta - \theta) = \cos^2(\delta - \theta)\cos^2(\delta - \theta)$$

Tem-se:

$$\begin{aligned} PG^2 + QG^2 &= \left[\frac{V_t Ea}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right]^2 - \dots \\ &\dots - 2 \frac{V_t^3 Ea}{X_d} \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_q} - \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) - \left[V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_q} - \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) \right]^2 - \dots \\ &\dots - 2 \frac{V_t^3 Ea}{X_d} \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) \cos(\delta - \theta) + \left[V_t^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) \right]^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PG^2 + QG^2 &= \left[\frac{V_t Ea}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right]^2 - \dots \\ &\dots - 2 \frac{V_t^3 Ea}{X_d} \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_q} - \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) \cos(\delta - \theta) - \dots \\ &\dots - \left[\left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) - \left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) \right]^2 + \left[\left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) + \left(V_t^2 \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) \right]^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PG^2 + QG^2 &= \\ &\left[\frac{V_t Ea}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right]^2 - 2 \frac{V_t^3 Ea}{X_d} \left(\frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_q} + \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) \cos(\delta - \theta) - \dots \\ &\dots - \left[\left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_q} \right)^2 - 2 \left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) \left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) + \left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right)^2 \right] + \dots \\ &\dots + \left[\left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right)^2 + 2 \left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) \left(V_t^2 \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) + \left(V_t^2 \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PG^2 + QG^2 &= \left[\frac{V_t Ea}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right]^2 - 2 \frac{V_t^3 Ea}{X_d} \frac{1}{X_q} \cos(\delta - \theta) - \dots \\ &\dots - \left[\left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_q} \right)^2 - 2 \left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) \left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_q} + V_t^2 \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) - \left(V_t^2 \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PG^2 + QG^2 &= \left[\frac{V_t Ea}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right]^2 - 2 \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \cos(\delta - \theta) \right) \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right) - \dots \\ &\dots - \left[\left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_q} \right)^2 - 2 \left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right) - \left(V_t^2 \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

$$PG^2 + QG^2 = \left[\frac{V_t Ea}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right]^2 - 2 \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \cos(\delta - \theta) \right) \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right) - \dots$$

$$\dots - \left[\left(\frac{V_t^2}{X_q} - V_t^2 \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right)^2 - 2 \left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right) - \left(V_t^2 \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right)^2 \right]$$

$$PG^2 + QG^2 = \left[\frac{V_t Ea}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right]^2 - 2 \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \cos(\delta - \theta) \right) \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right) - \dots$$

$$\dots - \left[\left(\frac{V_t^2}{X_q} \right)^2 - 2 \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right) \left(V_t^2 \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right) + \left(V_t^2 \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right)^2 - \dots \right]$$

$$\dots - 2 \left(V_t^2 \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right) - \left(V_t^2 \frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} \right)^2 \right]$$

$$PG^2 + QG^2 = \left[\frac{V_t Ea}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right]^2 - 2 \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \cdot \cos(\delta - \theta) \right) \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right) - \dots$$

$$\dots - \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right)^2 + 2 \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right) V_t^2 \left(\frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} + \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right)$$

$$PG^2 + QG^2 = \left[\frac{V_t Ea}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right]^2 - \dots$$

$$\dots - 2 \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right) \left[\left(\frac{V_t Ea}{X_d} \cos(\delta - \theta) \right) - V_t^2 \left(\frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} + \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) \right] - \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right)^2$$

$$PG^2 + QG^2 + 2 \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right) \left[\frac{V_t Ea}{X_d} \cos(\delta - \theta) - V_t^2 \left(\frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} + \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) \right] + \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right)^2 =$$

$$\left[\frac{V_t Ea}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right]^2$$

O termo $\frac{V_t Ea}{X_d} \cos(\delta - \theta) - V_t^2 \left(\frac{\text{sen}^2(\delta - \theta)}{X_q} + \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right)$ corresponde à potência reativa

gerada conforme (B.12), e desta forma tem-se:

$$PG^2 + QG^2 + 2 \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right) QG + \left(\frac{V_t^2}{X_q} \right)^2 = \left[\frac{V_t Ea}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right]^2$$

Finalmente chega-se a:

$$PG^2 + \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)^2 = \left[\frac{V_t Ea}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(\delta - \theta) \right]^2 \quad (\text{B.21})$$

