Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos Departamento de Engenharia Elétrica Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

### Moussa Reda Mansour

Método Rápido para Análise de Contingências e Seleção de Controles Preventivos no Contexto de Estabilidade de Tensão

> São Carlos 2013

### Moussa Reda Mansour

## Método Rápido para Análise de Contingências e Seleção de Controles Preventivos no Contexto de Estabilidade de Tensão

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luís Fernando Costa Alberto

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Rodrigo Andrade Ramos

São Carlos 2013

Trata-se da versão corrigida da tese.

A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

#### AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Mansour, Moussa Reda M289m Método rápido para análise de contingências e seleção de controles preventivos no contexto de estabilidade de tensão / Moussa Reda Mansour; orientador Prof Luís Fernando Costa Alberto; coorientador Prof. Rodrigo Andrade Ramos. São Carlos, 2013. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013. 1. Estabilidade de tensão. 2. Análise de contingências. 3. Seleção de controles preventivos. 4. Agrupamento de controles preventivos. 5. Colapso de tensão. I. Título.

#### FOLHA DE JULGAMENTO

#### Candidato: Bacharel MOUSSA REDA MANSOUR.

Título da tese: "Método rápido para análise de contingências e seleção de controles preventivos no contexto de estabilidade de tensão".

Data da defesa: 29/04/2013

#### Comissão Julgadora:

Prof. Associado Luís Fernando Costa Alberto (Orientador) (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Rodrigo Andrade Ramos** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. **Tatiana Mariano Lessa de Assis** (Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ)

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva (Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Dr. Marcelos Groetaers dos Santos (Operador Nacional do Sistema Elétrico/ONS) **Resultado:** 

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Presidente da Comissão de Pós-Graduação: Prof. Titular **Denis Vinicius Coury** 

> EE SCRISP Serviço de Pos Graduscão Protocolado em <u>( 1</u> 1

Fear is the path to the dark side; Fear leads to anger; Anger leads to hate; Hate leads to suffering.

Yoda Master

Ao meu avô Moussa (**in memorian**)

## Agradecimentos

Eis que chega o momento tão esperado, a escrita dos agradecimentos da tese. Caracterizando assim o fim de edição deste texto, registrando no mesmo as conquistas realizadas ao longo destes anos. Querendo sair do convencional, tradicional, do normal... Edito este agradecimento de forma diferente mas não tirando o sentido do mesmo. Inicialmente, gostaria de agradecer aos meus maravilhosos pais Reda e Fatme, que me trouxeram ao mundo, que depositaram muita confiança em mim. Gostaria de expressar a minha gratidão aos mesmos, pelo carinho e pelo que sempre representarão para mim. Como de praxe, não sou filho único, tive a sorte (ou azar?) de ter três irmãs Noura, Sara e Eva, é um pesadelo, três mulheres, três ciumentas, gurias bravas mas carinhosas e amorosas, e agradeço a elas pelo apoio moral e carinho que vem me passando ao longo dos anos. Com a minha vinda para São Carlos, e pela necessidade de manter o pesadelo, ganhei irmãs não biológicas, gurias maravilhosas, legais e sempre me apoiando. Para elas gostaria de expressar meu enorme carinho e gratidão pela força que me deram ao longo da minha história nesta cidade, sendo elas Tati Nemo, Tati Lyon, Juju, Giovana e **Carol**. Nesta tese me aventurei em uma área por mim até então desconhecida, conhecia apenas o básico devido a minha formação em Ciências da Computação, este doutorado significou um grande desafio para mim, tanto profissional quanto pessoal. Por isso, agradeço o voto de confiança dado pelo prof. Luís Fernando Costa Alberto, que alem de um excelente orientador tornou-se um grande amigo meu. Este agradecimento também é válido ao meu co-orientador prof. Rodrigo Andrade Ramos, que me incentivou no doutorado inteiro e me ajudou nos momentos mais "tensos". Ao longo da minha jornada em São Carlos conheci uma mulher maravilhosa, que com apenas um olhar me conquistou e me fez enxergar o mundo de forma diferente, o nome dela é **Débora**, que carinhosamente a chamo de Haiete. Minha amada, agradeço a você pelo carinho, amizade, companheirismo, confiança, força e inspiração que me passaste ao longo desta incansável jornada. Gostaria também de agradecer aos meus grandes e inesquecíveis amigos Gaucho, Suetake, Doido, Daniel, Daniel (Chefe), Marcelo, Novatão, Gigio, Guido, Monaro, Soldado e Medianeira, pois o tempo passa, e como passa, até o cabelo cai,

mas a satisfação em ter amigos igual vocês é impagável. Não posso esquecer de agradecer ao pessoal do LACO, Camila, Taylon, Alexandre, Henrique, Breno e o Edson, pelo grandes momentos que passamos e ao pessoal do LASENO, Geyverson, Thales, Alvaro, Marcelo, William, Artur, Jhonatan, Liciane e Zé Roberto, pelos incríveis e inesquecíveis momentos de risadas. Em especial ao Edson Geraldi, que por livre e espontânea pressão se prontificou a ler a tese inteira. Muchas Gracias! Aos meus amigos (as), Arthur (da Gi), Giselle (Gi), Daniel (Chefe), Thais, Raquel, Samuel, Salim, Karen, Mi e Jason, este último não sei como me aguenta, toda sexta feira 13 o encho de piadas. Lembro-me como se fosse ontem, eu chegava em casa, cansado, desamparado e sem uma bela música para cantar, ligava a TV e colocava em um canal para assistir os

Simpsons  $\Im$ , agradeço a eles pelo momentos de risadas que me proporcionaram e agradecer aos valiosos ensinamentos do grande mestre **Yoda** não posso esquecer. Ao caminhar da minha história em São Carlos fiz vários amigos, por isso fico um tanto quanto receoso em citar nome por nome. Então, para não esquecer alguém, agradeço a todos que estiveram presentes nesta história. Gracias! Obviamente, agradeço à **USP** (Universidade de São Paulo) pela oportunidade de realização de um doutoramento de alto nível e de reconhecimento internacional, ao pessoal do departamento da pós graduação da engenharia elétrica por todo o suporte que me forneceram e à **FAPESP**, pelo apoio financeiro. Conforme podem ver, poderia escrever uma grande história de agradecimentos aqui, mas neste momento finalizo o texto agradecendo a todos que colaboraram no desenvolvimento pessoal e profissional da minha pessoa.

### Resumo

MANSOUR, M. R., Método Rápido para Análise de Contingências e Seleção de Controles Preventivos no Contexto de Estabilidade de Tensão. São Carlos, 2009, 226p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Nos últimos anos verificou-se um crescimento acentuado da complexidade da avaliação da segurança em Sistemas Elétricos de Potência (SEPs). O aumento das interligações, aliado à operação das redes com altos níveis de carregamento, aumenta a probabilidade de ocorrência de incidentes que podem levar o SEP à instabilidade de tensão, culminando com o colapso de tensão e grandes prejuízos à qualidade do fornecimento de energia elétrica. Neste trabalho foi proposta uma ferramenta rápida para a manutenção da segurança de SEPs no contexto da Estabilidade de Tensão (ET). Para tal, foi desenvolvida uma metodologia rápida para a análise de contingências. Selecionadas as críticas, a eliminação da criticalidade das mesmas é realizada via ações preventivas. Neste contexto, foram desenvolvidas duas abordagens para a seleção de ações preventivas. Na primeira procura-se minimizar o número de controles via técnicas de agrupamento de dados, para eliminar a criticalidade de uma contingência. Na segunda abordagem foi desenvolvida uma estratégia para obtenção de um grupo de controles para eliminar a criticalidade de todas as contingências. Ambas as abordagens baseiam-se em uma metodologia de análise de sensibilidade da margem de ET em relação aos controles preventivos que também foi proposta nesta tese. A eficácia da ferramenta foi comprovada por intermédio de simulações em um SEP. Os resultados foram bastante satisfatórios, os grupos de controles obtidos pela primeira abordagem representam um conjunto mínimo de ações preventivas para eliminar a criticalidade de uma contingência específica. Já na segunda abordagem, foi possível determinar um grupo de controles para a eliminar simultaneamente a criticalidade de todas as contingências. Como produto científico deste doutorado foram obtidas novas metodologias rápidas para a análise de segurança do SEP no contexto da ET.

Palavras-chave: Estabilidade de tensão, análise de contingências, seleção de controles preventivos, agrupamento de controles preventivos, colapso de tensão.

### Abstract

MANSOUR, M. R., A Fast Method for Analysis of Contingency and Selection in the Context of Preventive Control of Voltage Stability São Carlos, 2009, 226. Thesis (PhD Study) - Engineering School of Sao Carlos, University of Sao Paulo.

The complexity of the security assessment in Electric Power Systems (EPS) has received much attention from researches in recent years. The continuous growth in the number of interconnections, allied to networks operating with high loading levels, enhance the probability of incidents that can lead the EPS to voltage instability. Voltage collapse and considerably loss of the electric supply are the principal consequences of this scenery. In this study, we propose a fast tool for supporting the EPS security, in the context of Voltage Stability (VS). To this end, a fast methodology was developed for contingency analysis. Once the critical contingencies are selected, their criticalities are eliminated through the selection of preventive actions. In this context, two approaches were developed. In the first one, we aim at minimizing eh number of controls by using clustering techniques. In this case, the principal objective is to eliminate the criticality of a contingency. In the second approach, we developed a strategy for obtaining a groups of controls in order to eliminate the criticality of all contingencies. Both approaches are based on a methodology for sensitivity analysis of the VS margin with respect to preventive controls which is also proposed in this thesis. The effectiveness of the tool was corroborated by simulations in a EPS. We found the results satisfactory, since the groups of controls achieved by the first approach represent a minimum set of preventive actions that can be taken to eliminate the criticality of a specific contingency. In the second approach, it was possible to determine a minimum group of controls that eliminate the criticality of all contingencies simultaneously. New fast methodologies for security analysis of the EPS in the context of the VS is considered the main scientific product result of this doctorate.

### Keywords: Voltage stability, contingency analysis, preventive controls selection, grouping of preventive controls, voltage collapse.

## Lista de Ilustrações

1.1	Margem de estabilidade de tensão utilizando curva $\lambda V$
1.2	Curva $PV$
1.3	Il ustração conceitual de controle preventivo e corretivo . $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ 41
1.4	Il ustração conceitual de controle preventivo e corretivo via curv a $PV.$ 41
2.1	Transições entre os estados de operação
2.2	Principais funções de segurança em tempo real
2.3	Diferentes níveis na análise de contingências
2.4	Espaço de parâmetros (cargas)
2.5	Mudança do ponto de operação
2.6	Mudança na fronteira das regiões
2.7	Ações de controle
3.1	Visão geral da análise de estabilidade de tensão
3.2	Fluxograma do programa proposto
4.1	Predição e correção de uma solução
6.1	Preditor secante
6.2	Tipos de parametrização e seus respectivos comprimentos de passo 93
7.1	Look-Ahead
7.2	Comparação das curvas $PV$ obtidas
7.3	Limite da potência reativa atingido resultando em um ponto de operação estável. 110
7.4	Limite da potência reativa atingido resultando em um ponto de operação instável. 110
7.5	Curva $(Q-\lambda)$ utilizada para estimação do ponto Q-limite
7.6	Curva $(Q-\lambda)$ com gerador se aproximando dos limites de potência reativa. . 114
7.7	Esquema geral do funcionamento do método <i>QLook-Ahead</i>
9.1	Curva $PV$ perturbada por uma ação de controle $u_c$
10.1	Agrupamento de dados representado por meio de um Diagrama de Venn 139

10.2	Agrupamento de dados representado por meio de um Dendrograma 140
10.3	Diagrama de Venn - Single Link
10.4	Dendrograma Single Link
10.5	Diagrama de Venn - Complete Link
10.6	Dendrograma Complete Link
10.7	Diagrama de Venn - Average Link
10.8	Dendrograma Average Link
10.9	Diagrama de Venn - Centroid Link
10.10	Dendrograma Centroid Link
10.11	Diagrama de Venn - Ward Link
10.12	2Dendrograma Ward Link
10.13	Corte no nível 4 no dendrograma
12.1	Localização dos capacitores e contingências críticas no sistema-teste brasileiro
	de 107 barras
12.2	Curvas $PV$ obtidas pelo método $QLook\mathchar`-Ahead.$
12.3	Curva $PV$ obtida pelo método $\mathit{QLook-Ahead.}$
12.4	Localização dos capacitores e contingências críticas no sistema-teste brasileiro
	de 107 barras
12.5	Dendrograma da contingência na linha (101-103)
12.6	Dendrograma da contingência na linha (101-103) após o corte no nível 0,003. . 171 $$
12.7	Dendrograma da contingência na linha (104-1503)
12.8	Dendrograma da contingência na linha (104-1503) após o corte no nível 0,005. 172
12.9	Dendrograma da contingência na linha (225-231)
12.10	) Dendrograma da contingência na linha (225-231) após o corte no nível $0{,}004{.}$ . 173
12.11	l Localização dos capacitores e contingências críticas no sistema-teste brasileiro
	de 107 barras
B.1	Arquitetura de software
B.2	Tela do software de visualização das METs basendo em aplicações GUI 213
B.3	Tela do software de vizualização das METs baseado em <i>webservice</i>
C.1	Diagrama unifilar do sistema-teste brasileiro de 16 barras
D.1	Diagrama unifilar do sistema-teste brasileiro de 107 barras

## Lista de Tabelas

Ι	Pontos de entrega ou conexão em tensão nominal igual ou superiores a 230kV. 27
1.1	Algumas vantagens e desvantagens da utilização da MET como índice de co-
	lapso de tensão
2.1	Apagões mais recentes no Brasil
2.1	Apagões mais recentes no Brasil
2.1	Apagões mais recentes no Brasil
2.1	Apagões mais recentes no Brasil
2.2	Estados de operação da rede
7.1	Avaliação da precisão do método Look-Ahead.
10.1	Algumas medidas de similaridade e dissimilaridade
10.2	Coordenadas $(x, y)$ do exemplo ilustrativo
12.1	Comparação dos métodos para obtenção da MET
12.2	Análise de contingências no sistema-teste
12.2	Análise de Contingências no sistema-teste
12.2	Análise de Contingências no sistema-teste
12.2	Análise de Contingências no sistema-teste
12.2	Análise de Contingências no sistema-teste
12.3	Capacitores disponíveis para o controle de tensão
12.4	Classificação e aplicação dos controles de tensão na contingência na linha (101-
	103).
12.5	Classificação e aplicação dos controles de tensão na contingência na linha (104-
	1503)
12.6	Classificação e aplicação dos controles de tensão na contingência na linha (225-
	231)
12.7	Contingências críticas

12.8	.8 Sensin bilidades de $\lambda^*_{max_i}$ em relação ao parâmetro de control e $u_c$ considerando		
	todas as contingências críticas		
12.9	Grau de Eficácia dos capacitores		
12.10	0 Matriz de relação R		
12.1	1 Análise dos PMCs obtidos após a aplicação do grupo $\mathcal{G}.$		
C.1	Descrição dos componentes da Tabela C.2		
C.2	Dados das barras do sistema brasileiro reduzido de 16 barras. $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $216$		
C.3	Descrição dos componentes da Tabela C.4		
C.4	Dados das linhas do sistema brasileiro reduzido de 16 barras		
D.1	Descrição dos componentes da Tabela D.2		
D.2	Dados das barras do sistema brasileiro reduzido de 107 barras		
D.2	Dados das barras do sistema brasileiro reduzido de 107 barras		
D.2	Dados das barras do sistema brasileiro reduzido de 107 barras		
D.3	Descrição dos componentes da Tabela D.4		
D.4	Dados das linhas do sistema brasileiro reduzido de 107 barras		
D.4	Dados das linhas do sistema brasileiro reduzido de 107 barras		
D.4	Dados das linhas do sistema brasileiro reduzido de 107 barras		
D.4	Dados das linhas do sistema brasileiro reduzido de 107 barras		

# Lista de Algoritmos

1	Fluxo de carga continuado
2	Look-Ahead
3	<i>QLook-Ahead</i>
4	Classificação dos controles preventivos
5	Algoritmo de agrupamento hierárquico aglomerativo básico
6	Algoritmo de agrupamento hierárquico divisivo básico
7	Algoritmo de agrupamento hierárquico de controles preventivos
8	Seleção global dos controles preventivos

## Lista de Abreviaturas

SEPs	Sistemas Elétricos de Potência
MET	Margem de Estabilidade de Tensão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PT	
TC	Tensão Contratada
TN	Tensão Nominal
TL	
ТА	Tensão de Atendimento
PMC	Ponto de Máximo Carregamento
EDO	Equações Diferenciais Ordinárias
SIL	
LTC	Load Tap Changer
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
HVDC	
EMS	Energy Management Systems
SCADA	
COS	Centros de Operação do Sistema
ATC	Available Transfer Capacity
FPO	
CPFLOW	Continuation Power Flow
SVC	
QLook-Ahe	ead Q-limit Look-Ahead
UVLS	Under Voltage Load Shedding
SOM	

GE	Grau	de Eficácia
----	------	-------------

## Sumário

-		tivação e Objetivos	31
1	$\mathbf{Est}$	abilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência	33
	1.1	Considerações Iniciais	33
	1.2	Conceitos Gerais	33
	1.3	Métodos de Análise	36
	1.4	Ações de Controle Preventivo e Corretivo	40
	1.5	Considerações Finais	42
<b>2</b>	Aná	ilise de Segurança em Sistemas Elétricos de Potência no Contexto	
	de l	Estabilidade de Tensão	43
	2.1	Considerações Iniciais	43
	2.2	Conceitos Gerais	43
	2.3	Estados de Operação de um SEP	49
	2.4	Segurança do SEP em Tempo Real	49
	2.5	Considerações Finais	62
3	Obj	etivos do Doutorado	63
P	arte	II Métodos para a Obtenção da Margem de Estabili- dade de Tensão	69
4	Mé	todos para a Obtenção da MET: Revisão Bibliográfica	71
	4.1	Considerações Iniciais	71
	4.2	Métodos Não Baseados na Direção de Crescimento de Carga $\ .\ .\ .\ .$	72
	4.3	Métodos Baseados na Direção de Crescimento de Carga	76
	4.4	Considerações Finais	81

<b>5</b>	Mo	delagem do Crescimento de Carga do Sistema Elétrico de Potência	
	para	a a Análise da Estabilidade de Tensão	83
	5.1	Considerações Iniciais	83
	5.2	Rede de Transmissão	84
	5.3	Parâmetros de Crescimento de Carga $(\lambda)$	84
	5.4	Considerações Finais	88
6	Flu	xo de Carga Continuado	89
	6.1	Considerações Iniciais	89
	6.2	Formulação Geral	90
	6.3	Parametrização em $\lambda$	94
	6.4	Parametrização Local	95
	6.5	Parametrização pelo Comprimento do Arco	97
	6.6	Implementação Computacional	99
	6.7	Considerações Finais	99
7	Metodologia Proposta para Estimação da MET Considerando os Li-		
	mit	es de Potência Reativa dos Geradores	101
	7.1	Considerações Iniciais	101
	7.2	Estimação da Margem de Estabilidade de Tensão via Look-Ahead	101
	7.3	Método de Predição do Perfil de Tensão	106
	7.4	Avaliação do Desempenho do Método <i>Look-Ahead</i>	107
	7.5	Limite de Potência Reativa dos Geradores	109
	7.6	Considerações Finais	118
D			
Pa	arte	III Métodos para a Classificação e Seleção dos ControlesPreventivos1	19
8	Mét	todos para a Classificação e Seleção de Controles Preventivos: Re-	
	visã	o Bibliográfica	121
	8.1	Considerações Iniciais	121
	8.2	Revisão Bibliográfica	121
	8.3	Considerações Finais	124
9	Met	todologia Proposta para a Classificação de Controles Preventivos	125
	9.1	Considerações Iniciais	125
	9.2	Classificação de Controles Preventivos para a Estabilidade de Tensão	125
	9.3	Parametrização da Variável de Controle para um Banco de Capacitores	128
	9.4	Considerações Finais	130

10 Meto	dologia Proposta para a Seleção de Controles Preventivos: Abor-	
dageı	m Local	133
10.1 (	Considerações Iniciais	. 133
10.2 I	Introdução ao Agrupamentos de Dados	. 134
10.3 4	Agrupamento Hierárquico	. 138
10.4	Algoritmo de Agrupamento Hierárquico Aglomerativo	. 139
10.5 4	Algoritmo de Agrupamento Hierárquico Divisivo	. 144
10.6	Aplicação de Técnicas de Agrupamento de Dados em Problemas de SEP	. 145
10.7 I	Metodologia Proposta	. 146
10.8 (	Considerações Finais	. 147
11 Meto	odologia Proposta para a Seleção de Controles Preventivos: Abor-	
dager	m Global	149
11.1 (	Considerações Iniciais	. 149
11.2	Agrupamento Global dos Controles Preventivos	. 149
11.3 (	Considerações Finais	. 152
Parte I	V Resultados. Considerações Finais e Perspectivas Fu-	
	turas	153
12 Simu	lações e Resultados	155
<b>12 Simu</b> 12.1 (	<b>lações e Resultados</b> Considerações Iniciais	<b>155</b> . 155
<b>12 Simu</b> 12.1 ( 12.2 S	<b>lações e Resultados</b> Considerações Iniciais	<b>155</b> . 155 . 155
<b>12 Simu</b> 12.1 ( 12.2 S 12.3 (	lações e Resultados         Considerações Iniciais         Sistema-Teste         Obtenção da MET via método         QLook-Ahead	<b>155</b> . 155 . 155 . 156
<b>12 Simu</b> 12.1 ( 12.2 S 12.3 ( 12.4 (	lações e Resultados         Considerações Iniciais         Sistema-Teste         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Classificação e Seleção de Contingências	<b>155</b> . 155 . 155 . 156 . 161
12 Simu 12.1 ( 12.2 S 12.3 ( 12.4 ( 12.5 (	lações e Resultados         Considerações Iniciais         Sistema-Teste         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Classificação e Seleção de Contingências         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Local	<b>155</b> . 155 . 155 . 156 . 161 . 165
12 Simu 12.1 ( 12.2 S 12.3 ( 12.4 ( 12.5 ( 12.6 (	lações e Resultados         Considerações Iniciais         Sistema-Teste         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Obtenção e Seleção de Contingências         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Local         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Global	<b>155</b> . 155 . 155 . 156 . 161 . 165 . 174
12 Simu 12.1 ( 12.2 S 12.3 ( 12.4 ( 12.5 ( 12.6 ( 12.7 (	lações e Resultados         Considerações Iniciais         Sistema-Teste         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Classificação e Seleção de Contingências         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Local         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Global         Considerações Finais	<b>155</b> . 155 . 155 . 156 . 161 . 165 . 174 . 179
12 Simu 12.1 ( 12.2 S 12.3 ( 12.4 ( 12.5 ( 12.6 ( 12.7 ( 13 Cons	lações e Resultados         Considerações Iniciais         Sistema-Teste         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Obtenção e Seleção de Contingências         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Local         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Global         Considerações Finais         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Local	<ol> <li>155</li> <li>155</li> <li>156</li> <li>161</li> <li>165</li> <li>174</li> <li>179</li> <li>181</li> </ol>
12 Simu 12.1 ( 12.2 S 12.3 ( 12.4 ( 12.5 ( 12.6 ( 12.7 ( 13 Cons 13.1 A	lações e Resultados         Considerações Iniciais         Sistema-Teste         Sistema-Teste         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Obtenção e Seleção de Contingências         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Local         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Global         Considerações Finais         iderações Gerais         Artigos Aceitos em periódicos	<ol> <li>155</li> <li>155</li> <li>156</li> <li>161</li> <li>165</li> <li>174</li> <li>179</li> <li>181</li> <li>183</li> </ol>
12 Simu 12.1 ( 12.2 S 12.3 ( 12.4 ( 12.5 ( 12.6 ( 12.7 ( 13.1 A 13.2 A	lações e Resultados         Considerações Iniciais         Sistema-Teste         Sistema-Teste         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Classificação e Seleção de Contingências         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Local         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Global         Considerações Finais         Considerações Gerais         Artigos Aceitos em periódicos         Artigo Publicados e Aceitos em Congressos	<b>155</b> . 155 . 155 . 156 . 161 . 165 . 174 . 179 <b>181</b> . 183 . 184
<ul> <li>12 Simu</li> <li>12.1 (1)</li> <li>12.2 (2)</li> <li>12.3 (2)</li> <li>12.3 (2)</li> <li>12.4 (2)</li> <li>12.5 (2)</li> <li>12.6 (2)</li> <li>12.6 (2)</li> <li>12.7 (2)</li> <li>13 Cons</li> <li>13.1 (4)</li> <li>13.2 (4)</li> <li>13.3 (4)</li> </ul>	lações e Resultados         Considerações Iniciais         Sistema-Teste         Sistema-Teste         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Classificação e Seleção de Contingências         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Local         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Global         Considerações Finais         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Global         Considerações Finais         Artigos Aceitos em periódicos         Artigo Publicados e Aceitos em Congressos         Artigos Pendentes	<b>155</b> . 155 . 155 . 156 . 161 . 165 . 174 . 179 <b>181</b> . 183 . 184 . 184
<ul> <li>12 Simu</li> <li>12.1 (1)</li> <li>12.2 (2)</li> <li>12.3 (2)</li> <li>12.3 (2)</li> <li>12.4 (2)</li> <li>12.5 (2)</li> <li>12.6 (2)</li> <li>12.6 (2)</li> <li>12.7 (2)</li> <li>13 Cons</li> <li>13.1 4</li> <li>13.2 4</li> <li>13.3 4</li> <li>14 Persp</li> </ul>	lações e Resultados         Considerações Iniciais         Sistema-Teste         Sistema-Teste         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Classificação e Seleção de Contingências         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Local         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Global         Considerações Finais         Considerações Gerais         Artigos Aceitos em periódicos         Artigos Pendentes         Artigos Pendentes         Considerações Futuras	<ol> <li>155</li> <li>155</li> <li>156</li> <li>161</li> <li>165</li> <li>174</li> <li>179</li> <li>181</li> <li>183</li> <li>184</li> <li>184</li> <li>184</li> <li>184</li> </ol>
12 Simu 12.1 ( 12.2 S 12.3 ( 12.4 ( 12.5 ( 12.6 ( 12.7 ( 13 Cons 13.1 A 13.2 A 13.3 A 14 Persp Parte V	lações e Resultados         Considerações Iniciais         Sistema-Teste         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Obtenção da MET via método QLook-Ahead         Classificação e Seleção de Contingências         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Local         Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Global         Considerações Finais         Considerações Gerais         Artigos Aceitos em periódicos         Artigos Pendentes         Catrigos Futuras         V         V         Textos de Suporte	<ol> <li>155</li> <li>155</li> <li>156</li> <li>161</li> <li>165</li> <li>174</li> <li>179</li> <li>181</li> <li>183</li> <li>184</li> <li>184</li> <li>184</li> <li>187</li> <li>189</li> </ol>

A	pêndices	205
A	Look-Ahead: Embasamento Teórico	207
в	Arquitetura de Software Desenvolvida	211
С	Sistema Brasileiro Reduzido de 16 Barras	215
D	Sistema Teste Brasileiro de 107 Barras	219

## Preâmbulo

A operação de Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) tem como principal objetivo o suprimento do mercado de energia elétrica, levando-se em consideração a continuidade, qualidade e economia do serviço, mantendo as tensões nas barras dentro de limites aceitáveis à frequência aproximadamente constante. Contudo, durante o funcionamento do SEP, podem ocorrer eventos que afetam suas tensões e frequência, podendo inclusive causar a interrupção da continuidade e do atendimento do mesmo na presença de perturbações. Com o aumento continuado da demanda de energia elétrica das últimas décadas, a avaliação da segurança do SEP foi se tornando cada vez mais complexa. Somado ao cenário de crescimento de carga, verifica-se que os SEPs também estão expostos a situações adversas e imprevisíveis que podem levar a situações de falha ou operação fora dos limites técnicos exigidos.

