

Universidade Federal de Juiz de Fora
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Mestrado em Engenharia Elétrica

Wesley Peres

**CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DE RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DE SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Juiz de Fora
2012

Wesley Peres

Contribuições ao Estudo de Recomposição Fluente de Sistemas Elétricos de Potência

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, área de concentração: Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

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

Juiz de Fora

2012

Peres, Wesley.

Contribuições ao estudo de recomposição fluente de sistemas elétricos de potência / Wesley Peres. – 2012.

142 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

1. Sistemas elétricos de potência. I. Título.

CDU 621.3.02

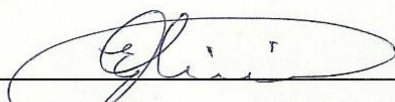
Wesley Peres

Contribuições ao Estudo de Recomposição Fluente de Sistemas Elétricos de Potência

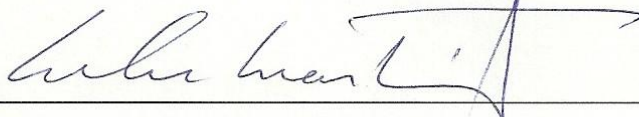
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Sistemas de Energia, da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 05 de Março de 2012.

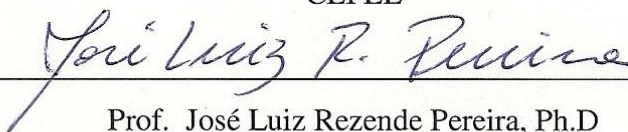
BANCA EXAMINADORA



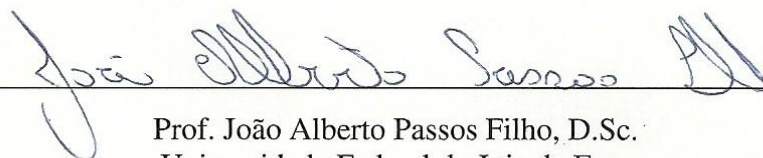
Prof. Edimar José de Oliveira, D.Sc. (Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora




Dr. Nelson Martins, Ph.D.
CEPEL



Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. João Alberto Passos Filho, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

*Dedico este trabalho à minha
família.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me permitir a realização deste trabalho.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais Antonio Dalamura Peres e Rute Moreira Peres, pelo incentivo e apoio durante toda a minha vida. Ao meu irmão Warleson Peres pelo exemplo e apoio.

Aos amigos de graduação e de mestrado, pelo companheirismo, incentivo, discussões técnicas e sugestões durante todo este período, em especial: Israel Lopes, Isabela Miranda, Fernando Nogueira, Accacio Ferreira e Wellington Carlos.

Ao professor Edimar José de Oliveira pela orientação e pelas inúmeras oportunidades oferecidas.

Aos professores João Alberto Passos Filho e Marcelo Aroca Tomim pelas diversas contribuições e sugestões dadas desde a época da minha graduação na UFJF.

Ao Dr. Nelson Martins e aos professores José Luiz Rezende Pereira e Leonardo Willer de Oliveira pelas contribuições dadas ao trabalho e pela participação na banca. Ao Engenheiro Eduardo Viana pela disponibilidade em responder aos emails com as dúvidas no início do trabalho.

Ao professor Vander Menengoy da Costa pelo tempo da Iniciação Científica e pelos conhecimentos passados, que muito contribuíram para a realização do presente trabalho. Ao professor Paulo Augusto Garcia pela oportunidade do estágio de docência no curso de graduação.

Aos professores e pesquisadores do PPEE/UFJF pelos conhecimentos passados, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desde trabalho.

Ao LABSPOT (Laboratório de Sistemas de Potência do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica), pelo suporte técnico.

Ao CNPQ, ao INERGE, à FAPEMIG e ao CEPTEL.

*Aprendi que ninguém é digno do
pódio senão usar suas derrotas
para alcançá-lo.*

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

CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DE RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Wesley Peres

Março de 2012

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

Programa: Engenharia Elétrica.

Este trabalho apresenta uma metodologia baseada em Fluxo de Potência Ótimo (FPO) e Análise de Sensibilidade para a definição da configuração mínima de rede necessária para garantir, com segurança, o processo de recomposição fluente de corredores radiais de transmissão. Nos instantes iniciais de recomposição, devido à baixa capacidade de geração que o sistema se encontra, uma estratégia importante consiste em elevar a Capacidade de Curto Circuito das barras. Neste sentido, a metodologia proposta baseia-se na incorporação, na função objetivo do FPO, da maximização da potência de curto circuito das barras. Para tanto, uma Análise de Sensibilidade é realizada a cada iteração do processo iterativo para determinar os fatores de ponderação de alocação associados à impedância equivalente permitindo a inclusão no FPO da maximização da potência de curto circuito das barras.

Na metodologia proposta os reatores que mais reduzirem a impedância receberão menores fatores de ponderação de alocação. Adicionalmente, o FPO contempla a modelagem das máquinas síncronas, curva de capacidade e o estudo de cada cenário de recomposição em regime permanente, pré e pós rejeição de carga.

O programa desenvolvido em MATLAB é utilizado para a simulação de corredores de recomposição fluente do sistema elétrico brasileiro. Os resultados obtidos apontam para uma ferramenta eficaz ao estudo de recomposição fluente.

Palavras-chave: Recomposição de Sistemas Elétricos de Potência, Fluxo de Potência Ótimo, Capacidade de Curto Circuito.

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

CONTRIBUTIONS TO STUDY OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS FLUENT RESTORATION

Wesley Peres

March 2012

Advisor: Edimar José de Oliveira, D. Sc.

Department: Electrical Engineering.

This work presents a methodology based on Optimal Power Flow (OPF) and Sensitivity Analysis to define a minimum network configuration for a power system fluent restoration taking security issues into account. At this early restoration stage, the system has low Short-Circuit Capacity due to the low generation capacity. An important strategy is to increase the Short Circuit Capacity at this operation stage through search network configurations with low bus equivalent impedance. In this work, the Short-Circuit Capacity is incorporated in the objective function of the OPF formulation by using sensitivity analysis which yields lowest allocation factors for more suitable reactors to reduce the equivalent impedances.

The proposed OPF takes into account the synchronous machine model, the capability curves and the set of overvoltage critical restoration scenarios following load rejection. The restoration scenarios are represented at steady state prior and after load rejection.

The computational tool is developed in the MATLAB platform and it is used to conduct case studies for fluent restoration branches of Brazilian Electric System. The results show that the proposed methodology is effective.

Keywords: Electrical Power Systems Restoration, Optimal Power Flow, Short Circuit Level.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	ANÁLISE DE SOBRETENSÕES NO PROCESSO DE RECOMPOSIÇÃO	4
1.2.1	Sobretensões Sustentadas	4
1.2.2	Sobretensões de Manobra.....	5
1.2.3	Harmônicas.....	6
1.3	MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	7
1.4	OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.....	7
1.5	PUBLICAÇÕES DECORRENTES DA DISSERTAÇÃO.....	8
1.6	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	10
2.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.2.1	Recomposição de Sistemas Elétricos de Potência.....	10
2.2.2	Capacidade de Curto Circuito	19
2.2.3	Impedância Equivalente de Thevenin	20
2.3	RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO	22
2.4	ESTUDOS ELÉTRICOS NA RECOMPOSIÇÃO	25
2.5	CONTROLE DE SOBRETENSÕES DURANTE A RECOMPOSIÇÃO	26
2.5.1	Sobretensões Sustentadas	26
2.5.2	Sobretensões de Manobra.....	27
2.5.3	Harmônicas.....	28
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
3	METODOLOGIA PROPOSTA.....	30
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	30
3.2	IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DE THEVENIN	30
3.2.1	Passo 1: Conexão de uma impedância entre uma nova barra p e uma barra existente k	31
3.2.2	Passo 2: Conexão de uma impedância entre uma barra k e a barra de referência.....	32
3.3	CAPACIDADE DE CURTO CIRCUITO	34

3.4	RECOMPOSIÇÃO FLUENTE.....	35
3.5	TÉCNICA DE SOLUÇÃO	38
3.6	MODELAGEM DOS COMPONENTES DA REDE	39
3.6.1	Modelagem das Máquinas Síncronas	39
3.6.2	Modelagem da Curva de Capabilidade	40
3.6.3	Modelagem dos Reatores <i>Shunt</i>	43
3.7	ÍNDICE DE SENSIBILIDADE PROPOSTO.....	44
3.8	FATOR DE PONDERAÇÃO PROPOSTO PARA A ALOCAÇÃO DOS REATORES	45
3.9	MODELAGEM DO FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO.....	46
3.9.1	Função Objetivo	46
3.9.2	Restrições de Balanço de Potência Ativa e Reativa no instante t_0^-	46
3.9.3	Restrições da Modelagem das Máquinas Síncronas no instante t_0^-	47
3.9.4	Restrições da Curva de Capabilidade no instante t_0^-	48
3.9.5	Limites Operativos da Tensão no instante t_0^-	48
3.9.6	Limites do Fator de Carregamento no instante t_0^-	49
3.9.7	Restrições de Balanço de Potência Ativa e Reativa no cenário n no instante t_0^{TP}	49
3.9.8	Restrições da Modelagem das Máquinas Síncronas no cenário n no instante t_0^{TP}	50
3.9.9	Restrições da Curva de Capabilidade no cenário n no instante t_0^{TP}	50
3.9.10	Limites Operativos da Tensão no cenário n no instante t_0^{TP}	51
3.10	FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO COMPLETO	51
3.11	ALGORITMO DE SOLUÇÃO	53
3.12	CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA PROPOSTA	55
3.13	DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS DE RECOMPOSIÇÃO.....	56
3.14	COMPARAÇÃO ENTRE A METODOLOGIA PROPOSTA E A LITERATURA	58
3.15	EXEMPLO TUTORIAL	59
3.16	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
4	ESTUDO DE CASO.....	66
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	66
4.2	ÁREA RIO DE JANEIRO	66
4.2.1	Simulação 1	68
4.2.2	Simulação 2	74

4.2.3	Simulação 3	76
4.2.4	Simulação 4	81
4.2.5	Simulação 5	82
4.2.6	Comparação entre as Simulações	85
4.3	ÁREA NORTE RIO DE JANEIRO	86
4.3.1	Simulação 1	87
4.3.2	Simulação 2	90
4.3.3	Comparação entre as simulações.....	91
4.4	ÁREA JUPIÁ	92
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	99
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	100
APÊNDICE A – METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE		102
A.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	102
A.2	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	102
A.3	SOLUÇÃO DO PROBLEMA.....	105
APÊNDICE B – DADOS DOS SISTEMAS ELÉTRICOS.....		108
B.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	108
B.2	ÁREA RIO DE JANEIRO	108
B.3	ÁREA NORTE RIO DE JANEIRO	109
B.2	ÁREA JUPIÁ.....	110
B.3	CURVA DE CAPABILIDADE.....	111
APÊNDICE C – METODOLOGIA INICIAL.....		112
C.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	112
C.2	FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO	113
C.3	CRITÉRIO DE ALOCAÇÃO DE REATORES	114
C.4	ALGORITMO	115
C.5	CONCLUSÕES	116

REFERÊNCIAS117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1– Curva Típica de Rejeição de Carga sem Auto-Excitação.....	5
Figura 2.1– Corredor para Recomposição Fluente.....	27
Figura 2.2– Esquema de Energização de Linha de Transmissão utilizando Resistores Pré-Inserção.....	28
Figura 3.1– Adição de uma nova barra 4 através da conexão da impedância Z_b na barra 2. ..	32
Figura 3.2– Adição de uma impedância Z_b entre a barra 2 e a referência.	33
Figura 3.3– Corredor de Recomposição Fluente.....	36
Figura 3.4– Cenários de Recomposição Fluente.	37
Figura 3.5–Curva de Capabilidade de Geradores Síncronos.....	41
Figura 3.6–Representação dos Reatores <i>Shunt</i>	43
Figura 3.7– Estrutura Matriz Hessiana.....	52
Figura 3.8– Fluxograma da Metodologia Proposta.	53
Figura 3.9– Sistema Genérico de Recomposição.....	57
Figura 3.10– Cenários de Recomposição Fluente.....	57
Figura 3.11– Definição dos Cenários de Recomposição Fluente.....	58
Figura 3.12– Sistema Genérico.....	59
Figura 3.13– Sistema Genérico com Barra Crítica destacada.....	61
Figura 3.14– Cenários Simulados.....	63
Figura 4.1– Área Rio de Janeiro.....	66
Figura 4.2– Cenários de Rejeição de Carga para a Área Rio de Janeiro.....	67
Figura 4.3– Valores de Impedância de Barras Antes da Conexão de Reatores (pu).....	69
Figura 4.4– Evolução da Tensão de Geração – Área Rio de Janeiro.....	75
Figura 4.5– Evolução das Impedâncias Equivalentes de Barra.....	77
Figura 4.6– Evolução do Ajuste da Tensão de Geração – Área Rio de Janeiro – Simulação 3.....	80
Figura 4.7– Comparativo entre os Valores de Impedância Equivalente da Barra 178.....	86

Figura 4.8– Área Norte Rio de Janeiro.....	86
Figura 4.9– Evolução da Impedância Equivalente:Área Norte Rio de Janeiro.	88
Figura 4.10– Área Jupiá.	92
Figura 4.11– Evolução da Impedância Equivalente:Área Jupiá.....	94
Figura A.1– Esquema de Solução por Decomposição de Benders.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Níveis de Tensão Aceitáveis em Regime Permanente para Estudo das Áreas de Recomposição.....	24
Tabela 3.1 Comparação com a Literatura.....	58
Tabela 3.2 Cálculo do Fator de Ponderação de Alocação	62
Tabela 4.1 Reatores alocados – Área Rio de Janeiro	69
Tabela 4.2 Potência Reativa Alocada pelo FPO – Área Rio de Janeiro	69
Tabela 4.3 Evolução das Impedâncias Equivalentes (pu) – Área Rio de Janeiro	70
Tabela 4.4 Evolução dos Fatores de Ponderação de Alocação – Área Rio de Janeiro.....	71
Tabela 4.5 Potência Reativa Alocada nos Reatores – Área Rio de Janeiro (MVar)	71
Tabela 4.6 Evolução da Impedância Equivalente da Barra Crítica (pu) – Área Rio de Janeiro	72
Tabela 4.7 Instante Pré-Rejeição – Área Rio de Janeiro	72
Tabela 4.8 Geração: Instante Pré-Rejeição – Área Rio de Janeiro.....	72
Tabela 4.9 Comparação dos Reatores Alocados– Área Rio de Janeiro.....	73
Tabela 4.10 Tensões nos Cenários de Rejeição – Área Rio de Janeiro.....	74
Tabela 4.11 Área Rio de Janeiro – Simulação 2.....	74
Tabela 4.12 Reatores Alocados: Área Rio de Janeiro – Simulação 2	75
Tabela 4.13 Reatores Alocados – Simulação 3 – Área Rio de Janeiro	76
Tabela 4.14 Potência Reativa Alocada pelo FPO – Simulação 3 – Área Rio de Janeiro	77
Tabela 4.15 Evolução da Impedância Equivalente da Barra Crítica (pu) – Simulação 3.....	77
Tabela 4.16 Potência Reativa Alocada nos Reatores para Área Rio de Janeiro (MVar) – Simulação 3	78
Tabela 4.17 Escolha do Reator a ser Alocado – Simulação 3	78
Tabela 4.18 Comparativo – Área Rio de Janeiro.....	79
Tabela 4.19 Instante Pré-Rejeição na Área Rio de Janeiro – Simulação 3	79
Tabela 4.20 Geração: Instante Pré-Rejeição na Área Rio de Janeiro – Simulação 3	80
Tabela 4.21 Tensões nos Cenários de Rejeição – Área Rio de Janeiro.....	81

Tabela 4.22 – Comparação entre a Impedância Equivalente da Barra 178.....	82
Tabela 4.23 – Reatores Alocados – Área Rio de Janeiro – Simulação 5	82
Tabela 4.24 – Evolução dos Índices de Sensibilidade – Área Rio de Janeiro – Simulação 5 ..	83
Tabela 4.25 – Evolução da Impedância Equivalente da Barra 178	83
Tabela 4.26 – Evolução da Potência Reativa Alocada pelo FPO – Área Rio de Janeiro – Simulação 5	84
Tabela 4.27 Tensões nos Cenários de Rejeição – Área Rio de Janeiro.....	84
Tabela 4.28 Reatores Alocados – Área Norte Rio de Janeiro	87
Tabela 4.29 Potência Reativa Alocada pelo FPO.....	87
Tabela 4.30 Evolução da Impedância Equivalente da Barra Crítica (pu)	88
Tabela 4.31 Instante Pré-Rejeição na Área Norte Rio de Janeiro	89
Tabela 4.32 Geração: Instante Pré-Rejeição na Área Norte Rio de Janeiro.....	89
Tabela 4.33 Comparação dos Reatores Alocados – Área Norte Rio de Janeiro	89
Tabela 4.34 Tensões nos Cenários de Rejeição – Área Norte Rio de Janeiro.....	90
Tabela 4.35 Área Norte Rio de Janeiro – Simulação 2	91
Tabela 4.36 Reatores Alocados: Área Norte Rio de Janeiro– Simulação 2	91
Tabela 4.37 Reatores Alocados – Área Jupia.....	93
Tabela 4.38 Potência Reativa Alocada pelo FPO– Área Jupia.....	93
Tabela 4.39 Evolução da Impedância Equivalente da Barra Crítica (pu)	94
Tabela 4.40 Instante Pré-Rejeição – Área Jupia.....	95
Tabela 4.41 Geração: Instante Pré-Rejeição – Área Jupia	95
Tabela 4.42 Tensões nos Cenários de Rejeição – Área Jupia	96
Tabela 4.43 Comparação dos Reatores Alocados – Área Jupia	96
Tabela 4.44 Comparação entre Soluções.....	97
Tabela 4.45 Comparativo entre as Impedâncias Equivalentes (pu).....	97
Tabela B.1 Dados de Circuito – Área Rio de Janeiro.....	108
Tabela B.2 Dados dos Geradores – Área Rio de Janeiro.....	109

Tabela B.3 Dados de Circuito – Área Norte Rio de Janeiro.....	109
Tabela B.4 Dados de Circuito – Área Jupiaá	110
Tabela B.5 Dados dos Geradores – Área Jupiaá	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CCC	<i>Capacidade de Curto Circuito</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
FPO	<i>Fluxo de Potência Ótimo</i>
NUPESP	<i>Núcleo de Pesquisa em Sistema de Potência</i>
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema</i>
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
SEP	<i>Sistema Elétrico de Potência</i>
SIN	<i>Sistema Interligado Nacional</i>
SPA	<i>Standing Phase Angle</i>

SIMBOLOGIA

$ V_{pf} $	Magnitude da tensão pré-falta de uma barra
$[Z_{EQ}]$	Somatório da impedância do reator e da impedância equivalente da barra de conexão do reator
$ Z_{KK}^{NOVO} $	Magnitude da Impedância atualizada de Thevenin da barra K (após a conexão do reator)
$[Z_{NOVO}]$	Nova matriz impedância de barras (após a conexão do reator <i>shunt</i>)
$[Z_{ORIG}]$	Matriz do sistema original (antes da conexão de reatores)
$[Z_P]$	Vetor linha correspondente à barra na qual foi conectado o reator
$ Z_{th} $	Magnitude da impedância equivalente de Thevenin de uma barra
ΔI_k	Variação de corrente na barra k
ΔV_k	Variação de tensão na barra k
C_{QA_i}	Fator de ponderação de alocação de reatores na barra i
α_i	Fator de carregamento na barra i
Ω_b	Conjunto de barras do sistema
Ω_{rb}	Conjunto de barras candidatas à alocação de reatores
Ω_i	Conjunto de barras adjacentes à barra i
C_{QA_N}	Fator de ponderação de alocação do reator N
$E^{(rp)n}$	Tensão interna do gerador em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição no cenário n
$PG_i^{(-)}$	Potência ativa gerada na barra i , antes da rejeição de carga (t_0^-)
$PG_i^{(rp)n}$	Potência ativa gerada na barra i , em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição no cenário n
$P_{ij}^{(-)}$	Fluxo de potência ativa no ramo $i-j$, antes da rejeição de carga (t_0^-)
$P_{ij}^{(rp)n}$	Fluxo de potência ativa no ramo $i-j$, em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição no cenário n
$Pmec_{max}$	Potência mecânica máxima fornecida pela máquina primária

$QG_i^{(-)}$	Potência reativa gerada na barra i , antes da rejeição de carga (t_0^-)
$QG_i^{(rp)n}$	Potência reativa gerada na barra i , em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição no cenário n
$Q_{ij}^{(-)}$	Fluxo de potência reativa no ramo $i-j$, antes da rejeição de carga (t_0^-)
$Q_{ij}^{(rp)n}$	Fluxo de potência ativa no ramo $i-j$, em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição no cenário n
Q_{km}	Fluxo de potência reativa da barra k para a barra m
Q_{mk}	Fluxo de potência reativa da barra m para a barra k
Q_{shb}^k	Injeção de potência reativa pelo reator <i>shunt</i> de barra na barra k
Q_{shl}^k	Injeção de potência reativa pelo reator <i>shunt</i> de linha na barra k
$S_{3\phi}$	Potência de curto circuito trifásica de uma barra
$S_{nominal}$	Potência aparente nominal da máquina síncrona
V_k	Tensão na barra k
V_t	Tensão terminal da máquina síncrona
X_d	Reatância síncrona de eixo direto
X_d''	Reatância subtransitória de eixo direto
X_q	Reatância síncrona de eixo quadratura
X_q''	Reatância subtransitória de eixo quadratura
Z_{KK}^{NOVO}	Impedância atualizada de Thevenin da barra K (após a conexão do reator)
Z_{KK}^{ORIG}	Impedância de Thevenin da barra K antes a conexão do reator
Z_{KN}	Elemento (K,N) da matriz impedância de barras antes da conexão do reator
Z_{NK}	Elemento (N,K) da matriz impedância de barras antes da conexão do reator
Z_{NN}	Impedância de Thevenin da barra N antes a conexão do reator. A barra N é a barra em que será conectado o reator
Z_b	Impedância do reator a ser conectado
Z_{th}	Impedância equivalente de Thevenin de uma barra
b_{km}	Susceptância série da linha de transmissão $k-m$
b_{km}^{sh}	Susceptância <i>shunt</i> da linha de transmissão $k-m$

b_{shb}^k	Susceptância <i>shunt</i> do reator de barra conectado na barra k
b_{shl}^k	Susceptância <i>shunt</i> do reator de linha conectado na barra k
$b_{sh}^{nominal}$	Susceptância <i>shunt</i> nominal do reator
g_{km}	Condutância série da linha de transmissão k-m
$\delta^{(rp)n}$	Ângulo interno do gerador em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição no cenário <i>n</i>
$\theta^{(-)}$	Ângulo das tensão terminal no instante (t_0^-)
$\theta^{(rp)n}$	Ângulo da tensão terminal do gerador em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição no cenário <i>n</i>
θ_{km}	Abertura angular entre as barras k e m
B_k	Barra k
K	Barra crítica
QA_i	Potência reativa alocada na barra i. Esse termo engloba a potência reativa dos reatores de linha e de barra
R_k	Reator k
t_0^-	Regime permanente pré-rejeição de carga
t_0^+	Regime dinâmico imediatamente após a rejeição de carga
t_0^{rp}	Regime permanente pós-rejeição de carga
Y_{barra}	Matriz Admitância de Barras
Z_{barra}	Matriz Impedância de Barras
Ea_{max}	Tensão interna máxima
Ea_{min}	Tensão interna mínima
Ea	Tensão interna da máquina síncrona
Ia_{max}	Máxima corrente de armadura permissível
$PL_i^{(-)}$	Carga ativa na barra <i>i</i> , antes da rejeição de carga (t_0^-)
PG	Potência ativa gerada;
$QL_i^{(-)}$	Carga reativa na barra <i>i</i> , antes da rejeição de carga (t_0^-)
QG	Potência reativa gerada;
$V \max_i^{(-)}$	Limite máximo de tensão no instante (t_0^-)
$V \max_i^{(rp)}$	Limite máximo de tensão no instante (t_0^{rp})

$V \min_i^{(-)}$	Limite mínimo de tensão no instante (t_0^-)
$V \min_i^{(rp)}$	Limite mínimo de tensão no instante (t_0^{rp})
$n_unidade$	Número de unidades geradoras conectadas em paralelo
δ	Ângulo da tensão interna da máquina síncrona
θ	Ângulo da tensão terminal da máquina síncrona

1 Introdução

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas elétricos de potência têm operado cada vez mais próximos de seus limites, seja pela falta de investimentos ou por restrições ambientais. Logo, torna-se necessário o aproveitamento de novos potenciais energéticos, muitas vezes distantes dos centros consumidores, como é o caso da Região Norte [1]. No Brasil a geração hidrelétrica é predominante e, conseqüentemente, o transporte dos grandes blocos de energia faz uso de longos corredores de transmissão e das interligações dos sistemas, aumentando seu tamanho e a complexidade da sua operação. Isso torna o sistema sujeito a maiores taxas de defeito em linhas de transmissão, aumentando os riscos de instabilidade transitória e dinâmica. Uma série de falhas pode conduzir à interrupção total ou parcial do fornecimento, também conhecida como blecaute.

As causas dos desligamentos são as mais variadas possíveis, tais como: descargas atmosféricas, temporais, queimadas, vandalismo, atuação incorreta da proteção, entre outras. Um estudo dos blecautes ocorridos nos últimos 25 anos no Brasil revelou que estes foram causados por contingências múltiplas, não consideradas na fase de planejamento [2].

Após a ocorrência de um blecaute inicia-se o processo de recomposição do sistema, cujo objetivo é atingir no menor tempo possível as condições normais de operação [3]. A recomposição dos sistemas de potência é um processo complexo que envolve inúmeras questões e requer estudos de regime permanente, transitórios eletromecânicos, transitórios eletromagnéticos [4] e desempenho da proteção [5]. Matematicamente, o problema da recomposição é não-linear, multi-estágio, envolvendo variáveis contínuas e discretas [6] e envolve a necessidade de estudos no domínio do tempo e no domínio da frequência. Considerando as diversas questões envolvidas no processo de recomposição, não foi possível o desenvolvimento de uma única metodologia que contemple todos os estudos necessários, haja vista que existem na literatura somente trabalhos focados em aspectos específicos da recomposição.

No Brasil, até a segunda metade da década de 70, os procedimentos de recomposição eram efetuados de forma centralizada pelos Centros de Operação. Estes procedimentos não eram suficientemente ágeis e o tempo para recomposição do sistema era elevado. A partir do final da década de 70, as concessionárias do setor elétrico brasileiro iniciaram os estudos no sentido de descentralizar os processos de recomposição. O processo de recomposição foi então estruturado em duas etapas: fase fluente e fase coordenada.

A recomposição coordenada corresponde ao fechamento de anéis ou paralelos das áreas já estabelecidas na recomposição fluente. Nessa fase, é muitas vezes necessário o redespacho de usinas para evitar o torque excessivo nos eixos destes geradores devido à variação instantânea de potência. Os impactos causados nas máquinas síncronas durante essa fase, são proporcionais à diferença angular nos pólos dos disjuntores utilizados no fechamento de anéis, grandeza conhecida na literatura como *Standing Phase Angle* (SPA) [7].

A fase fluente corresponde aos instantes iniciais do processo de recomposição, que corresponde à energização de corredores radiais totalmente desenergizados. Neste instante do processo, o objetivo é o atendimento de cargas prioritárias no menor tempo possível, sempre compatibilizando carga e geração. Nessa fase é de responsabilidade dos operadores tomar as decisões seguindo as Instruções Operativas (IO's), havendo mínima comunicação entre os operadores [8]. A recomposição inicia-se a partir de usinas equipadas com unidades geradoras com capacidade de auto-restabelecimento que permitem a energização de áreas sem o uso de fontes externas.¹

Durante a recomposição fluente o sistema está sujeito à ocorrência de sobretensões sustentadas à frequência fundamental, sobretensões transitórias ou de chaveamento devido ao fenômeno eletromagnético de alta frequência, com alto amortecimento e curta duração e, finalmente, fenômenos de ressonância harmônica².

As sobretensões sustentadas devem ser controladas utilizando a conexão de reatores *shunt*, ajuste da tensão de geração, ajuste de tapas de transformadores, definição do número de máquinas síncronas para absorção de potência reativa e tomadas de carga. As sobretensões

¹ As usinas com capacidade de auto-restabelecimento também são chamadas de *black-start*.

² O fenômeno de ressonância harmônica ocorre devido à saturação do núcleo durante a energização de transformadores e a interação entre indutância das fontes e capacitâncias das linhas de transmissão.

de manobra devem ser controladas através de pára-raios instalados nas extremidades das linhas de transmissão, do uso de resistores de pré-inserção nos disjuntores e controle do instante de chaveamento dos disjuntores [9].

Nos estudos de recomposição do SIN, a configuração mínima de rede é definida através de estudos de rejeição de carga em programas de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos, em um processo bastante dependente da experiência do operador [6].

Durante a recomposição, o sistema encontra-se com baixa capacidade de geração³ e uma configuração mínima de rede que implica em um nível reduzido de curto circuito ou Capacidade de Curto Circuito (CCC). A CCC está associada à força do sistema e à sua estabilidade. Portanto, é importante, durante o processo de recomposição, garantir que o sistema tenha uma CCC adequada. Maiores valores para a CCC garantem que o sistema seja mais estável [10] e que as sobretensões sejam reduzidas [11]. A CCC da rede está diretamente associada à sua configuração, sendo inversamente proporcional à impedância equivalente vista pelas barras da rede. Portanto, avaliando-se as variações nas impedâncias equivalentes é possível ter a sensibilidade da variação da CCC [12].

Na literatura técnica não existe uma metodologia que defina a configuração de rede com base no nível de curto circuito no processo de recomposição. O que existem são trabalhos que associam a CCC com a estabilidade e robustez da rede, haja vista que a ponderação do nível de curto circuito na medida da força do sistema não é fácil de ser realizada [11].

Outro aspecto importante da fase fluente está relacionado aos dispositivos de proteção, que nesta fase podem ser induzidos a operar de forma incorreta demandando maior tempo ou até mesmo comprometendo todo o processo. Este fato ocorre porque os dispositivos de proteção são ajustados para as condições normais do sistema, isto é, quando existe um nível de falta adequado para garantir a sua correta operação [13]. Entretanto, durante a recomposição tem-se uma capacidade limitada de nível de curto circuito, menor que o necessário para a correta operação dos dispositivos de proteção, exigindo uma análise mais aprofundada para o problema.

³ O número de máquinas em paralelo e em vazio deve ser reduzido devido a dificuldade de manter as máquinas a vazio em sincronismo.

A utilização de ferramentas de otimização coloca-se como uma opção atraente, pois permite o ajuste ótimo dos controles e a definição de configurações ótimas para as redes elétricas, principalmente no contexto da recomposição, onde existem inúmeras opções de configuração para a energização dos corredores. Nesse contexto, em [14] é apresentada uma metodologia para a definição da configuração mínima de rede baseada em Fluxo de Potência Ótimo, que também permite maximizar a carga suprida no fim do corredor. Com essa metodologia é possível estabelecer quais os reatores devem ser conectados para a limitação das sobretensões sustentadas durante a recomposição fluente, sem a necessidade de processos mais laboriosos.