A equação (B.21) descreve um círculo no plano PG-QG com centro em $\left(0, -\frac{V_t^2}{X_q}\right)$ e raio $\frac{V_t E_a}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cos(\delta - \theta)$. Esta equação é apropriada para descrever as limitações impostas pela corrente de campo, e será também utilizada no equacionamento do limite de estabilidade conforme será mostrado em item subsequente. Conforme exposto no início desta seção, a potência reativa gerada em função da máxima corrente de campo é expressa como uma limitação da tensão interna máxima $E_{a_{\max}}$ e desta forma tem-se:

$$PG^2 + \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 \leq \left[\frac{V_t E_{a_{\max}}}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cos(\delta - \theta)\right]^2 \quad (\text{B.22})$$

O sinal de desigualdade limita a operação da máquina ao interior da circunferência descrita. A Figura B.4 mostra este limite no plano PG-QG, onde o termo φ_{lim} corresponde ao fator de potência de transição entre o limite de corrente de armadura e o limite de excitação máxima. Neste caso a máquina opera em condições nominais tanto para o enrolamento de armadura quanto para o enrolamento de campo (Monticelli *et alii*, 2000).

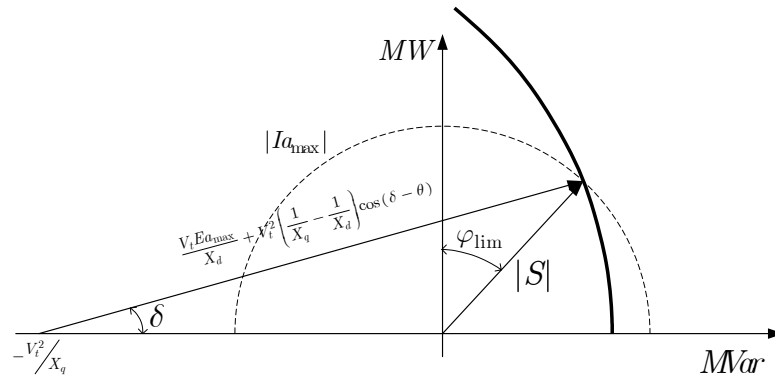


Figura B.4 – Limite de Excitação Máxima.

B.3.4 Limite de Excitação Mínima

O limite de excitação mínima corresponde ao lugar geométrico de operação em uma corrente mínima de campo. A curva característica desta limitação é um círculo concêntrico com o círculo de limite máximo de corrente de campo, sendo neste caso a corrente mínima caracterizada pela tensão interna mínima admissível $E_{a_{\min}}$.

$$PG^2 + \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 \geq \left[\frac{V_t E_{a_{\min}}}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cos(\delta - \theta)\right]^2 \quad (\text{B.23})$$

O sinal de desigualdade indica que o ponto de operação deve ser externo à circunferência limite de mínima corrente de campo. A Figura B.5 mostra o limite de excitação mínima no plano PG-QG.

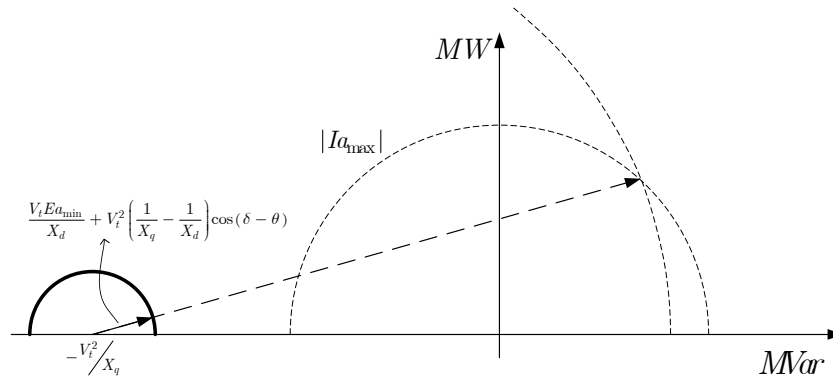


Figura B.5 – Limite de Excitação Mínima.

B.3.5 Limite de Estabilidade Estática

O limite de estabilidade estática é definido como a máxima potência ativa que pode ser gerada em função do ângulo interno δ . Na Figura B.6 está mostrada a curva de potência ativa para vários níveis de excitação e em cada curva é destacada com o símbolo “•” a potência ativa máxima. Verifica-se que para cada nível de excitação, a potência máxima ocorre para um valor do ângulo interno δ , não sendo este ângulo máximo fixo como na máquina de pólos lisos. Neste caso o limite angular é assintótico ao valor $\pi/2$. Deseja-se então equacionar esta curva $PG_{\max} \times \delta$ que descreva a limitação de estabilidade estática.