Recentemente, os processos industriais têm passado por ondas de modernização e restauração que aumentaram as possíveis fontes de perturbação no sistema levando a uma menor robustez e menor previsibilidade, dificultando a operação e a minimização do risco de blecautes (MORISON; WANG; KUNDUR, 2004). Com o aumento do número de interligações e com os sistemas trabalhando mais próximos de seus limites de carregamento, novos mecanismos de instabilidade surgiram. No final da década de 70, inúmeros blecautes ocorreram em diversos sistemas no mundo (VAN CUTSEM, 2000) cujo mecanismo de instabilidade não estava associado à perda de sincronismo entre geradores, mas sim a um colapso de tensão (queda de tensão acentuada) em uma ou várias barras do sistema. Desde então, o interesse pelo fenômeno de instabilidade de tensão aumentou consideravelmente e diversos trabalhos de pesquisa foram realizados para esclarecer este fenômeno.

Em (KWATNY; FISCHL; NWANKPA, 1995), por exemplo, foi demonstrado que o SEP pode ser levado à instabilidade de tensão através de incrementos de carga lentos e sucessivos. O fenômeno de instabilidade de tensão pode ser explicado pela teoria de bifurcações, a qual descreve as mudanças qualitativas no SEP em análise, assim como a perda da estabilidade devido à variação de um parâmetro do mesmo. Em um SEP, a variação da carga pode ser considerada como um parâmetro do sistema que, quando elevado gradativamente, conduz o sistema a uma bifurcação do tipo Sela-Nó (HALE; KOçAK, 1991), comumente chamado de ponto de máxima transferência de potência, cuja tradução se dá pela singularidade da matriz Jacobiana.

Estudos de segurança em SEP são baseados em condições existentes<sup>1</sup> que são suficientemente precisas para promover um estudo detalhado do funcionamento do sistema de potência, assim como dos seus limites de operação. Um procedimento utilizado atualmente para estes estudos de segurança consiste na obtenção da Margem de Estabilidade de Tensão (MET) do sistema através da avaliação de sua respectiva curva PV. A MET é definida como a distância, em termos de MW e/ou Mvar, do ponto atual de operação até o ponto de limite da rede do sistema parametrizado (OLIVEIRA, 2009). Conforme pode ser observado, a MET é uma das maneiras para se quantificar a segurança de um SEP do ponto de vista da estabilidade de tensão e a sua obtenção em tempo real é altamente desejada nos centros de operação.

Obtida a MET, faz-se necessário determinar em qual estado de operação<sup>2</sup> o SEP se encontra. Para tal, os órgãos reguladores determinam diretrizes que auxiliam os operadores na operação do SEP. Dentre os procedimentos de rede adotados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) brasileiro, no submódulo 23.3, data de vigência 11 de novembro de 2011 (ONS, 2011), são estabelecidas as diretrizes básicas para a implementação, revisão e gerência dos sistemas especiais de proteção, que englobam os esquemas de controle de emergência e de controle de segurança. Como critério geral, a MET para estudos de ampliações, reforços e planejamento da operação são de 7% e 4%, nas análises com rede completa e incompleta, respectivamente. Em casos de operação em tempo real, uma margem de 4% é adotado pelo (ONS, 2011).

Uma outra questão determinada pelos órgãos reguladores é o Perfil de Tensão (PT) em regime permanente. Para tal, a Resolução Nº 676 de 19 de dezembro de 2003 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual estabelece as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente, determina, de acordo com o art. 4°, que "a Tensão a ser Contratada (TC)<sup>3</sup> pela concessionária ou usuários, junto ao ONS, ou a tensão a ser contratada entre concessionárias deverá ser a Tensão Nominal (TN)<sup>4</sup> de operação do sistema no ponto de conexão" (ANEEL, 2003). Na Tabela I é apresentada a classificação dos níveis de tensão igual ou superiores a 230kV.

Na Tabela I, o termo Tensão de Leitura (TL) é o valor eficaz de tensão, integralizado a cada 10 (dez) minutos, obtido pela medição por meio de equipamentos apropriados, expresso em volts ou quilovolts e Tensão de Atendimento (TA) é o valor eficaz de tensão no ponto de entrega ou de conexão, obtido por meio de medição, podendo ser classificada em adequada, precária ou crítica, de acordo com a leitura efetuada, expresso em volts ou

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Como por exemplo a quantidade de carga e a topologia do sistema.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Os estados de operação fornecem o nível de estresse da rede em relação a um determinado distúrbio, para mais informações ver Seção 2.3.

 $<sup>^{3}</sup>$ Valor eficaz de tensão que deverá ser informado ao consumidor por escrito, ou estabelecido em contrato, expresso em volts ou quilovolts.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Valor eficaz de tensão pelo qual o sistema é designado, expresso em volts ou quilovolts.

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0.95 \text{ TC} \leq \text{TL} \leq 1.05 \text{ TC}$
Precária	$0.93 \text{ TC} \le \text{TL} \le 0.95 \text{ ou TC}$ 1.05  TC < TL < 1.07  ou TC
Crítica	$\mathrm{TL} < 0.93~\mathrm{TC}$ ou $\mathrm{TL} > 1.07~\mathrm{TC}$

Tabela I: Pontos de entrega ou conexão em tensão nominal igual ou superiores a 230kV.

quilovolts (ANEEL, 2003).

Dentro deste contexto, faz-se então necessário estabelecer estratégias de controle eficazes para atender as diretrizes estabelecidas pelos órgãos supracitados. É sempre desejável a utilização otimizada dos recursos disponíveis, com tempo de atuação reduzido, preservando os consumidores, ou seja, as cargas do SEP. Vale ressaltar que, em (SAVULESCU, 2006), destacaram-se preocupações sérias que surgiram a respeito da carência de ferramentas em tempo real capazes de detectar e alertar os operadores do SEP sobre as condições em que o mesmo se encontra, que podem resultar em blecautes devido à instabilidade. Neste contexto, a necessidade de quantificar, detectar e prevenir o risco de blecautes na operação do SEP tem se tornado particularmente relevante.

Do ponto de vista estático, dado certo ponto de operação e uma direção de variação de carga e geração, pode-se determinar a MET calculando-se inúmeros fluxos de carga ou utilizando programas do tipo fluxo de carga continuado (CHIANG et al., 1995). Para garantir a segurança do SEP, este processo deve ser repetido para uma lista grande de contingências. Geralmente, esta análise é realizada periodicamente para atualizar a MET.

Em sistemas de grande porte, a resolução de inúmeros fluxos de carga representa um grande esforço computacional e pode inviabilizar a implementação de uma ferramenta rápida para a avaliação da segurança do SEP em tempo real. Para contornar estes problemas, alguns pesquisadores sugeriram métodos de avaliação da MET que não requerem o cálculo de múltiplos fluxos de carga. Dentre estes, pode-se citar o índice do menor valor singular (LOF et al., 1992) da matriz jacobiana do fluxo de carga, métodos baseados em função energia (GUEDES; ALBERTO; BRETAS, 2005), método baseado na análise modal (SILVA, 2001) e índices especiais (DESTER, 2006).

Vários destes métodos têm o inconveniente de não levar em consideração, no processo de cálculo de MET, a "direção" de crescimento de carga e geração. Quando esta "direção" não é considerada, valores das METs que não refletem a realidade podem ser obtidos. Outros métodos utilizam linearizações e avaliam a MET a partir de sensibilidades locais, embora a direção de carga possa ser levada em consideração, a análise local pode não refletir corretamente o comportamento do sistema no ponto de colapso. Como consequência, METs erradas podem ser obtidas. Em (CHIANG; WANG; FLUECK, 1997), foi proposta uma nova metodologia para medir a MET que não requer o cálculo de vários fluxos de carga e leva em consideração a direção de crescimento de carga e geração do SEP. Na literatura, em inglês, é conhecida como *Look-Ahead*. Utilizando apenas duas soluções de fluxo de carga, obtêm-se uma previsão do Ponto de Máximo Carregamento (PMC) da rede elétrica. A metodologia está baseada na forma normal das equações algébricas no ponto de bifurcação sela-nó e portanto, leva em consideração a característica não-linear do problema. Esta metodologia tem sido empregada para análise de estabilidade de grandes redes tais como PJM (LI; CHIANG; TONG, 2004) e CAliforniaISO (VARGHESE et al., 2008). Detaca-se que a metodologia *Look-Ahead* é adequada para detectar a MET devido a bifurcação do tipo sela-nó. Um refinamento desta metodologia que também leva em consideração bifurcações induzidas por limites foi proposto em (ZHAO; CHIANG; LI, 2003).

Em face ao exposto, neste projeto de doutorado foi desenvolvida uma metodologia rápida para a manutenção da segurança do SEP com relação à estabilidade de tensão, de forma que a MET seja respeitada. Para tal, o principal objetivo foi o desenvolvimento de métodos rápidos para a análise e classificação de contingências e a seleção ótima de controles preventivos para eliminar a criticalidade da MET do SEP. Dentro deste contexto, o presente trabalho está organizado nas seguintes partes:

### Parte I - Estabilidade de Tensão: Conceitos Preliminares, Motivação e Objetivos

Nesta parte são abordados tópicos introdutórios relacionados ao problema de estabilidade de tensão (ver Capítulo 1) e da análise de segurança do SEP (ver Capítulo 2). Após a contextualização do problema de análise de segurança dos SEP serão apresentadas as metas do presente doutoramento (ver Capítulo 3).

### Parte II - Métodos para a Obtenção da Margem de Estabilidade de Tensão

Nesta parte são abordados alguns dos principais métodos existentes na literatura para a obtenção da MET (ver Capítulo 4), a modelagem do SEP utilizada neste trabalho (ver Capítulo 5) e os aspectos teóricos das metodologias: fluxo de carga continuado (ver Capítulo 6) e *Look-Ahead* (ver Capítulo 7). No Capítulo 7 será apresentada a metodologia, proposta neste trabalho, para a estimação da MET via o método *Look-Ahead* considerando os limites de potência reativa dos geradores.

Destaca-se que, nesta parte do texto foram realizadas simulações do sistema teste brasileiro composto por 16 barras. Estas simulações tiveram como principal objetivo comparar os métodos: fluxo de carga continuado e *Look-Ahead*. Para mais informações sobre este sistema ver Apêndice C.

■ Parte III - Classificação e Seleção das Ações dos Controles Preventivos

Nesta parte são abordados alguns dos principais métodos para a classificação e seleção dos controles preventivos (ver Capítulo 8) e as metodologias propostas neste trabalho para a classificação das ações de controle preventivo (ver Capítulo 9) e a seleção dos mesmos (ver Capítulos 10 e 11).

### ■ Parte IV - Resultados, Conclusões e Perspectivas Futuras

Nesta parte são discutidos os resultados obtidos pelo método desenvolvido neste trabalho (ver Capítulo 12), bem como as conclusões (ver Capítulo 13) e as perspectivas futuras(ver Capítulo 14).

#### ■ Parte V - Textos Complementares

Nesta parte são apresentados os textos complementares a este trabalho, que servem de suporte para o leitor, sendo eles: a demonstração matemática do método *Look-Ahead* (ver Apêndice A), a arquitetura de software desenvolvida (ver Apêndice B), e os sistemas testes utilizados nas simulações neste trabalho (ver Apêndices C e D).

## Parte I

# Estabilidade de Tensão: Conceitos Preliminares, Motivação e Objetivos
## Capítulo 1

# Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência

#### 1.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, uma revisão geral do problema de estabilidade de tensão é apresentada. Na Seção 1.2, são apresentados os conceitos gerais sobre estabilidade de tensão; na Seção 1.3, alguns métodos de análise de estabilidade de tensão são abordados. Na Seção 1.4, são abordados alguns conceitos relacionados às ações de controle corretivo e preventivo para eliminar possíveis instabilidades que possam ocorrer no SEP no contexto de estabilidade de tensão; e, na Seção 1.5, as consideração finais relacionadas a este capítulo são apresentadas.

#### 1.2 Conceitos Gerais

A estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) é a capacidade do mesmo permanecer em um estado de equilíbrio estável, sob condições de operação normal, e recuperar-se para um estado de equilíbrio estável, com a maioria das suas variáveis dentro de limites pré-estabelecidos, após alguma perturbação ocorrida, como por exemplo, a ocorrência de alguma contingência (BALU et al., 1992).

A estabilidade de tensão está relacionada com a habilidade do SEP em manter aceitáveis as tensões de todas as barras sob condições normais de operação e depois de submetido a alguma pertubação. Um SEP entra em estado de instabilidade de tensão quando alguma perturbação, um aumento na demanda ou uma mudança nas condições do mesmo provoca um declínio ou um aumento progressivo e descontrolado da tensão em algumas barras (KUNDUR; BALU, 1998).

O colapso de tensão é um processo pelo qual a sequência de eventos associada com a instabilidade de tensão conduz a um blecaute ou a tensões baixas incomuns em uma parte significante do SEP. A estabilidade de tensão depende da habilidade em manter/restaurar o equilíbrio entre a demanda da carga e o fornecimento à carga através do SEP. Uma possível consequência da instabilidade de tensão é a perda de carga em uma área, ou saída de linhas de transmissão e outros elementos pela atuação dos respectivos sistemas de proteção e até a ocorrência de saídas de equipamentos em cascata, por exemplo, a perda de sincronismo de alguns geradores. A queda progressiva das tensões nas barras do SEP também pode estar associada com a instabilidade do ângulo do rotor (KUNDUR et al., 2004).

O principal fator que contribui para a instabilidade de tensão é a queda da tensão que ocorre devido ao fluxo de potência ativa e reativa através das reatâncias indutivas das linhas de transmissão, que limitam a capacidade da linha de transmissão em transferir a potência e em manter a tensão nos níveis pré estabelecidos. Ademais, a transferência de potência e a manutenção da tensão são limitados quando os geradores atingem os seus limites de capacidade de tempo de sobrecarga da corrente de armadura e de campo. A estabilidade de tensão é ameaçada quando, uma perturbação aumenta a demanda de potência reativa além da capacidade sustentável das fontes de potência reativa disponíveis no SEP (KUNDUR et al., 2004).

Embora a forma mais comum de instabilidade de tensão seja a queda progressiva das tensões nas barras, o risco de instabilidade de sobre-tensão também existe. Esta última é provocada pelo comportamento capacitivo da rede (linhas de transmissão de alta tensão operando abaixo da potência natural<sup>5</sup>, do inglês *Surge Impedance Loading (SIL)*) e também pela atuação dos limitadores de sub-excitação, impedindo que os geradores e/ou compensadores síncronos absorvam o excesso de potência reativa. Neste caso, a instabilidade está associada com a incapacidade de combinar a geração e o sistema de transmissão para operar abaixo de determinado nível de carga. Destaca-se também que, a mudança de *taps* de transformadores na tentativa de restabelecer a potência da carga, provoca a instabilidade de tensão a longo prazo (KUNDUR et al., 2004).

A estabilidade de tensão está associada com os aspectos do desempenho dinâmico e de regime permanente do SEP. O controle de tensão, a administração e compensação de potência reativa, estabilidade de ângulo do rotor (sincronismo), proteção preventiva e operação de centros de controle são fatores que influenciam a estabilidade de tensão. As hipóteses de desacoplamento  $P - \delta$  e Q - V não são satisfeitas durante situações de alto estresse do SEP, ou seja, ângulos e transferência de potência elevados. Os problemas de estabilidade de tensão normalmente ocorrem durante condições altamente estressadas, usualmente após perturbações de grande porte (TAYLOR, 1994).

Geralmente é difícil controlar o perfil de tensão de uma rede elétrica malhada e esparsa, com linhas de transmissão de longas distâncias e extra alta tensão. Os fluxos de carga nas linhas de transmissão de extra alta tensão mudam de pesados para leves e até

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Potência natural de uma linha de transmissão de corrente alternada pode ser definida como sendo a potência ativa, que ao ser transportada pela linha de transmissão, causa um consumo de potência reativa igual à potência reativa gerada pela capacitância da mesma linha.

nulos e/ou de uma direção para outra em um ciclo de dia e também experimentam excesso ou carência de potência reativa periodicamente, o que resulta em uma flutuação de tensão periódica. Com o objetivo de manter o nível de tensão desejado, faz-se necessário gerar ou consumir potência reativa em barras estratégicas. Conseguem-se variações lentas de tensão através de *taps* de transformadores e capacitores/reatores controlados por um sistema supervisor de tensão. Variações rápidas de tensão são obtidas através de compensadores síncronos e compensadores estáticos de reativos (*Flexible AC Transmission Systems* – FACTS) (FERREIRA, 2006).

Dentro deste contexto, nota-se que a instabilidade de tensão pode ser causada tanto por pequenas perturbações como por grandes perturbações e pode ocorrer depois de alguns segundos ou até vários minutos após uma perturbação. Entretanto, estudar todos esses fenômenos ao mesmo tempo torna-se inviável devido a sua natureza complexa, por isso, faz-se a separação de tais fenômenos para efeito de estudo, tais como (DESTER, 2006):

- Estabilidade de tensão a pequenas perturbações: refere-se à capacidade que o SEP possui em manter o perfil de tensão em regime sob variações normais de carga, geração ou perdas de elementos pouco significativos no SEP. Esta capacidade depende do estado da rede, da característica da carga e dos sistemas de controle envolvidos. Neste caso é permitida uma modelagem simplificada, onde a dinâmica dos componentes do SEP pode ser representada por modelos linearizados em torno de um ponto de equilíbrio (KUNDUR; BALU, 1998).
- Estabilidade de tensão a grandes perturbações: refere-se à capacidade que o SEP possui em manter o perfil de tensão em regime após ocorrências de perturbações severas tais como: ocorrência de falta na rede de transmissão, perda de grandes blocos de geração ou de carga. Depende das características de carga e das interações de proteções de controles contínuos e discretos.

Este estudo deve contemplar uma janela de tempo que varie desde um até dez segundos ou até minutos para que se englobem fenômenos rápidos (atuações dos controles do sistema HVDC – do inglês, *High-Voltage Direct Current*, por exemplo) e fenômenos mais lentos (por exemplo, atuação de *Load Tap Changer* (LTC)) (DESTER, 2006).

- Estabilidade de tensão de curta duração: baseia-se na dinâmica dos componentes de atuação rápida, tais como: motores de indução, dispositivos FACTS (do inglês, *Flexible Alternating Current Transmission System*), dinâmica inercial dos geradores, controles digitais. Nesse caso, a janela de tempo para análise do fenômeno vai desde 0,1 segundo até alguns segundos (TAYLOR, 1992).
- Estabilidade de tensão de longa duração: baseia-se na dinâmica dos componentes de atuação lenta, tais como: LTC, sobrecargas em linhas e transformadores, cargas

controladas termostaticamente, dentre outros. Nesse caso, a janela de tempo para análise do fenômeno estende-se até a ordem de minutos (TAYLOR, 1992).

A seguir serão apresentados, de forma simplificada, os métodos de análise de estabilidade de tensão, dando maior ênfase aos métodos estáticos.

#### 1.3 Métodos de Análise

As metodologias para avaliação do fenômeno de estabilidade de tensão são classificadas em estáticas, quase-dinâmicas e dinâmicas. Embora tenham o mesmo objetivo, essas metodologias representam formas bem distintas de abordar o problema:

Análise Dinâmica: utiliza técnicas não-lineares de simulação no domínio do tempo, fornecendo dessa forma uma resposta mais fiel do comportamento dinâmico do SEP após a ocorrência de qualquer tipo de perturbação. Estes métodos são os únicos capazes de retratar cronologicamente, com precisão, os eventos responsáveis por um colapso de tensão, fornecendo informação útil para a coordenação de dispositivos de controle e de proteção, bem como representando uma ferramenta indispensável para estudos de casos críticos e específicos, onde métodos estáticos omitem detalhes importantes. No entanto, métodos de simulação não-linear no domínio do tempo requerem um grande esforço computacional, tornando-os inadequados quando é necessário analisar um grande conjunto de cenários, envolvendo contingências de linhas de transmissão, de unidades geradoras, crescimentos sucessivos de carga, dentre outros (SILVA, 2001).

As limitações supracitadas tornam o uso da abordagem dinâmica inviável tanto para monitoração *on-line* do SEP quanto para a análise de grandes SEP para os quais faz-se necessária a avaliação de uma grande quantidade de cenários.

Análise quase-dinâmica: conforme supracitado, as simulações no domínio do tempo de um grande SEP são altamente custosas em termos computacionais, apesar dos computadores atuais fornecerem o suporte e a rapidez necessários para processar o volume de informações. Como os componentes do sistema têm constantes de tempo diferenciadas, isto é, alguns respondem mais lentamente que outros, podese obter os mesmos resultados decompondo-se a dinâmica em dinâmicas lentas e rápidas (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1996). Assim, as simulações ganham em tempo computacional, sem prejuízo dos resultados obtidos (LIMA LOPES, 2004).

Neste caso, é comum supor que as dinâmicas rápidas do sistema (constante de tempo rápidas) sejam estáveis e aproximadas por sua dinâmica de equilíbrio (VAN CUT-SEM; VOURNAS, 1996). Com essa metodologia, os resultados obtidos são satisfatórios em relação ao modelo dinâmico do sistema, em se tratando de tempos superiores aos tempos dos transitórios envolvidos. A vantagem desta abordagem está no fato das equações serem algébricas e, portanto, solucionadas através de um método numérico iterativo qualquer, como por exemplo o método de Newton-Raphson. Assim, obtém-se uma sucessão de pontos de equilíbrio em função do tempo dos elementos discretos do sistema. Em resumo, tem-se um modelo quase-dinâmico do SEP, ou modelo "quase-estático", onde o intervalo de tempo entre um estado e outro é determinado pelos elementos de respostas mais lentas (tempo discreto) do SEP (LIMA LOPES, 2004).

Análise estática: embora a estabilidade de tensão seja um fenômeno dinâmico, diversas ferramentas estáticas têm sido utilizadas para análise de SEP de grandes portes, pois estas requerem um baixo custo computacional e apresentam baixa complexidade para a sua modelagem. Em (MORISON; GAO; KUNDUR, 1993; SAUER; PAI, 1990) foi apresentado que, sob certas condições, a análise do problema através das abordagens estáticas ou dinâmicas levam a resultados semelhantes.

A análise estática considera que, em muitos casos, a dinâmica do SEP com influência na estabilidade de tensão varia lentamente. Assim sendo, o modelo dinâmico, representado através do conjunto de equações diferenciais, pode ser reduzido para um conjunto de equações puramente algébricas para cada ponto de equilíbrio, considerando apenas o modelo de sistema utilizado nos estudos de fluxo de carga. Este conceito é útil para determinar, num instante qualquer, como a tensão irá responder a uma pequena mudança no SEP, como por exemplo, a transição entre períodos de carga (ALBUQUERQUE, 2005).

Em linhas gerais, a análise estática baseia-se na avaliação da margem de potência ativa e/ou reativa através de processamentos sucessivos de fluxo de carga, ou calculando-se diretamente o ponto de colapso de tensão (VAN CUTSEM, 2000).

As margens de potência ativa e reativa são avaliadas, geralmente, através das curvas PQ e PV, após o amortecimento das oscilações transitórias, e antes das tomadas das ações manuais dos operadores.

Devido às características próprias da instabilidade de tensão (variações lentas da tensões), métodos estáticos são usados e, na realidade, estes oferecem uma série de vantagens relacionadas com a eficiência no cálculo e no fornecimento de informações importantes sobre o fenômeno de colapso de tensão. A utilização de métodos estáticos é fundamental para a análise de estabilidade de tensão em ambientes em que há restrições rigorosas com relação a tempos computacionais, como por exemplo a operação em tempo real. A proximidade à instabilidade de tensão, e consequentemente o colapso de tensão, é avaliada como a distância entre o ponto de operação atual (caso base) e aquele para o qual a matriz Jacobiana torna-se singular, este último ponto pode ser denominado como Ponto de Máximo Carregamento (PMC). Esta distância é chamada de margem de segurança quanto a estabilidade de tensão, ou simplesmente de Margem de Estabilidade de Tensão (MET) e refere-se a margem de manobra para lidar com aumentos de carga e contingências (QUINTELA, 2002).

A Figura 1.1 ilustra, de forma simplificada, a ideia de MET através de uma curva  $\lambda V$ .



Figura 1.1: Margem de estabilidade de tensão utilizando curva  $\lambda V$ .

Na Figura 1.1, o parâmetro  $\lambda^{bc}$  representa o carregamento atual do SEP, denominado de caso base, e  $\lambda^{max}$  representa o máximo carregamento que o SEP suporta. A diferença entre os dois carregamentos corresponde à MET. À medida que o parâmetro  $\lambda$  cresce, o SEP se aproxima do ponto de colapso de tensão, representado pelo parâmetro  $\lambda_{max}$ . A utilização da MET como índice de colapso de tensão têm as suas vantagens e desvantagens, conforme pode ser visto na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Algumas vantagens e desvantagens da utilização da MET como índice de colapso de tensão.

Vantagens	<ul> <li>Fácil aceitação e entendimento.</li> <li>Pode ser facilmente calculada, pois é baseada em modelos estáticos e não inclui a dinâmica dos componentes da rede elétrica.</li> </ul>
Desvantagens	<ul> <li>Requer suposição de crescimento de carga e geração em uma dada direção, que algumas vezes não está disponível.</li> <li>Por ser baseada em métodos estáticos, não obtém informações sobre a cronologia dos mecanismos que causam a instabilidade do SEP.</li> <li>Pode não detectar instabilidades de natureza oscilatória.</li> </ul>

A MET é geralmente obtida através dos cálculos das curvas PV ou QV, partindo de um determinado ponto de operação. Isto é realizado resolvendo-se uma série de fluxos de carga, considerando-se incrementos de carga sucessivos, de acordo com uma direção pré-selecionada tanto para aumento de carga quanto para aumento de geração. As curvas PV representam a relação entre o crescimento de carga e a variação da tensão. Este método é geralmente usado para avaliar a MET como um todo (SILVA, 2001). Através desta curva pode-se visualizar o comportamento da tensão em função do carregamento da rede (potência ativa).

A Figura 1.2 ilustra uma curva PV típica, na qual  $V_0 \in P_0$  representam, respectivamente, a tensão e a potência ativa do caso base (estado atual do SEP) e  $V_{crit} \in P_{max}$ representam, respectivamente, a tensão e a potência ativa no ponto de colapso de tensão (ponto conhecido como nariz da curva ou *nose*). A parte da curva que corresponde à região de operação **estável** é onde as tensões são superiores à tensão ( $V_{crit}$ ) correspondente ao nariz da curva e a parte que corresponde à região de operação **instável** é aquela onde as tensões são inferiores à tensão ( $V_{crit}$ ) correspondente ao nariz da curva.



Figura 1.2: Curva PV

Os pontos da curva PV são normalmente obtidos a partir da solução de um problema de fluxo de carga, utilizando-se, por exemplo, o método de Newton-Raphson. Entretanto, o comportamento não-linear do SEP começa a aparecer à medida que o mesmo é estressado, conforme pode ser notado na Figura 1.2. Isto é refletido na matriz Jacobiana do fluxo de carga, a qual aproxima-se da singularidade à medida que os pontos da curva PV são calculados e, consequentemente, pode provocar dificuldades de convergência do método de Newton-Raphson. Para resolver este problema, e obter a curva PV completa, vários métodos de fluxo de carga baseados em técnicas de continuação (SEYDEL, 1947) foram propostos na literatura (AJJARAPU; CHRISTY, 1991; CHIANG et al., 1995). Estes métodos consistem, normalmente, de etapas de parametrização, previsão, controle de passo e correção. Através de modificações mínimas na matriz Jacobina do fluxo de carga, elimina-se a singularidade no PMC (SILVA, 2001). Mais detalhes a respeito deste método e outros para determinar a curva PV serão abordados no Capítulo 6.

Um possível critério de estabilidade de tensão pode se basear, por exemplo, na MET (ver Figura 1.1). Ou seja, considera-se que a rede elétrica esteja segura do ponto de vista de estabilidade de tensão caso a MET seja maior que um determinado limiar prédeterminado. Caso constatado que o SEP apresenta ou apresentará situações de instabilidade de tensão, ações de controle preventivo e/ou corretivo deverão ser tomadas para melhorar a segurança de tensão do SEP.

#### 1.4 Ações de Controle Preventivo e Corretivo

O objetivo do controle preventivo é impedir a instabilidade de tensão antes desta definitivamente ocorrer. As ações de controle preventivo, basicamente, movem o estado do SEP para um ponto de operação com tensões seguras, mudando o ponto de operação atual do SEP e evitando o surgimento de violações, caso contingências venham ocorrer. O objetivo do controle corretivo é estabilizar o SEP instável conduzindo a trajetória do SEP para um novo ponto de equilíbrio estável. As ações de controle corretivo, basicamente, mantém a estabilidade de tensão do SEP, eliminando a violação após ter sido detectada, por exemplo em uma contingência inesperada e severa (WANG; AJJARAPU, 2001).