1.2 ANÁLISE DE SOBRETENSÕES NO PROCESSO DE RECOMPOSIÇÃO

No processo de recomposição são considerados estudos de regime permanente, dinâmico e transitório. Cada estudo considera a rede em um intervalo de tempo, sendo utilizados modelos e programas computacionais específicos para o instante analisado. Considera-se três períodos distintos:

- O período transitório, no qual prevalecem os efeitos das ondas eletromagnéticas;
- O período dinâmico, que representa uma transição entre os períodos transitório e regime permanente;
- O regime permanente, no qual a tensão é periódica.

Durante a recomposição, o sistema está sujeito à sobretensões sustentadas e de manobra, além dos fenômenos harmônicos.

1.2.1 Sobretensões Sustentadas

Também chamadas de Sobretensões Temporárias, estas sobretensões são oscilatórias, de duração relativamente longa e permanecem no sistema até que este tenha a sua configuração alterada. Conforme [15], estas sobretensões possuem amplitudes menores que 1,5 pu, frequência de oscilação igual à frequência fundamental e duração superior a dezenas de segundos.

Uma das causas dessas sobretensões é a rejeição de carga, que origina sobretensões devido a Efeito Ferranti. Estas sobretensões possuem forma de onda senoidal à frequência fundamental, sendo influenciadas pelo comprimento e pelo nível de compensação das linhas de transmissão. A elevação da tensão e a máxima amplitude é função da potência reativa das linhas de transmissão e dos reguladores de tensão do geradores.

No instante da rejeição de carga, a tensão interna do gerador permanece constante. Após este período transitório, os reguladores de tensão e velocidade atuarão no sentido de restabelecer as condições normais de operação. O comportamento típico da tensão em um ponto da rede nas condições pré e pós rejeição de carga em regime permanente é mostrado na Figura 1.1. Observa-se uma descontinuidade no tempo, devido ao fato de somente a representação na frequência fundamental estar sendo usada. Caso os transitórios mais rápidos estivessem sendo modelados, essa descontinuidade não seria notada. Já para as tensões internas, essa variação não ocorre, já que os fluxos internos não mudam instantaneamente [16].

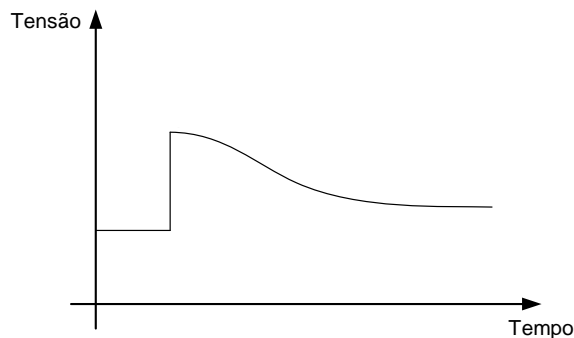


Figura 1.1– Curva Típica de Rejeição de Carga sem Auto-Excitação.

1.2.2 Sobretensões de Manobra

Também chamadas de Sobretensões de Chaveamento, essas sobretensões são um fenômeno eletromagnético e de alta frequência [15], sendo fortemente amortecidas e de curta duração. Tipicamente, a amplitude máxima dessas sobretensões é inferior à 1,4 pu e a frequência de oscilação está entre 2 kHz a 10 kHz .

A amplitude e duração das sobretensões de manobra dependem dos parâmetros do sistema, da sua configuração e das condições em que ele se encontra no momento da manobra. Dessa forma, para um mesmo sistema, a mesma operação pode resultar em valores diferentes para a sobretensão. Devido à aleatoriedade dos vários eventos (desconhecimento do instante exato de fechamento de chaves e ocorrência de faltas), é difícil prever o valor máximo da sobretensão de uma dada manobra, sendo utilizados métodos estatísticos para descrever o comportamento dessas sobretensões.

As sobretensões resultantes de manobras de energização e religamento dependem de diversos fatores associados ao sistema, sendo os mais importantes relacionados a seguir:

- Potência de curto do sistema alimentador;
- Instante de fechamento do disjuntor;
- Grau de compensação da linha de transmissão;
- Comprimento da linha de transmissão;
- Perdas no condutor;
- Presença de equipamentos de proteção;
- Grau de aterramento do sistema;
- Tensão de pré-manobra;
- Valor do resistor de pré-inserção;
- Tempo de inserção do resistor.

Uma observação deve ser feita quanto à potência de curto circuito: o fato do sistema ser forte ou fraco tem impacto no valor de sobretensões de manobra devido à energização de linhas de transmissão.

1.2.3 Harmônicas

As tensões de ressonância harmônica são sobretensões não amortecidas ou pouco amortecidas de longa duração que originam das não linearidades dos equipamentos. Resultam de muitos fatores que são característicos das redes em recomposição: ressonância entre o circuito formado pela indutância da fonte e capacitâncias da linha de transmissão e também

devido à saturação durante a energização de transformadores [17]. Durante a energização de transformadores, pode ocorrer a interação entre a indutância dos transformadores e a capacitância das linhas, gerando sobretensões elevadas [4].

1.3 MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O NUPESP (Núcleo de Pesquisa em Sistema de Potência) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPEE) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) tem desenvolvido vários trabalhos, baseados em Fluxo de Potência Ótimo – FPO, em contribuição ao estudo do processo de recomposição, propondo novas metodologias de auxílio para essa fase de operação do sistema elétrico, onde podem ser destacados:

- Em [7] é apresentada uma metodologia para o redespacho de unidades geradoras visando a reduzir os impactos nas máquinas síncronas durante o fechamento dos anéis;
- Em [18] é apresentada uma metodologia para determinar a máxima abertura angular permitida entre os pólos do disjuntor para fechamento de anel em um sistema de potência;
- Em [6] é apresentada uma metodologia para a definição da configuração de reatores e maximização da carga durante a fase fluente de recomposição.

Além disso, verificou-se que, durante o processo de recomposição, é necessário que a rede tenha uma configuração que garanta uma Capacidade de Curto Circuito adequada, fazendo que esta seja forte o suficiente para permanecer estável e para permitir a adequada operação dos dispositivos de proteção. Esta abordagem ainda está bastante incipiente na literatura tornando o tema muito fértil para pesquisa.

1.4 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação apresenta uma metodologia baseada em Fluxo de Potência Ótimo para a definição da configuração de reatores e maximização da carga para corredores radiais de recomposição fluente.

Propõe-se um índice de sensibilidade para a alocação de reatores e busca-se definir uma configuração de rede que minimize a impedância equivalente de uma determinada barra do sistema. A minimização da impedância equivalente está associada ao aumento do nível de curto circuito de uma determinada barra, o que é desejável durante o processo de recomposição. É avaliado qual o real impacto da conexão de reatores na minimização da impedância equivalente de barras do sistema.

1.5 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho de dissertação originou as seguintes publicações:

[A] W. Peres, E. J. de Oliveira, J. A. Passos Filho, N. Martins, L. W. de Oliveira, “Avaliação de Sobretensões de Manobra na Recomposição Fluente de Sistemas Elétricos” XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, SC, Outubro, 2011.

[B] W. Peres, E. J. de Oliveira, J. A. Passos Filho, N. Martins, M. A. Tomim, L. W. de Oliveira, “Ferramenta Baseada em Fluxo de Potência Ótimo para Auxílio no Processo de Recomposição de Corredores Radiais de Transmissão considerando a Avaliação da Capacidade de Curto Circuito” IX CLAGTEE – Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission , Mar Del Plata, Argentina, Novembro, 2011.

[C] W. Peres, E. J. de Oliveira, J. A. Passos Filho, I. C. da Silva Junior, M. A. Tomim, A. L. M. Marcato, “Ajuste de Sinais Adicionais Estabilizadores de Sistemas de Potência Utilizando Algoritmos Evolutivos” IX CLAGTEE – Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission , Mar Del Plata, Argentina, Novembro, 2011.

[D] W. Peres, E. J. de Oliveira, J. A. Passos Filho, M. A. Tomim, N. Martins, “Estudo do Processo de Recomposição de Sistemas Elétricos Considerando Aspectos Relacionados à Segurança”, artigo a ser apresentado no XII SEPOPE – Simpósio dos Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, Maio, 2012.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por 4 capítulos além deste capítulo introdutório e 3 apêndices.

O capítulo 2 apresenta uma revisão dos principais trabalhos publicados relacionados aos estudos de recomposição, nível de curto circuito e impedância equivalente de Thevenin. Também é apresentado neste capítulo uma revisão das diretrizes para a recomposição do SIN e dos métodos de controle de sobretensões.

O capítulo 3 apresenta a formulação, a modelagem do problema e a metodologia de solução proposta para a alocação de reatores visando à redução da impedância equivalente de barra. O capítulo apresenta também um estudo tutorial para ilustrar a metodologia proposta.

O capítulo 4 apresenta e discute alguns estudos de casos realizados com a metodologia proposta, destacando a análise de um corredor do sistema brasileiro.

Finalizando, o capítulo 5 apresenta as principais conclusões do trabalho e os desenvolvimentos futuros sugeridos.

O Apêndice A apresenta a metodologia de otimização para auxílio aos estudos de recomposição fluente proposto pelo NUPESP/UFJF.

O Apêndice B apresenta os dados dos sistemas simulados com a metodologia proposta.

O Apêndice C apresenta a metodologia básica desenvolvida no início da pesquisa.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Na literatura técnica são apresentadas diversas metodologias que visam auxiliar a tomada de decisão durante a fase fluente de recomposição dos sistemas elétricos de potência. Considerando a grande variedade de trabalhos existentes, o principal objetivo desse capítulo é apresentar uma revisão daqueles que são de interesse dessa dissertação. Neste sentido, são revisados os critérios e as diretrizes adotados pelo ONS para os estudos de recomposição e os trabalhos recentes que apresentam metodologias relacionadas à capacidade de curto circuito baseadas no valor da impedância equivalente de Thevenin.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2.1 Recomposição de Sistemas Elétricos de Potência

Em [19] são apresentados diversos aspectos associados ao processo de recomposição, entre os quais pode-se citar: balanço de potência reativa, transitórios de chaveamento, balanço entre carga e geração, tomada de carga, redução do *Standing Phase Angle* (SPA) e esquemas de isolamento de áreas com sub-frequência. Para cada tópico discutido, são apresentados os problemas encontrados e os critérios que devem ser adotados para que se tenha planos efetivos de recomposição. Os autores revisam vários planos de recomposição, alertam para a necessidade de desenvolvimento de ferramentas analíticas de auxílio ao processo, apresentam as vantagens da utilização de sistemas especialistas e a importância do treinamento dos operadores.

Em [20] são especificadas ferramentas para análise estática, transitória e dinâmica da rede durante a recomposição. Para cada tipo de análise os autores apresentam diretrizes para a modelagem da rede. Os programas de Fluxo de Potência são aplicados na análise de sobretensões sustentadas, no balanço de potência reativa e verificação da capacidade de linhas de transmissão e transformadores. Os programas de Estabilidade são utilizados na análise da frequência e da estabilidade dinâmica da rede durante o período em que está sendo restaurada.

Já os programas de Transitórios Eletromagnéticos (mais especificamente os programas EMTP) são empregados na análise das sobretensões de manobra e harmônicas durante a energização de linhas de transmissão e transformadores. O ajuste dos dispositivos de proteção é feito através dos programas de Curto Circuito, que também são utilizados para avaliar a capacidade dos disjuntores. Os autores descrevem que um mínimo nível de curto circuito (*Minimum Source*) é requerido para a operação correta dos dispositivos de proteção.

Em [21] é proposta uma metodologia para a avaliação de sobretensões sustentadas e de manobras. A modelagem aproximada permite a análise de sobretensões sem a necessidade de programas usualmente empregados, reduzindo o tempo de estudo. Um estudo comparativo entre os valores de sobretensões sustentadas e de manobra no final da linha de transmissão é feito para diversos níveis de carregamento, capacidade e número de unidades geradoras e comprimentos de linhas de transmissão. Os autores descrevem que o fator de potência da carga influencia no amortecimento das sobretensões de manobra.

Em [22] são apresentados os critérios adotados no processo de recomposição do sistema Hydro-Québec. O processo de recomposição é dividido em duas etapas. Na primeira etapa é feito o restabelecimento simultâneo de subsistemas visando o restabelecimento de cargas prioritárias (hospitais e cargas emergenciais). Durante essa etapa, ocorre a mínima comunicação entre os operadores. Após a estabilização dos subsistemas, tem-se início a segunda etapa, onde estes são sincronizados, finalizando o processo de recomposição.

Conforme [22], durante os instantes iniciais da recomposição, o sistema está sujeito à perda da estabilidade e ao colapso de tensão na ocorrência de contingências simples. Tais problemas são agravados pelo baixo nível de curto circuito nos instantes iniciais do processo. A fim de manter a estabilidade da rede após a tomada de carga, os geradores são equipados com Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP). É enfatizado que no momento da tomada de carga, os ESP acentuam as variações de tensão e frequência dentro de limites aceitáveis. O controle das sobretensões sustentadas é feito através da conexão de reatores e as sobretensões de manobra são mitigadas com o uso de disjuntores equipados com resistores de pré-inserção.

Continuando, [22] avalia que durante a energização dos transformadores, o baixo nível de curto circuito contribui na amplificação das sobretensões harmônicas. Para esse sistema, estudos têm sido feitos para viabilizar o uso da Compensação Série nos instantes iniciais da recomposição, uma vez que esta permite melhorar o perfil de tensão e reduzir o número de

operações de chaveamento. Nos casos em que o uso da Compensação Série não é viável no início do processo, esta opção é utilizada somente após a finalização da recomposição. O baixo nível de curto circuito a que o sistema está sujeito nos instantes iniciais da recomposição implica em grandes variações de tensão. Para o aumento do nível de curto circuito, são utilizados compensadores síncronos nos instantes finais do processo, diferentemente dos compensadores estáticos que permanecem desconectados. Os autores concluem afirmando a necessidade do treinamento dos operadores para a execução dos planos de recomposição.

Em [23] é apresentada uma metodologia para controle das sobretensões harmônicas oriundas da energização de transformadores baseada na impedância equivalente de barra para uma faixa de frequência de interesse (zero a dez vezes a frequência fundamental). Como opções de mitigação das sobretensões harmônicas têm-se a redução da impedância equivalente das barras para toda a faixa de frequência através da conexão de reatores, de unidades geradoras e tomada de carga. A opção mais adequada é fornecida por um índice de sensibilidade baseado na variação da impedância equivalente de barra.

Em [4] são discutidos os principais aspectos associados ao processo de recomposição do Sistema Elétrico Brasileiro. No Brasil, a recomposição é dividida em duas etapas. Na primeira etapa, denominada Fase Fluente, é realizado o restabelecimento das áreas geolétricas que possuem capacidade de auto-estabelecimento (*black-start*) visando à compatibilização entre carga e geração e ao atendimento de cargas prioritárias. Nessa etapa, tem-se a energização de corredores radiais e ocorre a mínima comunicação entre os operadores. Concluída a fase fluente, tem-se início a segunda etapa, denominada Fase Coordenada, correspondente ao fechamento de anéis ou paralelos das áreas restabelecidas na recomposição fluente.

No Brasil, de acordo com [4], para o estudo de recomposição do SIN, são efetuados estudos de fluxo de potência, de transitórios eletromecânicos e transitórios eletromagnéticos. Os estudos de fluxo de potência visam à verificação do perfil de tensão, carregamento dos equipamentos e capacidade das unidades geradoras para os diversos estágios do processo de recomposição. Os estudos de transitórios eletromecânicos são realizados para a definição do montante de carga a ser suprida, do número mínimo de unidades geradoras e número de reatores através de simulações de rejeição de carga. Os estudos de transitórios eletromecânicos também são realizados para verificação das oscilações de tensão e

frequência nas manobras durante a recomposição. Os estudos de transitórios eletromagnéticos visam analisar a viabilidade da energização dos equipamentos, bem como verificar se os esquemas de proteção e pára-raios estão operando corretamente. Os autores identificam dois problemas que podem comprometer o processo de recomposição: a operação incorreta de pára-raios e dispositivos de proteção. Concluindo, os autores apresentam um estudo do processo de recomposição da Área Rio de Janeiro.

Em [8] são apresentadas as diretrizes para a recomposição do Sistema Interligado Nacional. São definidos critérios para o estudo em regime permanente, de transitórios eletromecânicos e transitórios eletromagnéticos.

Em [24] são apresentados alguns fenômenos dinâmicos associados ao processo de recomposição, tais como: rejeição de carga, controle de frequência, controle de tensão e questões relativas ao sistema de proteção. Com o objetivo de minimizar os desvios de frequência, as cargas devem ser tomadas em incrementos, considerando que pequenos incrementos prolongam o processo e grandes incrementos podem ocasionar desvios de frequência que podem comprometer a recomposição. Durante os instantes iniciais da recomposição o sistema está sujeito a sobretensões sustentadas, de manobra (ou transitórias) e harmônicas, que devem ser controladas a fim de se evitar danos aos equipamentos. A energização de grandes corredores de transmissão possui como vantagem a redução do tempo de recomposição e como desvantagem a ocorrência de elevados níveis de sobretensão. Em geral, deve-se energizar a maior seção de linha de transmissão possível que garanta que os níveis de sobretensão estejam dentro dos limites aceitáveis.

Os autores apresentam um estudo comparativo de sobretensões para diversos comprimentos de linha e capacidade de geração e também discutem a importância de se ter um nível de curto circuito adequado (*minimum source impedance*), haja vista que caso isso não seja satisfeito, elevadas sobretensões sustentadas e de manobra estarão presentes no sistema, danificando os equipamentos. Outros tópicos também são abordados, tais como a necessidade da consideração das curvas de capacidade dos geradores, requisitos dos sistemas de proteção e a necessidade de se integrar ferramentas analíticas no planejamento e operação em tempo real com enfoque na simulação dinâmica da rede.

Em [17] são apresentadas as potencialidades da utilização de dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) no processo de recomposição. Os

dispositivos FACTS permitem o controle do fluxo de potência ativa e reativa, tensão e reatância de linhas de transmissão. Os problemas associados ao processo de recomposição que podem ser minimizados com o uso das tecnologias FACTS incluem: redução do SPA, balanço de potência reativa, energização de longas linhas de transmissão, minimização de transitórios de manobra, controle de tensão, aumento da estabilidade dinâmica, proteção de linhas de transmissão sujeitas a baixo nível de curto circuito e eliminação de assimetrias em linhas de transmissão não convencionais. Os autores enfatizam que o artigo é uma visão própria e otimista, supondo que em breve, os problemas relacionados à utilização de FACTS nos instantes iniciais do processo de recomposição sejam eventualmente resolvidos.

Em [17] também são apresentadas as aplicações de FACTS no controle de sobretensões sustentadas, transitórias e harmônicas. Uma aplicação dessa tecnologia seria a variação das impedâncias *shunt* e série das linhas de transmissão para a operação correta dos dispositivos de proteção. Apesar dos grandes benefícios da utilização de FACTS no processo de recomposição, existem várias pendências técnicas associadas à operação destes dispositivos sob condições próprias dos instantes iniciais da recomposição, tais como variação da frequência. De acordo com os autores, a aplicação deste tipo de tecnologia na recomposição é um desafio para os especialistas e um campo fértil para novos desenvolvimentos.

Em [25] é proposta uma metodologia para a avaliação da alocação de unidades geradoras *black-start* (localização e quantidade) com base no tempo total de recomposição. A utilização de unidades *black-start* no processo de recomposição permite a energização de áreas sem o uso de fontes de energia externas, sendo fundamental em todos os estágios da recomposição: estabilização do sistema, estabelecimento de caminhos de transmissão e tomada de carga. A alocação de novas unidades com capacidade de auto-estabelecimento contribui com a redução do tempo de restauração do sistema, entretanto, existe um limite a partir do qual os benefícios dessa alocação deixa de ser interessante.

O planejamento da inclusão de novas unidades é feito visando à manutenção da estabilidade do sistema, sendo validado através de simulações em programas de regime permanente e transitórios. Uma simulação passo a passo é requerida para a verificação dos limites de tensão e fluxo de potência. A metodologia proposta é dividida em três estágios para cada alocação de unidades geradoras (incluindo a localização e a capacidade de geração): determinação da sequência de partida dos geradores, busca de caminhos de transmissão e

determinação da sequência da tomada de carga. As estratégias propostas pela metodologia são quantificadas no tempo total de recomposição. Um estudo de caso utilizando o sistema IEEE 24 barras é realizado e os autores concluem traçando como desenvolvimentos futuros a utilização de ferramentas de otimização com o objetivo de estender a metodologia.

Em [11], é descrita uma metodologia para avaliação rápida da viabilidade da energização de linhas de transmissão que incorpora os resultados dos estudos de fluxo de potência e transitórios eletromagnéticos. A metodologia é baseada em Redes Neurais Artificiais (RNAs) que são treinadas considerando diversas possibilidades para a configuração do corredor de transmissão em recomposição fluente, tais como: número de usinas e unidades geradoras utilizadas, tensão de energização e configuração de reatores. Para cada configuração de rede são realizadas simulações de fluxo de potência e transitórios eletromagnéticos, a fim de obter os valores máximos de sobretensão em regime permanente (sobretensões sustentadas) e transitório (sobretensões de manobra). Quando as sobretensões máximas estão dentro dos limites permitidos, a RNA apresenta saída igual a um (energização viável) e zero caso contrário (energização inviável). São realizados estudos de casos para configurações de redes distintas do conjunto de treinamento, a fim de se avaliar a capacidade de generalização da RNA.

Em [11], as simulações de transitórios eletromagnéticos são feitas utilizando o ATP considerando as características probabilísticas do fechamento do disjuntor; os geradores são representados como fonte de tensão atrás da reatância subtransitória; as linhas de transmissão são modeladas com parâmetros distribuídos invariantes com a frequência e idealmente transpostas; considera-se os pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) e a curva de saturação dos transformadores. As simulações de fluxo de potência são feitas utilizando o software ANAREDE desenvolvido pelo CEPEL. É enfatizada a influência da capacidade de curto circuito no valor das sobretensões. Considerando a capacidade de generalização das RNAs, é potencializado o uso da metodologia nas análises em tempo real e encorajados novos desenvolvimentos tais como a inclusão da análise: de transitórios eletromecânicos, da energização de transformadores, do fechamento em anel e da dinâmica da carga.

Em [26] é apresentada uma metodologia baseada em RNAs para estimar o valor máximo e a duração das sobretensões de manobra devido à energização de transformadores durante o processo de recomposição. A RNA é treinada para os piores casos de chaveamento e a impedância equivalente vista pelo transformador também é utilizada como parâmetro de

entrada. É demonstrado que valores baixos para a impedância equivalente resulta em sobretensões de manobra menores. Como vantagem da metodologia, os autores citam a redução do tempo dispensado nas simulações de transitórios eletromagnéticos no ATP e encorajam a sua aplicação na análise em tempo real.

Em [9] são descritas as sobretensões que podem ocorrer durante a recomposição dos sistemas elétricos de potência e os métodos de controlá-las. As sobretensões sustentadas são estudadas através de programas de fluxo de potência e ocorrem devido ao baixo carregamento (carga leve) e excesso de potência reativa capacitiva a que o sistema está submetido nos instantes iniciais da recomposição. Estas podem ser controladas através da absorção de potência reativa por geradores, tomada de carga, utilização de reatores *shunt* e redução do perfil de tensão. As sobretensões de manobra são estudadas através da utilização de programas de transitórios eletromagnéticos e ocorrem devido à energização de longos trechos de linhas de transmissão e fechamento dos pólos do disjuntor em condições desfavoráveis. Estas podem ser controladas facilmente se as tensões em regime permanente forem menores que 1,2 pu, se forem utilizados pára-raios de alta capacidade, disjuntores com resistores pré-inserção e se o instante de fechamento dos pólos dos disjuntores for controlado.

Os fenômenos de harmônicos originam das não linearidades dos equipamentos da rede, mais especificamente do fenômeno da saturação dos transformadores. Estas não linearidades podem causar ressonâncias e amplificar os valores das sobretensões sustentadas. O objetivo da análise harmônica é determinar configurações de rede que não resultem em alto conteúdo harmônico. Estas sobretensões podem ser controladas através do ajuste de tape dos transformadores, tomada de carga e redução da impedância equivalente da barra que será energizada. Durante os instantes iniciais da recomposição, deve-se controlar as sobretensões para evitar danos aos equipamentos e reduzir o tempo do processo de restabelecimento.

Em [5] é apresentada uma revisão sobre os sistemas de proteção com o objetivo de determinar a influência desses no processo de recomposição. A operação incorreta desses dispositivos associadas às mudanças de topologia da rede durante a recomposição podem causar atrasos ao processo. A operação de diversos tipos de relés são discutidos tais como: relés de distância, relés de perda de sincronismo, relés de sobretensão de sequência negativa, relés diferenciais com limitações de harmônicos, entre outros. Os autores associam as operações indevidas das proteções ao baixo nível de curto circuito (*minimum source*) imposto ao sistema nos instantes iniciais do processo de recomposição, que compromete a seletividade

desses dispositivos. É enfatizado a necessidade da avaliação do desempenho das proteções sob as condições restaurativas da rede.

Em [13] são apresentados os resultados obtidos em um grupo de estudos do IEEE cujo objetivo era analisar mais profundamente o impacto dos sistemas de proteção no processo de recomposição, haja vista que poucas publicações na área de recomposição são dedicadas ao tópico. O aspecto mais importante durante esse estágio é o controle da tensão em regime permanente, dinâmico e transitório, de forma a não causar danos aos equipamentos. Além disso, na recomposição, torna-se necessário avaliar a existência de um nível de falta suficiente para a detecção de defeitos nos corredores de transmissão. A configuração da rede sob recomposição pode conduzir à operação incorreta dos dispositivos de proteção, causando atrasos ou em caso extremo, impedindo o processo de restauração.

Alguns problemas relacionados à proteção durante a recomposição são tratados em [13], como por exemplo, a atuação de relés sensíveis às componentes de sequência negativa e zero devido ao desbalanceamento de tensão causado por certas configurações de linhas de transmissão. Os autores sugerem que alguns relés podem ser temporariamente desabilitados durante o processo de recomposição. A energização de sistemas de transmissão fracos (baixo nível de geração e de curto circuito) pode criar sobretensões transitórias (ou de manobra) elevadas conduzindo a falhas de pára-raios e outros equipamentos. A compensação série pode ser utilizada para variar a impedância equivalente reduzindo as sobretensões sustentadas, e o elevado conteúdo harmônico gerado pela saturação de transformadores pode impactar na atuação de relés com restrição harmônica. Outros tópicos relacionados à proteção durante o processo de recomposição são tratados e os autores concluem enfatizando a necessidade de ajustes específicos da proteção para esse processo.

Em [14] e [27] é apresentada uma metodologia baseada em Fluxo de Potência Ótimo (FPO) associada à decomposição matemática de Benders para determinação de uma configuração mínima para a recomposição fluente. A metodologia permite o ajuste da tensão de geração, define uma configuração mínima de reatores a serem conectados e provê o montante máximo de carga a ser suprida no fim de corredor de recomposição. Os geradores são representados pelo seu modelo de fonte de tensão atrás da reatância subtransitória e a carga é considerada como 100 % de potência constante.

A função objetivo utilizada é a maximização da carga e a minimização da alocação de potência reativa. As restrições englobam as equações de balanço de potência ativa e reativa, as equações de modelagem das máquinas síncronas, as restrições impostas pela curva de capacidade e outras restrições operacionais, tais como limite de tensão em regime dinâmico e permanente. A metodologia é dividida em três subproblemas. O subproblema 1 corresponde à otimização do sistema completo (maximização da carga, minimização de reatores conectados e ajuste da tensão dos geradores). Em seguida são simuladas rejeições de carga em todas as barras do corredor (cenários de recomposição), onde são avaliadas as sobretensões em regime permanente (subproblema 2) e dinâmico (subproblema 3). Caso as sobretensões em regime permanente e dinâmico violem os limites definidos pelo ONS [8], são enviadas restrições de Benders ao subproblema 1 no sentido de modificar os valores otimizados de tensão de geração, da carga tomada e configuração de reatores. O processo iterativo converge quando não ocorrerem violações de tensões no sistema em regime permanente e dinâmico, fornecendo uma configuração ótima para viabilizar o processo de recomposição fluente.

Os resultados obtidos para o corredor da Área Rio de Janeiro são comparados com os propostos na literatura, indicando para uma ferramenta eficaz de auxílio aos estudos de recomposição. Como desenvolvimentos futuros, os autores sugerem a consideração de restrições no domínio transitório, definição do número mínimo de unidades geradoras para a recomposição fluente e o ajuste de tapes para controle de sobretensão.

Em [28], a metodologia proposta é apresentada como um único problema de otimização, englobando três instantes: (i) de pré rejeição de carga (regime permanente), (ii) o instante imediatamente após a rejeição de carga (regime dinâmico) e o novo regime permanente após a rejeição (iii). A representação dos instantes (i) e (ii) é necessária para a definição da máxima carga tomada e da configuração de reatores. Já o instante (iii) precisa ser representado, uma vez que se deseja ajustar a tensão de geração, instante no qual ocorre a atuação dos reguladores de tensão. A alocação de potência reativa por parte dos reatores é considerada de forma contínua no FPO. Após a execução do FPO, é chaveado o reator com capacidade nominal mais próxima da alocação de potência reativa, correspondendo a etapa discreta do algoritmo. Executa-se o FPO novamente e a convergência é obtida quando todos os reatores necessários ao controle de tensão são chaveados. O problema a ser resolvido é de grande porte e a utilização do Método dos Pontos Interiores é utilizado na solução, apresentando boa convergência e desempenho computacional satisfatório.

A metodologia proposta em [28] não define o número ótimo de unidades geradoras para o processo de recomposição fluente, entretanto, uma análise de sensibilidade é realizada com o objetivo de determinar o número ótimo de unidades. Para o corredor de recomposição da Área Rio de Janeiro o FPO é executado considerando três, quatro, cinco e seis unidades geradoras. Com três unidades o problema não converge devido ao excesso de potência reativa absorvida pelos geradores. Com quatro e seis unidades geradoras, o valor otimizado da carga é menor do que quando cinco unidades são consideradas. Portanto a análise de sensibilidade indica que cinco unidades é o valor ótimo para o processo de recomposição da área Rio de Janeiro. Esse valor está de acordo com o número mínimo proposto pelo ONS, obtido através de simulações de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos.

2.2.2 Capacidade de Curto Circuito

O conceito de Capacidade de Curto Circuito (CCC) de um determinado sistema está relacionado com a sua força, entre outras palavras, com sua capacidade de manter a tensão e frequência constantes na presença de perturbações na rede. Conforme [11], a ponderação do nível de curto circuito na medida da força do sistema não é fácil de ser realizada. Uma revisão da literatura mais recente [29], [30] sobre sistemas elétricos de potência mostra que o conceito de CCC tem sido utilizado para medir a estabilidade e robustez das redes elétricas. Considerando o conceito de estabilidade de tensão, o sistema é mais estável e mais forte quando apresenta uma CCC maior. O objetivo dessa seção é apresentar alguns trabalhos recentes que utilizam o conceito de nível de curto circuito, bem como sintetizar os principais aspectos relacionados à CCC durante o processo de recomposição.