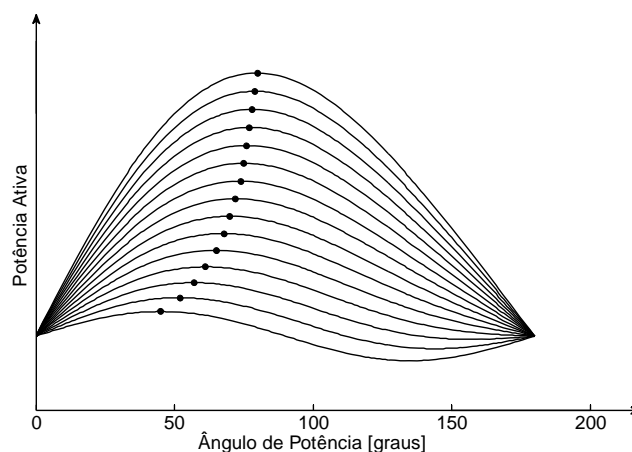


Figura B.6 – Limite de Estabilidade Estática – Pólos Salientes.

Na Figura B.6 o limite de estabilidade é dado em função do ângulo interno δ , entretanto, como a curva de capacidade é estabelecida em um plano PG-QG, o limite de estabilidade estáti-

ca deve ser expresso em termos destas variáveis. Desta forma, busca-se uma expressão para o valor máximo de PG em função da potência reativa QG . Para o equacionamento desse limite, é necessário então obter uma expressão que relacione o ângulo δ com a potência reativa gerada QG . Da equação (B.11), tem-se:

$$\begin{aligned}
 QG &= \frac{EaV_t}{X_d} \cos(\delta - \theta) - \frac{V_t^2}{X_d} \cos^2(\delta - \theta) - \frac{V_t^2}{X_q} \sin^2(\delta - \theta) \\
 QG &= \frac{EaV_t}{X_d} \cos(\delta - \theta) - \frac{V_t^2}{X_d} \cos^2(\delta - \theta) - \frac{V_t^2}{X_q} (1 - \cos^2(\delta - \theta)) \\
 QG &= \frac{EaV_t}{X_d} \cos(\delta - \theta) - \frac{V_t^2}{X_d} \cos^2(\delta - \theta) + \frac{V_t^2}{X_q} \cos^2(\delta - \theta) - \frac{V_t^2}{X_q} \\
 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos^2(\delta - \theta) + \frac{V_t Ea}{X_d} \cos(\delta - \theta) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) &= 0 \tag{B.24}
 \end{aligned}$$

A expressão (B.24) é uma equação de segundo grau na variável $\cos(\delta - \theta)$. Desta forma, têm-se como raízes os valores dados por (B.25).

$$\cos(\delta - \theta) = \frac{-\left(\frac{V_t Ea}{X_d}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{V_t Ea}{X_d}\right)^2 + 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)}}{2V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)} \tag{B.25}$$

Na expressão (B.25), considera-se somente o sinal positivo, que corresponde a uma diferença angular $\delta - \theta$ também positiva, representando a operação como gerador. Substituindo $\cos(\delta - \theta)$ encontrado em (B.25) na equação (B.21), tem-se:

$$\begin{aligned}
 PG^2 + \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 &= \left[\frac{V_t Ea}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \frac{-\left(\frac{V_t Ea}{X_d}\right) + \sqrt{\left(\frac{V_t Ea}{X_d}\right)^2 + 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)}}{2V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)} \right]^2 \\
 PG^2 + \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 &= \left[\frac{V_t Ea}{X_d} + \frac{1}{2} \left[-\left(\frac{V_t Ea}{X_d}\right) + \sqrt{\left(\frac{V_t Ea}{X_d}\right)^2 + 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)} \right] \right]^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 PG^2 + \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)^2 &= \\
 \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 + 2 \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right) \frac{1}{2} \left[- \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right) + \sqrt{\left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 + 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)} \right] + \dots \\
 \dots + \frac{1}{4} \left[- \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right) + \sqrt{\left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 + 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)} \right]^2 \\
 PG^2 &= - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)^2 + \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 - \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 + \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right) \sqrt{\left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 + 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)} + \dots \\
 \dots + \frac{1}{4} \left[\left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 - 2 \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right) \sqrt{\left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 + 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)} + \dots \right. \\
 \dots + \left. \left[\sqrt{\left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 + 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)} \right]^2 \right] \\
 PG^2 &= - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)^2 + \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right) \sqrt{\left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 + 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)} + \frac{1}{4} \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 - \dots \\
 \dots - \frac{1}{2} \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right) \sqrt{\left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 + 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)} + \frac{1}{4} \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) \\
 PG^2 &= - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) + \dots \\
 \dots + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^4 + \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)} \tag{B.26}
 \end{aligned}$$