O ponto de operação do SEP sofre deslocamentos constantes, tais como: variação da carga, alterações topológicas, e ações de controle que são realizadas de forma automática ou através dos operadores da rede elétrica. Tais ações de controle objetivam atingir o melhor ponto de operação para o nível de demanda atual, segundo algum critério, por exemplo, minimização das perdas de transmissão, manutenção do perfil de tensão, etc. Portanto, além da variação da carga, a atuação dos controles também afeta a MET (FER-REIRA, 2006).

Considerando a estabilidade de tensão, vários controles locais e centralizados estão disponíveis. Os controles diretos e indiretos de cargas são críticos para estabilidade de tensão. Cada concessionária ou área de controle tem um controle central, ou centro de despacho, onde comandos de controle mais lentos automáticos e manuais são emitidos para usinas e subestações (TAYLOR, 1994). Pode-se citar algumas ações de controle comuns para a eliminação de sobrecargas em linhas de transmissão, tais como: alterar o perfil de geração de MW (redespacho de geradores); alterar fluxos de potência de intercâmbio; alterar a posição do *tap* de transformadores defasadores; realizar alterações topológicas (do inglês, *network switching*) ou cortar carga. E também algumas ações de controle para a eliminação de violações de tensão, por exemplo: alterar a tensão em barra de geração; alterar a posição do *tap* de transformadores de fase; conectar/desconectar elementos reativos em derivação (capacitores e reatores); realização de alterações topológicas ou corte de carga (FERREIRA, 2006).

A Figura 1.3 ilustra o conceito de controle preventivo e corretivo. Representa-se o espaço de parâmetros em que o SEP foi levado por alguma razão a um ponto de operação sem solução O. A figura mostra que CC é o controle corretivo para mover o ponto sem solução O para bem próximo do ponto de fronteira  $B_c$ ; PC é o controle preventivo realizado de forma a se atingir a MET estabelecida  $(B_p)$  e VC corresponde as ações de

controle que levam o SEP a operar com as tensões dentro dos limites pré-estabelecidos  $(B_v)$  (WANG; AJJARAPU, 2001).



Figura 1.3: Ilustração conceitual de controle preventivo e corretivo. Adaptado de: (FENG; AJJARAPU; MARATUKULAM, 2000)

A Figura 1.4 ilustra o conceito das ações de controle preventivo e corretivo via uma curva *PV*. Para tal, supõem-se um corte de carga para ambos os controles (WANG; AJJARAPU, 2001).



Figura 1.4: Ilustração conceitual de controle preventivo e corretivo via curva PV. Adaptado de: (FENG; AJJARAPU; MARATUKULAM, 2000)

Na Figura 1.4, o ponto de operação O representa o SEP na pré-contingência, isto é, o SEP se encontra em uma situação estável antes a ocorrência de uma contingência severa. Após a ocorrência desta contingência, o controle corretivo de corte de carga  $\Delta P_c$ é acionado rapidamente com o objetivo de evitar que o SEP sofra um colapso transitório de tensão<sup>6</sup>. A solubilidade do SEP foi restaurada após a aplicação do controle corretivo, entretanto, tal controle pode não garantir a estabilidade de tensão do SEP, isto é, a aplicação do controle corretivo pode não levar o novo ponto de operação para a MET exigida para garantir a estabilidade de tensão do SEP. Deste modo, faz-se necessário aplicar uma ação de controle preventivo para mover o ponto de operação do SEP para longe do ponto crítico  $B_c$ , levando-o para o ponto de operação  $B_p$ , através da aplicação do corte de carga  $\Delta P_l$ . No ponto de operação  $B_p$ , podem existir algumas violações das restrições de tensão em algumas barras. Em face disso, faz-se necessário aplicar a ação de algum controle com o objetivo de corrigir tais violações de tensão, para tal, é aplicado o corte de carga  $\Delta P_v$  para mover o ponto de operação  $B_p$ , levando-o para o ponto de operação  $B_v$ .

A área entre os valores  $V_{max}$  e  $V_{min}$  na Figura 1.4 representa os limites de tensão estabelecidos. Os problemas de baixas tensões são resolvidos, parcialmente, via ações de controle preventivo, através de diversos dispositivos de controle de tensão.

### 1.5 Considerações Finais

Foi visto neste capítulo que o problema de estabilidade de tensão pode ser causado por pertubações e o mesmo pode ser analisado sob três pontos de vista: o dinâmico, o quasedinâmico e o estático. Dentre os três, o último é o mais abordado nas ferramentas de análise do fenômeno em questão, devido a sua baixa complexidade de modelagem e baixo tempo computacional requerido nas simulações de SEP de grande porte.

A MET é vista como um dos principais índices para o estudo da estabilidade de tensão de um SEP, nesta pode-se estudar possíveis proximidades do SEP à instabilidade de tensão, evitando assim possíveis colapsos de tensão, que podem levar a blecautes. Caso detectado que o SEP está próximo do colapso de tensão, medidas de ações de controle devem ser tomadas para a manutenção da MET em níveis aceitáveis, impedindo assim o comprometimento da estabilidade de tensão do SEP.

Este presente trabalho tem como principal objetivo desenvolver métodos para a avaliação estática da MET considerando contingências do SEP e para seleção ótima de controles preventivos com o objetivo de garantir a estabilidade de tensão do mesmo.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>O colapso transitório de tensão é associado a um repentino aumento de fluxo de potência em uma linha de transmissão e a uma deficiência de geração de potência reativa, o que provoca um afundamento de tensão temporário em algumas barras e pode ser seguido de perda de estabilidade eletromecânica (PAI-XãO, 2006).

## Capítulo 2

# Análise de Segurança em Sistemas Elétricos de Potência no Contexto de Estabilidade de Tensão

#### 2.1 Considerações Iniciais

Conforme visto no Capítulo 1, a MET é um importante índice para medir a proximidade do SEP ao colapso de tensão. Este índice é geralmente obtido para as contingências do sistema, e através desta análise é verificada a segurança do mesmo. Caso exista contingências que não atendam os critérios pré-estabelecidos pelos órgãos reguladores, faz-se necessário determinar ações de controle para a manutenção das mesmas. Neste trabalho pretende-se avaliar a MET de todas contingências e eliminar a criticalidade das selecionadas. Para tanto, neste presente capítulo serão apresentadas algumas das principais definições a respeito da análise de segurança de SEPs no contexto da estabilidade de tensão.

Na Seção 2.2, são abordados os conceitos gerais a respeito de análise de segurança de SEPs; na Seção 2.3, são apresentados os estados de operação do SEP; na Seção 2.4, são apresentados os tópicos referentes à segurança do SEP em tempo real, bem como a análise de contingências e a otimização de ações de controles preventivos e corretivos; e, na Seção 2.5, são discutidas as considerações finais a respeito do tema deste capítulo.

#### 2.2 Conceitos Gerais

A principal função de um SEP é realizar a conversão da energia na sua forma natural para a forma elétrica e transportá-la para os pontos de consumo. De forma geral, a sua função se resume em gerar, transmitir e distribuir energia elétrica. Para tal, o projeto e a operação de um SEP devem atender os seguintes fundamentos (KUNDUR; BALU, 1998):

- O SEP deve ser capaz de atender as contínuas mudanças na demanda da carga, pois a energia elétrica não pode ser convenientemente armazenada em grandes quantidades. Consequentemente, uma reserva girante<sup>7</sup> adequada de potência ativa e reativa deve ser mantida e apropriadamente controlada todo o tempo.
- O SEP deve fornecer energia elétrica minimizando os impactos ecológicos e o custo.
- A qualidade do fornecimento de potência elétrica deve atender determinados padrões mínimos.

De modo geral, os requisitos supracitados podem ser atendidos utilizando diversos níveis de controle, estes compostos por um arranjo complexo de dispositivos. Os objetivos do controle dependem do estado de operação do SEP. Em condições normais, o objetivo é operar tão eficientemente quanto possível com tensões e frequência perto dos valores nominais. Caso contrário, em situação de condição anormal, novos objetivos devem ser atendidos para restabelecer o SEP a um estado de operação normal (KUNDUR; BALU, 1998).

Entretanto, um SEP não opera com segurança no sentido absoluto da palavra, isto é, ausência total de risco devido a existência de uma pequena probabilidade de interrupção de serviço. Infelizmente, a ausência total do risco é inviável, pois demanda alto investimento e resulta em uma operação proibitivamente cara, tornando assim a segurança e a economia objetivos conflitantes (CASTRO, 2004). Em decorrência desta incompatibilidade (economia *versus* segurança), procura-se uma abordagem mais flexível para o problema de segurança de SEP fazendo com que a operação seja feita de forma econômica, sem comprometer a confiabilidade (ALBUQUERQUE, 2005).

Atualmente, os SEPs encontram-se interligados, isto é, várias empresas formam um único circuito elétrico. A interconexão de empresas de eletricidade usualmente conduz a uma melhoria de segurança e da economia da operação. Quanto ao aspecto econômico, as melhorias se devem à necessidade de menores capacidades de reserva de geração em cada subsistema. Ademais, permite que as empresas façam transferências econômicas e assim levem vantagens sobre as fontes de potência mais econômicas (FERREIRA, 2006). Como vantagens desta filosofia, têm-se uma operação mais econômica, levando-se em conta a otimização do programa de geração, e uma melhor controlabilidade, com variáveis de controle disponíveis em uma grande área. Entretanto, as interligações implicam em maiores riscos de problemas se espalharem por todo o SEP, podendo resultar em blecautes atingindo grandes áreas e várias empresas (ALBUQUERQUE, 2005). Sem interligações, cada empresa está sob maior risco de interrupção do serviço, a margem de controle é

44

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Por reserva girante (do inglês, *spinning reserve*) entende-se a capacidade de produção de energia de reserva já sincronizada com a rede elétrica e que pode ser colocada em operação, geralmente, dentro de 10 minutos, após a instrução do centro de despacho (FERREIRA, 2006).

menor e a operação pode ser mais cara. Por outro lado, eventuais problemas em uma parte do SEP não afetam as demais áreas.

A ocorrência de uma contingência é imprevisível e o SEP deve operar sempre de modo a não ser levado para uma região de operação perigosa, caso a perturbação de fato venha a ocorrer. A maioria dos SEPs são planejados e operados de forma que uma falha em um único equipamento não cause outras violações, evitando-se eventos em cascata. Com a reestruturação do setor elétrico, aliada às pressões econômicas e ambientais, o problema de instabilidade de tensão tornou-se ainda mais complexo e desafiador. Do ponto de vista da operação, os SEPs passaram então a operar sob estresse, com seus equipamentos próximos de seus limites, aumentando assim a probabilidade de ocorrência de distúrbios com sérias consequências (CASTRO, 2004). Tal fato pode ser comprovado analisando os blecautes recentes ocorridos no Brasil. A Tabela 2.1 apresenta uma breve descrição destes eventos (GLOBO, 2011).

Ocorrência	Descrição
Março de 1993	Rio e Espírito Santo ficaram sem luz no dia 11, com a queda de duas linhas de transmissão entre Cachoeira Paulista (SP) e Adrianópolis (RJ). Furnas alegou defeito numa linha.
Janeiro de 1997	Um curto-circuito provocou a explosão de dois transforma- dores em Adrianópolis (RJ). No mês seguinte, um dos nove transformadores da subestação explodiu novamente e provo- cou um incêndio que deixou dez municípios do Rio de Janeiro sem energia. O transformador que explodiu havia entrado em funcionamento quatro horas antes.
Verão do apagão em 1998	Entre o fim de 1997 e o início de 1998, a rede precária e so- brecarregada da concessionária Light fez os moradores do Rio de Janeiro passarem pelo "verão do apagão". Em 20 de no- vembro, bairros de Zona Sul e subúrbio ficaram quatro horas sem luz. Em dezembro, janeiro e fevereiro, sucessivos cortes de energia queimaram eletrodomésticos.
Abril de 1998	Sete torres da usina de Itaipu em Campina da Lagoa (a 460 quilômetros de Curitiba) foram derrubadas por ventos, afe- tando duas linhas de transmissão. Ficaram sem luz estados de Sudeste, Sul e Centro-Oeste.

Tabela 2.1: Apagões mais recentes no Brasil. Fonte: (GLOBO, 2011).

Ocorrência	Descrição				
Março de 1999	Um raio numa subestação em Bauru (SP) provocou um ble- caute em nove estados e no Distrito Federal no dia 11. Todo o sistema interligado foi comprometido.				
Dezembro de 2000	Doze estados de Sudeste, Sul e Centro-Oeste ficaram sem luz após um curto-circuito provocado por falha humana na hora da manutenção de equipamentos na subestação de Ivaiporã (PR). No Rio de Janeiro já era o terceiro apagão em 48 horas.				
Abril de 2001	Explosão na subestação de Furnas em Jacarepaguá. O disjun- tor da linha de transmissão explodiu e o sistema de proteção foi acionado.				
Janeiro de 2002	No penúltimo mês do racionamento de energia que começara em junho de 2001, um parafuso frouxo na linha de trans- missão perto da hidrelétrica de Ilha Solteira (SP) provocou rompimento e deixou às escuras 76 milhões de pessoas em dez estados.				
Janeiro de 2003	Um forte temporal deixou moradores do Rio de Janeiro e da Baixada Fluminense por mais de 48 horas sem luz.				
Janeiro de 2005	No primeiro dia do ano, a falha de um funcionário durante a operação do sistema elétrico na subestação de Cachoeira Paulista (SP), após um defeito técnico sem causa aparente, provocou o apagão que atingiu os estados do Rio de Janeiro e do Espírito Santo e parte de Minas Gerais. A falha humana ocorreu justamente na tentativa de corrigir uma falha técnica no sistema de linhas de transmissão operado por Furnas.				
Março de 2008	Em São Paulo, um apagão afetou 24 bairros no dia 4 de março. O apagão deixou desligados semáforos de várias avenidas im- portantes, como Paulista, Nove de Julho e Brasil. Faltou energia também na Vila Mariana e na região dos Jardins, após uma falha em uma subestação da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista.				

Tabela 2.1: Apagões mais recentes no Brasil. Fonte: (GLOBO, 2011). (continuação)

Ocorrência	Descrição
Novembro de 2009	Às 22h13m do dia 11 de novembro, uma pane no sistema elé- trico interligado brasileiro provocou um blecaute de grandes proporções em 18 estados de Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste, além do Distrito Federal. O apagão de até qua- tro horas, que atingiu 60 milhões de pessoas, foi considerado o mais abrangente ocorrido no país, comprometendo 45% do consumo de energia. Naquele dia, uma tempestade fora do comum causou um curto circuito na linha de transmissão en- tre Itaberá (SP) e Ivaiporã (PR), que levou ao desligamento inédito das três linhas que transportam a energia gerada em Itaipu. Essa interrupção de funcionamento provocou a queda em cascata de outras linhas no país, causando o apagão que afetou até o Paraguai.
Novembro de 2009	No dia 23, a população do Rio de Janeiro sofreu mais uma madrugada com a falta de energia. Trechos dos bairros de São Cristóvão, Ilha do Governador, Guadalupe, Jacarepaguá, Centro, Madureira, Penha, Marechal Hermes, Barra da Ti- juca, Gávea, Jardim Botânico, Benfica, Meier e Recreio dos Bandeirantes, além de locais nos municípios de Nova Iguaçu e Duque de Caxias, ficaram sem luz pelo menos por algum momento.
Fevereiro de 2010	O Nordeste foi vítima de um apagão de 30 minutos. De acordo com a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), a interrupção no fornecimento de energia aconteceu em todos os estados da região, devido a um problema nas linhas de trans- missão de energia elétrica que interligam as regiões Sudeste e Norte.

Tabela 2.1: Apagões mais recentes no Brasil. Fonte: (GLOBO, 2011). (continuação)

Ocorrência	Descrição
Dezembro de 2010	O município do Rio de Janeiro teve mais de 20% da energia cortada no dia 11 de dezembro. Um apagão atingiu vários bairros da capital por volta das 11h e causou muitos proble- mas na cidade. O trânsito ficou prejudicado em várias ruas e avenidas. Passageiros do metrô foram dispensados, e as es- tações foram fechadas até 13h50m. Todos os ramais de trens urbanos também foram afetados. Segundo o ONS, problemas em duas das principais subestações que abastecem o Rio de Janeiro fizeram com que 23% do fornecimento de energia da cidade fossem cortados.
Fevereiro de 2011	Uma possível falha na subestação Luiz Gonzaga, em Pernam- buco, causou um apagão em oito estados do Nordeste, entre a noite do dia 3 e a madrugada do dia 4. A energia só foi totalmente restabelecida às 5h.

Tabela 2.1: Apagões mais recentes no Brasil. Fonte: (GLOBO, 2011). (continuação)

Para mais informações sobre outros blecautes que ocorreram no mundo ao longo dos anos ver referências (TAYLOR, 1992, 1994; KUNDUR; BALU, 1998).

Em função da complexidade dos SEPs, torna-se muito importante a supervisão dos mesmos com o acompanhamento contínuo do estado de operação da rede, através do monitoramento dos dados e utilização de ferramentas computacionais, que possibilitem a tomada rápida de decisões em caso de ocorrência de incidentes que possam levar o SEP a uma condição insegura, mantendo-o operando de forma adequada e segura e, consequentemente, não trazendo risco ao mesmo.

O conceito de controle da segurança apareceu na metade dos anos 60 (DY LIACCO, 1967). Antes disso, dispunha-se de centros de despacho e supervisão, onde a quantidade de dados recebidos era estritamente necessária para o despacho da geração. Garantia-se uma reserva girante para cobrir aumentos de carga e perdas de geradores e, verificava-se os efeitos potenciais da retirada de equipamentos de manutenção. O controle de tensão, por exemplo, não era visto como um aspecto crítico para a segurança do SEP.

Portanto, é desejável que durante o planejamento do SEP, o mesmo seja projetado de forma muita robusta, isto é, que resista a distúrbios sem sérias interrupções de fornecimento de energia elétrica (CASTRO, 2004). Assim, aumentar a segurança da operação dos SEP foi a principal motivação para o desenvolvimento de Centros de Operação do Sistema (COS), cujo objetivo é coordenar as atividades de operação em tempo real, promovendo a integração operativa dos componentes de produção e transmissão de energia elétrica. Com isso, garante-se a segurança, a continuidade e a qualidade do suprimento de energia (FERREIRA, 2006). Entretanto, a incorporação da ideia de segurança trouxe consigo mudanças radicais, tais como, o aumento do volume de dados necessários para o processamento em tempo real, complexidade computacional, aumento do volume de informações a serem processadas e interfaces homem-máquina mais complexas que o usual. Dando assim início aos *Energy Management Systems* (EMS) computadorizados, análise de segurança em tempo real, uso dos sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), dentre outros.

Os SEPs modernos, em geral, dispõem de equipamentos que permitem aos operadores monitorar e operar a rede de maneira confiável. Nos COS, são executadas funções de análise de rede que procuram garantir a segurança da operação da rede, através de técnicas e equipamentos adequados (STOTT; ALSAC; MONTICELLI, 1987).

#### 2.3 Estados de Operação de um SEP

A definição dos estados de operação de um SEP com relação à segurança foi introduzida como parte da incorporação do controle de segurança da operação em tempo real dos SEP. Os estados de operação fornecem o nível de estresse da rede em relação a um determinado distúrbio. Uma vez conhecido o estado de operação da rede, o mesmo pode ser classificado em seis níveis diferentes (ver Tabela 2.2).

As transições entre os estados definidos na Tabela 2.2 podem ocorrer tanto em consequência de perturbações no SEP (transições involuntárias) como devido a ações de controle (transições voluntárias), algumas das quais constituem funções específicas dos centros de monitoração e controle. A transição do estado alerta para seguro é feita pela execução de funções de controle de segurança (modo corretivo) e realizado pelo centro de controle. No estágio final de desenvolvimento, essas ações de controle são comandadas pelo operador, que pode dispor de programas computacionais, como por exemplo o fluxo de carga ótimo com restrições de segurança, na determinação das melhores estratégias de controle a serem seguidas em cada situação particular. As várias transições de estado estão ilustradas na Figura 2.1 (MONTICELLI, 1983).

### 2.4 Segurança do SEP em Tempo Real

A operação do SEP em tempo real consiste na execução periódica de funções de análise e controle da rede (BALU et al., 1992). A Figura 2.2 apresenta uma visão geral das funções executadas em um SEP pelo COS. Vale destacar que, a execução de tais funções em tempo real é sujeita a uma restrição severa do tempo, ou seja, as funções devem ser

Tabela 2	2.2:	Estados	de	operação	da	rede.	Adaptado	de:	(FERREIRA,	2006)	apud
(STOTT	; AL	SAC; MO	ON7	ΓICELLI,	198	37)					

Nível	Estado de operação	Descrição
1	Seguro	A carga é atendida. Todas as variáveis do SEP estão dentro da faixa normal. Não há violações de limites de operação e/ou da MET. Nenhum equi- pamento é sobrecarregado. Possíveis contingências não causam violações das restrições.
2	Corretivamente seguro	A carga é atendida. Não há violações de limites de operação e/ou da MET. Violações causadas por possíveis contingências podem ser eliminadas por ações de controle apropriadas sem perda da carga.
3	Alerta	A carga é atendida. Não há violações de limites de operação e/ou da MET. O nível de segurança está abaixo de um certo limite de adequação. Algumas violações causadas por possíveis contingências não podem ser eliminadas por ações de controle sem que haja perda de carga. São obedecidas apenas as restrições de carga e de operação e nem todas de segurança. Assim pelo menos uma das contin- gências listadas como possíveis poderá levar o SEP a uma situação de emergência.
4	Emergência corrigível	A carga é atendida. Há violações de limites de operação e/ou da MET que podem ser eliminadas por ações de controle sem perda de carga.
5	Emergência não corrigível	A carga é atendida. Há violações de limites de ope- ração e/ou da MET que não podem ser eliminadas sem que haja perda de carga.
6	Restaurativo	Não há violações de limites de operação e/ou da MET. Ocorreu perda de carga ou ilhamento. O SEP não está intacto

executadas da forma mais rápida possível. As principais funções de controle em tempo real são (ALBUQUERQUE, 2005):

- **Configurador:** determina a topologia atual da rede com base nas medidas de estado das chaves, dos disjuntores e da disponibilidade dos equipamentos. Resulta no modelo da rede;
- Observador: avalia se o número e localização das medidas enviadas ao COS permite a estimação das condições de operação da rede;
- **Estimador de estado:** obtém o estado de operação do SEP. Deve ter a capacidade



Figura 2.1: Transições entre os estados de operação.

de detectar, identificar e processar de forma apropriada a ocorrência de erros nas medidas;

- Equivalente externo da rede: representa as regiões da rede que não pertencem à área de concessão e/ou que não são observáveis através de uma rede reduzida em torno da região de interesse;
- Análise de segurança: verifica a capacidade do SEP suportar as contingências. Consiste basicamente na avaliação do impacto das contingências sobre o estado de operação da rede e na determinação de ações de controle preventivo e/ou corretivo em caso de situação de emergência. A análise de segurança é a função de rede que exige maior tempo computacional para a sua execução;
- Previsão de carga: a previsão de carga por barra do SEP em geral baseia-se na previsão de demanda do SEP como um todo. A demanda global do SEP pode ser transformada em demanda por barra utilizando-se fatores de distribuição previamente calculados;
- Fluxo de carga em tempo real: simula o efeito de ações de controle antes de efetuá-las no SEP, avaliar contingências, determinação de estratégias de controle preventivo/corretivo para retirar o SEP de uma situação indesejável, dentre outros.

A análise de segurança do SEP pode ser dividida em três funções principais que são executadas nos centros de controle de operação (WOOD; WOLLENBERG, 1996):

1. Monitoração do Sistema;



Figura 2.2: Principais funções de segurança em tempo real. Adaptado de: (BALU et al., 1992)

- 2. Análise de Contingências;
- 3. Otimização das ações de controle preventivo e corretivo.

A funções supracitadas são realizadas através da execução contínua do seguinte algoritmo básico em um COS (BALU et al., 1992; FERREIRA, 2006):

Passo 1) Monitoração de segurança:

As medidas *on-line* do SEP e as variáveis ambientais que afetam a sua segurança fornecem as condições do caso base para análise dos efeitos das contingências. Usando medidas do SEP em tempo real, identifica-se se o mesmo está em um estado seguro

52

ou não. Se o SEP está em estado de emergência, o algoritmo procede para **passo** 4. Se cargas foram perdidas, o algoritmo procede para o **passo** 5.

Passo 2) Avaliação de segurança:

Estima a robustez relativa, isto é, o nível de segurança do SEP, no seu estado atual, utilizando a avaliação dos dados fornecidos pelo **passo 1**. Se o SEP está em um estado seguro, verifica-se qual será o estado do SEP (seguro ou inseguro) em relação a uma lista predefinida de possíveis contingências que podem ocorrer no SEP.

**Passo 3)** Melhoria da segurança:

Operações específicas são tomadas em tempo real para melhorar a robustez, isto é, para elevar o nível do desempenho da segurança do SEP. Refere-se ao despacho de segurança, controle de segurança, replanejamento corretivo e ações preventivas. Se o estado do SEP for inseguro, é porque há pelo menos uma contingência que pode levar a uma situação de emergência, então determina-se qual ação deve ser tomada para tornar o SEP seguro.

Passo 4) Controle de emergência:

Executa ações corretivas apropriadas para trazer o SEP de volta para o estado seguro, depois da ocorrência de uma contingência que provocou a entrada do SEP para um estado de emergência.

Passo 5) Controle restaurativo:

Restaura o serviço para as cargas do SEP.

#### 2.4.1 Monitoração e avaliação de segurança

Através do monitoramento, realizam-se medidas, em tempo real, das grandezas físicas do SEP e filtragens posteriores as quais conferem credibilidade e consistência dos dados. Então, é realizado um processamento para obter uma estimativa das variáveis de estado. Um fluxo de carga *on-line* é utilizado para avaliar o estado de operação do SEP (BALU et al., 1992).

O monitoramento de segurança deve ser capaz de aplicar múltiplas regras pré especificadas para avaliar as condições de segurança do SEP, fornecendo aos operadores informações atualizadas, sendo uma delas com relação a segurança de estabilidade de tensão, que geralmente é avaliada através da obtenção da MET. As regras são aplicadas nos dados do sistema na condição de pré e pós-contingência e/ou com índices calculados na seleção e/ou análise de contingência. Também deve ser capaz de estabelecer as margens, sensibilidades e outros sinais que são necessários no cálculo de vários limites de operação, tais como aqueles para o cálculo da capacidade de transmissão disponível (do inglês, *Available Transfer Capacity* - ATC) (ALBUQUERQUE, 2005). Mesmo quando o SEP está com tensões seguras, é desejável conhecer quanto o estado do SEP pode mover-se ao longo do seu ponto de operação e ainda permanecer seguro. Isto é particularmente verdade em um ambiente aberto de acesso à malha de transmissão, onde o cálculo da ATC deve levar em conta a MET adequada. Quando necessário, ações de controle devem ser tomadas para expandir a região de segurança ao redor do ponto de operação (CANIZARES, 2001).

Portanto, os objetivos de alguns processos que compõem o monitoramento do SEP são:

- O sistema de telemedição realiza a transmissão de dados e medidas até o COS;
- A estimação de estado é frequentemente usada para combinar os dados telemedidos com modelos do sistema para produzir a melhor estimativa das condições atuais, isto é, do estado de operação atual do SEP do ponto de vista estático;
- A supervisão dos sistemas de controle permite aos operadores controlar os equipamentos remotamente.

Todos estes processos são denominados como SCADA, o qual ajuda os operadores a monitorar a geração, transmissão e a tomada de decisões para corrigir sobrecargas ou tensões fora do limite pré-espeficicado (WOOD; WOLLENBERG, 1996).

#### 2.4.2 Análise de contingências

Pode-se definir contingência como sendo um evento no qual um ou mais equipamentos ficam fora de operação de forma inesperada ou planejada, resultando assim em uma mudança de estados de um ou mais elementos do SEP. Na forma inesperada, a contingência pode ser iniciada por um pequeno distúrbio, uma falta ou uma ação de chaveamento, como por exemplo a saída de operação da linha de transmissão devido à ocorrência de um raio em uma de suas torres. Na sua forma planejada, a contingência pode ocorrer devido a uma manutenção de um equipamento no sistema.