Em [29], é proposta uma ferramenta que permite avaliar a margem de estabilidade de tensão do sistema, bem como é definido o mínimo valor de CCC para que o sistema opere dentro da região de estabilidade. A metodologia proposta é baseada em equivalentes de Thevenin e um estudo de caso é realizado utilizando o sistema *New England*, que demonstra que o valor da CCC pode ser utilizada para avaliar a estabilidade de tensão, bem como a distância ao ponto de colapso (ou de máximo carregamento).

Em [30], é proposto um monitoramento em tempo real da estabilidade de tensão utilizando o conceito de capacidade de curto circuito. O trabalho é dividido em três partes.

Inicialmente os autores associam o grau de estabilidade de tensão com o conceito de CCC. Em seguida é apresentada uma ferramenta para aquisição dos dados da rede elétrica que é dividida em Áreas de Monitoramento de Tensão e onde são alocadas, de forma ótima, Unidades de Medição Fasorial. Finalizando, os autores apresentam uma aplicação prática utilizando um sistema interligado de grande porte. Os resultados demonstram a efetividade da metodologia na avaliação dinâmica do nível de tensão da rede.

A CCC de uma barra do sistema pode ser aproximada pelo inverso da sua impedância equivalente de Thevenin [31]. Em [16], é demonstrado matematicamente que o valor das sobretensões sustentadas está associado ao fato da rede elétrica ser forte ou fraca em termos de sua potência de curto circuito. Para linhas de transmissão longas, podem ocorrer casos extremos de sobretensões, devido ao excesso de potência reativa capacitiva e à baixa capacidade de curto circuito. O controle dessas sobretensões é realizado através de alterações na configuração da rede, que impactam no equivalente de Thevenin das barras, influenciando no valor das sobretensões, via conexão de reatores e alteração do número de máquinas nas usinas.

Nos estudos de recomposição, o conceito de capacidade de curto circuito está associado aos seguintes aspectos:

- Durante os instantes iniciais do processo de recomposição é requerida uma mínima capacidade de curto circuito [17], [20] e [22];
- Um mínimo valor de CCC é requerido para a operação correta dos dispositivos de proteção: [5] e [13];
- A energização de linhas de transmissão em redes com baixa capacidade de curto circuito pode originar valores grandes de sobretensões [16] e [24].

2.2.3 Impedância Equivalente de Thevenin

A matriz impedância de barras é utilizada na análise de Sistemas Elétricos de Potência, principalmente na análise de faltas [12] e [32] sendo que é possível demonstrar matematicamente que os elementos diagonais desta matriz correspondem às impedâncias

equivalentes de Thevenin vistas pelas barras da rede [33]. Qualquer modificação na topologia da rede implica na variação dessa impedância. Diversos trabalhos na literatura utilizam o valor da impedância de Thevenin para avaliar o desempenho da rede elétrica, como por exemplo a Capacidade de Curto Circuito de uma barra, que pode ser aproximada pelo inverso da sua impedância equivalente [31]. Durante o processo de recomposição, a impedância vista pelas barras geradoras são normalmente altas, conduzindo a operações errôneas dos dispositivos de proteção [34]. Considerando a relevância em se analisar a relação entre o valor das impedâncias equivalentes e o desempenho da rede elétrica, o objetivo dessa seção é apresentar alguns trabalhos baseados no valor dessa grandeza.

Em [20], os autores descrevem que durante os instantes iniciais da recomposição, a impedância equivalente vista nas barras de geração são altas, fazendo com que o sistema esteja sujeito à instabilidade dinâmica. Tal fato é devido ao baixo número de máquinas rotativas conectadas e à fragilidade do sistema de transmissão devido à configuração em que a rede se encontra durante o processo de recomposição. A redução do valor dessa impedância contribui no controle das sobretensões.

Em [10], o valor da impedância equivalente vista pelas barras é associado ao desempenho dinâmico da rede. O autor afirma que maiores impedâncias equivalentes correspondem a menores níveis de curto circuito e conseqüentemente, a maiores variações de tensão na rede. Em outras palavras, maiores impedâncias correspondem à menor estabilidade para o sistema. Para sistemas com linhas de transmissão longas e com baixa densidade de carga por superfície, deseja-se reduzir o valor da impedância equivalente, haja vista que para essas redes são dominantes as questões de estabilidade e regulação de tensão. No caso de redes fortemente malhadas, as correntes de curto circuito adquirem maior relevância, motivo pelo qual tem-se interesse em aumentar o valor das impedâncias equivalentes.

Em [35], é proposto um método analítico para formalizar a dependência do comportamento do sistema sob condições de defeito com a impedância equivalente da barra geradora. O comportamento da rede para faltas trifásicas é expressado como uma função racional que depende do valor da impedância dos geradores. Com essa metodologia, é possível analisar o efeito da conexão de novas unidades geradoras no nível de curto circuito de uma determinada barra da rede, haja vista que a contribuição de cada gerador para a corrente de falta é função da topologia da rede, sendo limitada por esta. Analisando os pólos e zeros da função racional proposta, é possível projetar o valor das impedâncias dos geradores

de forma a se ter o nível de falta requerido. A metodologia, que pode ser aplicada para as mais diversas configurações de rede é analisada por um sistema malhado de seis barras, mostrando resultados satisfatórios.

Durante o processo de recomposição, deseja-se reduzir o valor das impedâncias equivalentes das barras do sistema, tendo em vista que menores valores de impedância equivalente:

- correspondem à uma maior capacidade de curto circuito, necessário durante a recomposição [12] e [24] ;
- aumentam a estabilidade dinâmica do sistema, contribuindo para que o sistema não perca seu sincronismo [10] e [20] ;
- limitam os valores de sobretensões sustentadas [11] e [16];
- limitam os valores de sobretensões harmônicas devido à energização de transformadores [23] e [26];
- reduzem os valores de sobretensões de manobra durante a energização de linhas [9] e [11] .

2.3 RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

O processo de Recomposição Fluente do Sistema Elétrico Brasileiro é dividido em duas etapas: fase fluente e fase coordenada, conforme descrito em detalhes na referencia [8].

A fase coordenada envolve o fechamento de anéis ou paralelos entre as áreas já estabelecidas na recomposição fluente. Nessa fase, é muitas vezes necessário o redespacho de usinas para evitar o torque excessivo nos eixos dos geradores devido à variação instantânea de potência [7] e [18] . Em [7] é apresentada uma metodologia baseada em FPO para o redespacho de geradores visando à redução do impacto no eixo das máquinas síncronas durante o fechamento do anel. A recomposição coordenada deve ser iniciada somente após a verificação da ausência de sobrecargas em equipamentos da área considerada, da estabilização da frequência e da verificação de níveis de tensão compatíveis com a carga prioritária tomada.

A fase fluente corresponde ao início do processo de recomposição, partindo o corredor do sistema completamente desenergizado. Os corredores de transmissão são energizados radialmente, a partir de usinas hidroelétricas com capacidade de “*black-start*”, ou seja, de auto-restabelecimento. Nessa fase, cabe aos operadores tomar decisões seguindo um conjunto de instruções de operação (IO’s), havendo mínima comunicação entre os operadores envolvidos. A tomada de carga é frequentemente realizada a partir de geração remota, o que exige inicialmente o total restabelecimento do corredor de transmissão. Nessa fase, o corredor está sujeito a sobretensões sustentadas e de manobra ou chaveamento [23].

As diretrizes para recomposição fluente do SIN são apresentadas em [8] e sintetizadas em [36] conforme apresentado abaixo:

- Para o processo de recomposição fluente deve-se definir o número de unidades geradoras *black-start*, a tensão de energização e o montante de carga prioritária compatível com os níveis de geração e transmissão;
- No processo de recomposição são utilizados corredores radiais totalmente desenergizados e com baixa Capacidade de Curto Circuito, diferentemente da operação normal, quando o sistema é malhado;
- Considerar condições extremas de carga (leve e pesada) para garantir a recomposição em qualquer horário;
- As usinas devem partir com o maior número de unidades geradoras possível;
- Os bancos de capacitores devem ser desligados e os transformadores ajustados com valores de tapas que reduzam as sobretensões;
- Para o controle das tensões em níveis necessários para o restabelecimento deve-se usar os recursos disponíveis nas áreas geolétricas (áreas com capacidade de auto-restabelecimento). Os compensadores síncronos e estáticos não são considerados à priori;
- As parcelas de carga ativa e reativa devem ser representadas como 100 % de potência constante, com fator de potência entre 0,85 e 0,95;
- O critério geral é considerar que uma das unidades da usina de restabelecimento esteja em manutenção. Nesse caso, a potência inicialmente disponível será dada pela equação (2.1), onde n é o número de unidades e $P_{nominal}$ é a potência nominal da unidade

geradora. Pode-se considerar também um número mínimo de unidades definido a partir de estudos elétricos, objetivando-se evitar a ocorrência de auto-excitação nas rejeições de carga ou em função da sensibilidade de proteção. Nesse caso a potência será dada por (2.2) considerando n_{min} unidades;

$$P_{disponível} = 0,8 \cdot (n - 1) \cdot P_{nominal} \quad (2.1)$$

$$P_{disponível} = 0,8 \cdot n_{min} \cdot P_{nominal} \quad (2.2)$$

- A tomada da carga na fase fluente deve ser feita em degraus, considerando que em cada degrau não deve haver variação da tensão maior que 5% da tensão nominal nem variação da frequência fora da faixa de 56,5 a 66,0 Hz;
- O intervalo entre os degraus de tomada de carga não deve ser menor do que 1 minuto, para possibilitar a estabilização das oscilações de tensão e frequência através dos reguladores de tensão e velocidade das unidades geradoras;
- Os limites de tensão em regime permanente, admitindo-se que nenhuma carga tenha sido tomada, são apresentados na Tabela 2.1 para as Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste;

Tabela 2.1 Níveis de Tensão Aceitáveis em Regime Permanente para Estudo das Áreas de Recomposição

Tensão (kV)	Fase Fluente (pu)		Fase Coordenada (pu)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
≤ 138	0,90	1,10	0,90	1,05
230	0,90	1,10	0,90	1,10
345	0,90	1,10	0,90	1,10
440	0,90	1,10	0,90	1,10
500	0,90	1,10	0,95	1,10
525	0,85	1,05	0,90	1,05
765	0,90	1,046	0,90	1,046

- Os limites de tensão em regime dinâmico são de 0,85 pu a 1,25 pu.

2.4 ESTUDOS ELÉTRICOS NA RECOMPOSIÇÃO

O processo de recomposição do SIN é executado utilizando-se estudos de fluxo de potência, transitórios eletromagnéticos e transitórios eletromecânicos. Somente após os estudos de regime permanente, é que são executados os estudos de transitórios [4] e [8].

Os estudos de fluxo de potência são feitos para analisar as condições do sistema nas diversas etapas e configurações da recomposição, tais como: perfis de tensão, os carregamentos nos equipamentos e a capacidade das unidades geradoras nas situações pré e pós manobra [8]. A ferramenta computacional para estudos em regime permanente padronizada pelo ONS é o ANAREDE, desenvolvido pelo CEPEL [37].

Os estudos de transitórios eletromecânicos 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/ou rejeição de carga. Quando do fechamento de anéis devem ser investigadas as sobretensões dinâmicas, os aspectos torsionais das máquinas, e a manutenção da estabilidade da rede [8]. A ferramenta computacional utilizada para esses estudos é o ANATEM, desenvolvido pelo CEPEL [37].

Os estudos de transitórios eletromagnéticos são realizados para a análise de sobretensões transitórias e harmônicas devido à energização dos equipamentos, tais como linhas de transmissão e transformadores [8]. A ferramenta computacional utilizada para esses estudos é o ATP, que é um *software* livre. A modelagem da rede para estudos no ATP pode ser obtida em [8], [11] e [16]. Algumas diretrizes para estudo são as seguintes:

- Devido às características probabilísticas dos equipamentos e à aleatoriedade do instante de fechamento dos pólos dos disjuntores, devem ser realizados estudos estatísticos. Os estudos determinísticos podem ser utilizados para a representação dos piores casos de um estudo estatístico;
- Nos estudos de energização de linhas de transmissão, estas devem ser representadas considerando parâmetros distribuídos. Em casos mais específicos, deve ser considerada a variação dos parâmetros com a frequência;
- Os modelos de transformadores utilizados devem ser suficientemente detalhados para a reprodução das características de saturação do núcleo;

- Alguns dados para simulação de transitórios eletromagnéticos nem sempre estão disponíveis. Por exemplo a curva de saturação dos transformadores, que é obtida em testes de campo. Na ausência desses dados, pode-se utilizar dados típicos, desde que comprovada sua aplicabilidade.

2.5 CONTROLE DE SOBRETENSÕES DURANTE A RECOMPOSIÇÃO

Durante a recomposição, o sistema está sujeito à ocorrência de sobretensões que devem ser controladas a fim de não danificar os equipamentos [8], [14] e [15]. Uma breve descrição dos tipos de sobretensões e suas causas foram feitas no capítulo 1.

2.5.1 Sobretensões Sustentadas

As sobretensões sustentadas à frequência fundamental permanecem no sistema até que sejam eliminadas as causas que as originaram. Para o controle dessas sobretensões, geralmente utilizam-se reatores, ajustes de tapes dos transformadores e ajuste das tensões das unidades geradoras [15] e [23].

O aumento do número de máquinas conectadas nas usinas de auto-restabelecimento resulta no aumento da capacidade de absorção de potência reativa da rede, contribuindo para reduzir as sobretensões. O ajuste de tapes dos transformadores durante o processo de recomposição nem sempre é possível tendo em vista que os transformadores são equipados com tapes fixos, cujas posições foram ajustadas para as condições normais de operação [17].

Em geral, os compensadores síncronos e estáticos não são utilizados no controle de tensão durante o processo de recomposição, a menos que sua utilização esteja definida nas Instruções Operativas [8]. A definição de uma configuração de rede que apresente um nível de curto circuito adequado também contribui para o controle das sobretensões sustentadas [11] e [16].

A Figura 2.1 apresenta o esquema de um corredor de recomposição fluente, para o qual as sobretensões sustentadas podem ser controladas pela definição do número de unidades conectadas na barra B_1 , pelo ajuste da tensão de geração na barra B_1 , pela conexão de reatores ($R_1 - R_4$) nas barras e pelo valor de carga tomada na barra B_4 .

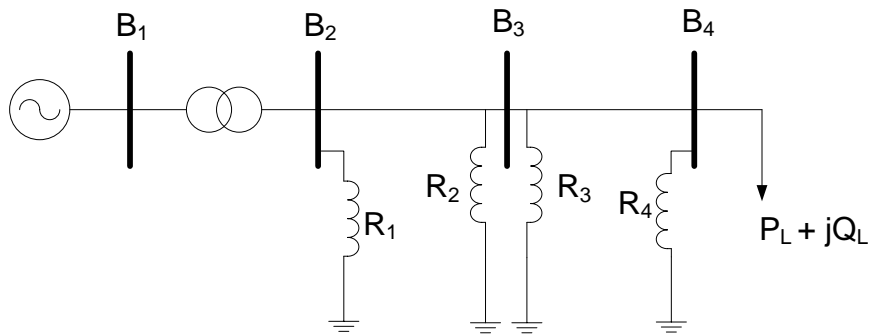


Figura 2.1– Corredor para Recomposição Fluente.

2.5.2 Sobretensões de Manobra

As sobretensões de manobra são um fenômeno eletromagnético e de alta frequência, sendo fortemente amortecidas e de curta duração. A amplitude e duração dessas sobretensões dependem dos parâmetros do sistema, da sua configuração e das condições em que ele se encontra no momento da manobra [15] e [23]. Para sua mitigação, geralmente são empregados pára-raios nas extremidades das linhas de transmissão, inserção de resistores em disjuntores e esquemas controlados de chaveamentos [9], [15] e [38]. Geralmente, se as condições de regime permanente são adequadas, se as compensações de potência reativa são ajustadas corretamente e as tensões dos geradores reguladas em valores adequados, as sobretensões de manobra ou chaveamento podem ser controladas sem grande dificuldade [9].

Os resistores pré-inserção são inseridos durante a energização da linha de transmissão através de contatos auxiliares do disjuntor de forma a atenuar as sobretensões máximas de energização. Depois de certo tempo, os resistores são retirados do circuito e a linha passa a funcionar normalmente [39]. Esses dispositivos possuem alto custo de instalação e manutenção, motivos pelo qual existe uma tendência das empresas de energia elétrica de substituí-los por outros métodos de controle [40]. A Figura 2.2 apresenta um esquemático da configuração de energização de uma linha de transmissão utilizando resistores pré-inserção (R_{PI}). Primeiro são fechados os contatos auxiliares que inserem o resistor e passado um intervalo de tempo os contatos principais são fechados, retirando os resistores (curto-circuito). Uma condição que deve ser obedecida é que o tempo de inserção deve ser maior que o dobro do tempo de trânsito da linha [16]. Valores típicos utilizados no Sistema Elétrico Brasileiro são de resistores pré-inserção de 400Ω e um tempo de inserção de 8ms [38].

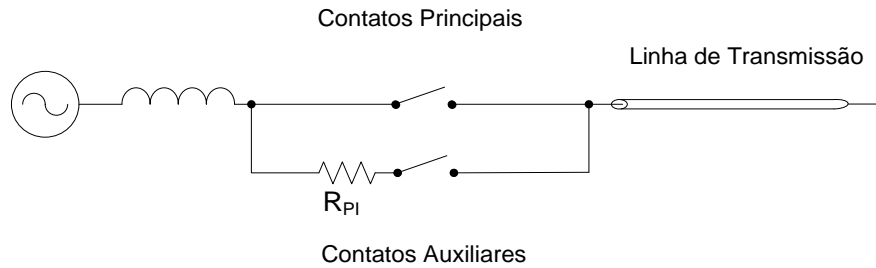


Figura 2.2– Esquema de Energização de Linha de Transmissão utilizando Resistores Pré-Inserção.

Chaveamento Controlado é o termo utilizado para descrever o uso de equipamentos eletrônicos para controlar o fechamento e abertura mecânica dos contatos dos disjuntores. O componente eletrônico utilizado é o sincronizador ou chave síncrona [15]. Este método consiste em controlar o instante de fechamento de cada pólo do disjuntor no momento em que as tensões de fase são próximas de zero [38]. Algumas variantes de chaveamento controlado consistem em [15]:

- Fechar as três chaves simultaneamente quando a tensão de apenas uma das fases for zero;
- Fechar as três fases consecutivamente quando a tensão de apenas uma delas for zero.

2.5.3 Harmônicas

As tensões de ressonância harmônica são sobretensões não amortecidas ou pouco amortecidas de longa duração que originam das não linearidades dos equipamentos. Resultam de muitos fatores que são característicos das redes em recomposição: ressonância entre o circuito formado pela indutância da fonte e capacitâncias da linha de transmissão e também devido à saturação durante a energização de transformadores [17]. Estas sobretensões podem ser controladas através do ajuste de tape dos transformadores, tomada de carga e redução da impedância equivalente da barra que será energizada [9].

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica de trabalhos recentes de interesse dessa dissertação. Aspectos importantes e atuais foram abordados: filosofia do

processo de recomposição, importância da Capacidade de Curto Circuito, métodos de controles de sobretensões sustentadas, harmônicas e transitórias, sistemas de proteção, aplicação de FACTS, aspectos dinâmicos e influência da impedância de Thevenin.

Em uma segunda etapa foram apresentadas as diretrizes de recomposição do Sistema Interligado Nacional. Métodos de controle de sobretensões foram apresentados, tanto para sobretensões sustentadas, quanto para sobretensões transitórias e harmônicas. Entre os métodos de controle de sobretensões sustentadas apresentados na literatura tem-se a conexão de reatores, a conexão de unidades de geradoras, o ajuste de tensão de geração, ajuste de taps de transformadores e tomada de carga. Para o controle de sobretensões de manobra ou chaveamento tem-se a utilização de para-raios nas extremidades das linhas de transmissão, de disjuntores com resistores pré-inserção e esquemas controlados de chaveamento.

Foi observado a importância de se definir configurações de rede que incrementem a Capacidade de Curto Circuito da rede elétrica sob o processo de recomposição. Diante desse cenário, essa dissertação está focada na definição de configurações de rede que viabilizem a recomposição de corredores de transmissão considerando a Capacidade de Curto Circuito.

3 Metodologia Proposta

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme abordado anteriormente nesse trabalho, não existe uma metodologia que defina a configuração mínima de rede sob recomposição fluente considerando os aspectos relacionados à capacidade de curto circuito (CCC). Como foi descrito, durante o processo de recomposição o sistema encontra-se sob baixo nível de curto circuito, fato que pode comprometer o restabelecimento da rede.

Nos estudos de recomposição do sistema brasileiro a configuração de rede é determinada através de estudos de rejeição de carga em problemas de transitórios eletromecânicos. Recentemente, foi desenvolvida no NUPESP (PPEE / UFJF) uma metodologia baseada em Fluxo de Potência Ótimo e Decomposição de Benders para a determinação automática da configuração mínima de rede durante a recomposição fluente. Essa metodologia é descrita no Apêndice C.

Neste capítulo, é apresentada a metodologia desenvolvida neste trabalho, visando à determinação ótima da configuração de rede considerando aspectos relacionados ao nível de curto circuito.

3.2 IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DE THEVENIN

A matriz impedância de barras possui grande importância na análise dos SEP, sendo de especial interesse no presente trabalho. A matriz impedância pode ser obtida de forma direta ou através da matriz admitância de barras utilizando técnicas de fatoração [32] e [33].

Um sistema genérico constituído por três barras, tem sua matriz impedância de barra apresentada em (3.1).

$$Z_{barra} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Conforme é conhecido da teoria de Análise de Redes Elétricas, os elementos diagonais da matriz impedância correspondem às impedâncias equivalentes de Thevenin vistas pelas barras da rede. No capítulo anterior foram apresentados vários aspectos relacionados ao valor da impedância de Thevenin, que mostram os benefícios de se ter um valor reduzido para essa grandeza.

Com o objetivo de minimizar o esforço computacional, especialmente para sistemas de grande porte, pode-se fazer correções na matriz impedância de barras original na ocorrência de alterações da rede. Considerando o sistema de três barras, uma variação de corrente na barra de número 2 (ΔI_2) irá produzir uma variação de tensão nas barras do sistema (ΔV) conforme (3.2).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta I_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Sendo V_2^0 a tensão na barra 2 antes da variação de corrente ΔI_2 , pode-se escrever as equações (3.3) e (3.4), onde V_2 é a tensão na barra 2 após a variação de corrente.

$$\Delta V_2 = V_2 - V_2^0 \quad (3.3)$$

$$V_2^0 = Z_{21} \cdot I_1 + Z_{22} \cdot I_2 + Z_{23} \cdot I_3 \quad (3.4)$$

A equação (3.3) pode ser reescrita conforme (3.5) :

$$V_2 = V_2^0 + \Delta V_2 = V_2^0 + Z_{22} \cdot \Delta I_2 \quad (3.5)$$

Sendo os reatores *shunt* utilizados no controle de sobretensões, sendo estes equipamentos modelados como impedâncias constantes considerando suas características nominais [6], e considerando a matriz impedância original, deseja-se avaliar o efeito da conexão de reatores *shunt* sobre a matriz impedância de barras, o que será feito em dois passos descritos a seguir.

3.2.1 Passo 1: Conexão de uma impedância entre uma nova barra **p** e uma barra existente **k**

A Figura 3.1 ilustra o caso onde se deseja incluir uma nova barra na rede (barra 4) conectada à barra 2 através de uma impedância Z_b .

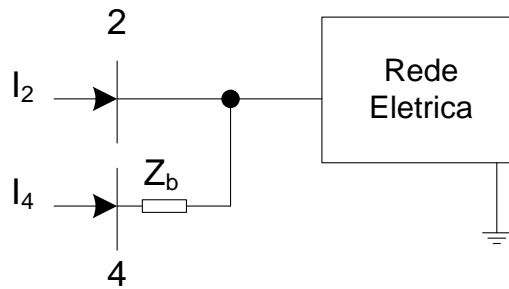


Figura 3.1– Adição de uma nova barra 4 através da conexão da impedância Z_b na barra 2.

Considerando a equação (3.5) e a conexão da barra 4 na rede, escrevem-se as seguintes equações, sendo $\Delta I_2 = I_4$:

$$V_2 = V_2^0 + Z_{22} \cdot I_4 \quad (3.6)$$

$$V_4 = V_2 + Z_b \cdot I_4 \quad (3.7)$$

Substituindo (3.6) em (3.7):

$$V_4 = V_2^0 + (Z_{22} + Z_b) \cdot I_4 \quad (3.8)$$

As equações (3.4) e (3.8) são utilizadas para escrever o sistema de equações de definição da nova rede:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{22} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{32} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{22} + Z_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.2.2 Passo 2: Conexão de uma impedância entre uma barra k e a barra de referência

Considerando o sistema matricial obtido no passo anterior, deseja-se conectar um reator *shunt* na barra 2, conforme indicado na Figura 3.2. O novo sistema matricial será obtido zerando a tensão na barra 4 e aplicando a Redução de Kron.

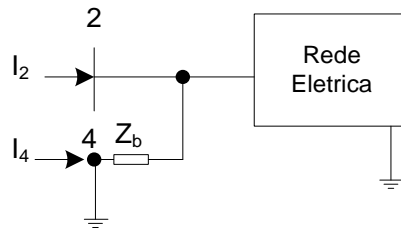


Figura 3.2– Adição de uma impedância Z_b entre a barra 2 e a referência.

Considerando que a barra 4 está aterrada, o sistema matricial (3.9) pode ser reescrito como:

$$\begin{bmatrix} V \\ V_4 = 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ORIG} & [Z_P]^T \\ Z_P & Z_{EQ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Onde :

$[Z_{ORIG}]$ é a matriz do sistema original (com três barras);

$[Z_P]$ é o vetor linha correspondente à barra 2 (na qual foi conectado o reator).

$$[Z_{EQ}] = [Z_{22} + Z_b] \quad (3.11)$$

O sistema matricial (3.10) pode ser desmembrado:

$$\begin{aligned} [V] &= [Z_{ORIG}] \cdot [I] + [Z_P]^T \cdot [I_4] \\ [0] &= [Z_P] \cdot [I] + [Z_{EQ}] \cdot [I_4] \end{aligned} \quad (3.12)$$

Desenvolvendo o sistema de equações (3.12), a nova matriz impedância de barras é apresentada em (3.13):

$$[Z_{NOVO}] = [Z_{ORIG}] - [Z_P]^T \cdot [Z_{EQ}]^{-1} \cdot [Z_P] \quad (3.13)$$

Nesse trabalho, o interesse está nos elementos diagonais da nova matriz impedância de barras, que são as impedâncias equivalentes de Thevenin:

$$\begin{aligned}
Z_{11}^{NOVO} &= Z_{11}^{ORIG} - \frac{Z_{12} \cdot Z_{21}}{Z_{22} + Z_b} \\
Z_{22}^{NOVO} &= Z_{22}^{ORIG} - \frac{Z_{22} \cdot Z_{22}}{Z_{22} + Z_b} \\
Z_{33}^{NOVO} &= Z_{33}^{ORIG} - \frac{Z_{32} \cdot Z_{23}}{Z_{22} + Z_b}
\end{aligned} \tag{3.14}$$

A expressão geral para atualização dos elementos diagonais da matriz impedância de barras, devido à conexão de um reator *shunt* na barra N , é apresentada em (3.15):

$$Z_{KK}^{NOVO} = Z_{KK}^{ORIG} - \frac{Z_{KN} \cdot Z_{NK}}{Z_{NN} + Z_b} \tag{3.15}$$

Onde:

- Z_{KK}^{NOVO} **Impedância atualizada de Thevenin** da barra K (após a conexão do reator);
- Z_{KK}^{ORIG} Impedância de Thevenin da barra K antes a conexão do reator;
- Z_{KN} Elemento (K,N) da matriz impedância de barras antes da conexão do reator;
- Z_{NK} Elemento (N,K) da matriz impedância de barras antes da conexão do reator;
- Z_{NN} Impedância de Thevenin da barra N antes a conexão do reator. A barra N é a barra em que será conectado o reator;
- Z_b Impedância do reator a ser conectado.

A equação (3.15) permite avaliar o efeito da conexão de reatores *shunt* nas barras do corredor de transmissão. Em outras palavras, pode-se utilizá-la como um índice de sensibilidade para conexão de reatores.

3.3 CAPACIDADE DE CURTO CIRCUITO

O conceito de capacidade de curto circuito (CCC) possui um significado muito mais claro quando considerado em conjunto com o teorema de Thevenin. Se as grandezas do

sistema forem expressas por unidade, a potência de curto circuito trifásica ($S_{3\phi}$) de uma barra, definida como capacidade de curto circuito, é dada por (3.16), onde $|V_{pf}|$ denota a magnitude da tensão pré-falta e $(Z_{th})^*$ denota o conjugado da impedância de Thevenin vista pela barra.

$$S_{3\phi} = \frac{|V_{pf}|^2}{(Z_{th})^*} \quad (3.16)$$

A CCC pode ser aproximada pelo inverso da impedância equivalente vista pela barra, conforme (3.17). Essa impedância é equivalente ao elemento diagonal da matriz impedância de barras [31].

$$CCC = \frac{1}{|Z_{th}|} \quad (3.17)$$

Observa-se que para o aumento da CCC de um barra, deve-se reduzir a impedância equivalente vista em seus terminais. Utilizando a equação (3.15) pode-se definir a barra mais apropriada para a alocação de reatores *shunt* visando a redução da impedância equivalente de Thevenin de uma determinada barra.

A CCC de uma barra é mais sensível à configuração da rede do que ao seu estado, e para o seu cálculo, considera-se a reatância subtransitória de eixo direto dos geradores, como é feito nos estudos de Curto Circuito [12].

3.4 RECOMPOSIÇÃO FLUENTE

O problema de recomposição fluente consiste em determinar uma mínima configuração de rede para o atendimento de uma carga prioritária.

A configuração típica de rede durante a recomposição fluente é apresentada na Figura 3.3.

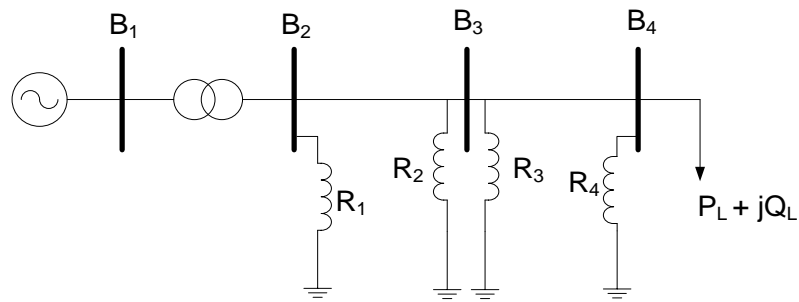


Figura 3.3– Corredor de Recomposição Fluente.

Com o objetivo de controlar as sobretensões sustentadas, deve-se utilizar as seguintes opções de controle de sobretensões:

- definição do número mínimo de unidades geradoras na barra B_1 , de modo que não ocorra a auto-excitação das máquinas;
- ajuste da tensão de geração na barra B_1 . O ajuste em valores altos permite um maior valor de carga suprida. Entretanto, conforme consta na literatura, valores altos para a tensão de energização implicam em maiores sobretensões de manobra e harmônicas;
- definição da configuração mínima de reatores a serem conectados no corredor radial de transmissão visando manter as tensões dentro dos limites padronizados. A energização é feita em estágios, motivo pelo qual é necessário a conexão de reatores, dentre as opções disponíveis: R_1 , R_2 , R_3 e R_4 ;
- definição do montante de carga a ser suprida no final do corredor, na barra B_4 .