Tem-se pela expressão (B.26) a potência ativa gerada, em função da potência reativa, sem a representação do ângulo δ . A máxima potência ativa que pode ser entregue pela máquina, em função da potência reativa gerada QG ocorre quando $\frac{dPG^2}{dQG} = 0$. Desta forma, tem-se:

$$\begin{aligned}
 \frac{dPG^2}{dQG} &= \\
 -2 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) + \frac{1}{2} \frac{\left[\left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]}{\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^4 + \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)}} &= 0 \\
 \frac{1}{2} \frac{\left[\left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]}{\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^4 + \left(\frac{V_t Ea}{X_d} \right)^2 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)}} &= \left[2 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]
 \end{aligned}$$

Elevando-se ao quadrado a expressão anterior:

$$\frac{1}{4} \frac{\left[\left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^2 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2}{\left[\frac{1}{4} \left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^4 + \left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^2 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) \right]} = \left[2 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \quad (\text{B.27})$$

$$\frac{1}{4} \frac{\left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^2 \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2}{\left[2 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2} = \left[\frac{1}{4} \left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^2 + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) \right]$$

$$\left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^2 \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 = \left[\left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^2 + 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) \right] \left[2 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^2 \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 &= \left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^2 \left[2 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 + \dots \\ &\dots + 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) \left[2 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^2 \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 - \left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^2 \left[2 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 &= \\ 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) \left[2 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^2 \left[\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 - \left[2 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \right] &= \\ 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) \left[2 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^2 \left[\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 - 4 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right)^2 + 4 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) - \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \right] &= \\ 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) \left[2 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^2 \left[4 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) \right] \right] &= \\ 4V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) \left[2 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \end{aligned}$$

$$\left(\frac{V_t E a}{X_d} \right)^2 \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) \right] = V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left[2 \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q} \right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2$$

$$\left(\frac{V_t Ea}{X_d}\right)^2 = \frac{V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \left[2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2}{\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]} \quad (\text{B.28})$$

Da expressão (B.27) retira-se também a identidade (B.29):

$$\left[\frac{1}{4}\left(\frac{V_t Ea}{X_d}\right)^4 + \left(\frac{V_t Ea}{X_d}\right)^2 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right] = \frac{1}{4} \frac{\left[\left(\frac{V_t Ea}{X_d}\right)^2 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2}{\left[2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2} \quad (\text{B.29})$$

Substituindo (B.29) em (B.26), tem-se:

$$\begin{aligned} PG^2 &= -\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{V_t Ea}{X_d}\right)^2 + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) + \dots \\ &\dots + \sqrt{\frac{1}{4} \frac{\left[\left(\frac{V_t Ea}{X_d}\right)^2 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2}{\left[2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2}} \end{aligned} \quad (\text{B.30})$$

$$\begin{aligned} PG^2 &= -\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{V_t Ea}{X_d}\right)^2 + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) + \dots \\ &\dots + \frac{1}{2} \frac{\left[\left(\frac{V_t Ea}{X_d}\right)^2 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]}{\left[2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]} \end{aligned} \quad (\text{B.31})$$

Substituindo (B.28) em (B.31), tem-se:

$$\begin{aligned} PG^2 &= -\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \left[2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2}{\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]} \right] + \dots \\ &\dots + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) + \frac{1}{2} \frac{\left[\frac{V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \left[2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2}{\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]} \right] \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \right]}{\left[2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 PG^2 &= -\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 + \frac{1}{2} \frac{V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \left[2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2}{\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]} + \dots \\
 &\dots + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) + \frac{1}{2} \frac{\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2 \left[2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]}{\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]} \\
 PG^2 &= \frac{-\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 \left[2\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]\right]}{2\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]} + \dots \\
 &\dots + \frac{V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \left[2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2}{2\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]} + \dots \\
 &\dots + \frac{V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) \left[2\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]\right]}{2\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]} + \dots \\
 &\dots + \frac{\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2 \left[2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) - V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]}{2\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]} \\
 PG^2 &= \frac{-2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) + 2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^3 + 4\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)}{2\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]} + \dots \\
 &\dots + \frac{-4\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2 + \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^3 + 2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2}{2\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]} + \dots \\
 &\dots + \frac{-2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) + 2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right) \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2 - \left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^3}{2\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]}
 \end{aligned}$$