As contingências podem ser classificadas em:

- Contingência simples: ocorre quando somente um equipamento sai de operação, como por exemplo, uma linha de transmissão ou uma unidade geradora;
- Contingência múltipla: ocorre quando dois ou mais equipamentos saem de operação.

Em um SEP de grande porte, como é o caso do sistema brasileiro, é praticamente inviável computacionalmente analisar todas as possíveis contingências, devido a seu elevado número (ASSIS; FALCAO; TARANTO, 2007). Na prática, faz-se uma análise de todas as contingências simples e selecionam-se as contingências múltiplas, cujas ocorrências sejam mais prováveis, de acordo com os critérios definidos pela própria empresa operadora da rede.

Os SEPs sofrem mudanças constantemente. Um SEP é dito **seguro** se continua operando adequadamente mesmo quando os componentes nele falham, sendo assim, muitos equipamentos são protegidos por dispositivos automáticos ou manuais, no intuito de serem desligados se os seus limites forem violados. Se um SEP continua operando com os seus limites violados, devido a uma contingência, pode-se danificar algum equipamento ou SEPs externos, assim se o processo continuar a ocorrer, o SEP inteiro ou parte dele pode sofrer blecaute (QUINTELA, 2002).

Deste modo, além de analisar o estado de operação atual do SEP no que diz respeito à estabilidade de tensão, é importante também identificar as contingências que podem levar o SEP a operar em condições anormais ou próximas do ponto de colapso de tensão. Este tipo de análise é denominado **análise de contingências**. Na análise de contingências, simula-se a ocorrência de uma contingência e então faz-se uma análise do seu impacto sobre a operação da rede.

Os limites operacionais normalmente levados em consideração na análise de contingências são sobrecargas em linhas de transmissão e transformadores e sobre ou subtensões em barramentos.

As redes elétricas atuais são projetadas para suportar todas as contingências simples, ou seja, a saída de um único equipamento não deve causar violações dos limites operacionais. Durante certos períodos de tempo, a rede pode vir a operar sob condições não usuais, como por exemplo, a saída de um ou mais equipamentos para manutenção. Nessa situação a rede elétrica pode se tornar vulnerável a determinadas contingências simples, além das contingências múltiplas. Por essa razão deve-se considerar todas as contingências (SANTOS, 2009).

A análise de contingência pode ser realizada através da resolução de sucessivos fluxos de carga para cada caso em uma lista das contingências mais prováveis. Em seguida, é feita uma verificação de possíveis violações nos limites operacionais. Na operação em tempo real, entretanto, a solução de sucessivos fluxos de carga torna-se impraticável devido às restrições de processamento computacional.

Um procedimento bem aceito na análise de contingência é dividir o processo em diferentes níveis, conforme a Figura 2.3.

De acordo com a Figura 2.3, a lista completa de contingências  $N_0$  representa todas as contingências possíveis, ou as mais prováveis no SEP. No **Nível 1**, as contingências são classificadas de acordo com algum critério que leve em consideração os seus impactos sobre a rede elétrica, em particular no que se refere às violações dos limites operacionais. Neste nível, as contingências menos severas são filtradas e não são consideradas. O restante das contingências são consideradas como as mais severas e então farão parte de uma nova lista, ordenada, de contingências representadas por  $N_1$ . As demais, que não aparecerem



Figura 2.3: Diferentes níveis na análise de contingências. Adaptado de: (ALBUQUER-QUE, 2005)

na lista  $N_1$ , são consideradas contingências cujas ocorrências são inofensivas do ponto de vista operacional. Então, as contingências da lista  $N_1$  são submetidas a uma nova análise, no caso no **Nível 2**, cujo modelo adotado ou método de análise é um pouco mais elaborado que a do Nível 1, e como resultados é produzida uma nova lista  $N_2$ , menor que  $N_1$ , contendo as contingências mais severas segundo o novo modelo ou critério.

Este processo se repete sempre com modelos mais elaborados a cada passo até que, após o **Nível N**, uma lista  $N_n$  é produzida composta pelas contingências consideradas mais severas em todo o SEP. Nota-se que a cada nível, o processo de seleção e análise de contingências torna-se cada vez mais refinado. O objetivo desses níveis é filtrar as contingências menos severas, restando apenas as mais severas para serem analisadas. É de se observar também que a lista  $N_n$  é muito menor que  $N_1$ . Vale destacar que o método de análise adotado no Nível 1 é, geralmente, mais simples e exige um baixo esforço computacional enquanto que o nível N é mais detalhado, exigindo assim um elevado custo computacional para a sua execução.

A segurança do SEP está relacionada ao resultado de análise de contingências. Para

cada contingência testada, verifica-se a existência de tensões fora dos limites operativos, assim como, a existência de linhas e transformadores sobrecarregados. Em uma dada condição, o SEP é considerado inseguro quando dada uma contingência, as tensões das barras do SEP ficam fora dos limites operativos. Se o SEP se encontrar inseguro quanto à estabilidade de tensão para pelo menos uma das contingências possíveis, devem ser tomadas ações de controle para melhorar a segurança de tensão do SEP.

Conforme supracitado, o processo de análise de contingência envolve vários níveis e é normalmente chamado de **seleção de contingências**.

A seleção de contingências consiste em calcular as condições de operação da rede póscontingência, para uma lista de contingências pré-definida e classificá-las de acordo com o índice de severidade, assim as contingências menos severas serão desconsideradas, pois praticamente não influenciam no estado de operação da rede elétrica. Essa classificação é baseada em índices de performance que indicam a severidade das violações para cada contingência.

A seleção de contingências, normalmente, é realizada somente para as contingências simples. As contingências múltiplas a serem analisadas são escolhidas a rigor, de forma que somente as contingências mais prováveis sejam consideradas. Como exemplo, a saída de duas linhas de transmissão em paralelo que utilizam a mesma torre constitui uma contingência múltipla a entrar na lista das contingências mais prováveis (QUINTELA, 2002).

A segurança do sistema está relacionada ao resultado da análise das contingências. Para cada contingência analisada, verifica-se a MET. Um sistema se encontra em estado **inseguro** (ou **alerta**) quando existe pelo menos uma contingência cuja MET esteja abaixo dos limites considerados aceitáveis. Se o sistema estiver em estado inseguro quanto à estabilidade de tensão para pelo menos uma das contingências, devem ser tomadas ações de controle preventivo para melhorar a segurança de tensão do ponto de operação atual.

#### 2.4.3 Otimização de ações de controles preventivo e corretivo

Após a fase de análise e seleção de contingências, a próxima etapa é determinar uma estratégia de controle preventivo e/ou corretivo para eliminar qualquer possibilidade do SEP operar em um estado não seguro. Este controle pode ser determinado resolvendo-se um problema de otimização, cujo objetivo é buscar a melhor condição de operação que satisfaça as restrições de segurança (FERREIRA, 2006). Porém este problema caracteriza-se por objetivos conflitantes, incluindo exigências tanto econômicas quanto ambientais. Dentro deste contexto, as ações de controle têm por objetivo evitar que o SEP seja submetido a situações não desejáveis, e em particular, evitar grandes interrupções de fornecimento de energia. Deste modo, o controle tem sido dividido em duas principais categorias (SAVULESCU, 2006): .

- Controle preventivo: tem por objetivo levar o sistema, quando ele está ainda em estado de operação seguro, a um ponto de operação capaz de enfrentar eventos futuros de maneira satisfatória;
- Controle corretivo: após a ocorrência da perturbação, o objetivo deste controle é minimizar suas consequências o mais rápido possível, eliminando possíveis violações na operação.

A praticidade e a eficácia de cada opção de controle depende de cada SEP (WANG; AJJARAPU, 2001), dos objetivos a serem atingidos e do ponto de operação. Os controles preventivo e corretivo diferem em muitos aspectos, entre os quais listam-se (SAVULESCU, 2006; FERREIRA, 2006):

- Tipos de ações de controle: replanejamento da geração, alterações topológicas, compensação de potência ativa, corte de carga para controle preventivo, corte de carga direto ou indireto, corte na geração, chaveamento de capacitores *shunt* ou de reatores *shunt*, separação de rede para controle corretivo;
- Incertezas: no controle preventivo, o estado do SEP é bem conhecido, mas os distúrbios são incertos; no controle corretivo, o distúrbio é determinado, mas o estado do SEP é frequentemente parcialmente conhecido; em ambos os casos, o comportamento dinâmico é indeterminado;
- Ciclo aberto ou fechado: o controle preventivo é geralmente do tipo malha aberta; o controle corretivo pode ser de malha fechada, e consequentemente mais robusto com relação a incertezas;
- Tempo de resposta: o controle preventivo geralmente pode ser feito por controladores de resposta lenta, contudo os controladores corretivos devem ser de ação rápida. Para mais detalhes ver (HISKENS; TAYLOR, 1995).

Basicamente, o controle preventivo tenta mudar as condições de operação de modo que as restrições de segurança sejam satisfeitas para todas as contingências e o controle corretivo deve manipular todos os outros distúrbios não plausíveis (FERREIRA, 2006). Contudo, do ponto de vista racional, o fato de um certo problema de segurança (ou restrição) ser tratado de um modo preventivo ou corretivo depende das condições de operação (elétricas, econômicas e meteorológicas). Por exemplo, se uma determinada contingência múltipla do tipo n - 2 torna-se muito provável devido às mudanças das condições meteorológicas, ou se o custo de tratamento no modo preventivo é baixo devido a uma desprezível redução da carga disponível, então é mais sensato manipular esta situação no modo preventivo.

Assim, a princípio, a escolha entre o modo preventivo e corretivo do controle de segurança deve ser uma saída (e não uma entrada) das ferramentas de suporte a decisão de

58

segurança. Contudo, existem dificuldades intrínsecas na obtenção deste objetivo, principalmente por causa da carência de dados sobre as probabilidades das contingências, como função das condições em tempo real, e dificuldades para modelar os custos das interrupções, ambas as quais devem ser exigências para permitir uma melhor coordenação dos controles de segurança no modo preventivo e corretivo (SAVULESCU, 2006). Uma vez constatada a existência de violações, no caso da ocorrência de uma certa contingência, pode-se (FERREIRA, 2006):

- Executar ações de controle preventivo, alterando as condições de operação da rede elétrica de forma que a ocorrência daquela contingência não resulte em violações;
- Determinar uma estratégia de controle corretivo a qual eliminará as violações caso a contingência venha a ocorrer.

Os controles são dispositivos controláveis fisicamente ou grandezas cujos valores de ajuste ótimo são aplicados para otimizar as condições de operação. O desenvolvimento de estratégias eficazes requerem análises complexas, que envolvem conhecimentos multidisciplinares, de modo a evitar a elaboração de metodologias de difícil aplicação ou mal planejadas (VALADARES; VALE, 2001). Tem-se por exemplo a compensação de potência reativa, que deve melhorar o perfil de tensão sem afetar a capacidade de transmissão de potência ativa através das linhas de transmissão disponíveis.

Quando um SEP é instável, ações de controle devem ser tomadas para garantir que este continue operando e, se possível, atendendo a totalidade da demanda. Caso seja verificado que um determinado ponto de operação é instável após a ocorrência de alguma contingência, então por meio de ações de controle preventivo esse ponto é modificado mesmo com a probabilidade de tal contingência ocorrer ser pequena. As ações de controle corretivas são iniciadas somente após a ocorrência do distúrbio. As ações de controle corretivo ou preventivo podem ser pré-programadas, determinadas a partir de estudos off-line ou on-line fundamentados em previsões de cenários futuros, porém sempre há o risco de algum cenário, que não tenha sido investigado, vir a acontecer. Dispositivos de controle corretivo on-line que atuam a partir de medidas das variáveis do SEP devem ser operados de forma a não ocorrer interferência entre eles, de modo a não prejudicar a dinâmica do SEP. A utilização de métodos híbridos empregando ações de controle preventivo e corretivo juntas consistem em solucionar um problema de otimização que leva em consideração os custos de ambas ações (FERREIRA, 2006).

Uma exemplificação básica das ações de controle é ilustrada nas Figuras 2.4 a 2.7 (QUIN-TELA, 2002). Considere um ponto de operação S no espaço de parâmetros (cargas P e Q), conforme ilustrado na Figura 2.4.

Um aumento de carga resulta em uma mudança no ponto de operação S para o ponto de operação S', conforme a Figura 2.5. O novo ponto de operação S' pode permanecer na região factível de operação, conforme ilustrado na Figura 2.5 (a) e, caso não ocorra



Figura 2.4: Espaço de parâmetros (cargas).

nenhuma violação de operação, diz-se que o novo estado de operação é seguro. Quando ocorrem violações, o estado de operação é de emergência. Aumentos de carga severos, como por exemplo em horários de pico de demanda, podem levar o novo ponto de operação S' para uma região infactível, conforme ilustrado na Figura 2.5 (b). Neste caso, não há possibilidade de atender a demanda e o SEP passa a operar em situação de instabilidade, podendo levá-lo ao blecaute.



Figura 2.5: Mudança do ponto de operação.

Após a contingência, a fronteira entre as regiões modifica-se, reduzindo em geral a região factível devido à alteração topológica do SEP. A Figura 2.6 ilustra a situação em que a contingência é severa, levando o ponto de operação à uma região infactível, devido a redução da região factível pós-contingência.

Ações de controle podem deslocar o ponto de operação S', por exemplo, através de um corte de carga (Figura 2.7 (a)) ou aumentar a região de factibilidade  $\Sigma$ , através de chaveamento de capacitores ou por mudança de *taps* de transformadores, para uma região de factibilidade  $\Sigma'$ (Figura 2.7 (b)).

Tradicionalmente, o problema de escolha dos controles corretivo e preventivo é formulado como um problema de otimização não linear, os quais envolvem função objetivo; restrições de igualdade, como por exemplo o balanço de potência em cada barra da rede; e restrições de desigualdade referente aos limites de operação das variáveis de estado e dos dispositivos de controle (WANG; AJJARAPU, 2001). Geralmente, este problema é formulado como:



Figura 2.6: Mudança na fronteira das regiões.



Figura 2.7: Ações de controle.

min./max. 
$$f(x, y, u)$$
  
s. a.  $g(x, y, u) = 0,$  (2.1)  
 $h(x, y, u) \le 0,$ 

sendo,

- $\blacksquare$  x o vetor de variáveis de estado;
- $\blacksquare$  y o vetor de variáveis algébricas;
- $\blacksquare$  *u* o vetor de todas as variáveis de controle;
- f(x, y, u) a função objetivo;
- g(x, y, u) as restrições de igualdade, incluindo as equações de balanço de potência nodais (fluxo de carga); e,
- h(x, y, u) as restrições de desigualdade, incluindo os limites de operação das variáveis de estado e dos dispositivos de controle.

Geralmente, os principais objetivos a serem alcançados são: minimizar o número de equipamentos de controle; minimizar o montante de controle de cada equipamento; minimizar o corte de carga; minimizar o custo do controle; maximizar a MET; minimizar o custo da geração; dentre outros. A grande dificuldade desta formulação para a seleção de controles preventivos é a complexidade em representar as restrições de MET na forma de restrições de desigualdade, pois a avaliação da MET é o resultado de um procedimento numérico de análise realizado por exemplo pelo método *Look-Ahead* ou fluxo de carga continuado. É usual incorporar restrições de estabilidade de tensão de forma aproximada e/ou heurística, vide por exemplo (WANG; AJJARAPU, 2001).

Apesar desta dificuldade intrínseca, as facilidades atuais do uso de técnicas computacionais fazem com que planejadores e operadores optem pelo desenvolvimento de ferramentas analíticas do tipo Fluxo de Potência Ótimo (FPO) para a otimização da ação dos controles (MOUNTFORD, 1997).

Métodos de programação não linear, que são a base das ferramentas de FPO, em geral, são computacionalmente intensivos. Com o objetivo de reduzir este esforço computacional, divide-se o problema de seleção e ajuste do controle preventivo em duas fases. Em primeiro lugar, um critério simples e de baixo esforço computacional de seleção de controles efetivos é utilizado. Isto reduz significativamente o número de variáveis na formulação de otimização que é utilizada para o ajuste dos controles selecionados. E depois de selecionados os controles mais efetivos, ajusta-se o valor de ação dos mesmos via um problema de FPO.

#### 2.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram abordados os principais conceitos da análise de segurança de SEPs. Devido ao crescimento dos SEPs, nota-se uma necessidade da inclusão dos aspectos da estabilidade de tensão na operação em tempo real e no planejamento. Em especial, a monitoração da rede elétrica, a qual fornece dados de análise no contexto de estabilidade de tensão, como por exemplo, fornecer a MET do SEP; a análise de contingências, a fim de determinar as contingências mais severas, que possam causar um impacto sobre a MET; e a análise preventiva/corretiva, possibilitando o projeto de ações de controle rápidas e adequadas em situações em que a segurança do SEP, no contexto da estabilidade de tensão, se encontra comprometida.

Dado o arcabouço teórico necessário para o desenvolvimento da ferramenta computacional para a análise da segurança do SEP no contexto de estabilidade de tensão, no próximo capítulo serão descritos, de forma detalhada, os objetivos deste projeto.

Capítulo 3

## Objetivos do Doutorado

Uma ferramenta computacional para a análise de estabilidade de tensão deve ser capaz de indicar, a cada instante considerado, uma estratégia de controle preventivo e/ou corretivo capaz de manter a MET e o PT adequados tanto para o caso base quanto para todos os casos de contingências simples do SEP. Isto torna a análise de contingências uma das tarefas mais importantes neste tipo de ferramenta. Em estudos de planejamento, a elaboração de uma ferramenta computacional capaz de satisfazer tais requisitos seria factível. Entretanto, considerando a operação em tempo real, o tempo necessário de processamento para tal tarefa representa um alto custo computacional. Além disso, uma estratégia traçada para eliminar a criticalidade de uma contingência pode não ser eficaz ou até mesmo piorar o cenário para uma outra contingência. Ademais, o número de ações de controle e até mesmo a quantidade necessária de variações de controles para atender todas as contingências simples possíveis pode ser muito elevado para ser executado na prática (FERREIRA, 2006).

Na Figura 3.1, a estrutura organizacional de uma ferramenta computacional de análise de estabilidade de tensão é decomposta, de forma sucinta, em quatro tarefas, representadas por elipses, que foram inseridas considerando o nível de sua aplicação e a importância neste tipo de análise. Conforme pode ser visto na Figura 3.1, a elipse azul representa a análise de contingências, que é considerada uma das tarefas mais importantes dentro da análise da estabilidade de tensão. Nesta tarefa são selecionadas as contingências não convergentes, que são as que geralmente possuem MET negativa, e as críticas, que possuem MET menor que um limiar pré-estabelecido. Após a seleção das **contingências críticas**, as mesmas são enviadas para a tarefa de seleção de controles (elipse na cor verde) para a determinação de ações preventivas. Determinados os controles preventivos, ajustam-se as ações dos mesmos via, por exemplo, um método de otimização (elipse na cor cinza) objetivando a manutenção da MET.

No caso das **contingências divergentes**, estas inicialmente são enviadas para uma nova análise (elipse na cor laranja), que é realizada por métodos específicos, como por



Figura 3.1: Visão geral da análise de estabilidade de tensão

exemplo (IWAMOTO; TAMURA, 1978, 1981; OVERBYE, 1995; CASTRO; BRAZ, 1997). Após esta análise, caso necessário, as mesmas são enviadas para a tarefa de seleção de controles (elipse na cor verde) para a determinação de ações corretivas e/ou preventivas. Determinados os controles, ajustam-se as ações dos mesmos via, por exemplo, um método de otimização (elipse na cor cinza) objetivando a restauração da contingência.

Face ao exposto, este projeto de doutorado teve por objetivo o desenvolvimento de um método rápido para eliminar a criticalidade das contingências do ponto de vista estático. Para tal, a metodologia *Look-Ahead* foi utilizada para avaliar a MET e classificar de forma rápida as contingências do ponto de vista da segurança do SEP, levando em consideração a MET. Por se tratar de uma metodologia relativamente rápida, ela é adequada para o problema de análise de segurança em tempo real.

Embora o método *Look-Ahead* tenha se mostrado eficiente na avaliação de MET, ainda existem alguns tópicos que merecem atenção e que não estão completamente resolvidos na literatura. Embora os autores afirmem que o método *Look-Ahead* possa facilmente levar em consideração os limites de potência reativa de geradores no cálculo da MET, não está claro na literatura como isto poderia ser feito de forma rápida e eficiente. Portanto, o estudo de métodos para estimar os pontos nos quais os geradores atingem seus limites de potência reativa foi um dos objetivos desta pesquisa. A obtenção destes pontos é fundamental para uma avaliação precisa da MET.

Após determinadas as METs para as contingências de um SEP e selecionadas as críticas, faz-se necessário adotar ações de controle preventivo com objetivo de eliminar aquelas consideradas críticas. Dentro deste prisma, **o principal objetivo deste projeto é o desenvolvimento de técnicas de seleção ótima de controles preventivos**. Desejou-se desenvolver técnicas de seleção de controle preventivo baseadas no algoritmo *Look-Ahead* de tal forma que possam ser rápidas o suficiente para serem aplicadas na análise de segurança SEP tanto em tempo real quanto no planejamento da pré-operação.

É importante destacar que não existem técnicas consolidadas de seleção de controles no contexto de análise de segurança para estabilidade de tensão. As dificuldades intrínsecas deste problema residem no fato de que as restrições de estabilidade de tensão não podem ser modeladas por um conjunto de equações/inequações algébricas, e o número de possíveis escolhas para o controle é elevado. Isto dificulta o uso de técnicas de otimização, tais como o fluxo de carga ótimo, para a seleção dos controles. Sendo assim, o estudo de técnicas de seleção ótima de controles preventivos no contexto da análise de segurança no contexto de estabilidade de tensão constitui um tema importante de pesquisa na área de SEP.

Neste projeto foi desenvolvida uma nova metodologia baseada na análise de sensibilidade da MET, estimada via *Look-Ahead*, para a classificação de controles preventivos. Baseando-se nesta classificação, foram propostas duas novas abordagem distintas para a seleção dos controles a serem aplicados na manutenção do SEP.

Na primeira abordagem, foi desenvolvida uma metodologia baseada na técnica de agrupamento de dados (do inglês, *Clustering*) para a seleção dos controles preventivos mais eficazes, auxiliando assim o operador do SEP na escolha dos controles a serem utilizados para um evento em particular, por exemplo, para uma determinada contingência. Esta abordagem foi denominada de **Abordagem Local**.

Contudo, é sabido que um SEP possui, na maioria dos casos, mais de uma contingência crítica. Desta forma, se considerada a distância geométrica e elétrica das ações dos controles preventivos, os mesmos podem eliminar simultaneamente a criticalidade de mais de uma contingência. Considerando esta hipótese, acredita-se que é possível determinar um conjunto mínimo de ações de controles preventivos para eliminar, simultaneamente, todas as contingências críticas do SEP. Para tanto, após obtidas as sensibilidades da MET de todas as contingências críticas em relação às variáveis de controle, na segunda abordagem foi desenvolvida uma nova metodologia capaz de determinar um grupo composto por um número mínimo de controles preventivos para eliminar a criticalidades de todas as contingências no SEP. Esta nova abordagem foi denominada de **Abordagem Global**.

Desta forma, os controles mais eficazes são escolhidos e, caso necessário, um ajuste das ações dos controles pode ser realizado por meio de um fluxo de potência ótimo.

De forma a expor computacionalmente o produto científico desenvolvido neste projeto, na Figura 3.2 é apresentado o fluxograma da visão geral do algoritmo proposto para alcançar os objetivos supracitados. Ressalta-se que, futuramente, este fluxograma pode ser aplicado para a detecção e resolução de outros tipos de limites que o SEP pode atingir, dependendo do cenário analisado. Destaca-se que, os blocos com bordas vermelhas são algumas das etapas previstas como perspectivas futuras para a continuação da pesquisa deste projeto de doutoramento.

Inicialmente, na Figura 3.2, é definida uma lista de contingências a ser processada na etapa de análise de contingências. Realizada esta análise, o próximo passo é a seleção



Figura 3.2: Fluxograma do programa proposto.

das contingências críticas. Selecionadas as críticas, pode-se aplicar uma das duas abordagens propostas para a seleção dos controles preventivos. Na **Abordagem Local**, é aplicada a classificação dos controles preventivos e a seleção dos mesmos via um método de agrupamento de dados, obtendo assim um conjunto mínimo de controles para eliminar a criticalidade de uma única contingência. Na **Abordagem Global**, é aplicada a classificação dos controles preventivos para todas as contingências críticas simultaneamente e é obtido, através da seleção dos controles preventivos, um grupo global de controles para eliminar a criticalidade de todas as contingências.

Após esta etapa, pode-se aplicar um fluxo de potência ótimo para ajustar os controles selecionados na etapa anterior. Consequentemente, a lista de contingências é alterada eliminando as contingências tratadas e retorna-se para a etapa de análise de contingências.

Nos próximos capítulos serão descritas em maiores detalhes as etapas desenvolvidas neste doutorado.
# Parte II

Métodos para a Obtenção da Margem de Estabilidade de Tensão

# Capítulo 4

# Métodos para a Obtenção da MET: Revisão Bibliográfica

### 4.1 Considerações Iniciais

Conforme visto nos capítulos anteriores, a MET é uma das abordagens mais utilizadas para a análise da estabilidade de tensão do SEP. Na literatura foram propostas inúmeras técnicas para a sua obtenção, todas com abordagens distintas para o cálculo da MET. Por exemplo, algumas técnicas estimam a MET e outras utilizam métodos para obter o valor exato da mesma. Uma forma simples e comum para a obter a MET é a utilização do fluxo de carga convencional. O fluxo de carga convencional (MONTICELLI, 1983) é uma das ferramentas mais utilizadas para a análise de SEP em regime permanente. Devido a isso, a sua utilização é a ideia mais natural e imediata para a obtenção da MET. O modelo estático do fluxo de carga convencional é definido em (4.1) e a sua solução é calculada através de um método numérico (por exemplo, o método de Newton-Raphson).

$$F(\theta, V) = 0 \tag{4.1}$$

sendo,

- $\theta$  vetor dos ângulos de fase nodais das barras de carga (PQ) e de geração (PV);
- V vetor das magnitudes das tensões nodais das barras de carga (PQ);

F – vetor das equações de fluxo de carga (potências ativa (P) e reativa (Q)).

A Equação (4.1) fornece apenas um ponto de equilíbrio, isto é, uma solução de fluxo de carga. Sendo assim, é necessário o cálculo de vários fluxos de carga para a obtenção da MET. Para tal, é acrescido em (4.1) um parâmetro escalar  $\lambda$ ,

$$F(x,\lambda) = 0 \tag{4.2}$$

sendo,  $x = [\theta, V]$  e  $\lambda$  um parâmetro escalar, cuja função será descrita mais adiante.

A Equação (4.2) é composta por n equações e n variáveis. Entretanto, com a inclusão do parâmetro  $\lambda$ , a formulação passa a apresentar um número de equações menor que o número de variáveis. Tal problema pode ser resolvido através da especificação de um valor numérico para o parâmetro  $\lambda$ . Dessa forma, uma nova solução pode ser obtida para cada valor do parâmetro  $\lambda$  fornecido.

Sendo assim, a MET pode ser obtida por intermédio de várias resoluções de fluxo de carga, nas quais as cargas são representadas em função do parâmetro  $\lambda$ , que é incrementado em passos discretos até a divergência do fluxo de carga. Entretanto, este método apresenta algumas desvantagens, como por exemplo:

- Para SEP de grande porte, o cálculo de sucessivos fluxos de carga pode ser custoso computacionalmente, inviabilizando a sua aplicação;
- Nas proximidades do ponto de colapso de tensão, a matriz Jacobiana aproxima-se da singularidade, provocando assim a divergência antecipada do método de fluxo de carga convencional.

Dentro deste contexto, devido ao gargalo tanto computacional quanto numérico apresentado pelo método de cálculo de consecutivos fluxos de carga, diversas técnicas para a obtenção da MET foram propostas na literatura, dentre elas destacam-se aquelas baseadas no menor valor singular, na função energia, na análise modal, nos métodos de otimização, na redes neurais artificiais, na lógica *fuzzy*, nas técnicas baseadas nos métodos da continuação, nas que calculam diretamente o PMC, dentre outras.