Os cenários ou estágios de recomposição fluente para o corredor da Figura 3.3 estão representados na Figura 3.4. Para cada cenário são simuladas rejeições de carga visando à determinação da configuração de reatores.

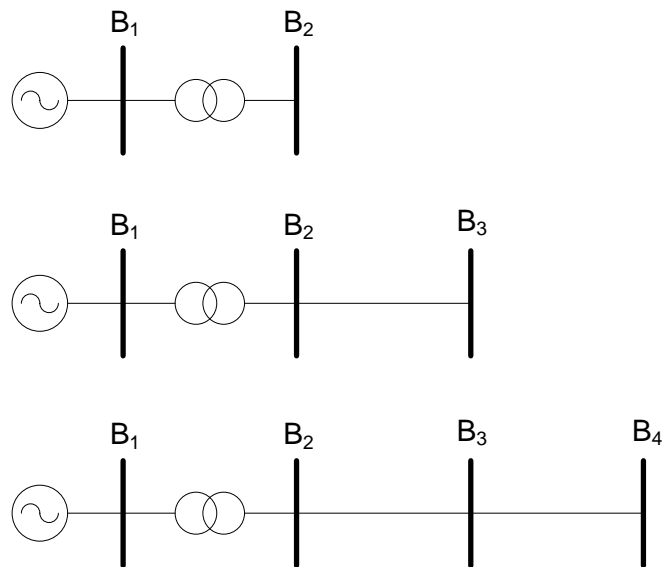


Figura 3.4– Cenários de Recomposição Fluente.

Observa-se que existe inúmeras configurações de rede a serem estudadas, devido à natureza combinatória do problema, motivo pelo qual necessita-se de uma metodologia capaz de otimizar os ajustes de forma automática.

Além das sobretensões sustentadas à frequência fundamental, deve-se mitigar as sobretensões de manobra, que são um fenômeno eletromagnético. Como foi visto no capítulo anterior, a utilização de pára-raios nas extremidades das linhas de transmissão, disjuntores com resistores de pré-inserção e esquemas controlados de chaveamentos mitigam os valores dessas sobretensões. Além disso, as sobretensões de manobra e harmônicas são reduzidas quando o valor da impedância equivalente das barras é baixo. O estudo de sobretensões de manobra e harmônicas não é contemplado nesse trabalho, mas esse item foi abordado na publicação [A], produzida durante o curso de mestrado.

Uma ferramenta baseada em FPO foi proposta em [6], para a otimizar o ajuste da rede sob recomposição fluente. Essa metodologia faz o ajuste da tensão de geração, define a configuração de reatores e maximiza a carga suprida.

No presente trabalho, propõe-se uma metodologia para definição da configuração de reatores para o controle de sobretensões sustentadas. Entretanto, busca-se uma configuração de reatores que minimize a impedância equivalente de Thevenin de uma barra pré-determinada e o valor da carga suprida também é maximizado.

3.5 TÉCNICA DE SOLUÇÃO

A técnica de solução adotada nesse trabalho para a determinação da mínima configuração de rede para o processo de recomposição fluente consiste em um método iterativo que utiliza Fluxo de Potência Ótimo e Análise de Sensibilidade.

O FPO tem o objetivo de maximizar a carga e minimizar a alocação de reatores para viabilizar o processo de recomposição fluente. A solução ideal seria que a energização do corredor de transmissão fosse feita sem a necessidade da alocação de reatores, permitindo uma máxima tomada de carga. Entretanto, o restabelecimento do corredor fluente é feito em estágios, correspondendo aos cenários descritos no item anterior, onde se deve limitar as sobretensões. Adicionalmente, a metodologia faz o ajuste da tensão de geração.

A análise de sensibilidade visa determinar os reatores mais adequados para a minimização da impedância equivalente de uma determinada barra, com o objetivo de aumentar o nível de curto circuito da barra sob análise.

O FPO utilizado é baseado na metodologia proposta em [6], que será descrita adiante. No presente trabalho de dissertação são considerados dois instantes: o regime permanente do sistema completo (t_0^-) e o regime permanente em cada cenário de recomposição (t_0^{rp}), o que é feito simulando rejeições de carga em cada barra do corredor. Os dois instantes são modelados em um único FPO e se acoplam através da potência reativa alocada (reatores) e da tensão de energização. Assim, a configuração de reatores deve ser viável em ambos os instantes.

No instante t_0^- é definida a alocação de reatores e maximizada a carga tomada. Logo após, são simulados as rejeições de carga e calculado o novo regime permanente em cada cenário t_0^{rp} . A configuração de reatores deve-se ser viável também nesse instante e destaca-se que em t_0^{rp} os reguladores de tensão já atuaram.

No processo de recomposição os geradores absorvem grande quantidade de potência reativa, respeitando os limites impostos pela curva de capacidade calculada com base no ponto de operação da máquina. Considerou-se a não ocorrência de auto-excitação com base no número mínimo de máquinas proposto pelo ONS [8].

Não foi considerado o instante da rejeição de carga (t_0^+), caracterizado pela elevação instantânea da tensão devido à perda de carga. Nesse instante, os reguladores de tensão não atuaram, e os geradores são modelados pelas suas variáveis internas (tensão e ângulo interno), que permanecem fixos nesse instante, devido à constante de tempo elevada das máquinas síncronas [31].

O programa computacional foi implementado em MATLAB utilizando a ferramenta *fmincon*. O *fmincon* utilizou o algoritmo de Pontos Interiores para a solução do problema de otimização proposto.

3.6 MODELAGEM DOS COMPONENTES DA REDE

Nesta seção descreve-se os modelos adotados para os componentes da rede: máquinas síncronas, curva de capacidade e reatores *shunt*.

3.6.1 Modelagem das Máquinas Síncronas

As máquinas síncronas de pólos salientes utilizadas no processo de recomposição são representadas como fonte de tensão ($E_a \angle \delta$) atrás da reatância subtransitória de eixo direto (X_d'') e eixo quadratura (X_q''). Essa modelagem é a mesma adotada em estudos dinâmicos e permite analisar a rede no instante imediatamente após a rejeição de carga e ocorrência de faltas.

No instante pré-rejeição de carga e pré-falta, a tensão interna da máquina E_a e o ângulo interno δ (também denominado ângulo de potência ou de carga) são calculados conforme as expressões de potência ativa e reativa apresentadas em (3.18) e (3.19). A dedução dessas equações é feita em [6].

$$PG = \frac{E_a V_t}{X_d''} \cdot \text{sen}(\delta - \theta) + \frac{V_t^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_d''} \right) \cdot \text{sen} 2(\delta - \theta) \quad (3.18)$$

$$QG = \frac{E_a V_t}{X_d''} \cdot \text{cos}(\delta - \theta) - \frac{V_t^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q''} + \frac{1}{X_d''} \right) + \frac{V_t^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_d''} \right) \cdot \text{cos} 2(\delta - \theta) \quad (3.19)$$

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 (3.18) e (3.19), quando inseridas na modelagem do instante imediatamente após a rejeição de carga, com tensão e ângulo interno fixos, fornecem o ponto de operação da rede considerando as sobretensões instantâneas. Adicionalmente, essas equações fornecem as variáveis internas das máquinas síncronas, utilizadas na modelagem da curva de capacidade.

3.6.2 Modelagem da Curva de Capacidade

Tradicionalmente, em programas de FPO, os limites de potência ativa e reativa dos geradores são considerados fixos. Entretanto, estes limites de potência ativa e reativa dos geradores são função do seu ponto de operação. No estudo de recomposição, onde os geradores operam na região de subexcitação absorvendo grande quantidade de potência reativa, é necessário a representação da curva de capacidade [34].

A curva de capacidade de geradores síncronos é uma região factível de operação dependente de sua potência ativa, potência reativa e tensão terminal [41] e [42]. O equacionamento das restrições da curva de capacidade foi desenvolvido em [6]. Os limites da curva de capacidade no plano PG-QG são função dos seguintes parâmetros:

- reatância síncrona de eixo direto X_d ;
- reatância síncrona de eixo quadratura X_q ;

- tensão terminal V_t ;
- potência aparente nominal $S_{nominal}$;
- potência mecânica máxima fornecida pela máquina primária $Pmec_{max}$;
- ângulo interno δ .

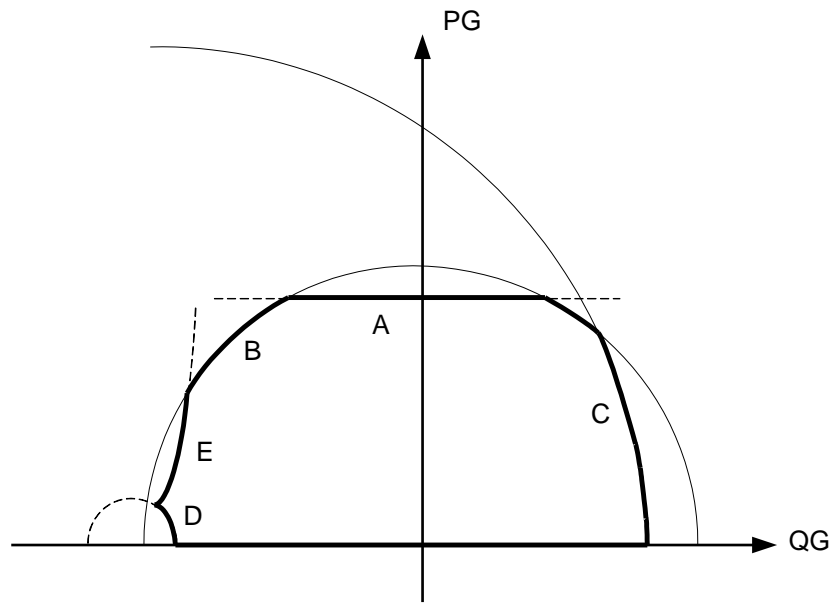


Figura 3.5–Curva de Capabilidade de Geradores Síncronos.

A Figura 3.5 apresenta a representação da curva de capacidade, onde estão indicados os cinco limites que a definem, cujas equações serão apresentadas a seguir:

- Limite de Capacidade da Máquina Primária (A):

$$PG = Pmec_{max} \quad (3.20)$$

- Limite de Corrente da Armadura (B):

$$PG^2 + QG^2 = (V_t I_{a_{max}})^2 \quad (3.21)$$

Onde:

Ia_{max} Máxima Corrente de Armadura Permissível.

- Limite de Excitação Máxima (C):

$$PG^2 + \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 = \left(\frac{V_t Ea_{max}}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cos(\delta - \theta)\right)^2 \quad (3.22)$$

Onde:

Ea_{max} Tensão Interna Máxima;

X_d, X_q Reatâncias Síncronas dos geradores.

- Limite de Excitação Mínima (D):

$$PG^2 + \left(QG + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 = \left(\frac{V_t Ea_{min}}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cos(\delta - \theta)\right)^2 \quad (3.23)$$

Onde:

Ea_{min} Tensão Interna Mínima.

- Limite de Estabilidade Estática (E):

$$PG^2 \left(\frac{V_t^2}{X_d} + QG\right) = -\left(\frac{V_t^2}{X_q} + QG\right)^3 \quad (3.24)$$

3.6.3 Modelagem dos Reatores *Shunt*

Os reatores *shunt* a serem alocados são os de barra e os de linha. Ambos os reatores são modelados como impedâncias constantes e se diferem somente no fato de que os reatores de linha só entram em operação através do religamento da linha de transmissão. A Figura 3.6 apresenta a representação dos reatores *shunt*.

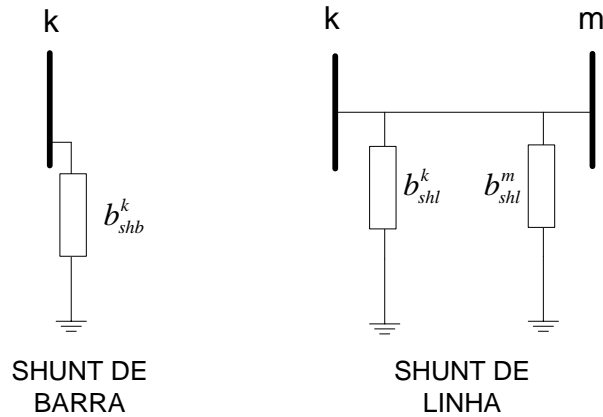


Figura 3.6–Representação dos Reatores *Shunt*.

A injeção de potência reativa pelo reator *shunt* de barra é calculada conforme a equação (3.25).

$$Q_{shb}^k = b_{shb}^k \cdot V_k^2 \quad (3.25)$$

Conforme [43], as equações que definem o fluxo de potência reativa fluindo em uma linha de transmissão são:

$$Q_{km} = -(b_{km} + b_{km}^{sh})V_k^2 - (g_{km} \text{sen}(\theta_{km}) - b_{km} \text{cos}(\theta_{km})) \quad (3.26)$$

$$Q_{mk} = -(b_{km} + b_{km}^{sh})V_m^2 + (g_{km} \text{sen}(\theta_{km}) + b_{km} \text{cos}(\theta_{km})) \quad (3.27)$$

A injeção de potência reativa pelos reatores *shunt* de linha é calculada de acordo com (3.28) e (3.29).

$$Q_{shl}^k = b_{shl}^k \cdot V_k^2 \quad (3.28)$$

$$Q_{shl}^m = b_{shl}^m \cdot V_m^2 \quad (3.29)$$

A modelagem dos reatores *shunt* de linha é feita somando a susceptância *shunt* desses elementos à susceptância *shunt* da linha, uma vez que esses elementos só entram em operação com o religamento da linha de transmissão.

$$Q_{km} = -(b_{km} + b_{km}^{sh} + b_{shl}^k)V_k^2 - (g_{km} \text{sen}(\theta_{km}) - b_{km} \text{cos}(\theta_{km})) \quad (3.30)$$

$$Q_{mk} = -(b_{km} + b_{km}^{sh} + b_{shl}^m)V_m^2 + (g_{km} \text{sen}(\theta_{km}) + b_{km} \text{cos}(\theta_{km})) \quad (3.31)$$

3.7 ÍNDICE DE SENSIBILIDADE PROPOSTO

O objetivo do presente trabalho é a busca por configurações de rede com maior nível de curto circuito durante o processo de recomposição fluente. O aumento de nível de curto circuito de uma determinada barra é provido pela redução da impedância equivalente de Thevenin da barra sob análise.

Como abordado anteriormente, o nível de curto circuito está associado à configuração da rede elétrica. No presente trabalho, considera-se somente a alocação de reatores para a modificação da configuração da rede e através de um processo de otimização baseado em uma análise de sensibilidade, busca-se alocar os reatores que minimizem a impedância de Thevenin de uma barra pré-determinada.

Considerando que deseja-se reduzir a impedância equivalente de uma barra K e que se tenham reatores a serem alocados em um conjunto de barras N , para cada reator candidato é calculada a impedância Thevenin atualizada conforme a equação (3.32).

$$Z_{KK}^{NOVO} = Z_{KK}^{ORIG} - \frac{Z_{KN} \cdot Z_{NK}}{Z_{NN} + Z_b} \quad (3.32)$$

Baseado na expressão da impedância de Thevenin atualizada, é proposto um índice de sensibilidade para cada reator, descrito na equação (3.33).

$$\text{índice de sensibilidade} = |Z_{KK}^{NOVO}| \quad (3.33)$$

O reator com maior probabilidade de ser alocado é aquele que, ao ser inserido, apresentar menor valor de impedância equivalente atualizada para a barra K . No FPO

proposto isso é feito através da definição de fatores de ponderação de alocação para os reatores, proporcionais ao índice de sensibilidade da equação (3.33). Assim, os reatores que mais reduzirem a impedância equivalente da barra K terão menores fatores de ponderação de alocação.

3.8 FATOR DE PONDERAÇÃO PROPOSTO PARA A ALOCAÇÃO DOS REATORES

A principal contribuição deste trabalho é o fator de ponderação de alocação de reatores baseado na impedância atualizada de Thevenin.

O primeiro passo é definir qual a barra do corredor terá sua impedância equivalente reduzida com a alocação de reatores. Denomina-se essa barra como *Barra Crítica* e neste trabalho, considerou-se a barra com a maior impedância equivalente ao longo do corredor de transmissão.

Considerando a *Barra Crítica* K e um conjunto de reatores a serem alocados nas Barras N , calcula-se a impedância atualizada de Thevenin para cada barra candidata à alocação. O fator de ponderação de alocação de reatores na barra N será dado conforme a equação (3.34):

$$C_{QA_N} = 100 \cdot |Z_{KK}^{NOVO}| \quad (3.34)$$

Conforme a equação (3.34), as barras que mais reduzirem a impedância equivalente da barra crítica terão menores fatores de ponderação de alocação. A utilização de um fator multiplicativo (aqui considerado igual à 100)⁴ é feita para garantir que os fatores de ponderação de alocação dos reatores sejam maiores que 1, que é o custo do carregamento da barra cuja carga deve ser maximizada. Isso é necessário, uma vez que o processo de recomposição tem como prioridade o restabelecimento do sistema considerando a maior carga possível.

⁴ O fator multiplicativo escolhido depende da ordem de grandeza das impedâncias de Thevenin do sistema. Esse fator deve garantir que os fatores de ponderação de alocação sejam maiores que 1. Portanto outros fatores poderiam ser utilizados, desde que atendam a esse critério.

3.9 MODELAGEM DO FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

Nesta seção é apresentada, com detalhe, a formulação do FPO implementado.

3.9.1 Função Objetivo

$$Max \left(\sum_{i \in \Omega_b} \alpha_i - \sum_{i \in \Omega_{rb}} C_{QA_i} \cdot QA_i \right) \quad (3.35)$$

Onde:

- Ω_b Conjunto de barras do sistema;
- α_i Fator de carregamento na barra i ;
- Ω_{rb} Conjunto de barras candidatas à alocação de reatores;
- C_{QA_i} fator de ponderação de alocação de reatores na barra i ;
- QA_i Potência reativa alocada na barra i .

3.9.2 Restrições de Balanço de Potência Ativa e Reativa no instante t_0^-

$$PG_i^{(-)} - (1 + \alpha_i)PL_i^{(-)} - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}^{(-)} = 0 \quad (3.36)$$

Onde:

- $PG_i^{(-)}$ Potência ativa gerada na barra i , antes da rejeição de carga (t_0^-);
- α_i Fator de carregamento na barra i ;
- $PL_i^{(-)}$ Carga ativa na barra i , antes da rejeição de carga (t_0^-);
- Ω_i Conjunto de barras adjacentes à barra i ;
- $P_{ij}^{(-)}$ Fluxo de potência ativa no ramo $i-j$, antes da rejeição de carga (t_0^-).

$$QG_i^{(-)} - (1 + \alpha_i)QL_i^{(-)} - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}^{(-)} - QA_i = 0 \quad (3.37)$$

Onde:

$QG_i^{(-)}$ Potência reativa gerada na barra i , antes da rejeição de carga (t_0^-);

$QL_i^{(-)}$ Carga reativa na barra i , antes da rejeição de carga (t_0^-);

$Q_{ij}^{(-)}$ Fluxo de potência reativa no ramo $i-j$, antes da rejeição de carga (t_0^-);

QA_i Potência reativa indutiva alocada na barra i . Esse termo engloba a potência reativa dos reatores de linha e de barra.

3.9.3 Restrições da Modelagem das Máquinas Síncronas no instante t_0^-

$$PG_i^{(-)}X_d''X_q'' - EaV_t \text{sen}(\delta - \theta^{(-)})X_q'' - 0,5V_t^2(X_d'' - X_q'')\text{sen}2(\delta - \theta^{(-)}) = 0 \quad (3.38)$$

$$QG_i^{(-)}X_d''X_q'' - EaV_t \text{cos}(\delta - \theta^{(-)})X_q'' + 0,5V_t^2(X_d'' + X_q'') - 0,5V_t^2(X_d'' - X_q'')\text{cos}2(\delta - \theta^{(-)}) = 0 \quad (3.39)$$

Onde:

X_d'', X_q'' Reatâncias Subtransitórias dos geradores;

Ea Tensão interna do gerador em (t_0^-);

V_t Tensão terminal do gerador em (t_0^-) e (t_0^{TP});

δ Ângulo interno do gerador em (t_0^-);

$\theta^{(-)}$ Ângulo da tensão terminal no instante (t_0^-).

Observa-se que as equações (3.38) e (3.39) permitem o cálculo das variáveis internas das máquinas síncronas antes da rejeição de carga.

3.9.4 Restrições da Curva de Capabilidade no instante t_0^-

- Limite de Capacidade da Máquina Primária:

$$PG_i^{(-)} \leq Pmec_{max} \quad (3.40)$$

- Limite de Corrente da Armadura:

$$\left(PG_i^{(-)}\right)^2 + \left(QG_i^{(-)}\right)^2 \leq (V_t I_{a_{max}})^2 \quad (3.41)$$

- Limite de Excitação Máxima:

$$\left(PG_i^{(-)}\right)^2 + \left(QG_i^{(-)} + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 \leq \left(\frac{V_t E a_{max}}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cos(\delta - \theta^{(-)})\right)^2 \quad (3.42)$$

- Limite de Excitação Mínima:

$$\left(PG_i^{(-)}\right)^2 + \left(QG_i^{(-)} + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 \geq \left(\frac{V_t E a_{min}}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cos(\delta - \theta^{(-)})\right)^2 \quad (3.43)$$

Onde:

X_d, X_q Reatâncias Síncronas dos geradores.

- Limite de Estabilidade Estática :

$$\left(PG_i^{(-)}\right)^2 \left(\frac{V_t^2}{X_d} + QG_i^{(-)}\right) \leq -\left(\frac{V_t^2}{X_q} + QG_i^{(-)}\right)^3 \quad (3.44)$$

3.9.5 Limites Operativos da Tensão no instante t_0^-

$$V \min_i^{(-)} \leq V_i \leq V \max_i^{(-)} \quad (3.45)$$

Onde:

$V \min_i^{(-)}, V \max_i^{(-)}$ Limites de tensão no instante (t_0^-).

3.9.6 Limites do Fator de Carregamento no instante t_0^-

$$\alpha_i \geq 0 \quad (3.46)$$

Uma vez inicializada o valor para a carga⁵, o algoritmo maximiza o valor da carga suprida através da maximização do fator de carregamento α_i . Esse fator é único para todos os instantes considerados. O valor de carga inicializado deve respeitar o valor do fator de potência na faixa estabelecida em [8]. No presente trabalho, considerou-se o fator de potência de 0,95.

As restrições anteriores modelaram o instante pré-rejeição de carga (t_0^-). As demais restrições do FPO desenvolvido são relativas ao novo regime permanente obtido em cada cenário de recomposição após as rejeições de carga em cada barra do corredor. Como foi dito anteriormente, os dois instantes se acoplam através de duas variáveis: alocação de potência reativa (reatores) e tensão de energização (V_t).

3.9.7 Restrições de Balanço de Potência Ativa e Reativa no cenário n no instante t_0^{TP}

$$PG_i^{(rp)n} - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}^{(rp)n} = 0 \quad (3.47)$$

Onde:

$PG_i^{(rp)n}$ Potência ativa gerada na barra i , em regime permanente (t_0^{TP}) de rejeição, no cenário n ;

$P_{ij}^{(rp)n}$ Fluxo de potência ativa no ramo $i-j$, em regime permanente (t_0^{TP}) de rejeição, no cenário n .

$$QG_i^{(rp)n} - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}^{(rp)n} - QA_i = 0 \quad (3.48)$$

Onde:

$QG_i^{(rp)n}$ Potência reativa gerada na barra i , em regime permanente (t_0^{TP}) de rejeição, no cenário n ;

⁵ O valor de inicialização depende do sistema: no presente trabalho a carga foi inicializada utilizando valores na faixa de dezenas de MW, considerando o fator de potência de 0,95.

- $Q_{ij}^{(rp)n}$ Fluxo de potência reativa no ramo $i-j$, em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição, no cenário n ;
- QA_i Potência reativa alocada na barra i . Esse termo engloba a potência reativa dos reatores de linha e de barra. Observe que essa variável é única para todo o processo de otimização.

Observa-se, das equações (3.47) e (3.48), que devido ao fato da carga ser considerada somente no fim do corredor, a parcela de carga não é considerada no balanço de potência ativa e reativa.

3.9.8 Restrições da Modelagem das Máquinas Síncronas no cenário n no instante t_0^{rp}

$$PG_i^{(rp)n} X_d X_q - E^{(rp)n} V_t \text{sen}(\delta^{(rp)n} - \theta^{(rp)n}) X_q - 0,5V_t^2 (X_d - X_q) \text{sen}2(\delta^{(rp)n} - \theta^{(rp)n}) = 0 \quad (3.49)$$

$$QG_i^{(rp)n} X_d X_q - E^{(rp)n} V_t \text{cos}(\delta^{(rp)n} - \theta^{(rp)n}) X_q + 0,5V_t^2 (X_d + X_q) - 0,5V_t^2 (X_d - X_q) \text{cos}2(\delta^{(rp)n} - \theta^{(rp)n}) = 0 \quad (3.50)$$

Onde:

- $E^{(rp)n}$ Tensão interna do gerador em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição, no cenário n ;
- $\delta^{(rp)n}$ Ângulo interno do gerador em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição, no cenário n ;
- $\theta^{(rp)n}$ Ângulo da tensão terminal do gerador em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição no cenário n .

3.9.9 Restrições da Curva de Capabilidade no cenário n no instante t_0^{rp}

Durante as rejeições de carga, as máquinas síncronas operam na região de subexcitação, absorvendo potência reativa. Baseando-se nesse aspecto e visando reduzir o esforço computacional, foram considerados somente três limites: limite de excitação mínima, limite da máquina primária e limite de estabilidade estática. Essa representação dos limites mínimos de geração de reativos é suficiente para a modelagem do problema.

- Limite de Capacidade da Máquina Primária:

$$PG_i^{(rp)n} \leq Pmec_{max} \quad (3.51)$$

- Limite de Excitação Mínima:

$$\left(PG_i^{(rp)n}\right)^2 + \left(QG_i^{(rp)n} + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^2 \geq \left(\frac{V_t E a_{min}}{X_d} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cos(\delta^{(rp)n} - \theta^{(rp)n})\right)^2 \quad (3.52)$$

- Limite de Estabilidade Estática :

$$\left(PG_i^{(rp)n}\right)^2 \left(\frac{V_t^2}{X_d} + QG_i^{(rp)n}\right) \leq -\left(\frac{V_t^2}{X_q} + QG_i^{(rp)n}\right)^3 \quad (3.53)$$

3.9.10 Limites Operativos da Tensão no cenário n no instante t_0^{rp}

$$V \min_i^{(rp)} \leq V_i \leq V \max_i^{(rp)} \quad (3.54)$$

Onde:

$V \min_i^{(rp)}, V \max_i^{(rp)}$ Limites de tensão no instante (t_0^{rp}).

3.10 FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO COMPLETO

Nesta seção é apresentada a formulação matemática do Fluxo de Potência Ótimo implementado, que foi detalhada na seção anterior.

$$Max \left(\sum_{i \in \Omega_b} \alpha_i - \sum_{i \in \Omega_{rb}} C_{QA_i} \cdot QA_i \right) \quad (3.55)$$

Sujeito a:

$$PG_i^{(-)} - (1 + \alpha_i) PL_i^{(-)} - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}^{(-)} = 0 \quad (3.56)$$

$$QG_i^{(-)} - (1 + \alpha_i) QL_i^{(-)} - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}^{(-)} - QA_i = 0 \quad (3.57)$$

$$PG^{(-)}X_d''X_q'' - EV_t \text{sen}(\delta - \theta^{(-)})X_q'' - 0,5V_t^2(X_d'' - X_q'')\text{sen}2(\delta - \theta^{(-)}) = 0 \quad (3.58)$$

$$QG^{(-)}X_d''X_q'' - EV_t \text{cos}(\delta - \theta^{(-)})X_q'' + 0,5V_t^2(X_d'' + X_q'') - 0,5V_t^2(X_d'' - X_q'')\text{cos}2(\delta - \theta^{(-)}) = 0 \quad (3.59)$$

$$\text{Restrições de Capabilidade no instante (-)} \quad (3.60)$$

$$V \min_i^{(-)} \leq V_i \leq V \max_i^{(-)} \quad (3.61)$$

$$\alpha_i \geq 0 \quad (3.62)$$

$$PG_i^{(rp)n} - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}^{(rp)n} = 0 \quad (3.63)$$

$$QG_i^{(rp)n} - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}^{(rp)n} - QA_i = 0 \quad (3.64)$$

$$PG^{(rp)n}X_dX_q - E^{(rp)n}V_t \text{sen}(\delta^{(rp)n} - \theta^{(rp)n})X_q - 0,5V_t^2(X_d - X_q)\text{sen}2(\delta^{(rp)n} - \theta^{(rp)n}) = 0 \quad (3.65)$$

$$QG^{(rp)n}X_dX_q - E^{(rp)n}V_t \text{cos}(\delta^{(rp)n} - \theta^{(rp)n})X_q + 0,5V_t^2(X_d + X_q) - 0,5V_t^2(X_d - X_q)\text{cos}2(\delta^{(rp)n} - \theta^{(rp)n}) = 0 \quad (3.66)$$

$$\text{Restrições de Capabilidade no instante (rp)} \quad (3.67)$$

$$V \min_i^{(rp)} \leq V_i \leq V \max_i^{(rp)} \quad (3.68)$$

Destaca-se que o programa computacional implementado resolve esse problema de otimização sem a necessidade da utilização de Decomposição de Benders.

O problema de otimização a ser resolvido exige baixo esforço computacional, uma vez que na recomposição fluente o sistema possui um número reduzido de barras. A matriz Hessiana, utilizada na solução do problema, é esparsa e possui a estrutura mostrada na Figura 3.7. Nesta figura é possível observar o acoplamento entre os instantes t_0^- e t_0^{rp} .

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{t_0^-, t_0^-} & \mathbf{W}_{t_0^-, t_0^{rp}} \\ \mathbf{W}_{t_0^-, t_0^{rp}} & \mathbf{W}_{t_0^{rp}, t_0^{rp}} \end{bmatrix}$$

Figura 3.7– Estrutura Matriz Hessiana.

3.11 ALGORITMO DE SOLUÇÃO

O fluxograma mostrado na Figura 3.8, apresenta a metodologia proposta.