Simplificando, chega-se a:

$$PG^2 = \frac{2\left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^3}{2\left[V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) - \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)\right]}$$

E finalmente em:

$$PG^2 = -\frac{\left(QG + \frac{V^2}{X_q}\right)^3}{\left(QG + \frac{V^2}{X_d}\right)} \quad (\text{B.32})$$

A expressão (B.32) descreve a curva limite de potência ativa máxima em função da potência reativa, adequada para representação do limite de estabilidade do plano PG-QG. Observa-se que na expressão (B.32), fazendo $X_q = X_d$, obtém-se a uma reta paralela ao eixo PG, passando pelo ponto $QG = -\frac{V_t^2}{X_d}$, que corresponde exatamente ao limite teórico de estabilidade estática para uma máquina de pólos lisos. No caso da máquina de pólos salientes, este limite é assintótico ao valor $-\frac{V_t^2}{X_d}$. A Figura B.7 mostra este limite no plano PG-QG.

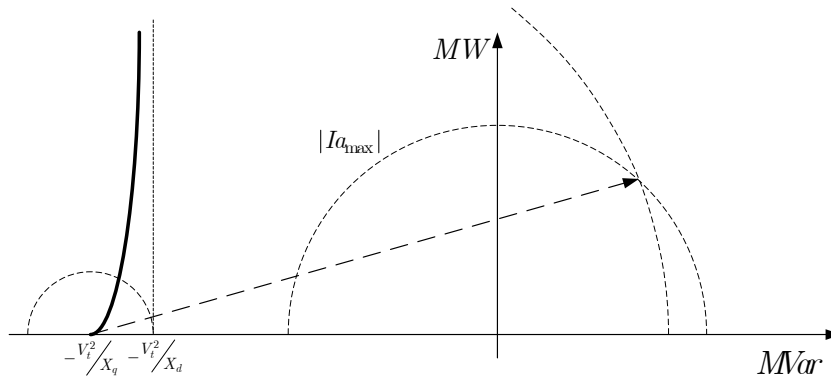


Figura B.7 – Limite de Estabilidade Estática.

Apêndice C

Dados dos Sistemas Elétricos

C.1 Considerações Iniciais

Neste apêndice encontram-se os dados dos sistemas utilizados neste trabalho. Os dados encontram-se em uma base de 100 MVA. Todos os sistemas foram simulados partindo-se do *Flat Start*, ou seja tensões iguais a 1,00 pu, ângulos de fase, e potência gerada iguais a zero. Os limites de reativos são calculados em função da curva de capacidade, conforme seção III.4.2.

C.2 Área Ilha Solteira

Tabela C.1 – Dados de Circuito – Área Ilha Solteira.

Circuito	De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (MVar)	Tap	Cap. (MVA)
1	538	501	0,00	0,39	0,00	1,000	3400,0
2	538	559	0,48	5,97	384,96	0,000	1524,0
3	559	593	0,38	4,70	303,36	0,000	1524,0
4	594	593	0,00	0,72	0,00	1,000	750,0
5	449	594	0,04	0,41	7,15	0,000	896,0
6	78	449	0,07	0,66	12,845	0,000	1076,0
7	78	464	0,10	0,95	17,073	0,000	1076,0
8	464	466	0,01	0,15	4,127	0,000	1195,0
9	466	467	0,00	5,64	0,00	1,000	400,0

Os geradores têm capacidade de 181,0 MW, com reatâncias $X_d = 87,0$, $X_q = 69,0$, $X_d'' = 15,0$, $X_q'' = 12,0$ na base de 170,0 MVA. O regulador de tensão modelado conforme a se-

ção III.4.3, possui o ganho estático Ka igual a 200. Os limites de reativos são dados com base na curva de capacidade.

C.3 Área Jupiá

Tabela C.2 – Dados de Circuito – Área Jupiá.

Circuito	De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (MVar)	Tap	Cap. (MVA)
1	539	502	0,00	0,80	0,00	1,000	1344,0
2	539	561	0,39	4,96	319,72	0,000	1524,0
3	561	584	0,30	3,76	242,06	0,000	1524,0
4	590	584	0,00	0,75	0,00	1,000	750,0
5	410	590	0,30	2,20	7,897	0,000	383,0
6	410	423	0,20	1,10	3,550	0,000	478,0
7	423	425	0,08	0,44	1,420	0,000	478,0
8	425	427	0,04	0,82	76,695	0,000	470,0
9	427	428	0,00	7,72	0,00	1,000	250,0

Os geradores têm capacidade de 110,8 MW, com reatâncias $X_d = 91,0$, $X_q = 57,0$, $X_d'' = 15,0$, $X_q'' = 11,0$ na base de 112,0 MVA. O regulador de tensão modelado conforme a seção III.4.3, possui o ganho estático Ka igual a 200. Os limites de reativos são dados com base na curva de capacidade.