A seguir, será apresentada uma revisão bibliográfica de alguns trabalhos desenvolvidos ao longo dos anos relacionados ao fenômeno de colapso de tensão. Esses trabalhos apresentam diferentes maneiras para determinar ou estimar a MET de um SEP. Inicialmente, serão abordados alguns dos trabalhos que não especificam a direção de crescimento de carga. Em seguida, serão descritos alguns dos trabalhos que especificam a direção de crescimento de carga para medir a MET.

# 4.2 Métodos Não Baseados na Direção de Crescimento de Carga

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos que não utilizam a informação da direção de crescimento de carga para determinar a MET de um SEP. A seguir serão descritos os trabalhos que calculam a MET do SEP através de índices de proximidade do PMC.

Em (KESSEL; GLAVITSCH, 1986) foi desenvolvido um índice para avaliar a MET do SEP. Este índice varia de 0 a 1, no qual 0 representa o caso base e 1 o colapso de tensão, o mesmo método também pode ser aplicado para detectar ilhas em um SEP. O método utiliza a informação de um fluxo de carga convencional, apresenta simplicidade nos cálculos e os resultados são bem satisfatórios na determinação da MET e nas ilhas do SEP.

SCHLUETER et al. (1991) propuseram um algoritmo que identifica a área de controle de tensão. Essas áreas são formadas por um conjunto de barras interconectadas que respondem de maneira similar a uma perturbação ocorrida em alguma barra localizada fora da área em questão. Segundo o artigo, a prevenção do colapso de tensão deve ser feita em cada uma das áreas de controle de tensão, e assim assegurar a proteção global do SEP. Desse modo, a medida proposta para determinação do índice de proximidade ao colapso de tensão é a reserva de potência reativa total dentro da fronteira de uma área de controle de tensão. A desvantagem desta metodologia é que a MET fica dependente de uma separação do SEP em áreas e a reserva total de potência reativa dentro de uma área, entretanto, pode não possuir uma relação direta com a proximidade do colapso de tensão.

Em (CHIANG; JEAN-JUMEAU, 1995) foi desenvolvido um índice baseado no modelo da variedade central para o fenômeno de colapso de tensão. Este índice consiste em um carregamento máximo acima do qual se dá a ocorrência do fenômeno. O cálculo deste índice não envolve operações matemáticas complexas, mas deve-se obter uma função teste empírica que indica a ocorrência do fenômeno. A obtenção dessa função teste pode ser complexa, limitando assim a aplicação do método. MOGHAVVEMI; FARUQUE (1999) desenvolveram um índice de proximidade de colapso de tensão denominado **índice de estabilidade de linha**. Para cada linha do SEP, um índice é calculado baseado no fluxo de carga da mesma. O método não apresenta complexidade computacional e pode ser facilmente implementado computacionalmente. Esse método é simples, rápido e computacionalmente eficiente para monitorar a segurança do SEP e pode ser usado como uma ferramenta para a operação do SEP em tempo real. Entretanto, vale destacar que o fato de uma linha estar sobrecarregada não implica necessariamente na proximidade do colapso de tensão. Isso pode inviabilizar a sua aplicabilidade na análise da estabilidade de tensão para análise da proximidade do SEP do colapso de tensão.

Em (FERREIRA et al., 2004) foi proposta uma nova metodologia para determinar o PMC do SEP, utilizando a formulação da injeção de corrente para solução do fluxo de carga, expressa em termo de coordenadas retangulares da tensão. A metodologia empregada na determinação do ponto estimado consiste em adicionar carga ao SEP em parcelas incrementais de 10% de carga nominal. Quando o fluxo de carga diverge, tem-se a estimativa inicial como sendo o último ponto com convergência normal do método. Desta forma, espera-se que o ponto estimado esteja próximo do PMC. Então, calcula-se a matriz jacobiana de injeção de corrente  $(J_i)$  no ponto estimado e o seu autovetor à esquerda (w)associado ao autovalor crítico. Os autores fazem uma comparação entre os resultados do método proposto com os resultados do fluxo de carga continuado. O método apresentou resultados satisfatórios na obtenção do PMC do SEP.

A seguir serão comentados alguns trabalhos baseados no menor valor singular. Este parâmetro também serve como indicativo para medir a proximidade do colapso de tensão.

LOF; ANDERSSON; HILL (1993) propuseram um método para detectar o PMC do SEP através de um índice baseado na decomposição de valor singular da matriz jacobiana do fluxo de carga. O menor valor singular é usado como índice para indicar a proximidade do colapso de tensão. Em (LOF et al., 1992) são sugeridas formas rápidas e eficientes para calculara este índice. Entretanto, o esforço computacional para a obtenção dos autovalores é relativamente alto para os padrões requeridos na análise de segurança em tempo-real. BARQUIN; GOMEZ; PAGOLA (1995) e EKWUE et al. (1999) também determinam a MET através do monitoramento do menor valor singular da matriz jacobiana do fluxo de carga. À medida que o carregamento do SEP vai aumentando, o menor valor singular vai diminuindo até se tornar nulo no ponto de colapso de tensão. Portanto, realizando o monitoramento do menor valor singular, é possível medir o quanto o SEP está próximo do colapso de tensão.

Entretanto, em (CANIZARES; DE SOUZA; QUINTANA, 1996) foi demonstrado que o menor valor singular não é um bom indicativo para medir a proximidade do colapso de tensão, uma vez que podem aparecer descontinuidades na maioria das curvas que medem este índice, podendo gerar resultados enganosos. Além disso, é proposta uma nova função teste para determinar o colapso de tensão. Essa metodologia apresenta algumas desvantagens: a necessidade do conhecimento prévio da barra mais sensível do SEP, pois apenas esta barra possui a característica esperada para a função teste e; a função teste só pode ser aplicável nas proximidades do colapso de tensão.

GARCIA; ALMEIDA (1999) apresentaram um método capaz de identificar ramos críticos para análise de estabilidade de tensão através de análise modal da matriz de sensibilidade entre a injeção de potência reativa e amplitude da tensão nas barras de carga. A análise é feita através dos autovalores e autovetores associados. Os autovalores fornecem uma medida relativa da proximidade do colapso de tensão e os autovetores dão informações relativas ao mecanismo da perda da estabilidade de tensão e fatores de participação dos ramos, com os quais é possível determinar ações corretivas em termos de redistribuição de fluxo de carga para aliviar o carregamento nos ramos. Quanto menor forem os autovalores, mais próximo o SEP estará do colapso de tensão. Os ramos com altos fatores de participação indicam quais são os ramos mais sensíveis ao SEP.

O método possui uma vantagem, mantém a esparsidade das matrizes envolvidas na resolução das equações de fluxo de carga. A dificuldade encontrada neste método é a determinação de rotinas mais adequadas no cálculo de autovalores e autovetores de interesse, uma vez que nesta etapa é consumida a maior parte do tempo de processamento computacional. Destaca-se que a matriz de sensibilidade proposta, por ser esparsa, viabiliza a implementação de rotinas rápidas. Outra metodologia bastante empregada na literatura para detecção da MET do SEP é a baseada nas técnicas de otimização, as quais tornaram-se ferramentas importantes na análise dos SEPs, sobretudo em estudos de estabilidade de tensão, pela necessidade de se considerarem os limites e os recursos para controle de tensão do SEP e pelas dificuldades de convergência do fluxo de carga convencional (GRANVILLE; MELLO; MELO, 1996).

Combinando *softwares* de estudo do fenômeno de instabilidade de tensão e fluxo de potência ótimo é possível avaliar com melhor precisão a influência da variação da carga no SEP, pois além de levar em consideração ações de controle de tensão, são capazes de considerar restrições do SEP que são de difícil modelagem em *softwares* convencionais de fluxo de carga (FERREIRA; SOUZA; GRANVILLE, 1998).

Em (GRANVILLE; MELLO; MELO, 1996) foi proposto um algoritmo baseado no FPO o qual utiliza a técnica de pontos interiores. O método não depende da convergência de nenhum algoritmo de fluxo de carga. Entretanto, as equações de balanço de fluxo de potência precisam ser atendidas na solução ótima. Esse método é efetivo no tratamento de redes mal condicionadas e com problemas de tensão. O cálculo do PMC é realizado em duas etapas:

- 1. Eliminam-se as restrições operativas de forma a obter-se um ponto de operação viável;
- Maximiza-se a carga do SEP, partindo do ponto de operação obtido na etapa anterior. Quando a carga estiver maximizada, obtém-se o PMC do SEP.

AFFONSO; DA SILVA (2004) apresentaram uma metodologia para aumentar a MET do SEP indiretamente através da maximização das reservas de potência reativa e minimização das perdas de potência ativa do FPO. Estes métodos são baseados na forte relação entre a MET e reservas de potência reativa na rede elétrica. A introdução de restrições de estabilidade de tensão no FPO pode aumentar os custos de geração. No entanto, a otimização adotada neste trabalho modifica apenas a potência reativa gerada, preservando a solução de menor custo fornecido pelo planejamento da operação. Este procedimento pode aumentar a segurança do SEP não apenas para condições normais de operação, mas também em situações de variações de carga e contingências severas.

Análise de contingências também foi realizada para avaliar o impacto das mesmas na MET do SEP. Os resultados mostraram que apenas um pequeno número de contingências possui impacto negativo significativo na MET. Para estes casos, nos quais as contingências severas ocorrem, o procedimento de otimização pode ajudar a trazer o SEP para um ponto de operação mais seguro de acordo com os critérios de estabilidade de tensão. Os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que a perda do SEP diminuiu e as MET, bem como as reservas de potência reativa aumentaram significativamente sem custo adicional. A melhoria da MET é obtida através de uma restrição linear baseada nas sensibilidades com respeito à carga a ser rejeitada. Estas sensibilidades são calculadas através dos multiplicadores de Lagrange do problema de otimização não linear, cuja solução é um ponto de bifurcação sela-nó do SEP, isto é, um ponto de colapso de tensão. O principal problema da formulação linear é a perda da precisão para grandes variações de geração e demanda. Para superar esta dificuldade, o processo iterativo do algoritmo impõe uma restrição adicional de redução de demanda total a cada iteração. O método apresenta algumas vantagens, tais como:

- O processo iterativo permite atualizar gradualmente as sensibilidades, evitando a perda de precisão da aproximação linear;
- A convergência do problema é garantida devido ao fato que o redespacho da máxima demanda permitida em cada iteração é controlada.

ZEFERINO; SOUSA; COSTA (2007) desenvolveram um algoritmo para detectar o PMC do SEP através do problema de otimização utilizando uma variante do método de pontos interiores, chamado de Método da Função Lagrangeana Barreira Modificada (FLBM). Este método tem como restrições de igualdade as equações do fluxo de potência e como restrições de desigualdades os limites de tensão nas barras e de potência reativa nas barras de controle de potência reativa. O FLBM é comparado com o método clássico Primal-Dual Barreira Logarítmica (PDBL). O FLBM apresentou resultados semelhantes necessitando um menor número de iterações, porém o FLBM apresenta uma desvantagem, a dificuldade de ajustar parâmetros de entrada, pois o tempo necessário para o ajuste é variável.

Além dos métodos citados, existem técnicas que se baseiam em funções energia e em Inteligência Computacional (IC) para determinar a MET de um SEP, como por exemplo em IC, lógica *fuzzy*, redes neurais e algoritmos evolutivos. Entretanto, estes métodos não serão abordados neste trabalho.

# 4.3 Métodos Baseados na Direção de Crescimento de Carga

Foram apresentados, até o presente momento, alguns trabalhos que utilizam diversas técnicas para determinar a MET. Dentre os quais, existem alguns que podem ser usados para a operação do SEP em tempo real e outros que não, pois exigem um elevado esforço computacional. De qualquer forma, todos os métodos até então apresentados não levam em consideração a direção de crescimento de carga para a obtenção da MET. Em geral, isso proporciona um menor esforço computacional, porém pode comprometer a obtenção da MET na medida em que não existe uma correlação clara entre os índices e o PMC. Uma linha sobrecarregada que não sofre impactos de acréscimo de transferência de potência na direção de crescimento de carga atual não é um problema do ponto de vista de estabilidade de tensão, embora possa gerar índices de proximidade do colapso de tensão muito pequenos, como por exemplo, os índices baseados em valores singulares.

A seguir serão apresentados alguns trabalhos que utilizam a curva PV e/ou QV como técnica para determinar a MET. Estas técnicas utilizam uma direção pré-determinada de crescimento de carga. Inicialmente serão apresentados alguns trabalhos que utilizam o método da continuação como técnica para calcular a MET, tal técnica é denominada **Fluxo de Carga Continuado (do inglês, Continuation Power Flow - CPFLOW)**. Esses trabalhos são utilizados na análise off line por apresentarem um elevado esforço computacional.

O método da continuação faz parte de um conjunto de métodos denominados *path* following ou branch tracing (SEYDEL, 1947). Com este método é possível reformular as equações do fluxo de carga convencional, definido as soluções como funções contínuas de um determinado parâmetro escalar  $\lambda$ .

O método da continuação baseia-se na obtenção de consecutivas soluções de equações algébricas não-lineares, traçando as trajetórias das soluções a partir de uma solução inicial, denominada de caso base, e atualizando o valor do parâmetro  $\lambda$  de maneira automática. Logo, sendo  $(x^1, \lambda_1)$  a primeira solução da Equação (4.2), o problema da continuação consiste em calcular as demais soluções,

$$(x^2, \lambda_2), (x^3, \lambda_3), \dots$$

até um determinado ponto desejado ( $\lambda = \lambda_{desejado}$ ).

De forma mais geral, sendo  $(x^j, \lambda_j)$  uma solução conhecida da equação (4.2), o problema da continuação consiste em calcular a solução  $(x^{j+1}, \lambda_{j+1})$  para o próximo  $\lambda$ , chamado de  $\lambda_{j+1}$ . Este processo é realizado através de duas etapas chamadas de predição e correção. Basicamente, o preditor fornece uma estimativa (previsão) próxima da solução e o corretor calcula a solução desejada de fato, utilizando algum método numérico iterativo (por exemplo, Newton-Raphson), tendo como ponto inicial a estimação realizada na etapa de predição. Ambas as etapas estão representadas na Figura 4.1.

A distância entre as soluções  $(x^j, \lambda_j) \in (\overline{x}^{j+1}, \overline{\lambda}_{j+1})$  é chamada de **tamanho do passo** (em vermelho na Figura 4.1) e a maneira de se identificar a localização da solução desejada é relacionada ao tipo de **estratégia de parametrização** adotada para traçar a trajetória das soluções.

Dentro deste contexto, dada uma condição inicial (caso base), o fluxo de carga continuado tem como objetivo traçar os perfis de tensão das barras. Desta forma é possível obter a MET e as informações adicionais sobre o comportamento das tensões das barras do SEP, com aumento do nível de carregamento, eliminando as singularidades no PMC e utilizando poucas resoluções de fluxos de carga.



Figura 4.1: Predição e correção de uma solução.

A aplicação do método da continuação em SEP teve a sua origem em (HUNEAULT et al., 1985), o qual foi aplicado aos problemas de despacho econômico. Em (AJJARAPU; CHRISTY, 1991), o método da continuação foi proposto para a obtenção do ponto de colapso de tensão parametrizado pela carga. O algoritmo proposto em (AJJARAPU; CHRISTY, 1991) é capaz de obter a MET de um SEP, evitando a singularidade da matriz Jacobiana nas proximidades do ponto de colapso de tensão.

Em (JEAN-JUMEAU; CHIANG, 1993), os autores propuseram uma mudança de parametrização das carga de modo que foi possível eliminar localmente o mal condicionamento da matriz Jacobiana nas proximidades do ponto de colapso. Em (CHIANG et al., 1995), foi proposto um novo algoritmo para o fluxo de carga continuado. Neste trabalho, os autores apresentaram um estudo detalhado sobre o fluxo de carga continuado e foram discutidos os três diferentes tipos de parametrização existentes: local, física e pelo comprimento do arco. O novo algoritmo proposto em (CHIANG et al., 1995) faz uso da parametrização pelo comprimento do arco, pelo fato das demais parametrizações apresentarem problemas numéricos na vizinhança do ponto de colapso de tensão, e apresenta uma nova abordagem para a predição da próxima solução desejada. Mais detalhes sobre este algoritmo serão abordados no Capítulo 6.

AJJARAPU; FENG (1998) implementaram uma nova metodologia para identificar o PMC utilizando um *CPFLOW* modificado que incorpora as características dinâmicas do SEP, ao longo de aumentos quase estáticos de carga. O PMC é identificado como sendo o ponto de equilíbrio associado à situação de máximo carregamento. Convém lembrar que num modelo de carga dependente da tensão, o PMC não é necessariamente o ponto de maior consumo de potência. A metodologia calcula a MET com precisão, apesar de requisitar um elevado esforço computacional para a sua determinação.

Em (SILVA; DA COSTA, 1999), foi proposta uma metodologia estática baseada no balanço nodal de potência para avaliar a MET, no qual pontos de equilíbrio são obtidos resolvendo-se simultaneamente o conjunto de equações algébrico-diferencias em regime permanente. Esta formulação fornece a identificação precisa do ponto de colapso de tensão quando comparada aos métodos tradicionais, visto que as características de regime permanente dos componentes dinâmicos do SEP são consideradas.

Os limites de corrente de campo e de armadura foram precisamente implementados e os resultados obtidos demonstram as diferenças dos limites de estabilidade de tensão do método proposto com o fluxo de carga convencional. Os resultados mostraram que quanto mais precisa for a modelagem dos componentes do SEP, mais próxima da realidade será a MET. Devido ao elevado esforço computacional, o método é utilizado apenas para a análise *off line* do SEP.

ALVES et al. (2003) apresentaram novos esquemas de parametrização que permitem o traçado completo da curva PV baseado em simples modificações da matriz jacobiana do fluxo de carga convencional. Neste trabalho, novas opções para a etapa de parametrização do método da continuação são apresentadas. Mostra-se que variáveis com claro significado físico podem ser utilizadas na etapa de parametrização, tais como, perda total da potência ativa e reativa na barra de referência, potência reativa das barras de geração e as perdas de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão. As modificações propostas para a etapa de parametrização não só preservam as características do método em si, mas também as melhoram.

Os resultados obtidos com a nova metodologia mostraram que as características de convergência do método de fluxo de carga convencional são melhoradas na região do PMC. Além disso, durante o traçado completo da curva PV, as diversas técnicas de parametrização podem ser comutadas entre si, possibilitando o cálculo de todos os pontos de equilíbrio da curva PV, com o número reduzido de iterações.

Em (LEITE; COSTA, 2003), os autores propuseram o estudo do *CPFLOW* utilizando a formulação de injeção de corrente em coordenadas retangulares. Além da formulação de injeção de corrente apresentar as mesmas características de convergência da formulação polar convencional, tanto no processo de predição quanto no de correção, sua utilização proporciona uma grande redução do esforço computacional. As principais vantagens desta formulação, frente à metodologia polar convencional, são decorrentes principalmente da estrutura e da montagem da matriz Jacobiana, a qual é formada basicamente pelos elementos da matriz admitância nodal.

ANDRADE; BARBOSA (2005) apresentaram um novo índice para detecção do ponto de colapso de tensão. Este índice é conhecido como Full Sum  $\partial Q_i/\partial V_i$ (FSQV). Esse método leva em consideração a singularidade da matriz jacobiana do fluxo de carga próximo ao PMC. Este artigo demonstra que quando a matriz jacobiana torna-se singular, a soma total das derivadas parciais das equações da potência reativa em relação ao nível de tensão é aproximadamente constante.

O valor de FSQV depende do número de barras no SEP. Quanto maior for a rede, mais altos serão os valores FSQV. Através de simulações verificou-se que o método FSQV é eficaz, pois o seu valor manteve-se constante para diferentes cenários de carga. O método permite simular contingências e verificar qual é o efeito de cada uma delas sobre a MET do SEP. Os valores de FSQV do último fluxo de carga, antes do colapso de tensão, são todos iguais para os diferentes cenários, o que significa que é possível detectar o ponto de colapso de tensão com uma relativa precisão.

Nos próximos parágrafos serão apresentados alguns trabalhos que utilizam a curva PV e/ou QV como técnica para estimar a margem de carregamento de SEP.

Um novo método para calcular a MET em Mvar foi proposto em (EJEBE et al., 1996). Tal método utiliza um polinômio de segunda ordem para estimar o ponto de colapso de tensão através do ajuste da curva QV, utilizando a informação de três fluxos de carga, determinando assim, com precisão, a MET do SEP. Os resultados obtidos foram satisfatórios, quando comparados ao método de fluxo de carga continuado (AJJARAPU; CHRISTY, 1991) e ao método ponto a ponto da curva QV (FOSSO et al., 1993). Entretanto, o método em (EJEBE et al., 1996) apresentou resultados não muito precisos para as barras vizinhas da barra crítica do SEP. Isso se traduz em uma limitação do método proposto, pois este determina a MET com precisão apenas para a barra crítica do SEP.

Em (CHIANG; WANG; FLUECK, 1997), foi desenvolvido um novo índice que calcula a MET de SEP, denominado *Look-Ahead*. Este método baseia-se na solução do fluxo de carga e na teoria de bifurcação sela-nó (HALE; KOçAK, 1991). O índice é obtido através do ajuste das curvas  $(\lambda - V)$  e  $(\lambda - \theta)$ . Neste trabalho, é calculada também a tensão crítica, que corresponde ao ponto de colapso de tensão, da barra mais sensível do SEP. Os autores do trabalho apresentaram uma comparação dos resultados obtidos pelo método proposto com os resultados do fluxo de carga continuado (CHIANG et al., 1995), e concluíram que o método proposto é eficiente, viabilizando assim a sua aplicação em tempo real, pelo fato de exigir pouco esforço computacional. Mais detalhes sobre este algoritmo serão abordados no Capítulo 7.

Melhorias no método *Look-Ahead* foram apresentadas em (LI; CHIANG; TONG, 2004), no qual foi desenvolvida uma técnica para determinar a MET com maior precisão. Para melhorar a estimativa da MET, os autores apresentaram um método baseado na sensibilidade das contingências para calcular o fluxo de carga próximo ao ponto de colapso de tensão. Com o objetivo de validar a nova metodologia, os autores a compararam com os métodos propostos em (CHIANG et al., 1995) e (CHIANG; WANG; FLUECK, 1997), a qual apresentou resultados compatíveis. Entretanto, a diferença entre os métodos não foi significativa e o esforço computacional apresentado pelo método foi um pouco superior ao de (CHIANG; WANG; FLUECK, 1997). Entretanto, como o aumento do esforço computacional foi mínimo, a metologia proposta pode ser aplicada na operação em tempo real.

WANG; LIU; LUAN (2005) apresentaram um novo método para avaliar a estabilidade de tensão do SEP em tempo real, baseada em caminhos de transmissão de potência. Um SEP é decomposto em vários caminhos de transmissão. O artigo define a potência crítica

que chega às barras, assim como a distância elétrica entre cada barra. Através de um equivalente de duas barras é possível obter os índices de estabilidade de tensão. O método é capaz de identificar o caminho de transmissão mais sensível e ao mesmo tempo avaliar a estabilidade de tensão do SEP.

### 4.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou alguns trabalhos na literatura para determinar a MET de um SEP. Alguns dos trabalhos apresentados podem ser empregados na operação em tempo real, pois requerem uma baixo esforço computacional, e, portanto, podem ser utilizados para a análise e seleção de contingências. Além disso, foram apresentados alguns trabalhos que possuem elevado esforço computacional na determinação da MET do SEP, os quais não podem ser aplicados na operação em tempo real de SEP de grande porte.

Neste trabalho de doutorado foi implementada computacionalmente a metodologia desenvolvida em (CHIANG; WANG; FLUECK, 1997), pois esta técnica estima de forma eficiente a MET através de um simples ajuste de curva PV, atendendo assim a um dos principais objetivos do presente projeto, que é o desenvolvimento de um método rápido para determinar a margem de carregamento de um SEP. Para a validação dos resultados da mesma, foi implementada computacionalmente a técnica de fluxo de carga continuado proposta em (CHIANG et al., 1995).

# Capítulo 5

# Modelagem do Crescimento de Carga do Sistema Elétrico de Potência para a Análise da Estabilidade de Tensão

### 5.1 Considerações Iniciais

Para a obtenção de uma MET mais próxima da realidade e consideranr os limites de potência reativa dos geradores, neste capítulo serão discutidos os modelos de dispositivos pertencentes aos SEP, usualmente empregados na análise estática de estabilidade de tensão, e a modelagem do crescimento de carga utilizada.

As barras de geração serão modeladas como barras de tensão regulada (barras PV), ou seja, barras que possuem tensão constante até o ponto em que o limite estático de geração de potência reativa seja respeitado. A partir deste ponto, a barra PV comportase como uma barra PQ, na qual a tensão passar a ser variável. Como complemento ao modelo de geradores empregado, será implementada computacionalmente uma rotina que possibilitará efetuar um redespacho das potências ativas geradas de todos os geradores, como maneira de evitar que a barra de referência angular ("slack") assuma todo o aumento de geração de potência ativa exigida pelas cargas (LIMA GUEDES, 2000).

Um modelo de carga de potência constante também será utilizado. Em análises com curva PV, tal representação resulta em uma MET conservadora, o que é desejável do ponto de vista de segurança. Nesta situação, a potência da carga não varia com a tensão, causando o aumento da corrente e provocando quedas de tensão mais acentuadas nas linhas do SEP. Será implementada computacionalmente uma rotina que possibilitará o crescimento tanto nas potências ativas quanto das reativas das barras do SEP, de tal forma a permitir o estudo do colapso de tensão em uma direção qualquer de crescimento de carga. Na Seção 5.2, uma visão geral da modelagem de um SEP do ponto de vista estático é apresentada ; na Seção 5.3, apresenta-se a modelagem dos parâmetros de crescimento de carga, tanto para redespacho de geradores quanto para o crescimento da carga; e, na Seção 5.4, as considerações finais são apresentadas.

# 5.2 Rede de Transmissão

As linhas de transmissão são representadas pelo modelo equivalente  $\pi$ , o qual é definido por três parâmetros: a resistência série  $r_{km}$ ; a reatância série  $x_{km}$ ; e a susceptância shunt  $b_{km}^{sh}$ . A expressão da impedância série é dada por (5.1).

$$z_{km} = r_{km} + jx_{km} \tag{5.1}$$

Representando (5.1) em termos de admitância série,

$$y_{km} = z_{km}^{-1} = g_{km} + jb_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 - x_{km}^2} - j\frac{x_{km}}{r_{km}^2 - x_{km}^2}$$
(5.2)

sendo  $g_{km}$  a condutância e  $b_{km}$  a susceptância do ramo k - m da linha de transmissão.

Neste modelo, as potências ativas  $(P_k)$  e reativas  $(Q_k)$  injetadas na barra k são funções dos módulos  $(V_k)$  e ângulos  $(\theta_k)$  das tensões nas demais barras do SEP, conforme (5.3) e (5.4).

$$P_k = \sum_{m=1}^{NB} V_k V_m \left[ G_{km} cos(\theta_{km}) + B_{km} sen(\theta_{km}) \right]$$
(5.3)

$$Q_k = \sum_{m=1}^{NB} V_k V_m \left[ G_{km} sen(\theta_{km}) - B_{km} cos(\theta_{km}) \right]$$
(5.4)

sendo, NB o número de barras no SEP e  $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$ . Os termos  $G_{km}$  e  $B_{km}$  representam, respectivamente, a condutância e susceptância do elemento  $Y_{km}$  da matriz de admitância nodal da rede de transmissão. A matriz de admitância nodal é construída a partir da resistência e reatância série e susceptância *shunt* (MONTICELLI, 1983).

## 5.3 Parâmetros de Crescimento de Carga $(\lambda)$

A funcionalidade do parâmetro de crescimento de carga  $(\lambda)$  é controlar a quantidade de incremento dado às potências ativas e reativas, tanto da geração quanto da carga. As barras de carga selecionadas para ter as potências ativas e reativas aumentadas são denominadas de barras de crescimento forçado (LIMA GUEDES, 2000).