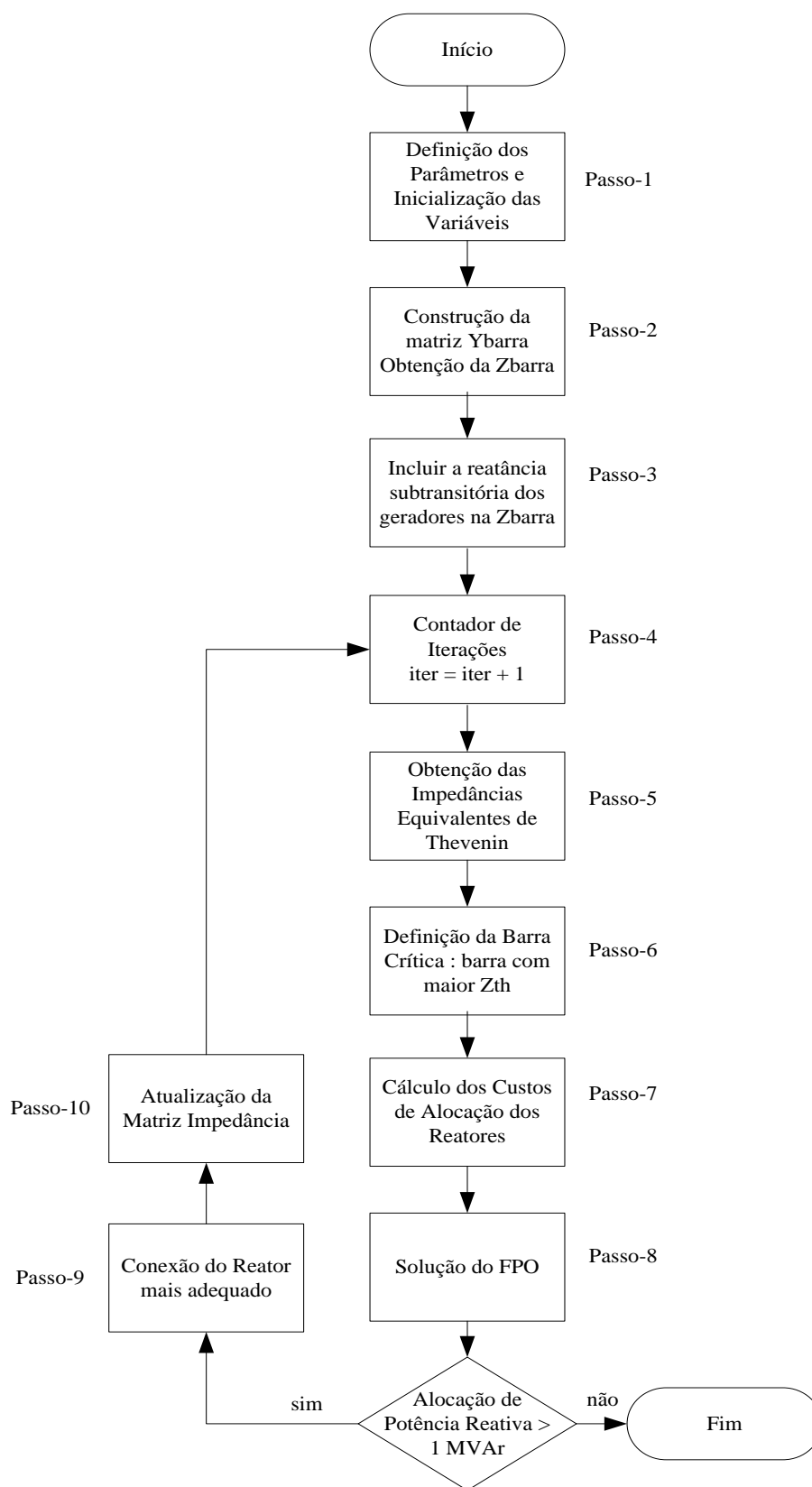


Figura 3.8– Fluxograma da Metodologia Proposta.

Algumas observações devem ser feitas a respeito do fluxograma apresentado na Figura 3.8.

No passo 2, a obtenção da matriz impedância foi feita pela simples inversão da matriz admitância. Apesar desse procedimento não ser viável para sistemas de grande porte, para os sistemas simulados nesse trabalho (corredores com configuração radial e com poucas barras) isso não foi um fator crítico.

A matriz impedância utilizada contém as impedâncias dos geradores, diferente da matriz admitância utilizada na solução do fluxo de potência convencional.

Nos passos 3 e 10, a atualização da matriz impedância é feita conforme a equação (3.13), repetida abaixo:

$$[Z_{NOVO}] = [Z_{ORIG}] - [Z_P]^T \cdot [Z_{EQ}]^{-1} \cdot [Z_P] \quad (3.69)$$

No passo 5, as impedâncias equivalentes correspondem aos elementos diagonais da matriz impedância de barras.

No passo 9, uma consideração muito importante deve ser feita: a cada iteração da metodologia, somente um reator é alocado. A escolha do reator a ser alocado pode ser feita de três maneiras:

- alocação do reator com capacidade nominal de potência reativa mais próxima do total alocado pelo FPO;
- alocação do reator que teve mais potência reativa alocada na iteração;
- alocação do reator que teve potência reativa alocada mais próxima da sua capacidade nominal. A justificativa para esse procedimento é porque quando uma variável de decisão atinge seu limite máximo em um processo de otimização, é porque caso ela tenha seu limite aumentado, a solução melhoraria. No programa implementado isso é possível, porque se considerou cada reator como variável de alocação, diferente de programas que consideram barras candidatas, isto é, um reator por barra.

No presente trabalho adotou-se a terceira opção. O reator alocado em uma iteração é excluído da lista de reatores candidatos à alocação nas iterações posteriores.

Destaca-se que se poderia ter alocado mais reatores por iteração e que a decisão da forma de alocação dos reatores pode influenciar na solução final de reatores alocados.

3.12 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA PROPOSTA

Nesta seção são apresentadas algumas considerações a respeito da metodologia proposta.

Durante a ocorrência de faltas, os equipamentos que contribuem com a corrente são as máquinas elétricas tais como geradores e compensadores [33]. Os reatores são elementos passivos, não contribuindo com a corrente de falta. Entretanto, considerando a dependência da CCC com a configuração da rede, deseja-se analisar o impacto dos reatores na redução da impedância equivalente de barra. O nível de curto circuito durante a recomposição pode ser aumentado com mais intensidade através da conexão de novas unidades geradoras ou compensadores síncronos, conforme [22].

A definição de capacidade de curto circuito, conforme a equação (3.16), mostra que a CCC é proporcional ao quadrado da tensão pré-falta. No presente trabalho, considera-se somente a relação inversa equivalente à impedância de Thevenin da barra. A aplicação de métodos evolutivos, como por exemplo *Colônia de Formigas* [44], pode ser utilizada para a busca de soluções ótimas de boa qualidade que englobem essa dependência com a tensão. Nesse caso, a função objetivo poderia ser minimizar a impedância atualizada de Thevenin de uma determinada barra. O método *Colônia de Formigas* foi utilizado com sucesso na publicação [C] feita durante o curso de mestrado.

A busca de configurações de rede com maior capacidade de curto circuito é realizada para o processo de recomposição, onde se tem um baixo nível de curto circuito. Para sistemas malhados, o nível de curto circuito pode atingir valores elevados, motivo pelo qual deseja-se limitá-lo através de reatores em série com os geradores ou linhas de transmissão [45] e [46].

Deve ser enfatizado que, na ocorrência de faltas na própria barra, uma alta CCC resultará em valores elevados de corrente, sobrecarregando os disjuntores. Uma restrição, que

não foi considerada no presente trabalho, é que os disjuntores não sejam sobrecarregados na presença de faltas na própria barra [31].

O presente trabalho executa o FPO para a determinação do total de potência reativa necessária ao controle de sobretensões em regime permanente pré-rejeição e após a rejeição de carga. Em seguida é realizada a etapa discreta do algoritmo, que corresponde à alocação do reator com sua capacidade nominal de MVar. Na prática, a alocação de reatores é discreta, considerando dois estados: alocado (estado 1) e não alocado (estado 0). A utilização de técnicas de Programação Não Linear Inteira Mista é indicada para a modelagem de um FPO que faça a alocação discreta de reatores.

Ressalta-se que na metodologia proposta, a prioridade para a alocação de reatores no corredor de transmissão é o controle de sobretensões sustentadas. Em outras palavras, a conexão de reatores ocorre somente no caso do FPO alocar um montante significativo de potência reativa (acima de 1 MVar).

3.13 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS DE RECOMPOSIÇÃO

A ferramenta computacional desenvolvida, considera as seguintes diretrizes para a definição dos cenários:

- para um corredor de X barras, serão considerados $(X-1)$ cenários de recomposição fluente;
- inicializa-se um contador de cenários n , que varia de 1 até $(X-1)$;
- para cada cenário, o algoritmo contará $(n + 1)$ barras, partindo da primeira barra do corredor, que é a barra de geração;
- cada cenário de recomposição de $(n + 1)$ barras corresponde à um sistema de ordem $(n + 1)$:
 - $(n + 1)$ equações de balanço de potência ativa e reativa;
 - matrizes admitância (Y_{barra}) e impedância (Z_{barra}) de ordem $(n + 1)$, etc.

Com o objetivo de exemplificar as diretrizes acima descritas, a Figura 3.9 apresenta um sistema genérico de quatro barras. Esse sistema possui três cenários, conforme ilustrado na Figura 3.10.

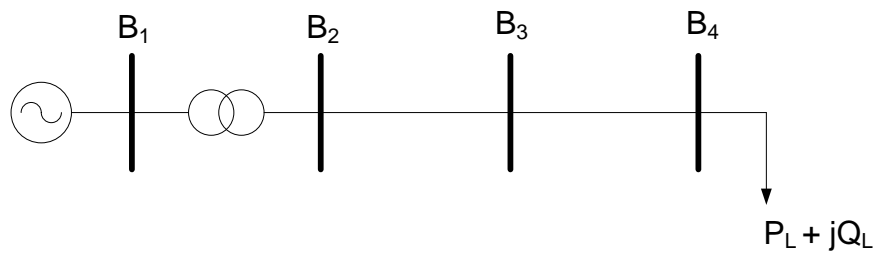


Figura 3.9– Sistema Genérico de Recomposição.

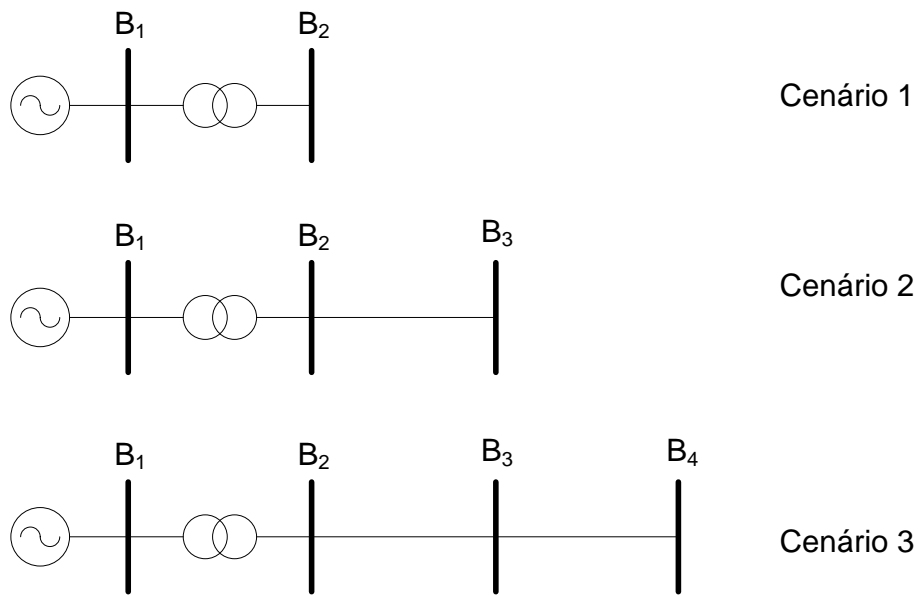


Figura 3.10– Cenários de Recomposição Fluente.

A Figura 3.11 apresenta o esquema de definição dos cenários de recomposição:

- Para o primeiro cenário ($n = 1$) considera-se duas barras ($n + 1$), formando um sistema de ordem 2: $B_1 - B_2$;
- Para o segundo cenário ($n = 2$) são consideradas três barras ($n + 1$), correspondendo à um sistema de ordem 3: $B_1 - B_2 - B_3$;
- O algoritmo continua até que todos os cenários sejam definidos.

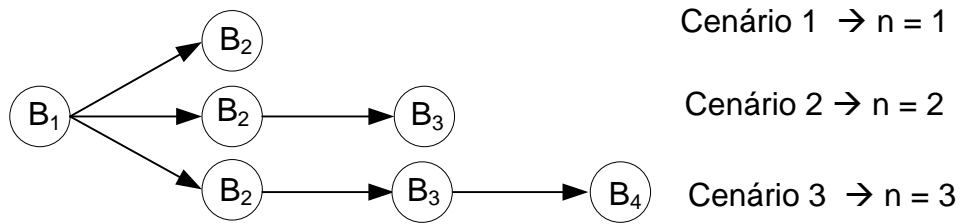


Figura 3.11– Definição dos Cenários de Recomposição Fluente.

3.14 COMPARAÇÃO ENTRE A METODOLOGIA PROPOSTA E A LITERATURA

Essa dissertação tem o objetivo de contribuir com o trabalho apresentado em [6], através da proposição de uma análise de sensibilidade para definição dos fatores de ponderação de alocação de reatores *shunt*. O objetivo da análise de sensibilidade é definir uma configuração de reatores que minimize a impedância equivalente de Thevenin de uma determinada barra do sistema, definida como *Barra Crítica*. Com o objetivo de comparar o presente trabalho com o apresentado em [6], é apresentada a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Comparação com a Literatura

Comparação	Proposta	Literatura [6]
Consideração do instante t_0^- , regime permanente pré-rejeição de carga:	SIM	SIM
Consideração do instante t_0^+ , regime dinâmico imediatamente após a rejeição de carga:	NÃO	SIM
Consideração do instante t_0^{tp} , regime permanente após a rejeição de carga:	SIM	SIM
Uso da Decomposição de Benders para solução do problema de otimização:	NÃO	SIM
Alocação de 1 reator por iteração da metodologia:	SIM	NÃO
Critério de definição dos fatores de ponderação de alocação de reatores:	Baseado no valor de Z_{th}	Valor fixo igual à 5

As variáveis de alocação de potência reativa nas duas metodologias são distintas. Em [6] considera-se como variável a potência reativa alocada em cada barra do sistema. Na presente dissertação, considera-se a potência reativa alocada em cada reator como variável.

Ressalta-se que a metodologia proposta em [6] não considera aspectos relacionados à Capacidade de Curto Circuito.

3.15 EXEMPLO TUTORIAL

A fim de ilustrar a metodologia proposta, essa seção discute alguns aspectos para um exemplo genérico. O objetivo é apresentar os principais conceitos, uma vez que exemplos numéricos são apresentados no capítulo seguinte.

Considere que se deseja fazer a definição da configuração de rede para o sistema da Figura 3.12.

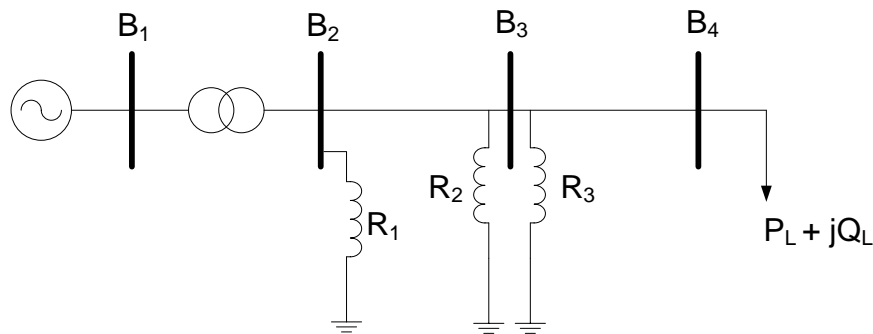


Figura 3.12– Sistema Genérico.

O número de unidades geradoras é pré-fixado (n_{unidade}) e deseja-se:

- Ajustar a tensão de energização (V_t) na barra B_1 ;
- Maximizar a carga na barra B_4 ;
- Definir os reatores a serem alocados: R_1 , R_2 e/ou R_3 .

Passo 1: Inicializar variáveis e parâmetros. Contador de iterações iter = 0.

Passo 2: Construir Matriz Admitância e obter a matriz Impedância de Barras:

Constrói-se a matriz Y_{barra} e em seguida obtém-se a Z_{barra} .

$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} \end{bmatrix}$$

$$Z_{barra} = [Y_{barra}]^{-1} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{14} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{24} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} & z_{34} \\ z_{41} & z_{42} & z_{43} & z_{44} \end{bmatrix}$$

Passo 3: Incluir a reatância dos geradores na matriz Z_{barra} :

Nos estudos de curto circuito, a reatância subtransitória de eixo direto dos geradores é incluída nos elementos diagonais, como um reator *shunt*, conforme [12] e [47] :

$$Z_b = j \frac{X_d''}{n_{unidade}}$$

A divisão pelo número de unidades é devido à associação paralela dos geradores.

Calcula-se a impedância equivalente $[Z_{EQ}]$, considerando a conexão do gerador na barra B_1 :

$$[Z_{EQ}] = [Z_{11} + Z_b]$$

Uma vez que a conexão ocorre na barra B_1 , considera-se os seguintes vetores:

$$[Z_P] = [Z_Q]^T = [z_{11} \quad z_{12} \quad z_{13} \quad z_{14}]$$

A nova matriz impedância será dada por:

$$[Z_{NOVO}] = [Z_{ORIG}] - [Z_Q] \cdot [Z_{EQ}]^{-1} \cdot [Z_P]$$

Onde $[Z_{ORIG}]$ é a matriz obtida através da inversão da matriz admitância.

Passo 4: Incrementar contador de iterações: $iter = iter + 1$.

Passo 5: Obtenção das impedâncias equivalentes de Thevenin:

$$Z_{th} = \begin{bmatrix} z_{11} \\ z_{22} \\ z_{33} \\ z_{44} \end{bmatrix}$$

Passo 6: Definição da barra crítica:

A barra crítica é aquela com maior impedância equivalente de Thevenin. Para este exemplo, considera-se que a última barra do corredor foi a que apresentou a maior impedância de Thevenin na situação em que nenhum reator foi alocado. Assim, a Figura 3.13 apresenta a barra crítica em destaque (barra B₄).

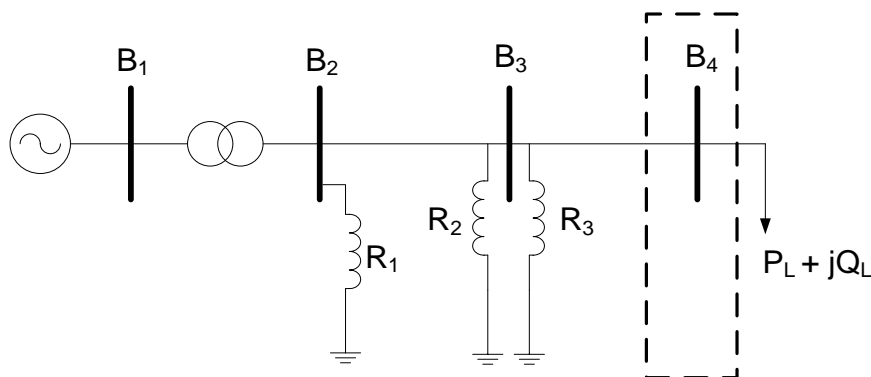


Figura 3.13– Sistema Genérico com Barra Crítica destacada.

Barra Crítica = Barra B₄. Portanto $K = 4$.

Passo 7: Cálculo dos fatores de ponderação de alocação de reatores:

As barras candidatas a alocação de reatores formam o conjunto:

$$N = [2 \ 3]$$

Em seguida calcula-se a impedância atualizada de Thevenin para a barra 4 considerando as possibilidades de conexão. Calcula-se o índice de sensibilidade e o fator de ponderação de alocação de cada reator. Os fatores de ponderação de alocação de reatores conectados em uma mesma barra serão iguais caso as capacidades nominais sejam iguais.

A reatância do reator é calculada considerando as condições nominais.

$$Z_b = [j b_{sh}^{nominal}]^{-1}$$

Tabela 3.2 Cálculo do Fator de Ponderação de Alocação

Reator / Barra	Impedância atualizada	Índice de Sensibilidade	Fator de Ponderação de Alocação
1 / B ₂	$Z_{44}^{NOVO} = Z_{44}^{ORIG} - \frac{Z_{42} \cdot Z_{24}}{Z_{22} + Z_{b1}}$	$ Z_{44}^{NOVO} $	$C_{QA1} = 100 Z_{44}^{NOVO} $
2 / B ₃	$Z_{44}^{NOVO} = Z_{44}^{ORIG} - \frac{Z_{43} \cdot Z_{34}}{Z_{33} + Z_{b2}}$	$ Z_{44}^{NOVO} $	$C_{QA2} = 100 Z_{44}^{NOVO} $
3 / B ₃	$Z_{44}^{NOVO} = Z_{44}^{ORIG} - \frac{Z_{43} \cdot Z_{34}}{Z_{33} + Z_{b3}}$	$ Z_{44}^{NOVO} $	$C_{QA3} = 100 Z_{44}^{NOVO} $

Passo 8: Solução do Fluxo de Potência Ótimo

A solução do FPO deverá ser viável para cada uma das configurações a seguir:

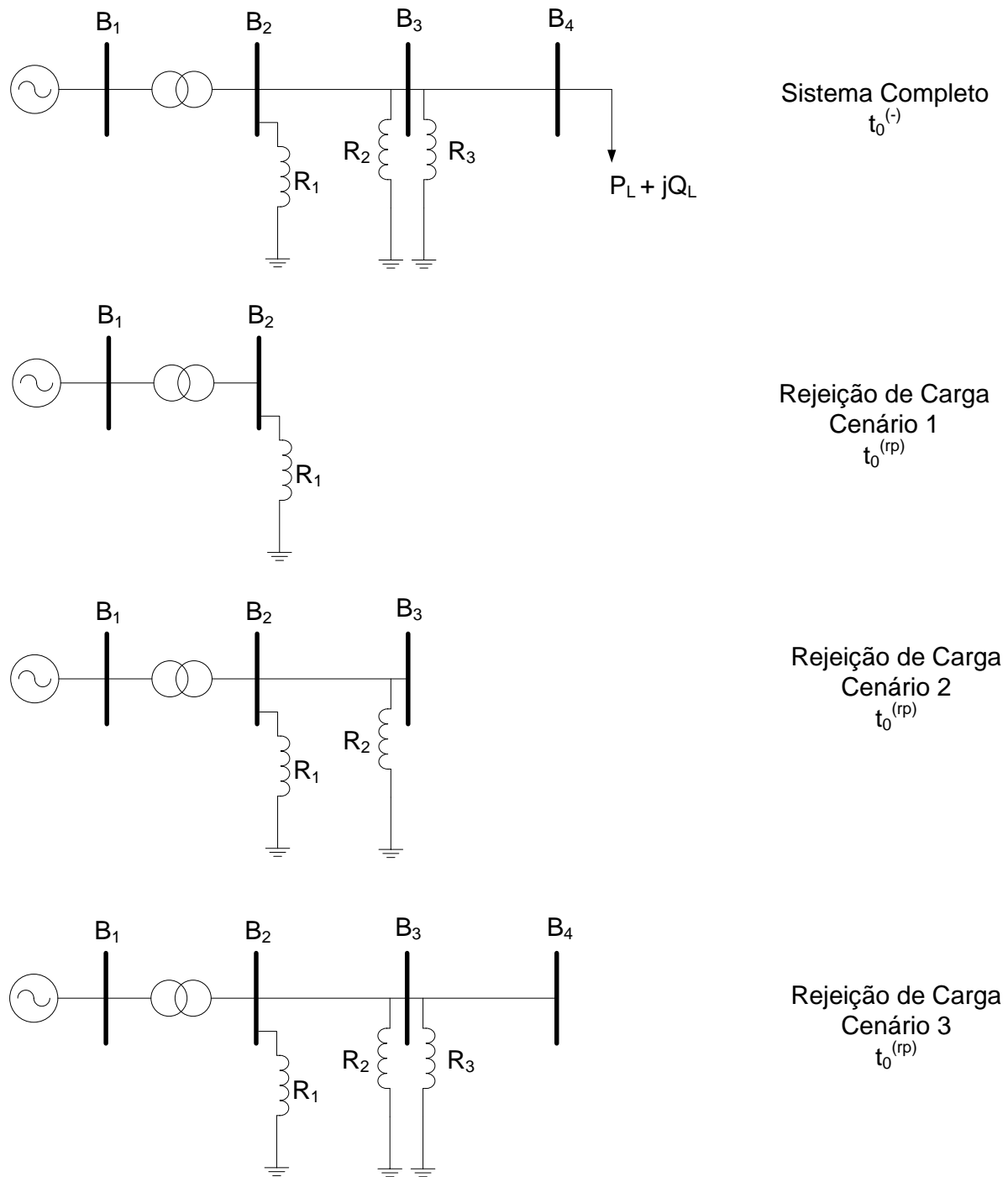


Figura 3.14– Cenários Simulados.

Observe que o FPO implementado faz distinção entre os reatores de barra e de linha para as simulações de rejeição de carga. Assim o reator R_3 não deve ser considerado na simulação de rejeição de carga na barra B_3 . Esse reator entra em operação somente com a recomposição da linha B_3 - B_4 .

O Fluxo de Potência Ótimo possui a seguinte função objetivo:

$$\max \left(\alpha - (C_{QA1} \cdot QA_1 + C_{QA2} \cdot QA_2 + C_{QA3} \cdot QA_3) \right)$$

Onde o fator de carregamento está associado à barra B₄.

Após a execução do FPO avalia-se o total de alocação de potência reativa. Caso o total seja menor que 1 MVar, a metodologia alcança sua convergência e fornece a configuração de rede:

- Configuração de reatores;
- Carga Máxima;
- Tensão de Energização (V_i).

Supondo que a alocação total seja superior à tolerância, o algoritmo prossegue com a alocação de reatores.

Passo 9: Conexão do reator mais adequado

Cada reator vai alocar uma quantidade de potência reativa. O reator que alocar a quantidade mais próxima da sua quantidade nominal será alocado.

Suponhamos que o reator R₂ seja escolhido para a alocação.

Passo 10: Atualização da matriz impedância

Esse passo corresponde a atualização da matriz impedância conforme foi feito no passo 3. Agora a alocação será feita na barra B₃.

Após a atualização da matriz impedância, deve-se retornar ao passo 4. A metodologia será executada até a obtenção da convergência.

Devido à característica radial do problema, em geral a barra crítica será a barra final do corredor durante a execução da metodologia. Entretanto, cada sistema deverá ser analisado separadamente.

3.16 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a metodologia proposta para a recomposição fluente de corredores radiais de transmissão, baseada em fluxo de potência ótimo. Como resultado, a metodologia apresenta: a configuração mínima de reatores, a máxima carga suprida no final do corredor e a tensão de energização otimizada. O Fluxo de Potência Ótimo implementado considera a rede em regime permanente para os instantes pré e pós rejeição de carga. Todos os cenários de recomposição são modelados em um único problema de otimização, que é resolvido sem a necessidade da decomposição de Benders.

Apresentou-se também algumas definições a respeito da matriz impedância de barra e capacidade de curto circuito. Em seguida, a modelagem de cada componente da rede foi descrita.

A contribuição do presente trabalho está na proposta de um índice de sensibilidade baseado na impedância equivalente de Thevenin atualizada para cada conexão de reator no corredor de transmissão. Os fatores de ponderação de alocação de reatores são baseados nesse índice de sensibilidade, de forma que os reatores que apresentarem menor impedância para uma determinada barra terão menores fatores de ponderação de alocação .

Algumas considerações à respeito da metodologia proposta foram feitas, tendo em vista a dificuldade de se ponderar a capacidade de curto circuito em sistemas de potência.

Por fim, apresentou-se um exemplo tutorial com os principais aspectos da metodologia proposta proporcionando um entendimento mais aprofundado do método. Destacou-se que a configuração de reatores está limitada pelo controle de sobretensões em cada cenário de recomposição e a definição da carga tomada no final do corredor é limitada pelos reatores conectados.

4 Estudo de Caso

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação da metodologia proposta em corredores de recomposição do Sistema Interligado Nacional. Os dados elétricos dos sistemas simulados são apresentados no Apêndice B. As simulações foram realizadas em um computador Intel Core 2 Duo com 2,20 GHz e 3 GB de RAM e sistema operacional Windows 7 64 bits. Para os sistemas simulados o limite de tensão é de 0,9 a 1,1 pu.

4.2 ÁREA RIO DE JANEIRO

Esse sistema é apresentado em [4] e [14], e seu diagrama unifilar é mostrado na Figura 4.1. Os reatores para controle de sobretensões estão indicados no diagrama e para esse sistema, cinco do total de oito unidades geradoras são utilizadas para o processo de recomposição.

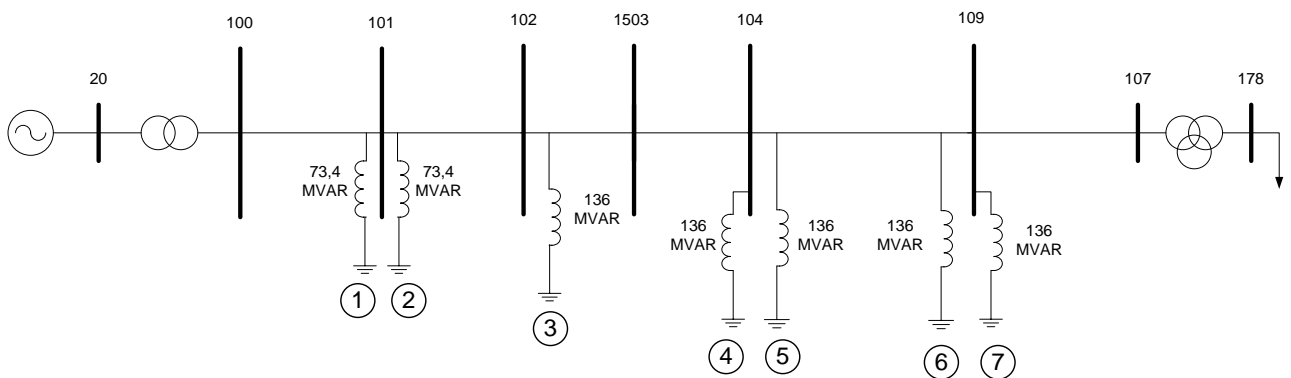


Figura 4.1– Área Rio de Janeiro.

Os reatores estão numerados e essa numeração será utilizada para a apresentação de resultados.