C.4 Área Rio de Janeiro

Tabela C.3 – Dados de Circuito – Área Rio de Janeiro.

Circuito	De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (MVar)	Tap	Cap. (MVA)
1	38	179	0,00	2,72	0,0	1,000	200,0
2	100	20	0,00	1,05	0,0	1,000	1520,0
3	100	101	0,17	2,70	230,2	0,000	1665,0
4	101	102	0,16	246	208,5	0,000	1665,0
5	102	1503	0,11	1,91	161,9	0,000	1665,0
6	104	1503	0,05	0,82	69,4	0,000	1665,0
7	104	109	0,15	2,39	202,7	0,000	2460,0
8	107	109	0,03	0,68	73,8	0,000	2428,0
9	107	179	0,00	2,29	0,0	1,000	600,0
10	178	179	0,00	-0,08	0,0	1,000	600,0

Os geradores têm capacidade de 186,0 MW, com reatâncias $X_d = 87,0$, $X_q = 69,0$, $X_d'' = 18,0$, $X_q'' = 12,0$ na base de 200 MVA. O regulador de tensão modelado conforme a seção III.4.3, possui o ganho estático Ka igual a 200. Os limites de reativos são dados com base na

curva de capacidade. O compensador síncrono da barra 38 tem reatâncias $X_d = 70,0$, $X_q = 58,0$, $X_d'' = 18,0$, $X_q'' = 12,0$.

C.5 Área Norte Rio de Janeiro

Tabela C.4 – Dados de Circuito – Área Norte Rio de Janeiro.

Circuito	De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (MVar)	Tap	Cap. (MVA)
1	100	20	0,00	1,05	0,0	1,000	1520,0
2	100	101	0,17	2,70	230,2	0,000	1665,0
3	101	102	0,16	2,46	208,5	0,000	1665,0
4	102	1503	0,11	1,91	161,85	0,000	1665,0
5	104	1503	0,05	0,82	69,36	0,000	1665,0
6	104	106	0,15	2,39	203,1	0,000	2460,0
7	106	141	0,00	2,67	0,0	1,000	560,0
8	140	141	0,00	-0,29	0,0	1,000	560,0
9	3966	140	0,49	5,46	93,37	0,000	766,0
10	3966	147	0,26	2,86	48,47	0,000	766,0
11	46	147	0,00	13,05	0,00	1,000	0,0
12	147	148	0,00	4,42	0,00	1,000	225,0
13	175	148	0,00	-0,2	0,00	1,000	225,0

Os geradores têm capacidade de 186,0 MW, com reatâncias $X_d = 87,0$, $X_q = 69,0$, $X_d'' = 18,0$, $X_q'' = 12,0$ na base de 200 MVA. O regulador de tensão modelado conforme a seção III.4.3, possui o ganho estático K_a igual a 200. Os limites de reativos são dados com base na curva de capacidade.

Referencias Bibliográficas

- ADIBI, M. M., ALEXANDER, R. W., AVRAMOVIC, B., “Overvoltage Control During Restoration”, IEEE Transactions on Power System, vol.7, no. 4, November 1992, pp. 1464 – 1469.
- ADIBI, M. M., ALEXANDER, R. W., MILANICZ, D. P. “Energizing High and Extra-High Voltage Lines During Restoration” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, Issue: 3, August 1999, pp. 1121 – 1126.
- ADIBI, M. M., BORKOSKI, J. N., KAFKA, R. “Analytical Tool Requirements for Power System Restoration”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 3, August 1994, pp. 1582 – 1591.
- ADIBI, M. M., KAFKA, R. J., “Power System Restoration Issues” In: Computer Applications in Power, IEEE, vol. 4, Issue: 2, April 1991, pp. 19 – 24.
- ADIBI, M. M., *Power System Restoration - Methodologies and Implementation*, IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.
- ALMEIDA, P. C., Prada R. B., *Esquemas de Proteção de Sistemas de Energia Elétrica*. 1ª ed. Rio de Janeiro: EPUB, 2005, vol. 1.
- ALVES, F. R. M., “Aplicação de Buscas Heurísticas ao Problema de Determinação de Rotas de Recomposição Fluente” Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- ALVES, F. R. M., FALCÃO, D. M., GUARINI, A. P., HENRIQUES, R. M., PASSOS Fº, J. A., “Recomposição Fluente de Sistemas Elétricos de Potência – Uma Abordagem Via Grafos e Buscas Heurísticas”, XIX SNPTEE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Outubro de 2007.