Todo o equacionamento efetuado nesta seção está baseado no parâmetro  $\lambda$  e nas potências bases, ativas e reativas. Para o caso base, o parâmetro  $\lambda = \lambda_0$  será adotado igual a 1. Caso o parâmetro  $\lambda$  seja, por exemplo, igual a 1,25 haverá um aumento de carga do sistema de 25% em relação ao caso base. Deste modo, a potência ativa total consumida pelas cargas pode ser representada por

$$P_{Total} = \lambda P_{0_{Total}} \tag{5.5}$$

sendo,  $P_{Total}$  a potência ativa total consumida pelas cargas;  $P_{0_{Total}}$  a potência ativa total consumida pelas cargas no caso base e  $\lambda$  o parâmetro escalar de crescimento de carga nas barras do SEP.

#### 5.3.1 Redespacho de Geradores

A falta de redistribuição do crescimento de potência ativa consumida entre os geradores do SEP faz com que um fluxo muito elevado de potência ativa seja observado nas linhas de transmissão, que ligam a barra de referência às barras que tiverem suas potências ativas consumidas elevadas. Esta situação faz com que as tensões caiam de maneira acentuada nas barras conectadas às linhas de transmissão sobrecarregadas. Entretanto, este fenômeno não ocorre em um SEP real, uma vez que os reguladores de velocidade<sup>8</sup> das turbinas do sistema controlam a injeção de potência ativa entregue à rede (LIMA GUEDES, 2000).

Neste trabalho, o incremento de potência ativa assumida no i-ésimo gerador é representado como

$$\Delta P_{Ger_i} = f p g_i \Delta P_{CarqaTotal} \tag{5.6}$$

sendo,  $fpg_i^9$  o fator de participação do *i*-ésimo gerador e  $\Delta P_{CargaTotal}$  a variação total de potência ativa nas barras (PQ) do SEP que é obtida em (5.7). Destaca-se que, caso as barras de geração (PV) possuírem cargas, estas deverão ser consideradas no cálculo.

$$\Delta P_{CargaTotal} = \sum_{j=1}^{NB} \Delta P_{Carga_j}.$$
(5.7)

Em (5.7), NB é o número de barras e  $\Delta P_{Carga_j}$  é a variação da carga na *j*-ésima barra, que é a diferença entre a carga incrementada e a carga base ( $\lambda_0$ ), cuja expressão é dada por

$$\Delta P_{Carga_j} = P_j(\lambda) - P_j(\lambda_0). \tag{5.8}$$

Realizando as devidas substituições em (5.6), (5.7) e (5.8), obtém-se a equação da variação da potência ativa no gerador i,

$$\Delta P_{Ger_i} = fpg_i \sum_{j=1}^{NB} \left[ P_j(\lambda) - P_j(\lambda_0) \right].$$
(5.9)

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>Os ajustes dos reguladores de velocidade são colocados de forma a permitir a repartição das cargas de potência ativa de acordo com algum critério estabelecido pela concessionária.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Geralmente, o fator de participação do gerador  $(fpg_i)$  é definido pelo operador do SEP.

E a potência ativa fornecida pelo gerador i é expressa em função do parâmetro  $\lambda$ , como segue

$$P_{Ger_i} = P_{Ger_i}(\lambda). \tag{5.10}$$

A variação de potência ativa do *i*-ésimo gerador é definida como sendo a diferença entre a potência ativa fornecida no caso de crescimento de carga e a potência ativa fornecida no caso base e é dada por,

$$\Delta P_{Ger_i} = P_{Ger_i}(\lambda) - P_{Ger_i}(\lambda_0). \tag{5.11}$$

Portanto, para obter a equação de potência ativa fornecida pelo gerador i, basta substituir (5.11) em (5.9), obtendo assim

$$P_{Ger_i}(\lambda) = P_{Ger_i}(\lambda_0) + fpg_i \sum_{j=1}^{NB} \left[ P_j(\lambda) - P_j(\lambda_0) \right].$$
(5.12)

#### 5.3.2 Crescimento de Carga

Com o objetivo de possibilitar o estudo de estabilidade de tensão do SEP nas diversas formas de crescimento de carga possíveis, foram atribuídos dois parâmetros a cada barra do SEP, sendo eles, o parâmetro de crescimento de potência ativa  $K_{AB_j}$  e o de reativa  $K_{RB_j}$ , também denominados de fator de participação ativo e reativo, respectivamente. Estes fatores controlam o crescimento relativo das cargas durante o processo de análise, à medida que os sucessivos cálculos de fluxo de carga são executados (LIMA GUEDES, 2000).

Além dos fatores de participação das barras, existem também os fatores de participação das áreas  $K_{A_i}$ , que junto com o parâmetro  $\lambda$ , podem influenciar na determinação das potências ativas e reativas das cargas do SEP (SANTOS, 2009).

A diferença entre os fatores de participação das áreas e das barras é que, o primeiro controla o crescimento de carga total relativo entre as áreas, enquanto que o segundo controle é realizado entre as barras da mesma área.

Portanto, seja  $A_i$  o conjunto de barras pertencente a *i*-ésima área. A potência ativa total  $P_{Total}$  das cargas do SEP é definida por (5.5) e (5.13).

$$P_{Total} = \sum_{i=1}^{NA} P_{A_i} \tag{5.13}$$

Em (5.13),  $P_{A_i}$  é a potência ativa total consumida pelas cargas da *i*-ésima área e NAé o número de áreas do SEP. A obtenção de  $P_{A_i}$  é dada por,

$$P_{A_i} = \sum_{j \in A_i}^{NA} P_{B_j} \tag{5.14}$$

sendo  $P_{B_j}$  a potência ativa das cargas da j-ésima barra pertencente à i-ésima área.

Para controlar o crescimento relativo de carga entre as áreas, utiliza-se um fator de participação  $K_{A_i}$ , para cada área do SEP, conforme a Equação (5.15).

$$P_{A_i} = P_{0_{A_i}} \left[ 1 + K_{A_i} \alpha \right] \tag{5.15}$$

Em (5.15),  $P_{0_{A_i}}$  é a potência ativa das cargas da *i*-ésima área do caso base;  $K_{A_i}$  é o fator de participação da *i*-ésima área e  $\alpha$  é uma constante de proporcionalidade a ser determinada em função do  $\lambda$ .

Por outro lado, o controle do crescimento relativo das cargas nas barras da mesma área do SEP é realizado ajustando-se os fatores de participação de cada barra,

$$P_{B_j} = P_{0_{B_j}} \left[ 1 + K_{AB_j} \gamma \right]$$
 (5.16)

sendo  $P_{0_{B_j}}$  a potência ativa das cargas da *j*-ésima barra,  $K_{AB_j}$  o fator de participação ativa da *j*-ésima barra e  $\gamma$  uma constante de proporcionalidade a ser determinada.

As constantes de proporcionalidade  $\alpha$  e  $\gamma$  são determinadas em função do parâmetro  $\lambda$ . Desta forma, para determinar a equação de  $\alpha$ , inicialmente, iguala-se (5.5) e (5.13), obtendo assim

$$\lambda \sum_{i=1}^{NA} P_{0_{A_i}} = \sum_{i=1}^{NA} P_{A_i}.$$
(5.17)

E determina-se o valor  $\alpha$  realizando as devidas substituições em (5.15) e (5.17),

$$\lambda \sum_{i=1}^{NA} P_{0_{A_i}} = \sum_{i=1}^{NA} P_{0_{A_i}} [1 + K_{A_i} \alpha]$$

$$\alpha = \frac{\left(\sum_{i=1}^{NA} P_{0_{A_i}}\right) (\lambda - 1)}{\left(\sum_{i=1}^{NA} P_{0_{A_i}} K_{A_i}\right)}.$$
(5.18)

Uma nova constante denominada  $\beta_{Area_{Ativa}}$  é obtida através de (5.18). Essa constante depende do fator de participação ativa da *i*-ésima área da potência ativa da carga da *i*-ésima área do caso base, como pode ser visto a seguir

$$\beta_{Area_{Ativa}} = \frac{\sum_{i=1}^{NA} P_{0_{A_i}}}{\sum_{i=1}^{NA} \left( P_{0_{A_i}} K_{A_i} \right)}.$$
(5.19)

Portanto, a potência ativa total da *i*-ésima área do SEP é dada por

$$P_{A_i} = P_{0_{A_i}} \left[ 1 + K_{A_i} \beta_{Area_{Ativa}} (\lambda - 1) \right].$$
(5.20)

Consequentemente, para determinar a equação de  $\gamma$  são realizadas as devidas substituições em (5.20), (5.16) e (5.14), obtendo assim

$$P_{A_i} = \sum_{j \in A_i}^{NA} P_{B_j}$$

$$P_{0_{A_i}}\left[1 + K_{A_i}\beta_{Area_{Ativa}}(\lambda - 1)\right] = \sum_{j \in A_i}^{NA} P_{0_{B_j}}\left[1 + K_{AB_j}\gamma\right]$$
$$\gamma = \frac{P_{0_{A_i}}K_{A_i}\beta_{Area_{Ativa}}(\lambda - 1)}{\sum_{j \in A_i}^{NA} \left(P_{0_{B_j}}K_{AB_j}\right)}.$$
(5.21)

Uma nova constante denominada  $\beta_j$  é obtida através de (5.21). Essa constante é calculada através de (5.22).

$$\beta_j = \frac{P_{0_{A_i}} K_{A_i} \beta_{Area_{Ativa}}}{\sum_{j \in A_i}^{NA} \left( P_{0_{B_j}} K_{AB_j} \right)}.$$
(5.22)

Portanto, a potência ativa das cargas nas barras do SEP é dada por

$$P_{B_j} = P_{0_{B_j}} \left[ 1 + K_{AB_j} \beta_j (\lambda - 1) \right].$$
(5.23)

Através de (5.23) é possível controlar o crescimento de carga no SEP. O controle é efetuado através do ajuste de fatores de participação das barras e das áreas do SEP (SANTOS, 2009).

Neste capítulo foram apresentadas as deduções de equações referentes à potência ativa das cargas nas barras do SEP. Para a potência reativa, a deduções são feitas de forma análoga e portanto, não serão abordadas.

### 5.4 Considerações Finais

Em um SEP, a variação da carga acontece durante todo o dia. Em horários de ponta, isto é, carga pesada, normalmente o centro de controle faz um redespacho de carga entre os geradores, no intuito de atender a demanda que cresce em uma determinada área e/ou barra do SEP.

Neste trabalho de doutorado, o aumento de carga será efetuado para todas as barras do SEP proporcionalmente ao caso base. O SEP será dividido em várias áreas, para que se possam incrementar de maneira diferente todas as áreas.

# Capítulo b

# Fluxo de Carga Continuado

### 6.1 Considerações Iniciais

O método da continuação é uma técnica matemática para traçar a trajetória das soluções de um sistema de equações algébricas não lineares (SEYDEL, 1947), passando pelo ponto de bifurcação sela-nó sem nenhuma dificuldade numérica. Esta capacidade torna tal método bastante atrativo nos problemas relacionados a SEPs, dando origem assim ao Fluxo de Carga Continuado (do inglês, *Continuation Power Flow* - CPFLOW).

O *CPFLOW* é uma ferramenta utilizada para analisar o comportamento estático de um SEP, levando em consideração as variações da geração e da carga. Alguns dos tipos de análise que podem ser realizados com o auxílio desta ferramenta são citados a seguir (CHIANG et al., 1995):

- Análise de problemas de tensão devido às variações da carga e da geração, por exemplo, a ocorrência do colapso de tensão;
- Avaliação da capacidade máxima de transferência e de transmissão em um SEP;
- Simulação do comportamento do SEP, do ponto de vista estático, levando em consideração a variação da carga e/ou da geração com ou sem dispositivos de controle;
- Estudo de dispositivos de controle para análise de segurança de estabilidade de tensão.

Como foi destacado no Capítulo 4, neste trabalho foi estudado e implementado o CPFLOW proposto em (CHIANG et al., 1995). Nas próximas seções o método da continuação será descrito detalhadamente dando ênfase, quando possível, a sua aplicação em SEP, isto é, ao CPFLOW. Na Seção 6.2, a formulação geral utilizada nas técnica baseadas nos métodos da continuação é apresentada; na Seção 6.3, é apresentada a parametrização em  $\lambda$ , denominada de parametrização física; na Seção 6.4, é apresentada a parametrização

local; na Seção 6.5, é apresentada a parametrização pelo comprimento do arco; na Seção 6.6, é apresentado o algoritmo computacional do método CPFLOW; e, na Seção 6.7, as considerações finais relacionadas a este capítulo são destacadas .

## 6.2 Formulação Geral

No Capítulo 4 foi visto que o Sistema de Equações (4.2) contém um número de variáveis maior que de equações, isto é, possui n + 1 variáveis e n equações. Se for definida uma estratégia de parametrização pela adição de uma equação escalar,

$$\rho(x,\lambda) = 0 \tag{6.1}$$

a Equação (4.2) pode ser estendida da seguinte forma,

$$F(x,\lambda) = \begin{pmatrix} f(x,\lambda) \\ \rho(x,\lambda) \end{pmatrix} = 0$$
(6.2)

que consiste de n + 1 equações para n + 1 variáveis. Detaca-se que, a formulação (6.2) pode ser utilizada em praticamente todos os tipos de parametrizações (SEYDEL, 1947).

Dado o Sistema (6.2), o CPFLOW consiste em calcular as suas soluções ao longo da trajetória a ser obtida, isto é, traçando a curva PV/QV do SEP. Para tal, são necessários os seguintes procedimentos:

- Parametrização;
- Predição;
- Correção;
- Controle do Tamanho do Passo.

A seguir, será dada uma visão geral destes procedimentos e nas Seções 6.3, 6.4 e 6.5 serão descritos os tipos de parametrização, destacando a correção e predição.

#### 6.2.1 Parametrização

A parametrização fornece uma forma de identificar cada solução ao longo da trajetória a ser obtida. Basicamente, as estratégias de parametrização são utilizadas para evitar a singularidade da matriz Jacobiana. Existem três diferentes tipos de parametrizações (CHI-ANG et al., 1995):

**Parametrização física:** baseia-se no parâmetro de controle  $\lambda$ , caso em que o comprimento do passo é dado por  $\Delta \lambda$ ;

- **Parametrização local:** baseia-se em alguma componente do vetor de estados x(chamada de componente  $x_k$ ) ou no parâmetro de controle  $\lambda$ . Neste caso o comprimento do passo é dado por  $\Delta x_k$  ou  $\Delta \lambda$ ;
- Parametrização pelo Comprimento do Arco (s): baseia-se no comprimento do arco ao longo da curva para efetuar a parametrização, caso em que o comprimento do passo é dado por Δs, onde s é o comprimento do arco.

#### 6.2.2 Predição

Basicamente, os preditores são utilizados para estimar as soluções na curva PV/QV. Na literatura, geralmente são abordados dois tipos de preditores, os baseados nas Equações Diferenciais Ordinárias (EDO) e os baseados na extrapolação polinomial.

O preditor baseado em EDOs é denominado **preditor tangente**. Este preditor estima a próxima solução na curva PV/QV na direção do vetor tangente de (6.2). A formulação matemática deste preditor depende do tipo de parametrização utilizada e, por esta razão, este será apresentado em detalhes nas seções referentes a cada tipo de parametrização.

O método da extrapolação polinomial baseia-se em um polinômio de ordem variada que passa pelas soluções já calculadas  $(x^j, \lambda_j), (x^{j-1}, \lambda_{j-1}), ...,$  para determinar uma aproximação (estimação) para a próxima solução  $(x^{j+1}, \lambda_{j+1})$  (SEYDEL, 1947). Isto é possível construindo um polinômio em  $\lambda$  de grau v que passa pelas v + 1 soluções,

$$(x^{j}, \lambda_{j}), (x^{j-1}, \lambda_{j-1}), ..., (x^{j-v}, \lambda_{j-v}).$$

Desta forma, a estimação inicial depende do grau de v. Um preditor trivial é o de polinômio de ordem zero (v = 0). Neste caso, a solução aproximada é dada por:

$$(\overline{x}^{j+1}, \overline{\lambda}_{j+1}) = (x^j, \lambda_j). \tag{6.3}$$

Entretanto, um preditor denominado **preditor secante** (ver Figura 6.1) usa o polinômio de grau um (v = 1) que passa pela solução atual e pela anterior para estimar a próxima solução,

$$(\overline{x}^{j+1}, \overline{\lambda}_{j+1}) = (x^j, \lambda_j) + \sigma(x^j - x^{j-1}, \lambda_j - \lambda_{j-1})$$
(6.4)

sendo  $\sigma$  o comprimento do passo pré-determinado.

O preditor secante é uma aproximação do vetor tangente que utiliza a solução atual e a anterior para determinar uma aproximação da próxima solução e é bastante empregado na literatura, por exemplo, para estimar as próximas soluções do *CPFLOW*. Entretanto, é necessário o conhecimento prévio de duas soluções para que o preditor secante possa ser aplicado.

Em (HASELGROVE, 1961), podem ser encontradas maiores informações sobre preditores de ordem superior a 1 ( $v \ge 2$ ).



Figura 6.1: Preditor secante.

#### 6.2.3 Correção

A fase de correção consiste em resolver (6.2), tomando como solução inicial a aproximação realizada na fase de predição. A princípio, qualquer método numérico capaz de resolver equações algébricas não lineares pode ser utilizado como corretor. Entretanto, a eficiência numérica e computacional é determinada pela escolha do tipo de parametrização e do método de resolução numérica.

Pelo fato da relação entre  $x_i$ ,  $\lambda$  e o comprimento do arco *s* ser desconhecida, diferentes tipos de parametrização podem acarretar em diferentes soluções reais, como pode ser visto na Figura 6.2.

No *CPFLOW* é utilizado, geralmente, o método de Newton-Raphson para o estágio de correção, conforme pode ser visto em (CHIANG et al., 1995; AJJARAPU; CHRISTY, 1991).

#### 6.2.4 Controle do Comprimento do Passo ( $\alpha$ )

O controle do comprimento do passo reflete na eficiência computacional do método da continuação. Por exemplo, um comprimento do passo muito pequeno pode tornar o método ineficiente computacionalmente. Em contrapartida, um comprimento de passo muito grande pode acarretar em uma aproximação da solução (passo de predição) bastante distante da solução real, consequentemente, o corretor precisará de várias iterações para encontrar a solução real. Em casos extremos, o cálculo impreciso do comprimento do passo pode acarretar na divergência do método (CHIANG et al., 1995).

Na literatura, geralmente é aconselhado um comprimento de passo grande para a parte que se aproxima da linearidade e um comprimento de passo pequeno para a parte não linear da curva de soluções a ser traçada. Entretanto, como a trajetória das soluções é desconhecida, esta estratégia torna-se difícil e é específica para cada aplicação.

Existem diversas abordagens para determinar o comprimento do passo. Em (SEYDEL, 1947), por exemplo, é apresentado um método simples para o controle do comprimento



Figura 6.2: Tipos de parametrização e seus respectivos comprimentos de passo: (a) parametrização local em  $x_k$ , (b) parametrização física em  $\lambda$  e (c) parametrização pelo comprimento do arco (s).

do passo que baseia-se no número de iterações do corretor,

$$\sigma_{novo} = \sigma_{velho} N_{opt} / N \tag{6.5}$$

sendo  $\sigma_{velho}$  o comprimento do passo calculado na etapa anterior,  $N_{opt}$  o número ótimo de iterações do corretor <sup>10</sup> e N o número de iterações necessárias para aproximar a solução na etapa anterior do método da continuação.

Nesta abordagem, se o número de iterações for pequeno, é escolhido um comprimento de passo grande para a próxima iteração. Caso contrário, é escolhido um comprimento de passo pequeno. Entretanto, este procedimento pode falhar e acarretar problemas de convergência.

Em (CHIANG et al., 1995), foi proposta uma estratégia para controlar o comprimento do passo baseada no comprimento do arco. Neste trabalho, é determinado um limite máximo  $\sigma_{max,i}$  para o ajuste de cada componente de x e do parâmetro  $\lambda$ . Desta forma, o comprimento do passo ao longo do comprimento do arco (s) é escolhido da seguinte forma,

 $<sup>^{10}</sup>$ Pode-se adotar como número ótimo de iterações o valor de 6 iterações para uma tolerância de  $10^{-4}$  (AJJARAPU, 2006).

$$\sigma \frac{dz_i}{ds} \le \sigma_{max,i} \tag{6.6}$$

sendo  $z = (x, \lambda)$ , com i = 1, 2, ..., n + 1 e n o número de componentes de x. A eficiência deste método é determinada pela escolha do valor de  $\sigma_{max,i}$ . Entretanto, este requer um conhecimento prévio do problema em questão. Vale destacar que, pelo fato deste método utilizar o comprimento do arco para determinar o comprimento do passo, o mesmo não apresenta problemas de convergência.

# 6.3 Parametrização em $\lambda$

A parametrização física é realizada sobre o parâmetro  $\lambda$ . Portanto, re-escrevemos (6.1) e (6.2) da seguinte forma,

$$\rho(x,\lambda) = \lambda - \lambda_{esp} = 0 \tag{6.7}$$

$$F(x,\lambda) = \begin{pmatrix} f(x,\lambda) \\ \rho(x,\lambda) \end{pmatrix} = 0$$
(6.8)

sendo  $\lambda_{esp}$  um parâmetro especificado.

Entretanto, esta estratégia de parametrização pode apresentar problemas numéricos, dificultando assim a convergência do método nas proximidades do ponto de bifurcação sela-nó (colapso de tensão).

#### 6.3.1 Preditor Tangente

Para obter o vetor tangente, primeiramente, efetua-se a derivada em ambas as partes de (4.2), ou seja,

$$D_x F \Delta x + D_\lambda F \Delta \lambda = 0. \tag{6.9}$$

Re-escrevendo (6.9) na forma matricial e fixando  $\Delta \lambda = \pm 1$ , tem-se,

$$\begin{pmatrix} D_x f & D_\lambda f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{pmatrix}$$
(6.10)

Calculado o vetor tangente de (6.10) (considerando  $\sigma$  o comprimento do passo), a predição da próxima solução é dada por

$$\begin{pmatrix} \overline{x}^{j+1} \\ \overline{\lambda}_{j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x^j \\ \lambda_j \end{pmatrix} + \sigma_j \begin{pmatrix} dx^j \\ d\lambda_j \end{pmatrix}$$
(6.11)

sendo os índices  $j \in j+1$  relacionados à solução atual e à próxima solução, respectivamente.

#### 6.3.2 Corretor

Neste trabalho é utilizado como corretor o método numérico de Newton-Raphson. Logo, expandindo em série de Taylor e fazendo a aproximação linear em torno de  $(x_0, \lambda_0)$  em (4.2), tem-se,

$$F(x,\lambda) \approx F(x_0,\lambda_0) + \begin{pmatrix} D_x f & D_\lambda f \\ D_x \rho & D_\lambda \rho \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{pmatrix} = 0$$
(6.12)

sendo a matriz Jacobiana (J) em (6.12) dada por,

$$J = \begin{pmatrix} D_x f & D_\lambda f \\ D_x \rho & D_\lambda \rho \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_x f & D_\lambda f \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(6.13)

Deste modo, o passo corretor consiste em resolver,

$$\begin{pmatrix} D_x f & D_\lambda f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} f(x_v, \lambda_v) \\ \lambda_v - \lambda_{esp} \end{pmatrix}$$
(6.14)

com v o número da iteração atual. Resolvendo (6.14), os estados são atualizados a cada iteração, ou seja,

$$x_{v+1} = x_v + \Delta x$$
  

$$\lambda_{v+1} = \lambda_v + \Delta \lambda.$$
(6.15)

Portanto, (6.14) e (6.15) são resolvidos partindo da solução estimada no passo do preditor como solução inicial, até atingir um critério de convergência.

Com a matriz Jacobiana calculada em (6.13), nota-se que nas proximidades do ponto de bifurcação sela-nó esta pode tornar-se singular utilizando este tipo de parametrização, ocasionando assim problemas de convergência.

### 6.4 Parametrização Local

Nesta estratégia é proposta a troca de parâmetros nas proximidades do ponto de bifurcação sela-nó, contornando assim o problema da singularidade da matriz Jacobiana (AJ-JARAPU; CHRISTY, 1991; SEYDEL, 1947). Par tal, considera-se  $x \in \lambda$  como sendo componentes de um vetor  $y = (x, \lambda)$ , e re-escreve-se (6.1) e (6.2) da seguinte forma,

$$\rho(y_k) = y_k - y_{k,esp} \tag{6.16}$$

$$F(y,k) = \begin{pmatrix} f(y) \\ \rho(y_k) \end{pmatrix} = 0.$$
(6.17)

sendo k o índice da componente a ser parametrizada e  $y = (x, \lambda)$ .

Vale destacar que a escolha do índice k é um ponto crítico desta parametrização, pois esta escolha determina a sua eficiência. Em (SEYDEL, 1947), é proposta uma escolha baseada nos preditores secante e tangente. No caso do preditor secante, a componente  $y_k$ que possui a maior variação relativa em todo y é utilizada como parâmetro. No caso do preditor tangente (ver Seção 6.4.1), a componente  $y_k$  que possui o maior elemento do vetor tangente ( $\Delta x, \Delta \lambda$ ) é escolhido como variável para parametrização. Esta metodologia é empregada no *CPFLOW* proposto em (AJJARAPU; CHRISTY, 1991).

#### 6.4.1 Preditor Tangente

Para obter o vetor tangente, primeiramente, efetua-se a derivada em ambas as partes de (4.2), ou seja,

$$D_x F \Delta x + D_\lambda f \Delta \lambda = 0. \tag{6.18}$$

Re-escrevendo (6.18) na forma matricial, para algum componente  $y_k$  a ser parametrizado e fixando  $\Delta y_k = \pm 1$ , tem-se,

$$\begin{pmatrix} D_x f & D_\lambda f \\ D_{y_k} \rho \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{pmatrix}$$
(6.19)

sendo que para k = n + 1 a parametrização é idêntica á formulação descrita na Seção 6.3 e  $D_{y_k}\rho$  é um vetor de zeros exceto em  $y_k$ .

Calculado o vetor tangente de (6.19) (considerando  $\sigma$  o comprimento do passo), a predição da próxima solução é dada por,

$$\begin{pmatrix} \overline{x}^{j+1} \\ \overline{\lambda}_{j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x^j \\ \lambda_j \end{pmatrix} + \sigma_j \begin{pmatrix} dx^j \\ d\lambda_j \end{pmatrix}$$
(6.20)

sendo os índices  $j \in j+1$  relacionados à solução atual e à próxima solução, respectivamente.

#### 6.4.2 Corretor

Expandindo em série de Taylor e fazendo a aproximação linear em torno de  $(x_0, \lambda_0)$  em (4.2), tem-se,

$$F(x,\lambda) \approx F(x_0,\lambda_0) + \begin{pmatrix} D_x f & D_\lambda f \\ D_{y_k} \rho \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{pmatrix} = 0$$
(6.21)

Após determinado o índice k da componente a ser parametrizada a matriz Jacobiana (J) em (6.21) é dada por,

$$J = \begin{pmatrix} D_x f & D_\lambda f \\ D_{y_k} \rho \end{pmatrix}$$
(6.22)

sendo  $\rho(y) = y_k - y_{k,esp}$ .

Deste modo, o passo corretor consiste em resolver,

$$\begin{pmatrix} D_x f & D_\lambda f \\ D_{y_k} \rho \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} f(x_v, \lambda_v) \\ y_{k_v} - y_{k_{esp}} \end{pmatrix}$$
(6.23)

sendo v o número da iteração atual. Resolvendo (6.23), os estados são atualizados a cada iteração, ou seja,

$$x_{v+1} = x_v + \Delta x$$
  

$$\lambda_{v+1} = \lambda_v + \Delta \lambda$$
(6.24)

Portanto, (6.23) e (6.24) são resolvidos, partindo da solução estimada no passo do preditor como solução inicial, até atingir um critério de convergência.