Para esse sistema, são simulados 8 cenários de rejeição de carga mostrados na Figura 4.2 a seguir:

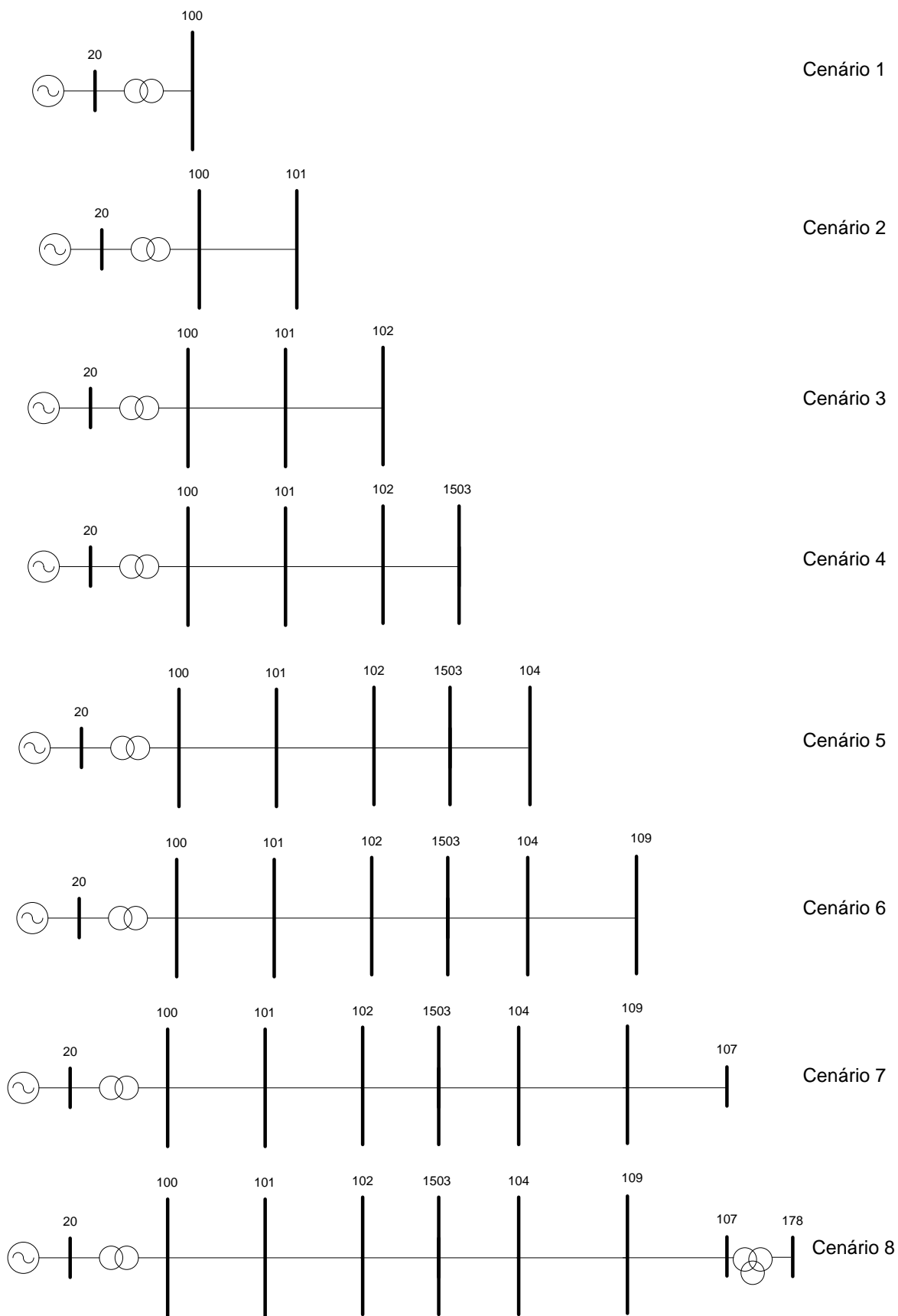


Figura 4.2– Cenários de Rejeição de Carga para a Área Rio de Janeiro.

Para esse sistema serão feitas cinco simulações:

- Simulação 1: execução da metodologia considerando a tensão de energização de 0,925 pu proposta em [6];
- Simulação 2: execução da metodologia considerando a tensão de energização como variável de otimização;
- Simulação 3: execução da metodologia considerando todos os reatores como de barra. Nesse caso a tensão de energização será considerada como variável de otimização.
- Simulação 4: execução da metodologia considerando a tensão de energização como variável de otimização e definindo a barra de geração (barra 20) como crítica.
- Simulação 5: utiliza-se a metodologia descrita no Apêndice C. Essa metodologia busca a redução da impedância equivalente sem a consideração dos cenários de recomposição. Essa é uma estratégia otimista sem aplicação prática. No entanto, a simulação mostra o desempenho do programa.

A referência [6] corresponde à metodologia proposta pelo NUPESP/UFJF.

4.2.1 Simulação 1

Para este sistema, sem a alocação de nenhum reator, identifica-se a barra 178 como barra crítica, tendo em vista que ela apresenta o maior valor de impedância de Thevenin. A Figura 4.3 apresenta os valores da impedância de Thevenin antes da inserção de reatores para todas as barras do sistema. Observa-se que o valor da impedância equivalente aumenta conforme a barra vai se distanciando eletricamente da barra de geração.

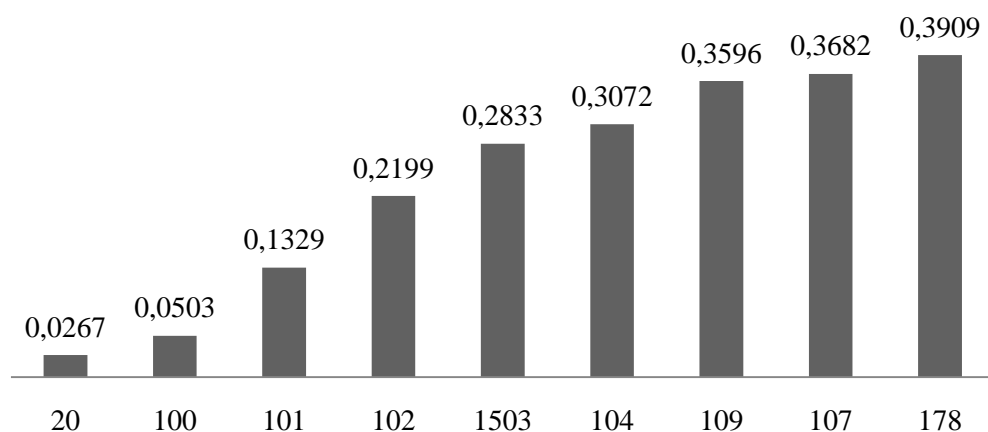


Figura 4.3– Valores de Impedância de Barras Antes da Conexão de Reatores (pu).

A utilização do algoritmo proposto resulta em 6 iterações e os reatores alocados estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Reatores alocados – Área Rio de Janeiro

Iteração	1	2	3	4	5	6
Reator	3	7	6	1	4	--
Barra	102	109	109	101	104	--
Reator de:	Linha	Barra	Linha	Linha	Barra	--

A Tabela 4.2 apresenta a alocação de potência reativa pelo FPO. Na iteração 1, considerando o sistema sem reatores, o FPO aloca um total de 556,20 MVar e conecta o reator 3 de 136 MVar na linha 102-1503. Com a alocação desse reator, observa-se que a potência alocada é reduzida para 420,20 MVar na iteração 2. Na sexta iteração ocorre a convergência do algoritmo, uma vez que a alocação de potência reativa é inferior à 1 MVar.

Tabela 4.2 Potência Reativa Alocada pelo FPO – Área Rio de Janeiro

Iteração	1	2	3	4	5	6
(MVar)	556,20	420,20	284,20	148,20	75,59	< 1

A fim de se avaliar a evolução do algoritmo, apresenta-se a seguir algumas tabelas identificando, por exemplo, a trajetória das impedâncias equivalentes, bem como de outros parâmetros de interesse.

Conforme pode ser visualizado na Tabela 4.3, a barra 178 se manteve como barra crítica. Nessa tabela é apresentada a evolução das impedâncias equivalentes das barras a cada iteração da metodologia proposta. Observa-se que na iteração 1, após a conexão do reator 3 na barra 102, o valor da impedância da barra crítica é reduzido de 0,3909 pu para 0,3216 pu. Na iteração 6 não ocorre alocação de reatores, motivo pelo qual a impedância não é modificada.

Tabela 4.3 Evolução das Impedâncias Equivalentes (pu) – Área Rio de Janeiro

Barra	Iteração				
	1	2	3	4	5
20	0,0238	0,0216	0,0204	0,0200	0,0192
100	0,0431	0,0376	0,0346	0,0335	0,0316
101	0,1065	0,0865	0,0753	0,0713	0,0644
102	0,1695	0,1312	0,1098	0,1054	0,0918
1503	0,2232	0,1676	0,1364	0,1317	0,1118
104	0,2437	0,1808	0,1456	0,1409	0,1183
109	0,2905	0,2084	0,1625	0,1580	0,1364
107	0,2988	0,2163	0,1701	0,1656	0,1439
178	0,3216	0,2392	0,1930	0,1885	0,1668

A Tabela 4.4 mostra a evolução dos fatores de ponderação de alocação de reatores para Área Rio de Janeiro onde o valor sombreado corresponde ao reator que foi escolhido para ser ligado na respectiva iteração. Observa-se que a alocação de um determinado reator não necessariamente será realizada por ele apresentar menor fator de ponderação de alocação.

Por exemplo, na iteração 1 o reator 3 não apresenta menor fator de ponderação de alocação e foi alocado.

Tabela 4.4 Evolução dos Fatores de Ponderação de Alocação – Área Rio de Janeiro

Reator (Barra)	Iteração					
	1	2	3	4	5	6
1 (101)	36,77	30,75	23,18	18,85	--	--
2 (101)	36,77	30,75	23,18	18,85	18,44	16,39
3 (102)	32,16	--	--	--	--	--
4 (104)	29,23	25,54	20,27	16,99	16,68	--
5 (104)	29,23	25,54	20,27	16,99	16,68	15,10
6 (109)	27,28	23,92	19,30	--	--	--
7 (109)	27,28	23,92	--	--	--	--

O fato de um reator com maior fator de ponderação de alocação poder ser alocado se deve à forma que o algoritmo faz a escolha do reator a ser alocado a cada iteração. A Tabela 4.5 apresenta o total de potência reativa alocada em cada reator em todas as iterações. Na primeira iteração, pode-se observar que três reatores aparentemente atingiram suas capacidades nominais: 3, 6 e 7. Na verdade esses valores se aproximaram das capacidades nominais e foram arredondados, e devido a questões numéricas, o algoritmo optou pela alocação do reator 3. Na iteração 4, observa-se que a diferença entre a capacidade nominal e o total alocado no reator 1 é menor do que em outros reatores, resultando a alocação deste.

Tabela 4.5 Potência Reativa Alocada nos Reatores – Área Rio de Janeiro (MVar)

Reator (Barra)	Iteração						Nominal
	1	2	3	4	5	6	
1 (101)	65,13	24,77	30,94	47,44	--	--	73,4
2 (101)	6,80	47,16	40,99	24,49	0	0	73,4
3 (102)	136	--	--	--	--	--	136
4 (104)	73,28	69,54	71,86	72,60	71,82	--	136
5 (104)	2,99	6,73	4,42	3,67	3,78	0	136
6 (109)	136	136	136	--	--	--	136
7 (109)	136	136	--	--	--	--	136

A Tabela 4.6 apresenta a evolução da impedância equivalente da barra crítica 178, onde é possível avaliar uma redução de aproximadamente 57,3 % na impedância após a

conexão dos reatores. Uma característica importante da metodologia proposta deve ser ressaltada: a cada iteração, a impedância da barra crítica após a conexão de um reator, será proporcional ao fator de ponderação de alocação desse reator. Por exemplo, na iteração 1, a impedância é atualizada para 0,3216 pu, valor proporcional ao fator de ponderação de alocação do reator alocado 3, apresentado na Tabela 4.4, que é de 32,16.

Tabela 4.6 Evolução da Impedância Equivalente da Barra Crítica (pu) – Área Rio de Janeiro

(Barra)	Iteração					
	0	1	2	3	4	5
178	0,3909	0,3216	0,2392	0,1930	0,1885	0,1668

Os valores das tensões pré-rejeição de carga são apresentados na Tabela 4.7. Já a Tabela 4.8 apresenta os valores ajustados para os geradores após a convergência.

Tabela 4.7 Instante Pré-Rejeição – Área Rio de Janeiro

Barra	Tensão (pu)
20	0,925
100	0,949
101	0,981
102	0,976
1503	0,965
104	0,952
109	0,913
107	0,911
178	0,900

Tabela 4.8 Geração: Instante Pré-Rejeição – Área Rio de Janeiro

Total de Geradores	E_a (pu)	δ (°)	$PG^{(i)}$ (MW)	$QG^{(i)}$ (MVar)
5	0,884	1,459	35,249	-42,230

Uma comparação com o resultado apresentado em [6] é mostrada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 Comparação dos Reatores Alocados– Área Rio de Janeiro

Proposto	Referencia [6]
Reator 1 de 73,4 MVar na barra 101 (Linha)	Reator 1 de 73,4 MVar na barra 101 (Linha)
Reator 3 de 136 MVar na barra 102 (Linha)	Reator 3 de 136 MVar na barra 102 (Linha)
Reator 4 de 136 MVar na barra 104 (Barra)	Reator 5 de 136 MVar na barra 104 (Linha)
Reator 6 de 136 MVar na barra 109 (Linha)	Reator 6 de 136 MVar na barra 109 (Linha)
Reator 7 de 136 MVar na barra 109 (Barra)	Reator 7 de 136 MVar na barra 109 (Barra)

Observa-se que a metodologia proposta divergiu da metodologia apresentada em [6], como destacado na tabela anterior. Uma justificativa para essa divergência é que a metodologia proposta é sensível ao local da alocação de reatores devido à inclusão de mínima impedância equivalente na função objetivo. Além disso, a referencia [6] considera o regime dinâmico (instante imediatamente após à rejeição de carga), caracterizado pela elevação instantânea das tensões.

Ambas as metodologias maximizam a carga no valor de $173,6 + j 39,8$ MVA. Apesar da divergência do tipo de reator alocado na barra 104, este aspecto não influencia no valor da impedância equivalente de Thevenin vista pelas barras do sistema.

Uma vez que a configuração de reatores obtida foi diferente da obtida na literatura, apresenta-se a tensão em regime permanente de rejeição para cada cenário. Esses valores são variáveis de saída do programa implementado e foram validados através do programa ANAREDE (versão acadêmica). Em todos os cenários, os limites de tensão (0,9 a 1,1 pu) foram satisfeitos, veja a Tabela 4.10.

Tabela 4.10 Tensões nos Cenários de Rejeição – Área Rio de Janeiro

Cenários	Barras								
	20	100	101	102	1503	104	109	107	178
1	0,925	0,925	--	--	--	--	--	--	--
2	0,925	0,941	0,951	--	--	--	--	--	--
3	0,925	0,964	1,035	1,062	--	--	--	--	--
4	0,925	0,968	1,047	1,082	1,099	--	--	--	--
5	0,925	0,959	1,017	1,034	1,037	1,028	--	--	--
6	0,925	0,952	0,992	0,993	0,984	0,971	0,933	--	--
7	0,925	0,960	1,020	1,038	1,043	1,035	1,011	1,014	--
8	0,925	0,960	1,020	1,038	1,043	1,034	1,011	1,014	1,014

4.2.2 Simulação 2

A simulação 2 consiste na otimização da tensão de geração, diferente do caso anterior onde ela foi fixada. Executando-se o algoritmo proposto, após seis iterações são obtidos os seguintes resultados:

Tabela 4.11 Área Rio de Janeiro – Simulação 2

Tensão de Geração (pu)	0,926
Carga (MVA)	174,0 + j 39,9

Tabela 4.12 Reatores Alocados: Área Rio de Janeiro – Simulação 2

Iteração	1	2	3	4	5	6
Reator	3	7	6	4	1	--
Barra	102	109	109	104	101	--
Reator de:	Linha	Barra	Linha	Barra	Linha	--

Destaca-se que a barra 178 manteve-se como crítica e, portanto, durante todo o processo iterativo buscou-se reduzir a impedância equivalente da referida barra.

Para essa simulação, a evolução da tensão de geração é mostrada na Figura 4.4. Nas primeiras 5 iterações em que ocorre alocação de potência reativa e conseqüentemente de reatores, a metodologia ajusta a tensão no mínimo valor possível com o objetivo de reduzir as sobretensões e a alocação de potência reativa. Na sexta iteração, a tensão é ajustada em um valor mais alto, permitindo a maximização da carga tomada.

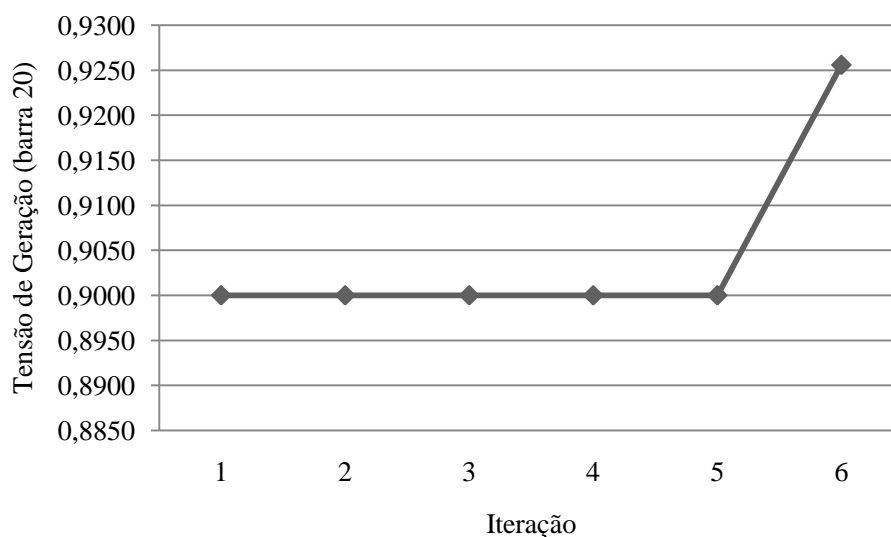


Figura 4.4– Evolução da Tensão de Geração – Área Rio de Janeiro.

As simulações 1 e 2 apresentaram a mesma configuração de reatores, diferindo somente na ordem em que os reatores foram conectados durante o processo iterativo. Isso

acontece porque, uma vez que a tensão de geração passa a variar, a alocação de potência reativa em cada reator também varia.

Com a mesma configuração de reatores da simulação 1, a impedância equivalente das simulações 1 e 2 é igual.

Observa-se que a tensão de geração foi aproximadamente a mesma apresentada em [6], que mostra a eficácia da metodologia proposta, uma vez que a configuração de reatores e carga máxima também foram iguais. As tensões em regime permanente de rejeição em cada cenário satisfizeram os limites impostos.

4.2.3 Simulação 3

Essa simulação apresenta uma situação mais flexível para a metodologia, na qual considera-se todos os reatores como Reatores de Barra. Dessa forma, aumenta-se o grau de liberdade para a alocação de reatores. Além disso, a tensão da barra de geração é considerada como variável de otimização.

Com a execução de sete iterações, a configuração de reatores obtida está apresentada na Tabela 4.13. Observa-se que nessa simulação, ocorre também a alocação do reator 2 na barra 101, além dos já alocados na simulação anterior.

Tabela 4.13 Reatores Alocados – Simulação 3 – Área Rio de Janeiro

Iteração	1	2	3	4	5	6	7
Reator	3	6	7	2	1	4	--
Barra	102	109	109	101	101	104	--

Durante as iterações a barra final do corredor (barra 178) foi a que apresentou a maior impedância de Thevenin, sendo a barra crítica, conforme já discutido nas simulações anteriores.

A alocação de potência reativa pelo FPO em cada iteração é apresentada na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 Potência Reativa Alocada pelo FPO – Simulação 3 – Área Rio de Janeiro

Iteração	1	2	3	4	5	6	7
(MVar)	492,01	356,01	220,01	84,01	46,13	15,75	< 1

A Figura 4.5 apresenta a evolução da impedância equivalente de cada barra em cada iteração. A iteração 0 corresponde ao sistema sem a conexão de reatores e na iteração 7 não ocorre alocação de reatores, motivo pelo qual a impedância equivalente não é modificada. Observa-se a redução da impedância equivalente das barras após a conexão dos reatores.

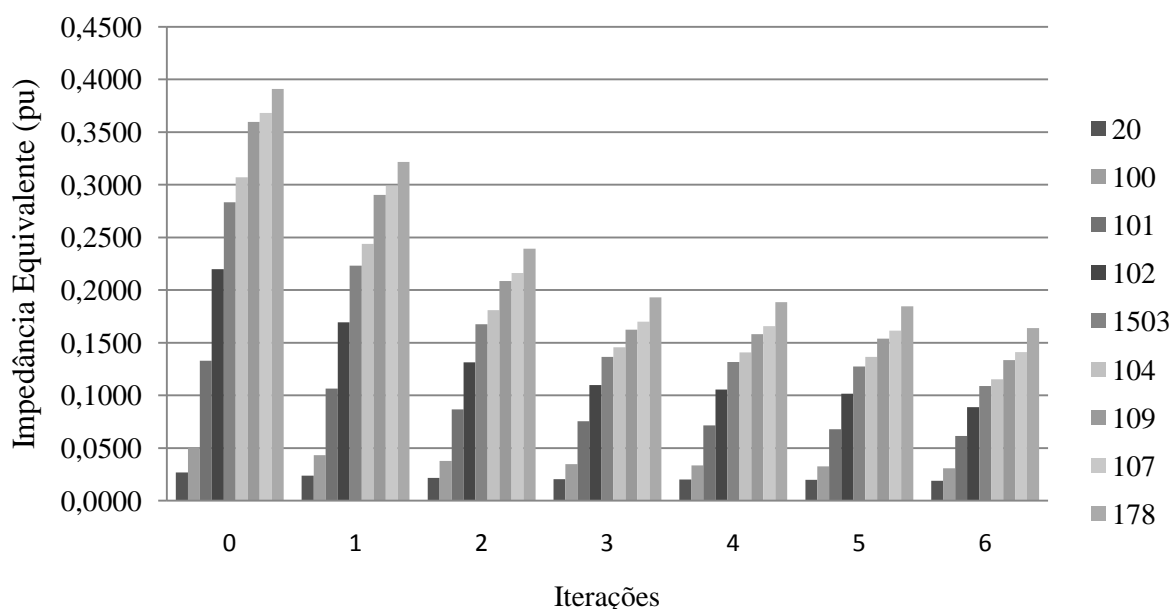


Figura 4.5– Evolução das Impedâncias Equivalentes de Barra.

Com a alocação adicional do reator 2 na barra 101, obteve-se uma impedância equivalente para a barra 178 menor do que as simulações anteriores, conforme é possível observar na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 Evolução da Impedância Equivalente da Barra Crítica (pu) – Simulação 3

(Barra)	Iteração						
	0	1	2	3	4	5	6
178	0,3909	0,3216	0,2392	0,1930	0,1885	0,1844	0,1639

Uma característica importante da metodologia proposta é a forma que se escolhe o reator para alocação em cada iteração. Como foi discutido no Capítulo 3, o reator escolhido para ser conectado é aquele cujo total de potência reativa alocada em uma determinada iteração seja o mais próximo da sua capacidade nominal. Para melhor ilustrar essa característica, considere a Tabela 4.16.

Tabela 4.16 Potência Reativa Alocada nos Reatores para Área Rio de Janeiro (MVar) – Simulação 3

Reator (Barra)	Iteração							Nominal
	1	2	3	4	5	6	7	
1 (101)	1,92	3,74	3,87	3,87	0	--	--	73,4
2 (101)	5,82	4,00	3,87	3,87	--	--	--	73,4
3 (102)	136	--	--	--	--	--	--	136
4 (104)	30,49	36,87	32,67	37,87	22,87	9,80	--	136
5 (104)	45,78	39,40	43,60	38,4016	23,25	5,96	0	136
6 (109)	136	136	--	--	--	--	--	136
7 (109)	136	136	136	--	--	--	--	136

A Tabela 4.16 mostra que na quinta iteração ocorre a alocação do reator 1, apesar de uma parcela desprezível de potência reativa ser alocado nele. Isso ocorre porque, ao se buscar conectar reatores com potência reativa alocada próxima da nominal, reatores de menores capacidades podem ser alocados. Isso é melhor ilustrado na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 Escolha do Reator a ser Alocado – Simulação 3

Reator	Capacidade Nominal	Alocação	Capacidade Nominal – Alocação
1	73,4	0	73,4
4	136	22,87	113,13
5	136	23,25	112,75

A presente simulação permite concluir que a alocação de mais reatores reduz a impedância equivalente vista pelas barras. Entretanto, a função objetivo contém um termo que minimiza o número de reatores alocados, o que limita a redução da impedância equivalente.

Com o aumento de reatores alocados, a metodologia ajusta a tensão de geração em um valor mais elevado, permitindo um ligeiro aumento da carga tomada, conforme consta na Tabela 4.18. Deve-se destacar que nessa simulação todos os reatores estão sendo considerados do tipo Reator de Barra, para melhor avaliar a flexibilidade da metodologia.

Tabela 4.18 Comparativo – Área Rio de Janeiro

	Simulações 1 e 2	Simulação 3
Tensão de Geração (pu)	0,926	0,954
Carga (MVA)	174,0 + j 39,9	176,5 + j 40,5
Total de Reatores	5	6
Impedância Equivalente (barra 178) (pu)	0,1668	0,1639

Os resultados das tensões pré-rejeição de carga são apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 Instante Pré-Rejeição na Área Rio de Janeiro – Simulação 3

Barra	Tensão (pu)
20	0,954
100	0,971
101	0,982
102	0,977
1503	0,966
104	0,952
109	0,914
107	0,911
178	0,900

Os valores de potências geradas e das variáveis internas das máquinas síncronas são mostrados Tabela 4.20.

Tabela 4.20 Geração: Instante Pré-Rejeição na Área Rio de Janeiro – Simulação 3

Total de Geradores	E_a (pu)	δ (°)	$PG^{(-)}$ (MW)	$QG^{(-)}$ (MVar)
5	0,926	1,381	35,87	-30,020

Como análise adicional, apresenta-se a evolução da tensão de geração ajustada pela metodologia, Figura 4.6. Em todas as iterações nas quais ocorrem alocações significativas de potência reativa pelo FPO, a tensão de geração é fixada em seu valor mínimo (0,9 pu) com o objetivo de limitar as sobretensões e reduzir a alocação de potência. Após a alocação de todos os reatores, a metodologia otimiza o valor da tensão de geração para maximizar a carga.

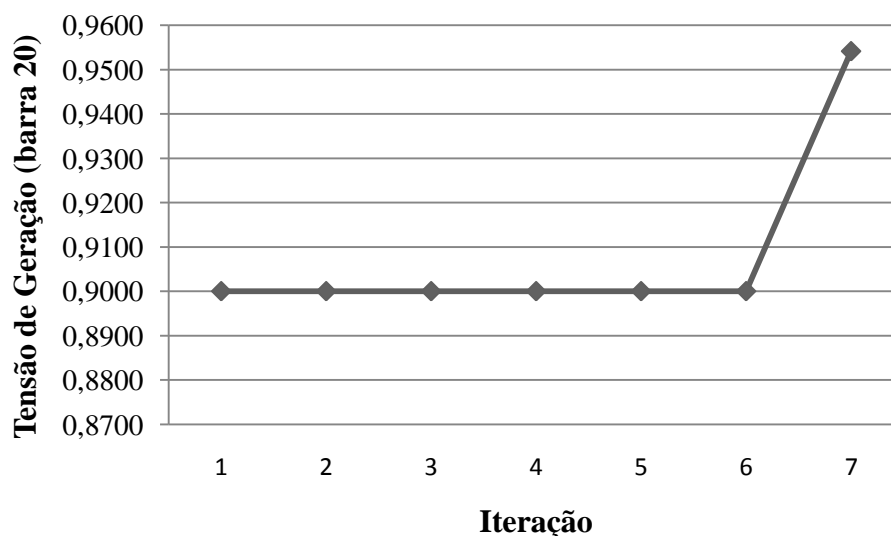


Figura 4.6– Evolução do Ajuste da Tensão de Geração – Área Rio de Janeiro – Simulação 3.

Os valores de tensão em regime permanente em cada cenário de rejeição de carga são apresentados na Tabela 4.21. Observa-se que os limites de tensão foram satisfeitos.

Tabela 4.21 Tensões nos Cenários de Rejeição – Área Rio de Janeiro

Cenários	Barras								
	20	100	101	102	1503	104	109	107	178
1	0,954	0,954	--	--	--	--	--	--	--
2	0,954	0,963	0,954	--	--	--	--	--	--
3	0,954	0,970	0,981	0,973	--	--	--	--	--
4	0,954	0,989	1,048	1,083	1,100	--	--	--	--
5	0,954	0,981	1,019	1,035	1,038	1,030	--	--	--
6	0,954	0,974	0,994	0,995	0,986	0,973	0,935	--	--
7	0,954	0,982	1,012	1,040	1,044	1,036	1,013	1,015	--
8	0,954	0,982	1,012	1,040	1,044	1,036	1,013	1,015	1,015

4.2.4 Simulação 4

Essa simulação considera a tensão de energização como variável de otimização, como foi feito na simulação 2. Entretanto, agora busca-se reduzir a impedância de Thevenin da barra de geração. Portanto a barra 20 será fixada como crítica durante a execução do programa computacional desenvolvido. Os reatores de barra e de linha são tratados de forma distinta, diferentemente da simulação anterior. Esta simulação é importante, pois na fase de energização real do corredor, ter-se-á as barras de energização com maior nível de CC.

O algoritmo executou sete iterações e convergiu para a mesma configuração obtida com a simulação 3 (caso em que todos os reatores são considerados como de barra), motivo pelo qual não serão apresentados os resultados. Entretanto, observa-se a sensibilidade da metodologia com a barra crítica. Na simulação 4 os reatores foram considerados como na prática, podendo ser de linha ou de barra. Essa estratégia foi considerada nas simulações 1 e 2,

nas quais ocorreu uma alocação de reator a menos, uma vez que a barra final (178) do corredor foi tratada como crítica. Uma análise é apresentada na Tabela 4.22:

Tabela 4.22 – Comparação entre a Impedância Equivalente da Barra 178

Simulação	1	2	3	4
Z_{eq}^{178} (pu)	0,1668	0,1668	0,1639	0,1639
Barra Crítica	178	178	178	20
Observação	Reatores de Barra e de Linha	Reatores de Barra e de Linha	Todos os Reatores são de Barra	Reatores de Barra e de Linha

4.2.5 Simulação 5

Essa simulação considera a metodologia apresentada no Apêndice C, onde não são modelados os cenários de recomposição, sendo uma estratégia mais otimista para a busca de configuração de rede com baixa impedância equivalente. A cada iteração dessa metodologia, o reator a ser alocado é obrigatoriamente aquele que apresentar menor índice de sensibilidade.

Com cinco iterações, aloca-se os reatores apresentados na Tabela 4.23. Observa-se uma concentração de reatores no final do corredor.

Tabela 4.23 – Reatores Alocados – Área Rio de Janeiro – Simulação 5

Iteração	1	2	3	4	5
Reator	6	7	4	5	--
Reator de Barra	Linha	Barra	Barra	Linha	--
Barra	109	109	104	104	--

A barra crítica durante todo o processo iterativo foi a barra 178, como já foi discutido, uma vez que ela apresenta a maior impedância de Thevenin. A evolução dos índices de sensibilidade é apresentada na Tabela 4.24, onde os reatores alocados estão destacados (aqueles com menores índices). Na iteração 5 não ocorre alocação de potência reativa, alcançando-se a convergência.

Tabela 4.24 – Evolução dos Índices de Sensibilidade – Área Rio de Janeiro – Simulação 5

Reator	Iteração			
	1	2	3	4
1	0,3677	0,2620	0,2066	0,1792
2	0,3677	0,2620	0,2066	0,1792
3	0,3216	0,2392	0,1930	0,1700
4	0,2923	0,2236	0,1834	--
5	0,2923	0,2236	0,1834	0,1631
6	0,2728	--	--	--
7	0,2728	0,2127	--	--

A evolução da impedância equivalente da barra crítica está na Tabela 4.25. O valor final da impedância equivalente é obtido na quinta iteração (0,1631 pu). Esse valor é menor que o valor obtido com a metodologia proposta no capítulo 3 (0,1668 pu). Quando se considera os cenários, a redução da impedância equivalente é mais restrita.