- AMBRIZ-PEREZ, H., ACHA, E., FUERTE-ESQUIVEL, C. R., “Advanced SVC Models for Newton-Raphson Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, Issue: 1, February 2000, pp. 129 – 136.
- BENDERS, J. F., “Partitioning Procedure for Solving Mixed Variables Programming Problems”, Numerische Mathematik, pp. 238 – 252, 1962.
- BRETAS, N. G., MARTINS, A. C. P., ALBERTO, L. F. C. GUEDES, R. B. L., “Static Simulation of Voltage Collapse Considering The Operational Limits of The Generators” Power Engineering Society General Meeting, 13-17 July 2003, vol. 4, pp. 2652 – 2658.
- CHENG, G. H., XU, Z. “A Method for Sustained Overvoltage Control during Power System Restoration”. In: PSCE2004 2004 Power Systems Conference & Expo, 2004, New York, vol. 1, pp. 473 – 477.
- D’Ajuz, A., Fonseca, C. S., Carvalho, F. M. S., Filho, J. A., Dias, L. E. N., Pereira, M. P., Esmeraldo, P. C. V., Vaisman, R., Frontin, S. O. “*Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão*”, FURNAS, EDUFF, Rio de Janeiro 1987, pp. 42 – 47.
- ELGERD, O. L. “*Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica*”, Mc Graw-Hill do Brasil, 1976, pp. 530.
- GOMES, P., CHIPPI, H. J., ORDACGI F^o, J. M., SARDINHA, S. L. A. “Brazilian Defense Plan Against Extreme Contingencies”, Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, CIGRE/IEEE PES International Symposium 2003, 8-10 October 2003.
- GOMES, P., DE LIMA, A. C. S., GUARINI, A. P. “Guidelines for Power System Restoration in the Brazilian System”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, Issue: 2, May 2004, pp. 1159 – 1164.
- GOMES, P., GUARINI, A. P., LIMA, A. C. S, GUARINI, M. C. “Otimização do Processo de Recomposição Para o Sistema Interligado Nacional”, In: Anais do XVII SNPTEE, Uberlândia, MG, Brasil, Outubro 2003.
- GOMES, P., GUARINI, A. P., DE LIMA, A. C. S., ROCHA, M. S., “Guidelines for Power System Restoration in the Brazilian System”, Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE Vol. 2, 27 – 31 January 2002, pp. 1299 – 1304.
- GRANVILLE, S., “Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Method”, IEEE Power Engineering Society, n. 93, February 1993.

- GRANVILLE, S., LIMA, M. C. A, “Application of Decomposition Techniques to Var Planning: Methodological & Computational Aspects”, IEEE/PES, no. 94, February 1994.
- HU, Y., MCLAREN, P. G., GOLE, A. M., FEDIRCHUK, D. J., CASTRO, A., “Self-Excitation Operating Constraint For Generators Connected to DC Lines” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, n. 3, August 1999, pp. 1003 – 1009.
- HUANG, J. A., AUDETTE, L., HARRISON, S. “A Systematic Method for Power System Restoration Planning” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, n. 2, May 1995, pp. 869 – 875.
- HUANG, J. A., GALIANA, F. D., VUONG, G. T. “Power System Restoration Incorporating Interactive Graphics and Optimization”, Power Industry Computer Application Conference, 7-10 May 1991, pp. 216 – 222.
- HUATUCO, D. Z. N, “Fluxo de Potência Ótimo com Restrições da Curva de Capabilidade do Gerador Síncrono” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Maranhão - UFMA, MA, Brasil, 2006.
- IEEE Power Engineering Society. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std. 421.5 – 1992.
- 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, February 1995, pp. 229 – 240.
- KETABI, A., ASMAR, H., RANJBAR, A. M., FEUILLET, R. “An Approach for Optimal Units Start-up during Bulk Power System Restoration”, LESCOPE Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, 11 – 13 July 2001, pp. 190 – 194.
- KETABI, A., RANJBAR, A. M., FEUILLET, R. “A New Method for Dynamically Calculation of Load Steps during Power System Restoration”, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, vol. 1, Issue , 2000, pp. 158 – 162.
- KETABI, A., RANJBAR, A. M., FEUILLET, R. “Analysis and Control of Temporary Overvoltages for Automated Restoration Planning” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 4, October 2002, pp. 1121 - 1127.
- KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill, 1994.