### 6.5 Parametrização pelo Comprimento do Arco

Uma outra forma de eliminar a singularidade de matriz Jacobiana é a parametrização baseada no comprimento do arco (s) (SEYDEL, 1947; CHIANG et al., 1995). Nesta abordagem, o comprimento do arco é introduzido na solução como um novo parâmetro no processo do método da continuação, obtendo assim

$$x = x(s), \lambda = \lambda(s). \tag{6.25}$$

Com esta troca de parâmetros, o comprimento do passo ( $\Delta s$ ), utilizando o comprimento do arco, é dado por (6.26) (SEYDEL, 1947; CHIANG et al., 1995).

$$\Delta s^{2} = \sum_{i=1}^{n} [x_{i} - x_{i}(s)]^{2} + [\lambda - \lambda(s)]^{2}.$$
(6.26)

Portanto, re-escrevemos (6.1) e (6.2) da seguinte forma,

$$\rho(x,\lambda) = -\Delta s_{esp}^2 + \sum_{i=1}^n [x_i - x_i(s)]^2 + [\lambda - \lambda(s)]^2 = 0$$
(6.27)

$$F(x,\lambda,s) = \begin{pmatrix} f(x,\lambda) \\ \rho(x,\lambda,s) \end{pmatrix} = 0$$
(6.28)

sendo  $\Delta s_{esp}$  um valor especificado.

Com esta parametrização a matriz Jacobiana continua não-singular nas proximidades do ponto de bifurcação sela-nó, obtendo assim um traçado completo da trajetória das soluções (curva PV), sem apresentar problemas de mal condicionamento da matriz Jacobiana.

#### 6.5.1 Preditor Tangente

Efetuado a derivada em ambas as partes dae (4.2), ou seja,

$$D_{x}f\Delta x + D_{\lambda}f\Delta \lambda + 0\Delta s = 0$$

$$D_{x}\rho\Delta x + D_{\lambda}\rho\Delta \lambda + D_{s}\rho\Delta s = 0$$

$$2\sum_{i=1}^{n} [x_{i} - x_{i}(s)]\Delta x_{i} + 2[\lambda - \lambda(s)]\Delta \lambda - 2\Delta s\Delta s = 0$$

$$\sum_{i=1}^{n} \Delta x_{i}^{2} + \Delta \lambda^{2} = \Delta s^{2}$$
(6.30)

e fixando  $\Delta s=\pm 1,$  temos

$$\sum_{i=1}^{n} \Delta x_i^2 + \Delta \lambda^2 = 1.$$
(6.31)

Portanto, a solução do preditor tangente é dada por,

$$\begin{cases} D_x f \Delta x + D_\lambda f \Delta \lambda = 0\\ \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2 + \Delta \lambda^2 = 1 \end{cases}$$
(6.32)

que é um sistema de equações não lineares. Em (KUBIVCEK, 1976) foi proposto um método especial para resolver (6.32). Entretanto, este método não será abordado neste capítulo por fugir do escopo do mesmo.

#### 6.5.2 Corretor

Expandindo em série de Taylor e fazendo a aproximação linear em torno de  $(x_0, \lambda_0)$  em (4.2), tem-se,

$$F(x,\lambda) \approx F(x_0,\lambda_0) + \begin{pmatrix} D_x f & D_\lambda f \\ D_x \rho & D_\lambda \rho \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{pmatrix} = 0$$
(6.33)

sendo a matriz Jacobiana (J) mo (6.9) é dada por,

$$J = \begin{pmatrix} D_x f & D_\lambda f \\ D_x \rho & D_\lambda \rho \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_x f & D_\lambda f \\ 2[x_1 - x_1(s)], \dots, 2[x_n - x_n(s)] & 2[\lambda - \lambda(s)] \end{pmatrix}.$$
 (6.34)

Deste modo, o passo corretor consiste em resolver,

$$J\left(\begin{array}{c}\Delta x\\\Delta\lambda\end{array}\right) = -\left(\begin{array}{c}f(x_v,\lambda_v)\\\rho(x_v,\lambda_v,s)\end{array}\right)$$
(6.35)

sendo v o número da iteração atual. Resolvendo (6.35), os estados são atualizados a cada iteração, ou seja,

$$x_{v+1} = x_v + \Delta x$$
  

$$\lambda_{v+1} = \lambda_v + \Delta \lambda.$$
(6.36)

Portanto, (6.35) e (6.36) são resolvidos, partindo da solução estimada no passo do preditor como solução inicial, até atingir um critério de convergência.

## 6.6 Implementação Computacional

O Algoritmo 1 apresenta uma visão geral dos passos necessários para o CPFLOW para traçar a curva PV do SEP.

Algoritmo 1: Fluxo de carga continuado
início
Passo 1: Entrar com os dados do SEP;
$Passo \ 2$ : Inicializar os estados;
Passo 3: Parametrizar as cargas e a geração;
Passo 4: Estimar a próxima solução;
Passo $4.1$ : Utilizar o preditor tangente (ver $(6.32)$ );
Passo $4.2$ : Utilizar o preditor secante (ver $(6.4)$ );
Passo 5: Usar o corretor para calcular a próxima solução, utilizando a
aproximação feita pelo preditor como solução inicial (ver 6.35);
Passo 6: Verificar critério de parada. Se não atendido, ir para Passo 4.2;
—

Vale destacar que, pelo fato do algoritmo proposto em (CHIANG et al., 1995) utilizar a parametrização pelo comprimento do arco, o mesmo não apresenta problemas numéricos nas proximidades do ponto de colapso de tensão. Além disso, este método apresenta baixo esforço computacional, pelo fato de o mesmo utilizar apenas duas vezes o preditor tangente e nas demais iterações utilizar o preditor secante.

### 6.7 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado o método que toma como base o método da continuação para traçar a curva PV, denominado Fluxo de Carga Continuado (do inglês, *Continuation Power Flow - CPFLOW*). O *CPFLOW* tem como principal vantagem a capacidade de traçar a curva PV sem ser afetado pela singularidade da matriz Jacobiana nas vizinhanças do ponto de colapso de tensão. Entretanto, é sabido que o *CPFLOW* requer um alto esforço computacional para determinar a MET de um grande número de contingências, podendo inviabilizar assim a sua aplicação na análise de segurança de SEPs de grande porte em tempo real.

Deste modo, neste trabalho foi estudada e implementada uma técnica para estimar a MET proposta em (CHIANG et al., 1995) denominada *Look-Ahead*. Entretanto, em (CHI-ANG et al., 1995), não é definido como incorporar os limites de potência reativa dos geradores na obtenção da MET. Portanto, no próximo capítulo será apresentada a metodologia proposta neste trabalho para obtenção da MET levando em consideração os limites de potência reativa do geradores.

Com o objetivo de validar os resultados obtidos pela metodologia supracitada, o CP-FLOW proposto em (CHIANG et al., 1995) foi implementado computacionalmente, le-

vando em consideração os limites de potência reativa.

# Capítulo 7

# Metodologia Proposta para Estimação da MET Considerando os Limites de Potência Reativa dos Geradores

### 7.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo será apresentada a metodologia proposta neste trabalho para estimar a MET levando em consideração os limites de potência reativa dos geradores. Esta metodologia é uma extensão do método proposto em (CHIANG et al., 1995), denominado *Look-Ahead*. O *Look-Ahead* é uma técnica que explora o fato de que nas proximidades do ponto de colapso de tensão (bifurcação do tipo sela-nó) a curva PV possui propriedade quadrática (ver Apêndice A), viabilizando assim a estimação do Ponto Máximo de Carregamento (PMC).

Na Seção 7.2, a metodologia *Look-Ahead* é apresentada; na Seção 7.3, apresenta-se o método para a predição do perfil de tensão considerando a estimação da MET via o *Look-Ahead*; na Seção 7.4, é apresentada uma avaliação do método *Look-Ahead*; na Seção 7.5, é apresentada a metodologia proposta neste trabalho para a estimação da MET levando em consideração os limites de potência reativa dos geradores do SEP; e, na Seção 7.6, as considerações finais a respeito do presente capítulo são apresentadas.

# 7.2 Estimação da Margem de Estabilidade de Tensão via *Look-Ahead*

A formulação matemática do Look-Ahead baseia-se na solução do fluxo de carga. Portanto, considere  $x_1$  e  $x_2$  dois vetores de variáveis de estado do SEP, para diferentes níveis de

carregamento  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , respectivamente, conforme a Figura 7.1. Através de  $x_1$  e  $x_2$ , é possível estimar o PMC, representado pelo parâmetro  $\lambda_{max}^*$ .



Figura 7.1: Look-Ahead.

A estimativa do PMC é realizada para a barra mais sensível do SEP, denominada de **barra piloto de tensão**, que é a barra que apresenta a maior variação relativa de tensão determinada através de

$$\Delta V_i = \frac{(V_i|_{\lambda=\lambda_1} - V_i|_{\lambda=\lambda_2})}{V_i|_{\lambda=\lambda_1}} \tag{7.1}$$

sendo,  $\Delta V_i$  a maior variação relativa de tensão da *i*-ésima barra de carga do sistema e  $V_i|_{\lambda=\lambda_1}$  e  $V_i|_{\lambda=\lambda_2}$  as tensões da *i*-ésima barra de carga correspondente aos pontos de operação  $x_1$  e  $x_2$ , respectivamente. Deste modo, a barra piloto de tensão é dada por,

$$V_p = max \left\{ \Delta V_i \right\}. \tag{7.2}$$

Entretanto, nem sempre a mesma barra apresenta a maior variação de tensão e ângulo ao mesmo tempo (SANTOS, 2009). A curva  $\lambda V$  da barra piloto p é escolhida para calcular a MET do SEP. Esta estimava é realizada ajustando-se uma curva quadrática  $(\lambda V)$  representada por,

$$\lambda = \alpha + \beta V_p + \gamma V_p^2 \tag{7.3}$$

sendo,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  incógnitas a serem determinadas. Logo, dado um nível de carregamento  $\lambda_1$ , obtém-se, através do fluxo de carga, a variável de estado  $x_1$ , a qual representa o ponto de operação para o caso  $\lambda_1^{11}$ . O mesmo procedimento é realizado para o nível de carregamento  $\lambda_2^{12}$ , obtendo-se assim a variável de estado  $x_2$ . Ambas as variáveis de estado estão representadas na Figura 7.1. Conhecidas as variáveis  $x_1$  e  $x_2$  do SEP, obtém-se o sistema

$$\begin{cases} \lambda_1 = \alpha + \beta V_{p,1} + \gamma V_{p,1}^2\\ \lambda_2 = \alpha + \beta V_{p,2} + \gamma V_{p,2}^2 \end{cases}$$
(7.4)

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>Geralmente, o nível de carregamento  $\lambda_1$  representa o caso base do SEP.

 $<sup>^{12}\</sup>mathrm{O}$ nível de carregamento  $\lambda_2$ representa um aumento do carregamento no SEP.

sendo,  $\lambda_1 < \lambda_2$  e  $V_{p,1}$  e  $V_{p,2}$  tensões da barra piloto  $V_p$  referente a cada nível de carregamento.

Pelo fato de (7.4) possuir duas equações e três incógnitas, uma terceira equação é necessária e esta é obtida derivando-se, em relação a  $\lambda$ , uma das equações em (7.4). Por conveniência, será escolhida a equação referente ao nível de carregamento  $\lambda_2$ , pois para este nível, o ponto de operação  $x_2$  se encontra mais próximo do PMC. Portanto, derivando-se esta equação em relação a  $\lambda_2$ , obtém-se

$$1 = \beta \frac{dV_{p,2}}{d\lambda} \bigg|_{\lambda = \lambda_2} + 2\gamma \frac{dV_{p,2}}{d\lambda} \bigg|_{\lambda = \lambda_2} V_{p,2}$$
(7.5)

sendo,  $\frac{V_{p,2}}{d\lambda}|_{\lambda=\lambda_2}$  um termo conhecido. Em verdade, o valor deste termo pode ser obtido através do cálculo do vetor tangente (LIMA GUEDES, 2000).

O vetor tangente indica o grau de sensibilidade das tensões e ângulos das barras do SEP, dada uma variação do parâmetro  $\lambda$ . Os elementos do vetor tangente fornecem informações importantes sobre a dinâmica do colapso de tensão, indicando quais as barras mais atingidas pelo fenômeno (LIMA GUEDES, 2000).

Sejam  $F(x, \lambda) = 0$  as equações de fluxo de carga, com as cargas variando de acordo com o parâmetro  $\lambda \in x$  o vetor de variáveis de estado do SEP. Se  $\frac{\partial F}{\partial x}$  é não singular, então, pelo teorema da função implícita, pode-se determinar x em função de  $\lambda$ , de forma que  $F(x(\lambda), \lambda) = 0$ . O vetor tangente  $\frac{\Delta x}{\Delta \lambda} \approx \frac{\partial x}{\partial \lambda}$  pode ser calculado para um determinado ponto de equilíbrio  $(x, \lambda)$  (SANTOS, 2009). Este vetor é calculado através de

$$F(x,\lambda) = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial x}\Big|_{(x,\lambda)} \Delta x + \frac{\partial F}{\partial \lambda}\Big|_{(x,\lambda)} \Delta \lambda = 0$$
$$\frac{\partial F}{\partial x}\Big|_{(x,\lambda)} \frac{\Delta x}{\Delta \lambda} = -\frac{\partial F}{\partial \lambda}\Big|_{(x,\lambda)}$$
(7.6)

sendo,  $\frac{\partial F}{\partial x}$  a matriz Jacobiana do fluxo de carga e  $\frac{\partial F}{\partial \lambda}$  o vetor das derivadas das equações de potência ativa e reativa.

Conforme pode ser visto em (7.6), o vetor tangente pode ser obtido de forma relativamente simples uma vez que a matriz Jacobiana já foi calculada e fatorada durante o fluxo de carga e o vetor  $\frac{\partial F}{\partial \lambda}$  pode ser facilmente obtido através de (7.8) (SANTOS, 2009).

$$F(x,\lambda) = \begin{pmatrix} F_1(x,\lambda) \\ F_2(x,\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P^{esp}(\lambda) - P^{calc}(x) \\ Q^{esp}(\lambda) - Q^{calc}(x) \end{pmatrix}$$
(7.7)

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P^{esp}(\lambda)}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial Q^{esp}(\lambda)}{\partial \lambda} \end{pmatrix}$$
(7.8)

sendo,  $P^{esp}(\lambda) \in Q^{esp}(\lambda)$  os vetores de potência ativa e reativa líquida (ver (7.9)).

7. Metodologia Proposta para Estimação da MET Considerando os Limites de Potência Reativa 104 dos Geradores

$$\frac{\partial P_i^{esp}}{\partial \lambda} = \frac{\partial (P_i^{ger} - P_i^{carga})}{\partial \lambda}.$$
(7.9)

Em (7.9),  $P^{ger}$  é a potência ativa gerada e  $P^{carga}$  é a potência ativa consumida na *i*ésima barra, calculadas através de (5.12) e (5.23), respectivamente. Portanto, realizandose as devidas substituições em (5.12), (5.23) e (7.9), obtém-se

$$\frac{\partial P_i^{esp}}{\partial \lambda} = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left\{ \left[ P_{Ger_i}(\lambda_0) + fpg_i \sum_{j=1}^{NB} \left( P_j(\lambda) - P_j(\lambda_0) \right) \right] - \left[ P_{0_{B_i}} \left( 1 + K_{AB_i} \beta_i (\lambda - 1) \right) \right] \right\}$$
(7.10)

$$\frac{\partial P_i^{esp}}{\partial \lambda} = fpg_i \left( \sum_{j=1}^{NB} P_{0_{B_j}} K_{AB_j} \beta_j \right) - P_{0_{B_i}} K_{AB_i} \beta_i.$$
(7.11)

A dedução da derivada da potência reativa líquida  $\frac{\partial Q^{esp}(\lambda)}{\partial \lambda}$  é feita de forma análoga. Portanto, não será apresentada neste capítulo.

Como a matriz Jacobiana e o vetor  $\frac{\partial F}{\partial \lambda}$  são conhecidos, torna-se uma t arefa trivial calcular o vetor tangente (7.12), para tal, basta resolver (7.6).

$$\frac{dx}{d\lambda} = \begin{bmatrix} \frac{d\theta_i}{d\lambda} \\ \frac{dV_i}{d\lambda} \end{bmatrix}$$
(7.12)

Destaca-se que o vetor (7.12) possui como uma das entradas o termo  $\frac{dV_{p,2}}{d\lambda}|_{\lambda=\lambda_2}$  de (7.5). Deste modo, basta determinar os valores de  $\alpha$ ,  $\beta \in \gamma$ , através do sistema de equação composto pelas Equações (7.4) e (7.5). Esse sistema pode ser expresso na forma matricial, conforme segue.

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & V_{p,1} & V_{p,1}^2 \\ 1 & V_{p,2} & V_{p,2}^2 \\ 0 & \frac{dV_{p,2}}{d\lambda_2} & 2\frac{dV_{p,2}}{d\lambda_2}V_{p,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}$$
(7.13)

Resolvendo (7.13) determinam-se os valores de  $\alpha$ ,  $\beta \in \gamma$ . Desta forma, é possível estimar o máximo carregamento  $\lambda_{V_{max}}$  que o SEP pode suportar antes do surgimento do colapso de tensão. Para determinar o índice  $\lambda_{V_{max}}$  é necessário determinar o ponto máximo de (7.3), como segue.

$$\frac{d\lambda}{dV_p} \left( \alpha + \beta V_p + \gamma V_p^2 \right) = 0$$
  
$$\beta + 2\gamma V_p = 0$$
  
$$V_{p_{max}} = -\frac{\beta}{2\gamma}.$$
 (7.14)
Finalment, e efetuando as devidas substituições em (7.3) e (7.14), obtém-se o valor estimado de  $\lambda^*_{Vmax}$ .

$$\lambda_{V_{max}}^{*} = \alpha - \beta \left(\frac{\beta}{2\gamma}\right) + \gamma \beta \left(\frac{\beta}{2\gamma}\right)^{2}$$
$$\lambda_{V_{max}}^{*} = \alpha - \frac{\beta^{2}}{2\gamma} + \frac{\beta^{2}}{4\gamma}$$
$$\lambda_{V_{max}}^{*} = \alpha - \frac{\beta^{2}}{4\gamma}$$
(7.15)

Nesta seção, foi apresentado o equacionamento para o ajuste da curva  $\lambda V$ , referente à barra piloto de tensão. Entretanto, conforme mencionado anteriormente, esta barra pode também apresentar mudança significativa no ângulo. Portanto, deve-se repetir todo o procedimento de ajuste da curva  $\lambda\theta$ . A qual apresenta a mesma propriedade quadrática da curva  $\lambda V$  próxima ao ponto de colapso de tensão(SANTOS, 2009). O cálculo de  $\lambda^*_{\theta_{max}}$  é feito de forma análoga e será mostrada apenas a sua equação final.

$$\lambda_{\theta_{max}}^* = \eta - \frac{\varphi^2}{4\tau} \tag{7.16}$$

sendo,  $\eta$ ,  $\varphi \in \tau$  incógnitas a serem determinadas. Estas são calculadas da mesma forma que as incógnitas  $\alpha$ ,  $\beta \in \gamma$  conforme (7.13). Determinados  $\eta$ ,  $\varphi \in \tau$ , estima-se o carregamento máximo  $\lambda^*_{\theta max}$ .

Com o objetivo de melhor a exatidão da estimativa da MET, faz-se uma média aritmética dos índices  $\lambda_{V_{max}}^* \in \lambda_{\theta_{max}}^*$ . Portanto o índice  $\lambda_{max}^*$  é calculado através de (7.17);

$$\lambda_{max}^* = \frac{\lambda_{V_{max}}^* + \lambda_{\theta_{max}}^*}{2} \tag{7.17}$$

O Algoritmo 2 apresenta uma visão geral dos passos necessários para o *Look-Ahead* estimar a MET do SEP.

#### Algoritmo 2: Look-Ahead

7. Metodologia Proposta para Estimação da MET Considerando os Limites de Potência Reativa 106 dos Geradores

### 7.3 Método de Predição do Perfil de Tensão

Nesta seção, será apresentado o procedimento para estimar o perfil de tensão de uma determinada barra de carga j do SEP calculada no PMC. Será estimada a tensão crítica  $(V_{crit})$  da barra de carga j correspondente à tensão do PMC, conforme a Figura 7.1. O cálculo da tensão crítica está baseado na propriedade quadrática da curva  $\lambda - V$  próximo ao PMC e da solução do fluxo de carga. A estimativa da tensão da barra de carga j é feita de forma similar ao que foi feito para estimar o parâmetro  $\lambda_{max}$ . As Equações (7.18) e (7.19) são similares ao Sistema (7.4). A Equação (7.20) é determinada no PMC, onde  $\lambda_{max}$  é o carregamento máximo aproximado do SEP obtido através de (7.17) e  $V_{Min,j}$  é a tensão da j-ésima barra de carga no PMC a ser calculada.

$$\lambda_1 = \alpha_j + \beta_j V_{j,1} + \gamma_j V_{j,1}^2 \tag{7.18}$$

$$\lambda_2 = \alpha_j + \beta_j V_{j,2} + \gamma_j V_{j,2}^2 \tag{7.19}$$

$$\lambda_{max}^* = \alpha_j + \beta_j V_{Min,j} + \gamma_j V_{Min,j}^2 \tag{7.20}$$

Nota-se que em (7.20) existem 4 incógnitas,  $\alpha_j$ ,  $\gamma_j$ ,  $\beta_j$  e  $V_{Min,j}$ , sendo necessária a adição de uma nova equação para que (7.20) tenha uma solução. Esta equação adicional é obtida derivando-se (7.20) em relação a  $V_{Min,j}$ , obtendo assim

$$0 = \beta_j + 2\gamma_j V_{Min,j}. \tag{7.21}$$

No PMC, a derivada  $d\lambda/dV = 0$ , pois não ocorre variação do parâmetro  $\lambda$  em relação a tensão V da barra de carga j no PMC. Conhecidos os parâmetros  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_{max}^*$ ,  $V_{j,1}$  e  $V_{j,2}$ , determinam-se os parâmetros  $\alpha_j$ ,  $\gamma_j$ ,  $\beta_j$  e  $V_{Min,j}$ . Rearranjando (7.21), tem-se

$$\beta_j = -2\gamma_j V_{Min,j}.\tag{7.22}$$

Substituindo (7.21) em (7.20), tem-se:

 $\lambda_{max}^* = \alpha_j - 2\gamma_j V_{Min,j} + \gamma_j V_{Min,j}^2$  $\lambda_{max}^* = \alpha_j - \gamma_j V_{Min,j}^2$ 

$$\alpha_j = \lambda_{max}^* + \gamma_j V_{Min,j}^2. \tag{7.23}$$

Substituindo (7.21) e (7.23) em (7.18), tem-se:

$$\lambda_1 = \lambda_{max}^* + \gamma_j V_{Min,j}^2 - 2\gamma_j V_{Min,j} + \gamma_j V_{j,1}^2$$

$$\lambda_{1} = \lambda_{max}^{*} + \gamma_{j} (V_{Min,j} - V_{Min,j})^{2}$$

$$\lambda_{1} - \lambda_{max}^{*} = \gamma_{j} (V_{Min,j} - V_{j,1})^{2}.$$
(7.24)

E de forma análoga, substituindo (7.21) e (7.23) em (7.19),

$$\lambda_2 - \lambda_{max}^* = \gamma_j (V_{Min,j} - V_{j,2})^2.$$
(7.25)

Fazendo a relação entre (7.24) e (7.25), tem-se:

$$\frac{\lambda_2 - \lambda_{max}^*}{\lambda_2 - \lambda_{max}^*} = \frac{(V_{Min,j} - V_{j,1})^2}{(V_{Min,j} - V_{j,2})^2}$$
(7.26)

Considerando que  $A = \frac{(V_{Min,j} - V_{j,1})^2}{(V_{Min,j} - V_{j,2})^2}$ , pode-se manipular algebricamente (7.26) e obter (7.27).

$$V_{Min,j}^{2} + \frac{2(-AV_{j,2} + V_{j,1})}{(A-1)}V_{Min,j} + \frac{AV_{j,2}^{2} - V_{j,1}}{(A-1)} = 0$$
(7.27)

Dado o parâmetro  $\lambda_{max}$  é possível determinar o valor aproximado da tensão crítica  $V_{Min,j}$  da barra de carga j, através de (7.27). Dessa maneira é possível avaliar tanto o carregamento do SEP quanto a tensão crítica da **barra piloto de tensão**.

# 7.4 Avaliação do Desempenho do Método Look-Ahead

Com o objetivo de avaliar o precisão do método *Look-Ahead* na estimação do PMC, nesta seção será apresentada uma comparação do mesmo em relação ao método *CPFLOW*. Para tal, foram feitas simulações no sistema brasileiro reduzido composto por 16 barras (ver Apêndice C). Este sistema possui duas áreas e 13 barras de carga (tipo PQ). Para efeito de simulação, foram adotados fatores de participação iguais para todas as barras e áreas do sistema.

Os fatores de participação utilizados nesta simulação são:

- Fator de participação das barras igual a 0,3;
- Fator de participação das áreas igual a 1.

Com o objetivo de avaliar a precisão do método *Look-Ahead* foram estimados o PMC  $(\lambda_{max}^*)$  e a magnitude da tensão crítica  $(V_{crit}^*)$  para cinco diferentes níveis de carregamento  $\lambda_2^{13}$ . O cálculo do erro relativo em relação ao PMC  $(\lambda_{max})$  e a magnitude da tensão

Look-Ahead			Erro Relativo [%]		
$\lambda_2$	$\lambda^*_{max}$	$V_{crit}^*$	$rac{\lambda_{max} - \lambda^*_{max}}{\lambda_{max}}$	$\frac{V_{crit} - V_{crit}^*}{V_{crit}}$	
$^{1,1}$	2,7257	0,733	21,82	23,38	
$^{1,5}$	$2,\!8265$	0,7141	17,26	20,2	
2	$2,\!9467$	$0,\!6892$	11,81	16	
$^{2,5}$	$3,\!0601$	$0,\!6618$	$6,\!67$	$11,\!4$	
3	$3,\!1661$	$0,\!6269$	$1,\!87$	$5,\!52$	

Tabela 7.1: Avaliação da precisão do método Look-Ahead.

crítica  $(V_{crit})$  foi feita para analisar a eficácia do método *Look-Ahead*. Os resultados desta simulação estão apresentados na Tabela 7.1.

Os valores obtidos via *CPFLOW* foram  $\lambda_{max} = 3,2075$  e  $V_{crit} = 0,5941$ . Assim, analisando a Tabela 7.1, pode-se observar que, quando o nível de carregamento  $\lambda_2$  está bastante distante do valor real de  $\lambda_{max}$ , a estimação obtida via *Look-Ahead* apresenta um erro relativo de aproximadamente 21,82%, e conforme o valor de  $\lambda_2$  se aproxima ao valor real do  $\lambda_{max}$ , este erro diminui. Esta análise nos leva a concluir que de fato o método *Look-Ahead* apresenta imprecisão da estimação do PMC quando  $\lambda_2$  se encontra distante do valor  $\lambda_{max}$  Na Figura 7.2 são ilustradas as curvas *PV* referentes a estes resultados.



Figura 7.2: Comparação das curvas PV obtidas.

Entretanto, em face a analisar sua aplicabilidade na operação em tempo real, dado o ponto de operação do SEP, acredita-se que o método *Look-Ahead* consiga fornecer ao operador uma ideia de o quanto o SEP está distante do ponto de colapso de tensão.

 $<sup>^{13}\</sup>mathrm{O}$ nível de carregamento  $\lambda_1$  foi considerado igual a 1 em todas as simulações.

Esta informação pode ser útil para apresentar ao operador uma estimativa do nível de carregamento do SEP.

Destaca-se que melhorias do *Look-Ahead* foram propostas na literatura, tais como as propostas em (ZHAO; CHIANG; LI, 2003; MARTINS L. F. B. ; MARTINS, 2009), onde em ambos os trabalhos, os autores propõem técnicas distintas para estimar de forma mais precisa o PMC através de uma estratégia para a obtenção do  $\lambda_2$ .

### 7.5 Limite de Potência Reativa dos Geradores

Em estudos de fluxo de carga, os geradores são representados por tensões terminais controladas (barras *PV*), isto é, nas barras dos geradores são fixados os limites de geração de potência reativa, modelando de forma aproximada a limitação de corrente de campo e corrente de estator (KRAUER, 2000). Os limites de potência reativa assumem papel importante quando se pretende avaliar a estabilidade de tensão. Sem o efeito dos limitadores de potência reativa, o colapso de tensão ocorre por sobrecarga do sistema de transmissão, neste caso, os geradores apresentam capacidade ilimitada de assumir o aumento de potência reativa consumida pelas cargas do SEP. Quando os limites de potência reativa são considerados há uma redução significativa da MET. Nesta seção, serão discutidos os impactos ocorridos na MET, quando alguns geradores do SEP atingem o limite de potência reativa (Q-limite). A partir do ponto Q-limite, os geradores perdem a capacidade de fornecimento de potência reativa, e, como consequência, ocorre uma redução significativa da MET do SEP, podendo levar o SEP ao colapso de tensão.