Tabela 4.25 – Evolução da Impedância Equivalente da Barra 178

Iteração	0*	1	2	3	4
Z_{th} (pu)	0,3909	0,2728	0,2127	0,1834	0,1631

* sem reatores.

A evolução da potência reativa alocada pelo FPO é a apresentada na Tabela 4.26.

Tabela 4.26 – Evolução da Potência Reativa Alocada pelo FPO – Área Rio de Janeiro – Simulação 5

Iteração	1	2	3	4	5
Mvar	529,18	393,18	259,23	123,23	< 1

Nesta simulação, a tensão de geração foi fixada em 0,925 pu e a carga foi maximizada em (176,75 + j 40,57) MVA.

Os valores da tensão em cada cenário de recomposição são apresentados na Tabela 4.27. É possível concluir que a concentração de reatores no final do corredor não garante a eliminação dos valores de sobretensão em todos os cenários. No caso, os cenários 4 e 5 possuem violações de tensão, conforme destacado.

Tabela 4.27 Tensões nos Cenários de Rejeição – Área Rio de Janeiro

Cenários	Barras								
	20	100	101	102	1503	104	109	107	178
1	0,925	0,925	--	--	--	--	--	--	--
2	0,925	0,948	0,979	--	--	--	--	--	--
3	0,925	0,973	1,067	1,095	--	--	--	--	--
4	0,925	0,998	1,156	1,238	1,257	--	--	--	--
5	0,925	0,987	1,117	1,175	1,178	1,169	--	--	--
6	0,925	0,962	1,026	1,030	0,996	0,972	0,934	--	--
7	0,925	0,970	1,054	1,075	1,052	1,033	1,010	1,012	--
8	0,925	0,970	1,054	1,075	1,052	1,033	1,010	1,012	1,012

4.2.6 Comparação entre as Simulações

A simulação 1 considerou o valor de tensão apresentado em [6] e otimizou o valor da carga e a configuração de reatores. A simulação 2 considerou a tensão como variável de otimização e convergiu para a mesma solução proposta na literatura. Ambas as simulações apresentaram resultados semelhantes, o que valida o algoritmo implementado. A simulação 1 convergiu em 103,2 segundos e a simulação 2 convergiu em 64,7 segundos. A simulação 2 convergiu em menos tempo que a simulação 1, tendo em vista que não foram impostos limites mais restritivos para a tensão de geração, o que pode ser crítico.

Já na simulação 3, todos os reatores foram considerados como do tipo barra e devido às características do algoritmo proposto, foi alocado um reator adicional quando compara-se com as simulações anteriores. A configuração permitiu uma maior redução da impedância equivalente da barra 178, elevar a tensão de geração e suprir um valor de carga ligeiramente maior.

Na simulação 4 (na qual todos os reatores foram considerados como na prática, linha ou barra), a estratégia foi considerar a barra de geração como crítica e obteve-se a mesma configuração da simulação 3 (onde a barra crítica foi a barra final do corredor e todos os reatores são considerados como do tipo barra). Em geral, a redução da impedância de qualquer barra tenderá a reduzir a impedância das outras barras. Tal fato é devido à característica radial do corredor. Entretanto, cada rede deve ser analisada separadamente.

Na simulação 5, utilizou-se a metodologia descrita no Apêndice C, que não considera a representação dos cenários de recomposição fluente. Foi obtido o menor valor de impedância equivalente, sendo portanto uma consideração mais otimista. Entretanto, ocorreu uma concentração de reatores no final do corredor, não viabilizando o processo de recomposição, devido à falta de controle de sobretensões nos primeiros cenários do processo.

A Figura 4.7 sintetiza os valores de impedância equivalente obtidos em cada simulação.

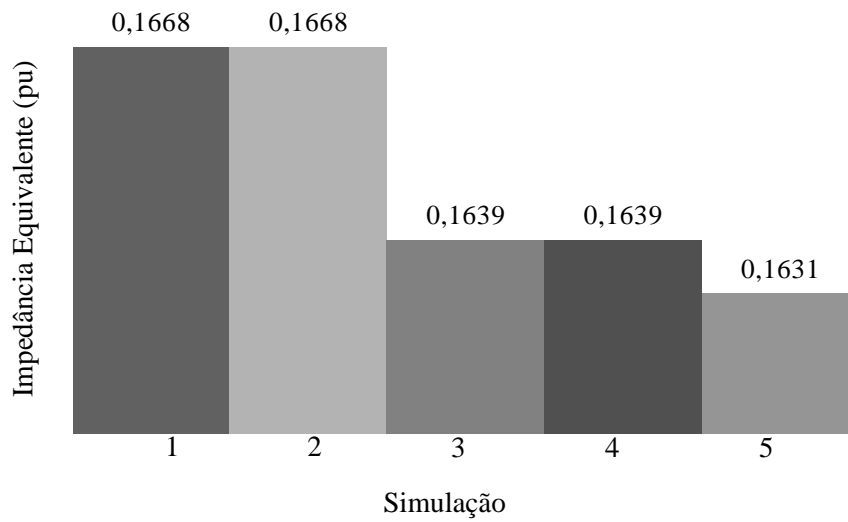


Figura 4.7– Comparativo entre os Valores de Impedância Equivalente da Barra 178.

4.3 ÁREA NORTE RIO DE JANEIRO

Esse sistema corresponde a uma parte do sistema da seção anterior acrescido de mais alguns ramos, conforme proposto em [6]. O diagrama unifilar está apresentado na Figura 4.8, onde estão identificados os reatores candidatos à alocação.

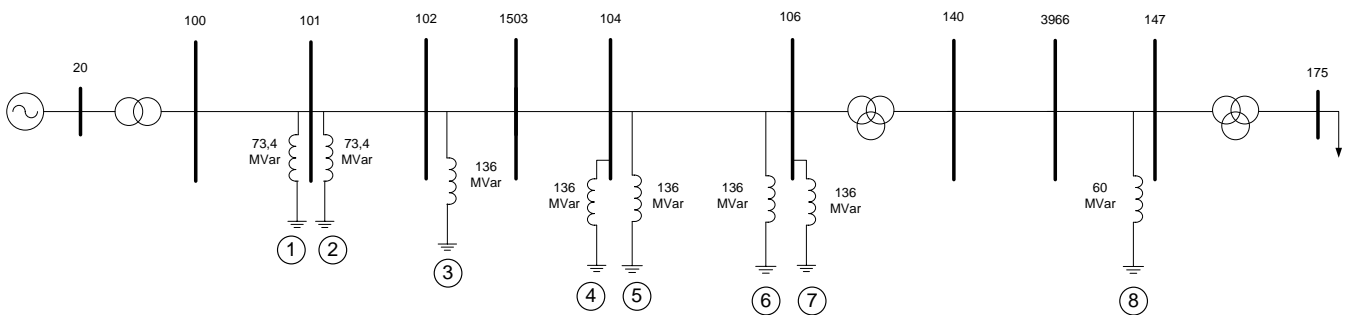


Figura 4.8– Área Norte Rio de Janeiro.

Para esse sistema considera-se a utilização de cinco unidades geradoras e existem 10 cenários de rejeição de carga a serem simulados.

Para esse sistema, serão feitas duas simulações:

- Simulação 1: execução do programa considerando a tensão de energização de 0,924 pu proposta em [6];
- Simulação 2: execução do programa considerando a tensão de energização como variável de otimização.

4.3.1 Simulação 1

Após efetuar sete iterações, a metodologia apresentou a configuração de reatores mostrada na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 Reatores Alocados – Área Norte Rio de Janeiro

Iteração	1	2	3	4	5	6	7
Reator	7	6	3	4	2	8	--
Barra	106	106	102	104	101	147	--
Reator de:	Barra	Linha	Linha	Barra	Linha	Linha	--

O total de potência reativa alocada pelo FPO nas sete iterações efetuadas é apresentado na Tabela 4.29. Observa-se que na iteração 1 ocorre uma alocação de 653,70 MVar, fazendo com que o reator 7 de 136 MVar seja alocado. Na iteração 2, a potência reativa alocada diminui, haja vista que um reator foi alocado na iteração anterior.

Tabela 4.29 Potência Reativa Alocada pelo FPO

Iteração	1	2	3	4	5	6	7
(MVar)	653,70	517,70	381,70	248,54	113,90	43,81	< 1

Durante as iterações, a barra final do corredor (barra 175) foi a que apresentou maior impedância equivalente, sendo portanto, a barra crítica do problema. A Figura 4.9 apresenta a evolução da impedância equivalente de cada barra do corredor em cada iteração. A iteração 0

corresponde ao sistema sem a conexão de reatores. A iteração 7, na qual não ocorreu alocação de reatores, não é apresentada.

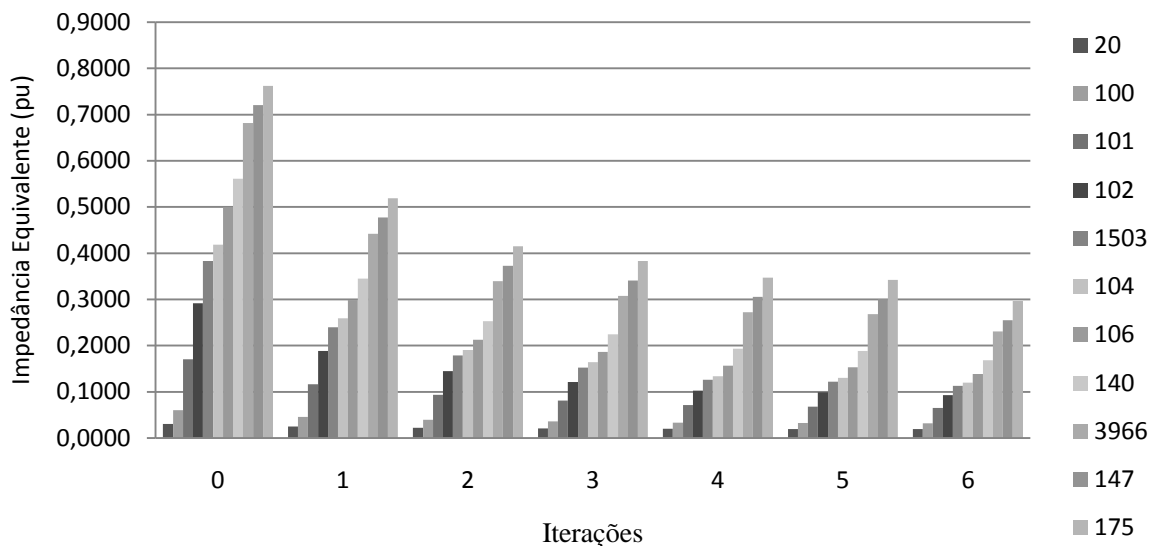


Figura 4.9– Evolução da Impedância Equivalente:Área Norte Rio de Janeiro.

A evolução da impedância da barra crítica (175) durante o processo iterativo é mostrada na Tabela 4.30. Observa-se que a alocação de reatores reduziu o valor da impedância equivalente da barra crítica em aproximadamente 61 %.

Tabela 4.30 Evolução da Impedância Equivalente da Barra Crítica (pu)

Barra	Iteração						
	0	1	2	3	4	5	6
175	0,7621	0,5192	0,4151	0,3832	0,3474	0,3426	0,2968

Os valores das tensões no instante pré-rejeição de carga são apresentados na Tabela 4.31. Observa-se que os limites de tensão 0,9 a 1,1 pu são satisfeitos.

Tabela 4.31 Instante Pré-Rejeição na Área Norte Rio de Janeiro

Barra	Tensão (pu)
20	0,924
100	0,953
101	0,995
102	0,999
1503	0,993
104	0,981
106	0,947
140	0,953
3966	0,941
147	0,916
175	0,900

Na Tabela 4.32, estão apresentados os valores de potência ativa e reativa geradas no instante pré-rejeição. Os valores das variáveis internas também são mostrados.

Tabela 4.32 Geração: Instante Pré-Rejeição na Área Norte Rio de Janeiro

Total de Geradores	E_a (pu)	δ (°)	$PG^{(-)}$ (MW)	$QG^{(-)}$ (MVar)
5	0,875	0,836	20,040	-50,053

Uma comparação com o resultado apresentado em [6] é mostrada na a Tabela 4.33. Observa-se que alocação de reatores divergiu do resultado proposto em [6], conforme destacado.

Tabela 4.33 Comparação dos Reatores Alocados – Área Norte Rio de Janeiro

Proposto	[6]
Reator 2 de 73,4 MVar na barra 101 (Linha)	Reator 1 de 73,4 MVar na barra 101 (Linha)
Reator 3 de 136 MVar na barra 102 (Linha)	Reator 3 de 136 MVar na barra 102 (Linha)
Reator 4 de 136 MVar na barra 104 (Barra)	Reator 4 de 136 MVar na barra 104 (Barra)
Reator 6 de 136 MVar na barra 109 (Linha)	Reator 6 de 136 MVar na barra 106 (Linha)
Reator 7 de 136 MVar na barra 109 (Barra)	Reator 7 de 136 MVar na barra 106 (Barra)
Reator 8 de 60 MVar na barra 147 (Linha)	Reator 8 de 60 MVar na barra 147 (Linha)

O valor de carga suprida obtido pelas duas metodologias é de (97,6 + j 32,1) MVA. Apesar da divergência na configuração de reatores, o valor da impedância equivalente da barra crítica é igual à 0,2968 pu.

A Tabela 4.34 apresenta as tensões em regime permanente de rejeição de carga em cada cenário de recomposição. Esses valores de tensão são variáveis do processo de otimização e foram validados com o programa ANAREDE. Pode-se observar que os limites de tensão (0,9 a 1,1 pu) foram satisfeitos em todos os cenários.

Tabela 4.34 Tensões nos Cenários de Rejeição – Área Norte Rio de Janeiro

Cenários	Barras										
	20	100	101	102	1503	104	106	140	3966	147	175
1	0,924	0,924	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2	0,924	0,947	0,978	--	--	--	--	--	--	--	--
3	0,924	0,963	1,034	1,061	--	--	--	--	--	--	--
4	0,924	0,967	1,046	1,081	1,098	--	--	--	--	--	--
5	0,924	0,958	1,016	1,033	1,036	1,027	--	--	--	--	--
6	0,924	0,951	0,991	0,992	0,984	0,971	0,933	--	--	--	--
7	0,924	0,951	0,991	0,992	0,984	0,971	0,933	0,933	--	--	--
8	0,924	0,962	1,029	1,053	1,062	1,056	1,037	1,061	1,089	--	--
9	0,924	0,960	1,024	1,045	1,051	1,044	1,023	1,044	1,064	1,053	--
10	0,924	0,960	1,024	1,045	1,051	1,044	1,023	1,044	1,064	1,053	1,053

4.3.2 Simulação 2

A simulação 2 consiste na otimização da tensão de geração, diferente do caso anterior onde ela foi fixada. Executando-se o algoritmo proposto, após seis iterações são obtidos os seguintes resultados:

Tabela 4.35 Área Norte Rio de Janeiro – Simulação 2

Tensão de Geração (pu)	0,926
Carga (MVA)	98,5 + j 32,4

Na Tabela 4.35, observa-se que a tensão de geração foi aproximadamente a mesma apresentada em [6], que mostra a eficácia da metodologia proposta. As tensões em regime permanente de rejeição em cada cenário satisfizeram os limites impostos.

Conforme a Tabela 4.36, diferente da simulação 1, a simulação 2 apresentou a mesma configuração de rede apresentada em [6]. Isso ocorre porque ao permitir a variação da tensão de geração na simulação 2, a alocação de potência nos reatores torna-se diferente em cada iteração, influenciando na configuração de reatores fornecida pela metodologia proposta. Destaca-se que a cada iteração somente 1 reator é alocado. A impedância equivalente das barras ao final do processo iterativo não é diferente da simulação 1, uma vez que do ponto de vista das barras (pontos de conexão de reatores), a configuração de reatores é a mesma.

Tabela 4.36 Reatores Alocados: Área Norte Rio de Janeiro– Simulação 2

Iteração	1	2	3	4	5	6	7
Reator	7	6	3	8	4	1	--
Barra	106	106	102	147	104	101	--
Reator de:	Barra	Linha	Linha	Linha	Barra	Linha	--

4.3.3 Comparação entre as simulações

As simulações 1 e 2 apresentaram uma configuração de reatores diferente, uma vez que a simulação 2 convergiu para a mesma solução em [6]. A simulação 1 convergiu em 175 segundos e a simulação 2 em 96,3 segundos. Isso é devido ao fato que na simulação 2 a tensão de energização não é fixada em limites mais restritivos.

Uma comparação entre as duas simulações realizadas para a Área Norte do Rio de Janeiro mostra que o local da alocação de reatores em uma iteração pode influenciar a alocação nas iterações posteriores. Na quarta iteração, a simulação 1 fez a alocação do reator 4, enquanto a simulação 2 alocou o reator 8, fazendo com que nas iterações posteriores, a configuração de reatores alocados obtida pelas duas simulações sejam diferentes.

4.4 ÁREA JUPIÁ

Esse corredor de recomposição é descrito em [6] e [48]. O diagrama unifilar desse corredor está mostrado na Figura 4.10, onde estão identificados os reatores candidatos à alocação. Do total de quatorze máquinas geradoras, são utilizadas duas máquinas para o processo de recomposição. Um total de nove cenários de rejeição de carga são considerados.

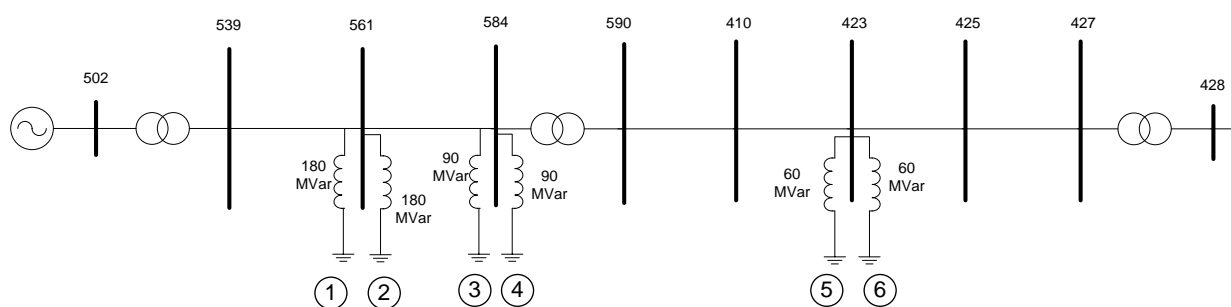


Figura 4.10– Área Jupiá.

Para esse sistema, os resultados apresentados correspondem à simulação que considera a otimização da tensão de geração, maximização da carga e minimização dos reatores alocados.

Após efetuar cinco iterações, a metodologia apresentou a configuração de reatores mostrada na Tabela 4.37.

Tabela 4.37 Reatores Alocados – Área Jupιά

Iteração	1	2	3	4	5
Reator	1	2	3	5	--
Barra	561	561	584	423	--
Reator de:	Linha	Barra	Linha	Barra	--

A trajetória de alocação de potência reativa pelo FPO é apresentada na Tabela 4.38. Observa-se que conforme os reatores vão sendo alocados, ocorre a redução da potência reativa alocada pelo FPO, e na quinta iteração alcança-se a convergência.

Tabela 4.38 Potência Reativa Alocada pelo FPO– Área Jupιά

Iteração	1	2	3	4	5
(MVar)	430,23	245,92	81,51	18,30	< 1

Durante a execução da metodologia, a barra que apresentou maior impedância equivalente foi a barra final do corredor (barra 428), sendo portanto a barra crítica, conforme pode ser visto na Figura 4.11.

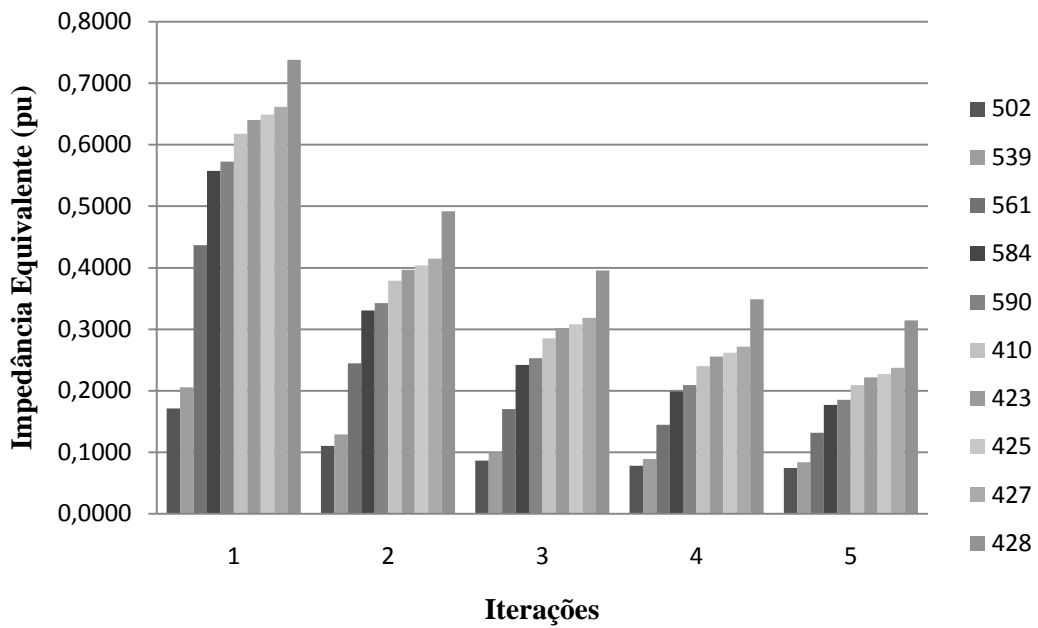


Figura 4.11– Evolução da Impedância Equivalente:Área Jupiá.

A evolução da impedância equivalente da barra 428 é mostrada na

Tabela 4.39, onde é possível observar uma redução de aproximadamente 57,4 % no valor dessa grandeza.

Tabela 4.39 Evolução da Impedância Equivalente da Barra Crítica (pu)

Barra	Iteração				
	0	1	2	3	4
428	0,7381	0,4917	0,3955	0,3485	0,3143

Após a convergência, a metodologia ajustou a tensão em 1,053 pu e maximizou o valor da carga tomada em (139,7 + j 45,9) MVA.

Os valores da tensão pré-rejeição de carga satisfizeram os limites impostos (0,9 a 1,1 pu), conforme pode ser visto na Tabela 4.40.

Tabela 4.40 Instante Pré-Rejeição – Área Jupιά

Barra	Tensão (pu)
502	1,053
539	1,057
561	0,995
584	0,981
590	0,977
410	0,961
423	0,952
425	0,951
427	0,947
428	0,900

Os valores de geração de potência e das variáveis internas das máquinas podem ser visualizados na Tabela 4.41.

Tabela 4.41 Geração: Instante Pré-Rejeição – Área Jupιά

Total de Geradores	E_a (pu)	δ (°)	$PG^{(-)}$ (MW)	$QG^{(-)}$ (MVar)
5	1,024	3,709	71,521	-25,990

As tensões em regime permanente de rejeição de carga em cada cenário são apresentadas na Tabela 4.42. Esses valores foram validados com o programa ANAREDE e satisfazem aos limites mínimo (0,9 pu) e máximo (1,1 pu) das tensões.

Tabela 4.42 Tensões nos Cenários de Rejeição – Área Jupιά

Cenários	Barras									
	502	539	561	584	590	410	423	425	427	428
1	1,053	1,053	--	--	--	--	--	--	--	--
2	1,053	1,051	0,956	--	--	--	--	--	--	--
3	1,053	1,063	1,038	1,050	--	--	--	--	--	--
4	1,053	1,063	1,038	1,050	1,050	--	--	--	--	--
5	1,053	1,063	1,043	1,058	1,059	1,060	--	--	--	--
6	1,053	1,059	1,011	1,005	1,001	0,990	0,984	--	--	--
7	1,053	1,059	1,012	1,006	1,003	0,992	0,985	0,985	--	--
8	1,053	1,065	1,057	1,082	1,084	1,090	1,093	1,096	1,100	--
9	1,053	1,065	1,057	1,082	1,084	1,090	1,093	1,096	1,100	1,100

Uma comparação com o resultado apresentado em [6] é mostrada na Tabela 4.43, onde é possível observar que as configurações de reatores foram divergentes.

Tabela 4.43 Comparação dos Reatores Alocados – Área Jupιά

Proposto	[6]
Reator 1 de 180 MVar na barra 561 (Linha)	Reator 1 de 180 MVar na barra 561 (Linha)
Reator 2 de 180 MVar na barra 561 (Barra)	Reator 2 de 180 MVar na barra 561 (Barra)
Reator 3 de 90 MVar na barra 584 (Linha)	Reator 3 de 90 MVar na barra 584 (Linha)
Reator 5 de 60 MVar na barra 423 (Barra)	Reator 4 de 90 MVar na barra 584 (Barra)

Ressalta-se que em [6], também é considerado o instante imediatamente após a rejeição de carga, caracterizado pela elevação instantânea das tensões. Não foi feita nenhuma análise da configuração proposta nesse trabalho a respeito desse instante, que considera somente os regimes permanentes pré e pós rejeição de carga.

Observa-se que a configuração divergiu da literatura, alocando menos quantidade de MVar no sistema, o que permitiu uma maior tomada de carga conforme a Tabela 4.44.

Tabela 4.44 Comparação entre Soluções

	Proposto	[6]
Tensão de Geração (pu)	1,053	1,050
Carga (MVA)	139,7 + j 45,9	134,1 + j 44,1

Outra simulação foi realizada, mantendo a tensão de 1,05 pu na barra de geração durante todo o processo iterativo. Esse valor de tensão foi proposto em [6]. A mesma configuração de reatores da Tabela 4.37 foi obtida, entretanto não serão apresentados os resultados dessa simulação.

Considerando que a configuração de reatores conectados foi diferente, a Tabela 4.45 apresenta a impedância equivalente da barra 428 (barra final do corredor que apresentou a maior impedância durante todo o processo iterativo).

Tabela 4.45 Comparativo entre as Impedâncias Equivalentes (pu)

Barra	Proposto	[6]
428	0,3143	0,3158

Observa-se que a configuração de reatores obtida pela metodologia proposta reduziu a o valor da impedância equivalente.

Esse resultado permite observar que a configuração de reatores tem pouca influência sobre o valor da impedância equivalente de barra e que para a maioria dos sistemas a alocação dos reatores será determinada com o objetivo de limitar sobretensões ao longo do corredor que está sendo recomposto. Como foi abordado anteriormente, o nível de falta pode ser aumentado com a conexão de novas máquinas no sistema (geradores e compensadores síncronos).

O tempo médio de processamento foi de aproximadamente 187s.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos através da metodologia proposta para três corredores de recomposição fluente do sistema elétrico brasileiro. A metodologia permitiu a determinação da configuração de reatores, maximização da carga tomada e ajuste da tensão de geração. A configuração de reatores é determinada considerando os efeitos na impedância equivalente de barra, cujo valor se deseja reduzir.

O ajuste feito de forma automática através do Fluxo de Potência Ótimo foi realizado em poucos minutos de simulação.

Com a experiência obtida na utilização da metodologia proposta, observou-se que a escolha do reator a ser alocado em uma iteração pode influenciar na configuração final. A alocação de mais reatores por iteração pode reduzir essa influência.

Os resultados obtidos com a metodologia proposta permitem concluir que a configuração de reatores pouco influencia na minimização do valor da impedância equivalente. A configuração é fortemente determinada pela necessidade do controle de sobretensões nos cenários de recomposição fluente.

Ressalta-se que uma configuração de reatores que faça puramente a minimização da impedância equivalente de barra não é viável no processo de recomposição fluente. O Apêndice C apresenta uma metodologia que busca puramente a redução da impedância equivalente.

Apesar do esforço feito, a metodologia proposta concluiu para os corredores examinados a baixa influência dos reatores na CCC. Os reatores estão associados à relação entre a CCC e a configuração da rede. Considerando todos os reatores como Reatores de Barra em uma das simulações da área Rio de Janeiro, obteve-se um resultado mais otimista com a metodologia proposta. Nessa simulação, o algoritmo alcançou uma configuração de baixa impedância não obtida nas outras simulações.

Destaca-se portanto a necessidade de avaliar outros critérios com o objetivo de melhorar a metodologia proposta, tais como: escolha do reator a ser alocado a cada iteração e definição da barra crítica.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma metodologia baseada em Fluxo de Potência Ótimo para auxílio nos estudos de recomposição fluente de corredores radiais de transmissão. A metodologia proposta permitiu a determinação da configuração de reatores, a maximização da carga suprida e o ajuste de tensão de geração. Os cenários de recomposição fluente em regime permanente, pré e pós rejeição de carga, foram considerados em um único problema de otimização.

O enfoque do presente trabalho foi a busca de uma configuração de reatores que minimizasse a impedância equivalente das barras do sistema. Esse procedimento foi justificado para o processo de recomposição, onde se deseja reduzir o valor da impedância equivalente e conseqüentemente aumentar o valor do nível de curto circuito, como foi abordado na revisão bibliográfica realizada. Ressalta-se que a ponderação do nível de curto circuito em sistemas elétricos é de difícil realização, e não foram encontrados trabalhos na literatura que abordassem a determinação de configurações de rede baseada no nível de curto circuito.

Foi proposto um índice de sensibilidade baseado na impedância equivalente de Thevenin, que permitiu avaliar os efeitos da modificação da configuração da rede na impedância das barras do sistema. Baseando-se nesse índice, foi feita a proposição de um método de cálculo dos fatores de ponderação de alocação de reatores. Nessa metodologia, o reator que mais reduzir a impedância equivalente de uma determinada barra recebe o menor fator de ponderação de alocação.

As simulações realizadas permitiram concluir que a configuração de reatores pouco contribui na minimização da impedância equivalente de barra, uma vez que esta configuração é ditada pela necessidade do controle de sobretensões nos cenários de recomposição fluente. Entretanto, a metodologia proposta permitiu a realização de uma análise de sensibilidade extra com objetivo de mostrar que é possível alocar reatores adicionais que permitem reduzir a

impedância sem reduzir o valor da carga tomada. A busca de configurações de rede de recomposição com maiores níveis de curto circuito deve continuar sendo investigada.