- LOF, P-A., ANDERSON, G., HILL, D. J., “Voltage Dependent Reactive Power Limits for Voltage Stability Studies”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, n. 1, February 1995, pp. 220 – 228.
- MACHADO Jr, Z. S., TARANTO, G. N., FALCÃO, D. M. “An Optimal Power Flow Formulation Including Detailed Modeling of Generators”, Proceedings of the PSCE 2004, New York, USA, October 2004.
- MARTINS, N., OLIVEIRA, E. J., MOREIRA, W. C., PEREIRA, J. L. R., FONTOURA, R. M., “Redispatch to Reduce Rotor Shaft Impacts upon Transmission Loop Closure”. In: General Meeting 2008 PES, 2008, Pittsburgh. 2008. v. 1. pp. 1-8.
- MARTINS, N., OLIVEIRA, E. J., PEREIRA, J. L. R., FERREIRA, L. C. A., “Reducing Standing Phase Angles via Interior Point Optimum Power Flow for Improved System Restoration”. In: PSCE2004 2004 Power Systems Conference & Expo, 2004, New York, v. 1. pp. 1 – 6.
- MELLO, F. P., LEUZINGER, L. M., MILLS, R. J., “Load Rejection Overvoltages Affected by Excitation System Control” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, no. 2, March/April 1975, pp. 280 – 287.
- MONTICELLI, A., GARCIA, A., *Introdução a Sistemas de Energia Elétrica*, Editora da Unicamp, 2000.
- NILSSON, N. E., MERCURIO, J., “Synchronous Generator Capability Curve Testing and Evaluation” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 1, January 1994, pp. 414 – 424.
- OLIVEIRA, E. J., FONTOURA, R. M., MARTINS, N., PEREIRA, J. L. R., OLIVEIRA, L. W. “Inclusão de Restrições Dinâmicas no Problema de Planejamento de Potência Reativa” Sba Controle & Automação, Mar. 2008, vol. 19, no. 1, pp. 53 – 62. ISSN 0103-1759.
- OLIVEIRA, E. J., MARTINS, N., PEREIRA, J. L. R., SILVA, E. D., FERREIRA, L. C. A. “Análise de Fechamento de Anel Via Fluxo de Potência Ótimo e Estabilidade Dinâmica”. In: Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, 2004, Rio de Janeiro. IX SEPOPE, 2004. vol. 1, pp. 1 – 6.
- OLIVEIRA, E. J., PEREIRA, J. L. R., RIANI, L. M., MARCATO, A. L. M., OLIVEIRA, L. W. “Series Compensation Device Allocation under Contingency Constraints”, IEEE Power Tech Conference Proceedings, 23-26 June 2003, Bologna, Italy, vol. 4.

- OLIVEIRA, L. W., “Ajuste Ótimo e Coordenado dos Parâmetros do Compensador Estático de Reativos” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil, 2005.
- ONS, Procedimentos de Rede, Submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos, Julho, 2001.
- PASSOS F^o, J. A., “Modelagem e Incorporação de Dispositivos de Controle no Problema de Fluxo de Potência” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil, 2000.
- PENANTE, A. C. A. V., FRAGA, F. N., NETO, P. M. P., SILVA, R. L. “Recomposição de um sistema elétrico com gerenciamento da tomada de carga nas instalações”. In: Anais do XVII SNPTEE, Campinas, SP, Brasil, Outubro 2001.
- ROMAN, C., ROSEHART, W. “Optimal Power Flow Based Loadability Assessment with Detailed Complementarity Model for Synchronous Generators”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 1, June 2005, pp. 563 – 570.
- SANTOS, J. V. C. “Métodos Analíticos Para Auxílio à Restauração Após Blecautes de Sistemas de Energia Elétrica”. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1998.
- SANTOS, J. V. C., GARCIA, A. V. “Um Método Auxiliar de Restauração de Sistemas de Potência” Sba Controle & Automação, Jan., Fev. e Mar. 2004, vol. 15 no.1.
- SFORNA, M., and BERTANZA, V. C. “Restoration Testing and Training in Italian ISO” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 4, November 2002, pp. 1258 – 1264.
- WRIGHT, S. J. *Primal-Dual Interior Point Methods*, Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 1997.
- WU, F. F., MONTICELLI, A. J., “Analytical Tools for Power System Restoration – Conceptual Design” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, Issue: 1, February 1988, pp. 10 – 26.
- YUNHAI, Z., YONG, M. “Optimal Algorithm for System Reconstruction”. In: Proceedings of International Conference on Power System Technology, 13 – 17 October 2002, vol. 1, pp. 201 – 203.