O índice de sensibilidade proposto permite a avaliação da conexão de novas unidades geradoras e compensadores síncronos no sistema. A conexão desses equipamentos é realizada para o aumento do nível de curto circuito durante a recomposição de sistemas elétricos de outros países.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para trabalhos futuros, podem-se destacar:

- Implementação do índice de sensibilidade proposto para cálculo dos fatores de ponderação de alocação dos reatores na metodologia desenvolvida pelo NUPESP (PPEE – UFJF);
- Avaliação da real influência do valor da impedância de Thevenin na magnitude de sobretensões de manobra e ressonância harmônica. Diversos trabalhos na literatura apontam que a redução da impedância equivalente minimiza o valor dessas sobretensões;
- Avaliação da influência do valor reduzido da impedância de Thevenin no fechamento de paralelos ou anéis durante a recomposição coordenada. Existem trabalhos na literatura que apontam que esses valores reduzidos de impedância melhoram a estabilidade dinâmica;
- Definição do número mínimo de unidades geradoras de forma automática, visando a não ocorrência de auto-excitação. Destaca-se que a alteração do número de unidades modifica a configuração da rede, influenciando no seu nível de falta;
- Utilização de Programação Não Linear Inteira Mista para a alocação discreta de reatores;

- Implementação de uma metodologia que seja capaz de otimizar o ajuste de dispositivos de proteção para o processo de recomposição fluente;
- Avaliação da utilização dos dispositivos FACTS no processo de recomposição, apesar desse tipo de tecnologia necessitar ser melhorada para suportar as condições impostas durante essa fase da operação. Uma proposta seria avaliar os efeitos da compensação série no valor da impedância equivalente de barra;
- Consideração das variações de frequência no sistema durante a tomada de carga. A oscilação da frequência deve satisfazer os limites impostos, com o objetivo de evitar as operações indevidas de relés de proteção;
- Estudo da energização dos corredores de transmissão do ponto de vista dos Transitórios Eletromagnéticos. Ressalta-se que a investigação de métodos de mitigação de transitórios de manobra é um campo fértil para a pesquisa. As ferramentas de simulação mundialmente utilizadas são: ATP, PSCAD e RTDS (*Real Time Digital Simulator*).

Apêndice A – Metodologia para Otimização da Recomposição Fluente

A.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste Apêndice é apresentada a formulação matemática do Fluxo de Potência Ótimo desenvolvido para automatização dos estudos de recomposição fluente proposto em [6].

Essa modelagem foi desenvolvida pelo NUPESP (Núcleo de Pesquisa em Sistema de Potência) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPEE) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

A.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

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

Considera-se três instantes de operação:

- (i) Regime Permanente pré-rejeição de Carga (-);
- (ii) Regime Dinâmico imediatamente após a rejeição de carga (+);
- (iii) Regime Permanente pós-rejeição de carga (rp).

O Fluxo de Potência Ótimo é formulado como segue:

$$Max (\sum_{i \in \Omega_b} \alpha_i - \sum_{i \in \Omega_{rb}} C_{QA_i} \cdot QA_i) \quad (A.1)$$

Sujeito a:

$$PG_i^{(-)} - (1 + \alpha_i)PL_i^{(-)} - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}^{(-)} = 0 \quad (A.2)$$

$$QG_i^{(-)} - (1 + \alpha_i)QL_i^{(-)} - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}^{(-)} - QA_i = 0 \quad (A.3)$$

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

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

$$V \min_i^{(-)} \leq V_i \leq V \max_i^{(-)} \quad (\text{A.6})$$

$$\text{Restrições de Capabilidade no instante (-)} \quad (\text{A.7})$$

$$\alpha_i \geq 0 \quad (\text{A.8})$$

$$PG_i^{(+n)} - (1 + \alpha_i)PL_i^{(+n)} - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}^{(+n)} = 0 \quad (\text{A.9})$$

$$QG_i^{(+n)} - (1 + \alpha_i)QL_i^{(+n)} - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}^{(+n)} - QA_i = 0 \quad (\text{A.10})$$

$$PG^{(+n)}X_d''X_q'' - EV_t^{(+n)} \text{sen}(\delta - \theta^{(+n)})X_q'' - 0,5(V_t^{(+n)})^2(X_d'' - X_q'')\text{sen}2(\delta - \theta^{(+n)}) = 0 \quad (\text{A.11})$$

$$QG^{(+n)}X_d''X_q'' - EV_t^{(+n)} \cos(\delta - \theta^{(+n)})X_q'' + 0,5(V_t^{(+n)})^2(X_d'' + X_q'') - 0,5(V_t^{(+n)})^2(X_d'' - X_q'')\cos2(\delta - \theta^{(+n)}) = 0 \quad (\text{A.12})$$

$$V \min_i^{(+)} \leq V_i \leq V \max_i^{(+)} \quad (\text{A.13})$$

$$\text{Restrições de Capabilidade no instante (+)} \quad (\text{A.14})$$

$$PG_i^{(rp)n} - (1 + \alpha_i)PL_i^{(rp)n} - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}^{(rp)n} = 0 \quad (\text{A.15})$$

$$QG_i^{(rp)n} - (1 + \alpha_i)QL_i^{(rp)n} - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}^{(rp)n} - QA_i = 0 \quad (\text{A.16})$$

$$PG^{(rp)n}X_dX_q - E^{(rp)n}V_t \text{sen}(\delta^{(rp)n} - \theta^{(rp)n})X_q - 0,5V_t^2(X_d - X_q)\text{sen}2(\delta^{(rp)n} - \theta^{(rp)n}) = 0 \quad (\text{A.17})$$

$$QG^{(rp)n}X_dX_q - E^{(rp)n}V_t \cos(\delta^{(rp)n} - \theta^{(rp)n})X_q + 0,5V_t^2(X_d + X_q) - 0,5V_t^2(X_d - X_q)\cos2(\delta^{(rp)n} - \theta^{(rp)n}) = 0 \quad (\text{A.18})$$

$$V \min_i^{(rp)} \leq V_i \leq V \max_i^{(rp)} \quad (\text{A.19})$$

$$\text{Restrições de Capabilidade no instante (rp)} \quad (\text{A.20})$$

Onde:

$P G_i^{(-)}, P G_i^{(+n)}, P G_i^{(rp)n}$	Potência ativa gerada na barra i , antes da rejeição de carga (t_0^-), no instante da rejeição (t_0^+) no cenário n e em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição no cenário n ;
$Q G_i^{(-)}, Q G_i^{(+n)}, Q G_i^{(rp)n}$	Potência reativa gerada na barra i , antes da rejeição de carga (t_0^-), no instante da rejeição (t_0^+) no cenário n e em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição no cenário n ;
$P L_i^{(-)}, P L_i^{(+n)}, P L_i^{(rp)n}$	Carga ativa na barra i , antes da rejeição de carga (t_0^-), no instante da rejeição (t_0^+) no cenário n e em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição no cenário n ;
$Q L_i^{(-)}, Q L_i^{(+n)}, Q L_i^{(rp)n}$	Carga reativa na barra i , antes da rejeição de carga (t_0^-), no instante da rejeição (t_0^+) no cenário n e em regime permanente (t_0^{rp}) de rejeição no cenário n ;
$E, E^{(rp)n}$	Tensão interna do gerador em (t_0^-) e (t_0^{rp});
$\delta, \delta^{(rp)n}$	Ângulo interno do gerador em (t_0^-) e (t_0^{rp});
V_i	Tensão na barra i ;
$V_t, V_t^{(+n)}$	Tensão terminal do gerador e tensão terminal no instante da rejeição de carga no cenário n ;
$V \min_i^{(-)}, V \max_i^{(-)}$	Limites de tensão no instante (t_0^-);
$V \min_i^{(+)}, V \max_i^{(+)}$	Limites de tensão no instante (t_0^+);
$V \min_i^{(rp)}, V \max_i^{(rp)}$	Limites de tensão no instante (t_0^{rp});
$\theta_i^{(-)}, \theta_i^{(+n)}, \theta_i^{(rp)n}$	Ângulos das tensões nos instantes (t_0^-), (t_0^+) e (t_0^{rp});
α_i	Fator de carregamento na barra i ;
$P_{ij}^{(-)}, P_{ij}^{(+n)}, P_{ij}^{(rp)n}$	Fluxo de potência ativa no ramo $i-j$, antes da rejeição de carga (t_0^-), no instante da rejeição (t_0^+) no cenário n e em regime

	permanente (t_0^{TP}) de rejeição no cenário n ;
QA_i	Injeção de potência reativa na barra i ;
$Q_{ij}^{(-)}, Q_{ij}^{(+)n}, Q_{ij}^{(rp)n}$	Fluxo de potência reativa no ramo $i-j$, antes da rejeição de carga (t_0^-), no instante da rejeição (t_0^+) no cenário n e em regime permanente (t_0^{TP}) de rejeição no cenário n ;
Ω_i	Conjunto de barras adjacentes à barra i ;
Ω_b	Conjunto de barras do sistema;
Ω_{rb}	Conjunto de barras candidatas à alocação de reatores;
X_d'', X_q'', X_d, X_q	Reatâncias Subtransitórias e Síncronas dos geradores.

A equação (A.1) corresponde à função objetivo do processo de otimização, que é a minimização de reatores conectados e maximização da carga tomada.

As equações (A.2) a (A.8) correspondem ao regime permanente antes da rejeição de carga (t_0^-).

As equações (A.9) a (A.14) correspondem ao instante da rejeição de carga em todos os cenários de recomposição (t_0^+).

As equações (A.15) a (A.20) correspondem ao regime permanente após a rejeição de carga (t_0^{TP}).

A.3 SOLUÇÃO DO PROBLEMA

Em [6], o problema da recomposição fluente formulado como Fluxo de Potência Ótimo é resolvido por meio da Decomposição Matemática de Benders. Conforme apresentado anteriormente, essa metodologia define a configuração mínima de reatores, a máxima carga prioritária a ser suprida e faz o ajuste da tensão de geração.

O Fluxo de Potência Ótimo define a alocação de potência reativa necessária para o controle de sobretensões (etapa contínua) e em seguida é feita a alocação do reator cuja a

alocação contínua de potência reativa mais se aproximar da capacidade nominal do reator correspondente (etapa discreta).

A modelagem da rede é feita em três instantes:

- (i) Regime Permanente pré-rejeição de Carga (t_0^-);
- (ii) Regime Dinâmico imediatamente após a rejeição de carga (t_0^+);
- (iii) Regime Permanente pós-rejeição de carga (t_0^{TP}).

Cada instante é modelado como um subproblema conforme apresentado na Figura A.1.

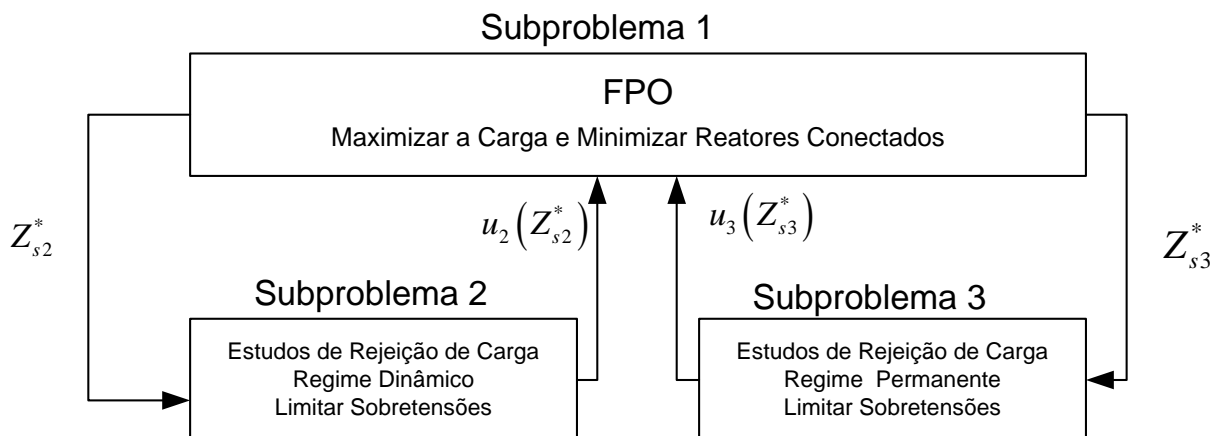


Figura A.1– Esquema de Solução por Decomposição de Benders.

No subproblema 1, correspondente ao instante (i) é considerada a rede completa, onde o objetivo é definir a tensão de geração, a configuração de reatores e o montante máximo da carga a ser suprida. Nesse instante são calculados as variáveis internas das máquinas síncronas.

Com os ajustes Z_{s2}^* e Z_{s3}^* feitos no Subproblema 1 (tensão de geração, configuração de reatores e total de carga) são simuladas rejeições de carga nas barras do sistema, considerando o regime dinâmico (Subproblema 2) e permanente (Subproblema 3), com o objetivo de limitar as sobretensões. Os subproblemas 2 e 3 correspondem aos cenários de recomposição descritos na Figura 3.4. Caso os ajustes do subproblema 1 não sejam suficientes para a não ocorrência de sobretensões nos cenários de recomposição, são enviadas restrições de Benders $u(Z_{s2}^*)$ e $u(Z_{s3}^*)$ ao subproblema 1, que é executado novamente, alterando os

ajustes para uma configuração que satisfaça as restrições do problema de recomposição fluente.

No Subproblema 2 (regime dinâmico) são consideradas fixas as variáveis internas das máquinas e no Subproblema 3 estas variáveis são ajustadas com o objetivo de alterar a tensão de geração.

Apêndice B – Dados dos Sistemas Elétricos

B.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesse apêndice são apresentados os dados dos sistemas utilizados nessa dissertação. Os dados de linha estão na base de 100 MVA. As simulações iniciaram sem conexão de reatores. Os dados dos geradores estão na base nominal da máquina.

B.2 ÁREA RIO DE JANEIRO

Tabela B.1 Dados de Circuito – Área Rio de Janeiro

Circuito	De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	<i>Shunt</i> (MVar)	Tap
1	20	100	0,00	1,05	0,00	1,00
2	100	101	0,17	2,70	230,20	0,00
3	101	102	0,16	2,46	208,50	0,00
4	102	1503	0,11	1,91	161,90	0,00
5	1503	104	0,05	0,82	69,40	0,00
6	104	109	0,15	2,39	202,70	0,00
7	109	107	0,03	0,68	73,80	0,00
8	107	178	0,00	2,29	0,00	1,00

Tabela B.2 Dados dos Geradores – Área Rio de Janeiro

Capacidade (MW)	186
Reatância Síncrona de eixo direto (%)	87,0
Reatância Síncrona de eixo quadratura(%)	69,0
Reatância Subtransitória de eixo direto(%)	18,0
Reatância Subtransitória de eixo quadratura(%)	12,0
Base (MVA)	200
Número de máquinas / Numero usado na recomposição	8 / 5

B.3 ÁREA NORTE RIO DE JANEIRO

Tabela B.3 Dados de Circuito – Área Norte Rio de Janeiro

Circuito	De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	<i>Shunt</i> (MVar)	Tap
1	20	100	0,00	1,05	0,00	1,00
2	100	101	0,17	2,70	230,20	0,00
3	101	102	0,16	2,46	208,50	0,00
4	102	1503	0,11	1,91	161,85	0,00
5	1503	104	0,05	0,82	69,36	0,00
6	104	106	0,15	2,39	203,10	0,00
7	106	140	0,00	2,38	0,00	1,00
8	140	3966	0,49	5,46	93,37	0,00
9	3966	147	0,26	2,86	48,47	0,00
10	147	175	0,00	4,22	0,00	1,00

Os dados das unidades geradoras são os mesmos utilizados na Área Rio de Janeiro.

B.2 ÁREA JUPIÁ

Tabela B.4 Dados de Circuito – Área Jupiá

Circuito	De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	<i>Shunt</i> (MVar)	Tap
1	502	539	0,00	0,80	0,00	1,00
2	539	561	0,39	4,96	319,72	0,00
3	561	584	0,30	3,76	242,06	0,00
4	584	590	0,00	0,75	0,00	1,00
5	590	410	0,30	2,20	7,897	0,00
6	410	423	0,20	1,10	3,55	0,00
7	423	425	0,08	0,44	1,42	0,00
8	425	427	0,04	0,82	76,695	0,00
9	427	428	0,00	7,72	0,00	1,00

Tabela B.5 Dados dos Geradores – Área Jupiá

Capacidade (MW)	110,8
Reatância Síncrona de eixo direto (%)	91,0
Reatância Síncrona de eixo quadratura(%)	57,0
Reatância Subtransitória de eixo direto (%)	15,0
Reatância Subtransitória de eixo quadratura (%)	11,0
Base (MVA)	112
Número de máquinas / Numero usado na recomposição	14 / 2

B.3 CURVA DE CAPABILIDADE

Para a modelagem da curva de capacidade considerou-se:

- Limite da máquina primária igual à capacidade nominal em MW;
- Tensão Interna Mínima: 0,05 pu;
- Tensão Interna Máxima: 2,80 pu;
- Corrente Máxima da armadura igual à corrente nominal:

$$|S_{\text{nominal_MVA}}| = |V_{\text{nominal}}| \cdot |I_{\text{nominal}}|$$

Apêndice C – Metodologia Inicial

C.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esse apêndice apresenta a primeira metodologia desenvolvida para a minimização da impedância de uma barra do corredor fluente de recomposição. Essa metodologia tinha o objetivo de introduzir os seguintes tópicos no estudo de recomposição:

- necessidade do aumento do nível de curto circuito em corredores radiais durante o processo de recomposição fluente;
- a ponderação do nível de curto circuito pelo valor inverso da impedância equivalente de barras;
- a redução da impedância de Thevenin através da conexão de reatores;

Essa metodologia deu origem à seguinte publicação:

[B] W. Peres, E. J. de Oliveira, J. A. Passos Filho, N. Martins, M. A. Tomim, L. W. de Oliveira, “Ferramenta Baseada em Fluxo de Potência Ótimo para Auxílio no Processo de Recomposição de Corredores Radiais de Transmissão considerando a Avaliação da Capacidade de Curto Circuito” IX CLAGTEE – Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission , Mar Del Plata, Argentina, Novembro, 2011.

A primeira metodologia proposta possuía as seguintes características:

- considerava somente a otimização do corredor radial sem a representação dos cenários;
- não considerava as curvas de capacidade dos geradores. Utilizava a representação tradicional de limites fixos de potência ativa e reativa;
- não considerava as restrições de potência ativa e reativa da modelagem das máquinas síncronas;
- fazia a maximização da carga e minimização dos reatores conectados;

- a alocação de reatores era baseada somente no índice de sensibilidade equivalente à impedância atualizada de Thevenin. Desprezando-se a avaliação dos cenários, os reatores alocados eram obrigatoriamente aqueles que mais reduzissem a impedância da barra crítica (barra com maior impedância equivalente no corredor);

C.2 FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

O fluxo de potência ótimo utilizado era o seguinte:

$$Max (\sum_{i \in \Omega_b} \alpha_i - \sum_{i \in \Omega_{rb}} C_{QA_i} \cdot QA_i) \quad (C.1)$$

Sujeito a:

$$PG_i - (1 + \alpha_i)PL_i - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} = 0 \quad (C.2)$$

$$QG_i - (1 + \alpha_i)QL_i - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} = 0 \quad (C.3)$$

$$V \min_i \leq V_i \leq V \max_i \quad (C.4)$$

$$PGi_{min} \leq PG_i \leq PGi_{max} \quad (C.5)$$

$$QGi_{min} \leq QG_i \leq QGi_{max} \quad (C.6)$$

$$\alpha_i \geq 0 \quad (C.7)$$

Onde

PG_i	Potência ativa gerada na barra i ;
QG_i	Potência reativa gerada na barra i ;
PL_i	Carga ativa na barra i ;
QL_i	Carga reativa na barra i ;
V_i	Tensão na barra i ;
$V \min_i , V \max_i$	Limites de tensão;

PGi_{min} , PGi_{max}	Limites de potência ativa na barra i ;
QGi_{min} , QGi_{max}	Limites de potência reativa na barra i ;
α_i	Fator de carregamento na barra i ;
P_{ij}	Fluxo de potência ativa no ramo $i-j$;
QA_i	Injeção de potência reativa na barra i ;
C_{QA_i}	Custo de alocação de reatores na barra i , considerado igual á 5;
Q_{ij}	Fluxo de potência reativa no ramo $i-j$;
Ω_i	Conjunto de barras adjacentes à barra i ;
Ω_b	Conjunto de barras do sistema;
Ω_{rb}	Conjunto de barras candidatas à alocação de reatores;

Observa-se que o custo de alocação era fixo para todos os reatores.

C.3 CRITÉRIO DE ALOCAÇÃO DE REATORES

Com o objetivo de limitar as sobretensões o fluxo de potência ótimo alocava potência reativa nas barras candidatas à alocação de reatores. Os reatores escolhidos para alocação eram aqueles que mais reduzissem à impedância equivalente da barra crítica (barra com maior impedância equivalente do corredor).

O índice de sensibilidade era o mesmo utilizado na metodologia proposta no capítulo 3.

Considerando que deseja-se reduzir a impedância equivalente de uma barra K e que se tenham reatores a serem alocados em um conjunto de barras N , para cada reator candidato é calculada a impedância Thevenin atualizada conforme a equação (C.8).

$$Z_{KK}^{NOVO} = Z_{KK}^{ORIG} - \frac{Z_{KN} \cdot Z_{NK}}{Z_{NN} + Z_b} \quad (C.8)$$

O índice utilizada está na equação (C.9).

$$\text{índice de sensibilidade} = |Z_{KK}^{NOVO}| \quad (C.9)$$

O reator a ser alocado é aquele que apresentar menor índice de sensibilidade, em outras palavras, aquele que mais reduzir a impedância de Thevenin da barra crítica.

C.4 ALGORITMO

O algoritmo da metodologia inicial consistia nos seguintes passos:

Passo 1: definição dos parâmetros e inicialização das variáveis;

Passo 2: construção da matriz admitância e obtenção da matriz impedância;

Passo 3: correção da matriz impedância para inclusão dos geradores;

Passo 4: obtenção das impedâncias equivalentes de barra e definição da barra crítica (aquela com maior impedância) ;

Passo 5: execução do Fluxo de Potência Ótimo. Se a potência alocada for maior que 1 MVar, seguir para o Passo 6. Caso contrário, ir ao Passo 9;

Passo 6: análise de sensibilidade para definir o reator a ser alocado;

Passo 7: conexão do reator mais favorável;

Passo 8: atualizar matriz impedância considerando o novo reator. Seguir ao Passo 4;

Passo 9: fim: imprimir resultados.

C.5 CONCLUSÕES

Esse apêndice apresentou a primeira metodologia desenvolvida no presente trabalho de mestrado. A alocação de reatores era feita considerando somente a minimização da impedância de barras. Uma vez que os cenários de recomposição não foram considerados, os resultados não garantem que os limites de tensão sejam respeitados em cada um deles.

Dessa forma, uma metodologia que faz puramente a minimização da impedância de barra não é viável, devido à concentração de reatores que pode ocorrer.

Referências

- [1] M. C. Tavares e R. T. Borges, “Estudo do Comportamento Transitório da Linha de um Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda Submetida a Manobras Usuais”, presented at the Congresso Brasileiro de Automática - CBA, Bonito - MS, 2010.
- [2] Gomes, P., “Segurança Elétrica do SIN”, Tutorial sobre Recomposição de Sistemas, CEPTEL, Rio de Janeiro, 2008.
- [3] M. M. Adibi, *Power System Restoration: Methodologies and Implementation Strategies*, 1^o ed. Wiley-IEEE Press, 2000.
- [4] P. Gomes, A. C.S. Lima, e A. A. P. Guarini, “Guidelines for Power System Restoration in the Brazilian System”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, n^o. 2, p. 1159–1164, maio 2004.
- [5] M. M. Adibi e D. P. Milanicz, “Protective System Issues During Restoration”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, n^o. 3, p. 1492–1497, ago. 1995.
- [6] E. M. Viana, “Ferramenta para Maximização de Carga na Fase Fluente de Recomposição de Sistemas Elétricos de Potência”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2008.
- [7] N. Martins, E. J. de Oliveira, W. C. Moreira, J. L. . Pereira, e R. M. Fontoura, “Redispatch to Reduce Rotor Shaft Impacts Upon Transmission Loop Closure”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, n^o. 2, p. 592–600, maio 2008.
- [8] ONS, “Procedimentos de Rede, Submódulo 23.3 - Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos”. 2009.
- [9] M. M. Adibi, R. W. Alexander, e B. Avramovic, “Overvoltage Control During Restoration”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, n^o. 4, p. 1464–1470, nov. 1992.
- [10] C. M. J. C. M. Portela, *Regimes Transitórios*, vol. 1, 4 vols. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1983.

- [11] C. M. S. Chaves, “Aplicação de Inteligência Computacional para Auxílio à Recomposição de Sistemas Elétricos de Potência”, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.
- [12] P. M. Anderson, *Analysis of Faulted Power Systems*, 1^o ed. Wiley-IEEE Press, 1995.
- [13] T. S. Sidhu, D. A. Tziouvaras, A. P. Apostolov, C. H. Castro, S. R. Chano, S. H. Horowitz, W. O. Kennedy, Sungsoo Kim, R. J. Martilla, P. G. McLaren, G. L. Michel, K. K. Mustaphi, P. Mysore, M. Nagpal, B. Nelson, F. P. Plumptre, M. S. Sachdev, J. S. Thorp, e J. T. Uchiyama, “Protection Issues During System Restoration”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, n^o. 1, p. 47– 56, jan. 2005.
- [14] E. M. Viana, E. J. de Oliveira, N. Martins, L. W. de Oliveira, e J. L. R. Pereira, “Ferramenta para Auxílio à Recomposição Fluente de Sistemas Elétricos”, presented at the XI SEPOPE – Simpósio dos Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétric, Bélem, PA, 2009.
- [15] A. D’Ajuz, C. S. Fonseca, F. M. S. Carvalho, J. A. Filho, L. E. N. Dias, M. P. Pereira, P. C. V. Esmeraldo, R. Vaisman, e S. O. Frontin, *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão*. Rio de Janeiro: FURNAS , EDUFF, 1987.
- [16] L. C. Zanetta Junior, *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*, 1^o ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- [17] M. M. Adibi, N. Martins, e E. H. Watanabe, “The Impacts of FACTS and other New Technologies on Power System Restoration Dynamics”, in *2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2010, p. 1–6.
- [18] E. J. Oliveira, N. Martins, J. L. R. Pereira, E. D. Silva, e L. C. A. Ferreira, “Análise de Fechamento de Anel Via Fluxo de Potência Ótimo e Estabilidade Dinâmica”, presented at the IX SEPOPE – Simpósio dos Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Rio de Janeiro – Brasil, 2004.
- [19] M. M. Adibi e R. J. Kafka, “Power System Restoration Issues”, *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 4, n^o. 2, p. 19–24, abr. 1991.

- [20] M. M. Adibi, S. M. Borkoski, e R. J. Kafkra, “Analytical Tool Requirements for Power System Restoration”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, n.º. 3, p. 1582–1591, ago. 1994.
- [21] M. M. Adibi, R. W. Alexander, e D. P. Milanicz, “Energizing High and Extra-High Voltage Lines During Restoration”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, n.º. 3, p. 1121–1126, ago. 1999.
- [22] F. Levesque, Si Truc Phan, A. Dumas, e M. Boisvert, “Restoration Plan — The Hydro-Québec Experience”, in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008, p. 1–6.
- [23] A. Ketabi, A. M. Ranjbar, e R. Feuillet, “Analysis and Control of Temporary Overvoltages for Automated Restoration Planning”, *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, n.º. 6, p. 64–64, jun. 2002.
- [24] M. M. Adibi e N. Martins, “Power System Restoration Dynamics Issues”, in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008, p. 1–8.
- [25] W. Sun, C.-C. Liu, e S. Liu, “Black Start Capability Assessment in Power System Restoration”, 2011, p. 1–7.
- [26] A. Ketabi, I. Sadeghkhan, e R. Feuillet, “Using Artificial Neural Network to Analyze Harmonic Overvoltages During Power System Restoration”, *European Transactions on Electrical Power*, vol. 21, n.º. 7, p. 1941–1953, out. 2011.
- [27] E. M. Viana, E. J. de Oliveira, N. Martins, L. W. de Oliveira, e J. L. R. Pereira, “Otimização da Fase Fluente de Recomposição de Sistemas Elétricos”, presented at the Congresso Brasileiro de Automática, CBA, Juiz de Fora, 2008.
- [28] E. M. Viana, E. J. Oliveira, N. Martins, J. L. R. Pereira, e L. W. de Oliveira, “An Optimal Power Flow Function to Aid Restoration Studies of Long Transmission Segments”, *IEEE Transactions on Power Systems (a ser publicado)*.

- [29] Deng Guiping, Fu Shiji, Shu Kaiqi, e Chen Jun, “Local Voltage-Stability Margin Based on Short-Circuit Capacity”, in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, 2010, p. 1–4.
- [30] Lei Huang, Jian Xu, Yuanzhang Sun, Ting Cui, e Fei Dai, “Online Monitoring of Wide-Area Voltage Stability Based on Short Circuit Capacity”, in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific*, 2011, p. 1–5.
- [31] O. I. Elgerd, *Electric Energy Systems Theory: An Introduction*. McGraw-Hill, 1971.
- [32] C. Ferreira, *Redes Lineares em Sistemas Elétricos de Potência*, 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Canalenergia, 2005.
- [33] J. Grainger e J., William Stevenson, *Power System Analysis*, 1º ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1994.
- [34] M. M. Adibi, “Power System Restoration_: Methodologies & Implementation Strategies - Topic 9: Protective System Issues Relays Impeding Restoration”, Rio de Janeiro, set-2008.
- [35] J. D. . McDonald e T. K. Saha, “Analytical Representation of the Relationship Between Generator Design and System Fault Behavior”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, nº. 3, p. 1215– 1223, ago. 2005.
- [36] E. J. Oliveira e J. A. P. Filho, “Introdução ao Estudo de Recomposição de Sistemas Elétricos de Potência”, *Tutoriais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, set. 2010.
- [37] ONS, “Procedimentos de Rede, Submódulo 18.2 - Relação dos sistemas e modelos computacionais”. 2009.
- [38] P. Mestas e M. C. Tavares, “Comparative Analysis of Techniques for Control of Switching Overvoltages During Transmission Lines Energization”, *Electric Power Systems Research*, vol. 80, nº. 1, p. 115–120, jan. 2010.
- [39] A. E. A. Araújo e W. L. A. Neves, *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2005.

- [40] P. M. Valero, “Análise Comparativa de Técnicas de Controle de Sobretensões Transitórias nas Manobras de Energização e Religamento de Linhas de Transmissão”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Campinas, SP, 2007.
- [41] D. Z. N. Huatuco, “Fluxo de Potência Ótimo com Restrições da Curva de Capabilidade do Gerador Síncrono”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, Maranhão, 2006.
- [42] C. H. C. Guimarães e R. D. Rangel, “Diagramas Operacionais de Unidades Geradoras”, presented at the X SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Florianópolis, SC, 2009.
- [43] A. J. Monticelli, *Fluxo de Cargas em Redes de Energia Elétrica*, 1ª ed. São Paulo, SP: Editora Blucher Ltda, 1983.
- [44] M. Dorigo e T. Stützle, *Ant Colony Optimization*. The MIT Press, 2004.
- [45] C. S. Ferreira e C. L. T. Borges, “Solução do Problema de Superação de Disjuntores pela Alocação Ótima de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto Circuito Utilizando Algoritmos Genéticos.”, *Revista Controle & Automação*, vol. 18, nº. 4, dez-2007.
- [46] J. A. Filho, P. C. Fernandez, E. H. Rose, A. D’Ajuz, e A. Castanheira, “Brazilian Successful Experience in the Usage of Current Limiting Reactors for Short-Circuit Limitation.”, presented at the IPST’05 - International Conference on Power Systems Transients 2005, Montreal, Canadá, 2005.
- [47] G. Kindermann, *Curto-Circuito*, 1ª ed. Porto Alegre, RS: Sagra Luzzato, 1992.
- [48] F. R. M. Alves, “Aplicação de Buscas Heurísticas ao Problema de Determinação de Rotas para Recomposição Fluente de Sistemas Elétricos de Potência.”, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.