A limitação da capacidade de geração de potência reativa pode fazer com que o SEP atinja o colapso de tensão antes do ponto de sobrecarga do sistema de transmissão, devido à incapacidade das unidades geradoras de prover o incremento de potência reativa exigida pelas cargas. A Figura 7.3 ilustra o impacto da MET do SEP quando o gerador *i* atinge o seu limite de potência reativa.

Analisando a Figura 7.3, nota-se que o SEP está operando em um determinado ponto de operação PO da curva PV-1, distante do limite de potência reativa do gerador i, representado pelo ponto  $Q_{lim}$  da mesma curva. Com o aumento do carregamento do SEP, os valores das amplitudes das tensões das barras de carga sofrem uma redução. Em contrapartida, ocorre um aumento da potência reativa gerada pelo gerador i. Em um determinado instante, o gerador i atinge a sua capacidade máxima de fornecimento de potência reativa (ponto  $Q_{lim}$ ), alterando as equações de fluxo de carga e, consequentemente, o traçado da curva PV que passa a ser representada pela curva PV-2. Se o ponto  $Q_{lim}$  estiver na parte superior da curva PV-2, o SEP encontrará um ponto de equilíbrio estável, entretanto, a MET sofrerá uma significativa redução de  $\lambda_1$  para  $\lambda_2$ .

Caso o ponto de operação  $Q_{lim}$  esteja na parte inferior da *curva PV-2*, como ilustrado na Figura 7.4, o SEP encontrará um ponto de equilíbrio instável, caracterizando o surgi-



Figura 7.3: Limite da potência reativa atingido resultando em um ponto de operação estável.



Figura 7.4: Limite da potência reativa atingido resultando em um ponto de operação instável.

mento do fenômeno de colapso de tensão devido ao aparecimento da bifurcação induzida por limite no ponto  $Q_{lim}$ . Essa bifurcação ocorre por causa da limitação dos geradores do SEP em suprir a demanda de potência reativa exigida pelas cargas.

#### 7.5.1 Revisão Bibliográfica

A seguir serão apresentados alguns trabalhos existentes na literatura relacionados à limitação de potência reativa dos geradores do SEP.

GOLUB; LOAN (1996) relataram que dada uma matriz, o seu menor valor singular diminui enquanto o maior valor singular aumenta se a matriz original for acrescida de uma coluna. De fato, isto acontece em um SEP quando uma barra de tensão controlada atinge o seu limite de geração de potência reativa, uma vez que a barra controlada passa a se comportar como uma barra de carga PQ. Em termos de equacionamento do fluxo de carga, isto implica no aumento de uma linha referente a potência reativa da nova barra PQ e uma coluna relativa a tensão da barra que passa a ser uma variável. Essa troca de tipo das barras é realizada toda vez que um gerador atinge seu limite de potência reativa. Isso fará com que a MET do SEP seja reduzida, podendo, inclusive levar o SEP ao colapso de tensão.

A potência reativa entregue pelo gerador à rede deve ficar entre os limites máximo e mínimo de potência reativa definidos pela curva de capabilidade de cada máquina. Para um determinado nível de carga nas barras PQ, calcula-se, em cada iteração, pelo método de Newton-Raphson, a potência reativa gerada por cada máquina. Caso a potência reativa calculada seja superior ao limite de potência reativa, a barra PV passa a ser tratada como barra PQ com potência reativa fixada no valor limite de potência reativa permitida para a barra (MONTICELLI, 1983). Como consequência, haverá uma redução da MET do SEP provocada pela limitação do suprimento de potência reativa dos geradores.

Um modelo mais elaborado de limitador de potência reativa para os geradores empregados em estudos estáticos de colapso de tensão foi proposto em (LOF; ANDERSSON; HILL, 1995). Neste trabalho, os limites de corrente de campo são incluídos no modelo. Esse modelo é então incorporado nas equações do fluxo de carga. Utiliza-se o menor valor singular para indicar o limite de estabilidade de tensão.

Em (YORINO; LI; SASAKI, 2005), foi proposto um método para calcular através da curva *PV* o ponto (Q-limite) em que os geradores atingem os seus limites de potência reativa. O método proposto estima este ponto através de um algoritmo de predição e correção. O esquema de predição utiliza uma estimativa linear, que é corrigida pelo esquema de correção, a fim de encontrar qual é o gerador que está mais próximo do ponto Q-limite. Os autores também propõem um algoritmo que calcula o ponto de colapso de tensão com o intuito de detectar a bifurcação sela-nó.

CHEN; MIN (2007) estudaram a ocorrência da bifurcação do tipo induzida por limite causados pelos dispositivos FACTS, como por exemplo SVC (do inglês, *Static VAR Com*-

*pensator*). Os autores mostraram que, quando a capacidade do SVC é aumentada até o seu valor crítico, o SVC torna-se um capacitor fixo e perde a capacidade de regular a tensão quando atinge o seu limite. A mudança estrutural do SEP causa a bifurcação e leva o SEP a instabilidade.

Em (YUE; VENKATASUBRAMANIAN, 2007), apresentaram-se condições gerais para a ocorrência de bifurcações induzidas por limites complementares quando duas variáveis representam complementarmente uma relação do tipo limite *windup* funcional em um sistema de equações. Uma aplicação direta deste trabalho é na caracterização da bifurcação induzida por limite para um grande conjunto de equações de fluxo de carga. Os autores demonstraram que a bifurcação induzida por limite surge sempre que ocorrer uma mudança no sinal no determinante da matriz Jacobiana quando realiza-se a alteração da barra PV para PQ (VENKATASUBRAMANIAN; SCHATTLER; ZABORSKY, 1995).

Em (ZHU; TAYLOR; IRVING, 2008), foi apresentado um novo algoritmo que leva em consideração o limite de potência reativa dos geradores (Q-limite) para calcular o ponto de máximo carregamento. Este algoritmo faz uso da interpolação polinomial de Lagrange para determinar o ponto limite de potência reativa dos geradores. Esse método baseia-se no CPFLOW convencional. Entretanto, apresenta maior robustez e eficiência computacional quando comparado com o mesmo. CAO; CHEN (2010) propuseram um CPFLOW melhorado para determinar a bifurcação induzida por limite, associada às equações de fluxo de carga. Neste método, os autores incorporaram as características da MET na ocorrência de uma bifurcação induzida por limite e a utilização do vetor tangente das equações do CPFLOW no ponto em que o limite de potência reativa dos geradores é atingido, este último é utilizado para diferenciar as bifurcações induzidas por limites e as bifurcações sela-nó.

Em (AVALOS et al., 2009), foi realizado um estudo detalhado para identificar bifurcações do tipo sela-nó e induzidas por limites em um SEP, utilizando uma abordagem baseada em métodos de otimização. Os estudos teóricos apresentados demonstraram, formalmente, que as soluções encontradas pelo modelo de otimização, que é baseado nas restrições de complementaridade usadas para representar adequadamente os controles de tensão dos geradores, correspondem a um do ponto de bifurcação do tipo sela-nó ou induzida por limites deste modelo.

LI; CHIANG (2008) apresentaram uma extensão do método Look-Ahead para determinar a MET considerando os limites de potência reativa dos geradores. Neste trabalho, os autores determinam os geradores que atingem o limite reativo após o cálculo do PMC através do método Look-ahead. Caso existam geradores que violaram os limites de potência reativa, o tipo da barra destes geradores é alterado de PV para PQ e o PMC é estimado novamente pelo Look-ahead. Este procedimento é realizado até que é obtido um PMC sem violação dos limites reativos dos geradores. Entretanto, não está evidente no artigo o procedimento para a determinação do ponto de carregamento nos quais os geradores atingem os limites de potência reativa. Esta informação é importante para a avaliação da MET, principalmente quando o PMC corre em um ponto de BIL.

Os limites de potência reativa dos geradores e os limites de taps de transformadores também causam efeitos significativos em relação ao colapso de tensão. Em geral, o sistema de equações se altera quando estes limites são atingidos. Essas mudanças podem modificar a MET e inclusive serem responsáveis pelo aparecimento das bifurcações induzidas por limites.

Todos os trabalhos citados anteriormente calculam de alguma forma o ponto (Q-limite) onde ocorre a violação de potência reativa dos geradores. O cálculo deste ponto é muito importante, pois quando um determinado gerador atinge seu limite de potência reativa, há uma significativa redução da MET do SEP.

Neste trabalho foi proposta uma nova metodologia para estimar o ponto Q-limite. A técnica baseia-se na característica aproximadamente quadrática da curva  $(Q - \lambda)$  dos geradores e utiliza esta curva para estimar o ponto Q-limite dos geradores mais sensíveis do SEP. Após a obtenção do ponto Q-limite, foi desenvolvida uma extensão da metodologia Look-ahead para a determinação da MET considerando os limites reativos dos geradores.

#### 7.5.2 Metodologia Proposta

Nesta seção será apresentada a metodologia desenvolvida neste trabalho para estimar o ponto (Q-limite) onde ocorre violação do limite de potência reativa dos geradores do SEP. A determinação deste ponto possibilita a detecção das bifurcações induzidas por limites, sendo esta uma das vantagens da metodologia proposta em relação a (LI; CHIANG, 2008). A partir deste ponto, as unidades geradoras perdem a capacidade de fornecimento de potência reativa exigida pelas cargas, como consequência, haverá uma mudança significativa da MET do SEP. O método parte do princípio de que a curva  $(Q - \lambda)$  possui propriedade aproximadamente quadrática.

O método utiliza a informação do fluxo de carga e do vetor tangente. A estimativa é realizada utilizando dois pontos de operação,  $x_1 \in x_2$ , e do vetor tangente calculado no ponto de operação  $x_2$ , para estimar o valor do carregamento ( $\lambda_{Q_{lim}}$ ) em que ocorre a violação de potência reativa dos geradores do SEP, conforme ilustrado na Figura 7.5.

A estimativa é realizada para os geradores mais sensíveis do SEP, que são aqueles que possuem maiores variações de potência reativa. Para calcular a sensibilidade dos geradores foi adotado o critério apresentado na Figura 7.6, onde  $Q_{i_{max}} \in Q_{i_{min}}$  representam os limites superior e inferior de potência reativa do *i*-ésimo gerador, respectivamente;  $\lambda_1$ e  $\lambda_2$  são pontos de carregamento, sendo  $\lambda_1 < \lambda_2$ ;  $x_1 \in x_2$ , são os pontos de operação correspondentes aos pontos de carregamento  $\lambda_1 \in \lambda_2$ , respectivamente; e  $Q_{i_1} \in Q_{i_1}$  são a potência reativa gerada pelo *i*-ésimo gerador para os pontos de carregamento  $\lambda_1 \in \lambda_2$ , respectivamente.



Figura 7.5: Curva  $(Q - \lambda)$  utilizada para estimação do ponto Q-limite.



Figura 7.6: Curva  $(Q - \lambda)$  com gerador se aproximando dos limites de potência reativa.

Para o crescimento da curva  $(Q_i - \lambda)$ , no caso em que o limite do gerador *i* se aproximar do seu limite superior  $(Q_{i_2} > Q_{i_1})$ , a primeira equação em (7.28) é utilizada para determinar o valor da sensibilidade do gerador. Caso contrário, em que o limite do gerador *i* se aproxima do seu limite inferior  $(Q_{i_2} < Q_{i_1})$  é utilizada a segunda equação em (7.28).

$$\Delta G_{i} = \begin{cases} \text{Se } Q_{i_{2}} > Q_{i_{1}}, \left(\frac{Q_{i|\lambda=\lambda_{2}}-Q_{i|\lambda=\lambda_{1}}}{Q_{imax}-Q_{i|\lambda=\lambda_{1}}}\right) \\ \text{Se } Q_{i_{2}} < Q_{i_{1}}, \left(\frac{Q_{i|\lambda=\lambda_{1}}-Q_{i|\lambda=\lambda_{2}}}{Q_{i|\lambda=\lambda_{1}}-Q_{imin}}\right) \end{cases}$$
(7.28)

Sendo  $\Delta G_i$  a variação relativa da potência reativa do *i*-ésimo gerador do SEP,  $Q_i|_{\lambda=\lambda_1}$  a potência reativa calculada no ponto de operação  $x_1 \in Q_i|_{\lambda=\lambda_2}$  a potência reativa calculada no ponto de operação  $x_2$ , conforme a Figura 7.6, e  $Q_{i_{max}} \in Q_{i_{min}}$  representam os limites superior e inferior de potência reativa do *i*-ésimo gerador, respectivamente.

Uma normalização do vetor  $\Delta G_i$  é realizada para facilitar a análise do problema, conforme pode ser visto em (7.29). As sensibilidade de todos os geradores do SEP são calculadas e o gerador que possuir maior sensibilidade, denotado por  $\Delta G_{max}$  em (7.29), será escolhido como sendo o gerador mais sensível do SEP e a sua sensibilidade é utilizada para efetuar a normalização.

$$\Delta G_{n_i} = \left(\frac{\Delta G_i}{\Delta G_{max}}\right) \tag{7.29}$$

Desta forma, o gerador mais sensível do SEP possuirá sensibilidade igual a 1 e todos os demais geradores possuirão sensibilidade menores que 1. Assim, os geradores que possuírem as maiores sensibilidades provavelmente atingirão o limite de potência reativa.

A estimativa é realizada ajustando-se a curva  $(Q - \lambda)$ , representada por (7.30).

$$Q = \mu + \tau \lambda + \sigma \lambda^2 \tag{7.30}$$

Em (7.30),  $\mu$ ,  $\tau \in \sigma$  são incógnitas a serem determinadas e  $\lambda$  é o carregamento do SEP. Depois de determinadas as variáveis de estado  $x_1 \in x_2$ , via resolução das equações de fluxo de carga, calculam-se as potências reativas  $Q_1 \in Q_2$  para os níveis de carregamento  $\lambda_1 \in$  $\lambda_2$ , lembrando que  $\lambda_1 < \lambda_2$ . Conhecidas as potências reativas  $Q(\lambda_1) \in Q(\lambda_2)$ , obtém-se o Sistema de Equações (7.31) para o gerador mais sensível.

$$\begin{cases} Q_k(\lambda_1) = \mu + \tau \lambda_1 + \sigma \lambda_1^2 \\ Q_k(\lambda_2) = \mu + \tau \lambda_2 + \sigma \lambda_2^2 \end{cases}$$
(7.31)

Em (7.31)  $Q_k(\lambda_1) \in Q_k(\lambda_2)$  são as potência reativas correspondentes aos carregamentos  $\lambda_1 \in \lambda_2$  do gerador mais sensível, denotado por k. Pelo fato de (7.31) possuir duas equações e três incógnicas ( $\mu$ ,  $\tau \in \sigma$ ), uma terceira equação é necessária par a determinação dos três parâmetros. Esta equação é obtida derivando-se, em relação ao parâmetro  $\lambda$ , uma das equações em (7.31). Por conveniência, será escolhida a equação referente ao nível de carregamentos  $\lambda_2$ , pois para este nível o ponto de operação  $x_2$  encontra-se mais próximo do limite de potência reativa (Q-limite) dos geradores do SEP, conforme ilustrado na Figura 7.5, obtendo-se assim

$$\frac{dQ_k(\lambda_2)}{d\lambda_2} = \tau + 2\sigma\lambda_2 \tag{7.32}$$

e o Sistema de Equações (7.33).

$$\begin{cases}
Q_k(\lambda_1) = \mu + \tau \lambda_1 + \sigma \lambda_1^2 \\
Q_k(\lambda_2) = \mu + \tau \lambda_2 + \sigma \lambda_2^2 \\
\frac{dQ_k(\lambda_2)}{d\lambda_2} = \tau + 2\sigma \lambda_2.
\end{cases}$$
(7.33)

Para obter a solução de (7.33) é necessário a obtenção da derivada da potência reativa em função do parâmetro  $\lambda_2$ . Este valor pode ser obtido através da equação da injeção da potência reativa do k-ésimo gerador,

$$Q_k = h_k(x) - Q_{l_k}(\lambda) \tag{7.34}$$

sendo  $h_k(x)$  a potência reativa transmitida e  $Q_{l_k}$  a potência reativa consumida pelas cargas do SEP. A função  $h_k(x)$  é definida por (7.35) e  $Q_{l_k}$  é definida por (7.36).

$$h_k = \sum_{m=1}^{NB} V_k V_m \left[ G_{km} sen(\theta_{km}) - B_{km} cos(\theta_{km}) \right]$$
(7.35)

Em (7.35), NB é o número de barras no SEP e  $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$ . Os termos  $G_{km}$  e  $B_{km}$  representam, respectivamente, a condutância e susceptância do elemento  $Y_{km}$  da matriz admitância nodal da rede de transmissão. A matriz admitância nodal é construída a partir da resistência e reatância série e susceptância *shunt* das linhas de transmissão (MONTI-CELLI, 1983).

$$Q_{l_k} = Q_{0_{l_k}} \left[ 1 + K_{R_{l_k}} \beta_{R_k} (\lambda - 1) \right]$$
(7.36)

Em (7.36),  $Q_{0_{l_k}}$  é a potência reativa das cargas da k-ésima barra do caso base;  $K_{R_{l_k}}$  é o fator de participação reativa da k-ésima barra e  $\beta_{R_k}$  é uma constante de proporcionalidade.

Derivando-se (7.34) em relação ao parâmetro  $\lambda$ , têm-se

$$\frac{dQ_k}{d\lambda_2} = \frac{\partial h_k(x)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \lambda_2} - \frac{\partial Q_{l_k}(\lambda_2)}{d\lambda_2}$$
(7.37)

sendo,  $\partial h_k(x)/\partial x$  um vetor formado pela derivadas parciais da potência reativa de (7.34) em relação as variáveis de estado  $x = [\theta, V]$  do SEP (ver 7.38)<sup>14</sup>, o vetor  $\frac{\partial x}{\partial \lambda_2}$  é determinado através do vetor tangente e  $\frac{\partial Q_{l_k}(\lambda_2)}{\partial \lambda_2}$  definido em (7.39).

$$\frac{\partial h_k}{\partial x} = \left[ \frac{\partial h_k(x)}{\partial \theta_1} \frac{\partial h_k(x)}{\partial \theta_2} \dots \frac{\partial h_k(x)}{\partial \theta_{NB}} \middle| \frac{\partial h_k(x)}{\partial V_1} \frac{\partial h_k(x)}{\partial V_2} \dots \frac{\partial h_k(x)}{\partial V_{NB}} \right]$$
(7.38)

$$\frac{\partial Q_{l_k}}{\partial \lambda_2} = Q_{0_{l_k}} K_{R_{l_k}} \beta_{R_k} \tag{7.39}$$

Portanto, conhecidos os elementos de (7.37) determina-se o valor de  $dQ_k/d\lambda_2$ . Deste modo, calculado o valor de  $dQ_k/d\lambda_2$ , obtém-se o valor das incógnitas  $\mu$ ,  $\tau \in \sigma$  através da resolução de (7.40).

$$\begin{bmatrix} Q_{k_1} \\ Q_{k_2} \\ \frac{dQ_k(\lambda_2)}{d\lambda_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & \lambda_1 & 1 \\ \lambda_2^2 & \lambda_2 & 1 \\ 2\lambda_2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma \\ \tau \\ \mu \end{bmatrix}$$
(7.40)

 $<sup>^{14}</sup>$  Em (MONTICELLI, 1983) é apresentada toda a formulação básica para o fluxo de carga, inclusive as derivadas de (7.38).



Figura 7.7: Esquema geral do funcionamento do método QLook-Ahead

Conhecidos os valores de  $\mu$ ,  $\tau \in \sigma$ , calcula-se o carregamento no qual ocorre a violação de potência reativa dos gerados do SEP. O cálculo é realizado através de

$$Q_{k_{lim}} = \mu + \tau \lambda_{Q_{k_{lim}}} + \sigma \lambda_{Q_{k_{lim}}}^2 \tag{7.41}$$

sendo,  $Q_{k_{lim}}$  o limite máximo de potência reativa no gerador mais sensível. Rearrajando (7.41), têm-se

$$0 = (\mu - Q_{lim}) + \tau \lambda_{Q_{k_{lim}}} + \sigma \lambda_{Q_{k_{lim}}}^2.$$

$$(7.42)$$

Através de (7.42) obtém-se o carregamento  $\lambda_{Q_{k_{lim}}}$ , que provoca a violação de potência reativa nos geradores do SEP. Após obtido o parâmetro  $\lambda_{Q_{k_{lim}}}$ , determina-se a MET do SEP através do método *Look-Ahead*. Quando a barra de tensão controlada (barra PV) atinge o seu limite de geração reativa, a mesma passa a se comportar como uma barra do tipo PQ. A troca de PV para PQ é realizada toda vez que um gerador atinge o seu limite de potência reativa.

A Figura 7.7 apresenta uma visão geral do funcionamento do método para a obtenção da MET levando em consideração os limites reativos proposto neste trabalho. Este método é denominado de *Q-limit Look-Ahead* (*QLook-Ahead*).

Na Figura 7.7, a curva PV-1 representa a MET, sem levar em consideração os limites reativos do geradores, obtida inicialmente pelo *Look-Ahead* convencional. Aplicando a técnica proposta neste trabalho, verifica-se que o *k*-ésimo gerador atingirá o seu limite de potência reativa primeiro. Ao ser obtido o ponto  $Q_{k_{lim}}$  é atualizado o valor do ponto de carregamento  $\lambda_2$  pelo valor de  $\lambda_{Q_{k_{lim}}}$ , e então é executado novamente o método *Look-Ahead*, obtendo assim a nova curva PV-2 (em verde na Figura 7.7). Este procedimento de atualização de  $\lambda_2$  pelo  $\lambda_{Q_{lim}}$  é realizado iterativamente até que o ponto de máximo carregamento seja menor que o valor de  $\lambda_{Q_{lim}}$  estimado, isto é,  $\lambda_{max} < \lambda_{Q_{lim}}$ , caso que ocorre na curva PV-3 (em azul na Figura 7.7). No caso da Figura 7.7, a curva PV-3 é a MET obtida pelo QLook-Ahead que leva em consideração os limites reativos dos geradores.

O Algoritmo 3 descreve uma visão geral dos passos necessários para o *QLook-Ahead* estimar a MET do SEP levando em consideração os limites reativos dos geradores.

#### Algoritmo 3: QLook-Ahead

início
<i>Passo 1</i> : Estimar a MET $(\lambda_{max})$ via o método <i>Look-Ahead</i> (ver Algoritmo 2);
<i>Passo 2</i> : Obter a lista de sensibilidade $\Delta G$ dos geradores (ver (7.29)));
Passo 3: Obter o gerador com a maior sensibilidade em $\Delta G$ , denotado por k;
Passo 4: Determinar o vetor $\frac{dQ_k}{d\lambda_2}$ (ver (7.37));
<i>Passo 5</i> : Determinar os valores de $\mu$ , $\tau \in \sigma$ (ver 7.40);
<i>Passo 6</i> : Estimar o valor de $\lambda_{Q_{k_{lim}}}$ (ver 7.42);
Passo 7: Se $\lambda_{Q_{k_{lim}}} > \lambda_{max}$ fim do algoritmo, caso contrário continue;
<i>Passo 8</i> : Trocar o tipo de barra referente do gerador k para $PQ (PV \rightarrow PQ)$ ;
Passo 9: Fazer $\lambda_2 = \lambda_{Q_{k_{lim}}}$ e voltar para o Passo 1.

### 7.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada uma nova metodologia, baseada no método *Look-Ahead*, para determinar a MET levando em consideração os limites de potência reativa dos geradores. O método é baseado na solução de fluxo de carga e no vetor tangente. A metodologia é mais rápida em comparação ao *CPFLOW* e ao fluxo de carga tradicional (método de sucessivos fluxos de carga), visto que o mesmo faz uso de apenas dois fluxos de carga para a determinação da MET.

Destaca-se que o método proposto neste trabalho leva em consideração o comportamento não linear do SEP, característica herdada pelo método *Look-Ahead* e por ser rápido, o método pode ser aplicado na operação em tempo real.

# Parte III

Métodos para a Classificação e Seleção dos Controles Preventivos

## Capítulo 8

# Métodos para a Classificação e Seleção de Controles Preventivos: Revisão Bibliográfica

### 8.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão abordados alguns dos trabalhos importantes na literatura que propõem algumas técnicas de seleção e aplicação de controles preventivos e/ou corretivos para a manutenção da MET. Usualmente, os controles de tensão empregados para a prevenção da instabilidade de tensão são o corte de carga, o redespacho da geração, reguladores automáticos de tensão, chaveamento de capacitor/reator, mudança do *tap* (LTC), mudança de ângulo de fase defasador e recursos (SVC). Todos estes tipos de controle oferecem uma contribuição significativa para a prevenção do colapso de tensão. Contudo, devido ao elevado número de controles de tensão existentes no SEP, faz-se necessário desenvolver métodos para a seleção dos controles mais eficazes para uma determinada situação.

### 8.2 Revisão Bibliográfica

A maioria dos métodos na literatura para a seleção de controle são baseados na análise de sensibilidade da MET em relação aos parâmetros de controle. Assim, é comum que as restrições de estabilidade de tensão do SEP sejam representadas através de equações de sensibilidade, obtidas através de vários métodos disponíveis e incorporadas na função objetivo ou nas restrições de igualdade/desigualdade de fluxo de potência ótimo (WANG; AJJARAPU, 2001). As referências apresentadas a seguir utilizam alguma técnica de análise de sensibilidade para determinar os controles de tensão mais efetivos.

Em (GREENE; DOBSON; ALVARADO, 1997), o vetor normal (DOBSON; LU, 1993), foi generalizado para calcular a eficácia da mudança dos parâmetros do SEP para aumen-

tar a MET do mesmo. É fornecido um método de cálculo de índices para consideração da estabilidade no problema de controle corretivo e preventivo. Em (GREENE; DOBSON; ALVARADO, 1997), um único *CPFLOW* determina o ponto de máximo carregamento, o nariz da curva *PV*, para o caso base, e a análise de sensibilidade da MET com os seus respectivos parâmetros é proposta. A estimação da variação dessa sensibilidade com a mudança nos parâmetros nominais é feita a partir de aproximações lineares e quadráticas. Em geral, a aproximação linear é bem eficiente, sendo que a precisão que se ganha na aproximação quadrática em situações específicas não justifica a sua utilização na maioria dos casos. Vale destacar que esta sensibilidade pode ser utilizada para avaliar o impacto da ação de controles preventivos na MET, e também que a obtenção dessas estimativas dispensa o cálculo de novos *CPFLOWs* quando são feitas variações pequenas no parâmetro em questão.

Em (GAO; MORISON; KUNDUR, 1996) aplica-se a análise modal (GAO; MORI-SON; KUNDUR, 1992) nas vizinhanças do nariz da curva PV para identificar a melhor localização para um dispositivo de compensação estática de reativos (SVC) com o objetivo de aumentar a MET pós-contingência. Através da análise modal, calcula-se o menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida e fatores de participação dos geradores, ramos e barras. Com isso, o modo crítico para a estabilidade de tensão é definido a partir do autovalor de menor valor absoluto da matriz Jacobiana reduzida no nariz da curva PV e de seus autovetores associados. Uma outra metodologia, para a prevenção da instabilidade de tensão, foi proposta em (TIRANUCHIT; THOMAS, 1988), a qual foi fundamentada em um índice baseado no valor singular mínimo da matriz Jacobiana do fluxo de carga. Segundo a referência (WANG; AJJARAPU, 2001), o valor singular mínimo se caracteriza como uma ferramenta útil para a determinação da proximidade do ponto de colapso de tensão.

Em (KUMANO; YOKOYAMA; SEKINE, 1994; KUMANO, 1991), foi proposta uma nova metodologia *on-line*, baseada em múltiplas soluções de fluxo de carga e análises de sensibilidade, para monitorar e replanejar os ajustes dos controles a fim de prevenir a instabilidade de tensão. O controle preventivo, para acomodar o aumento de carga, inicia-se quando um par de soluções próximas (dois pontos de equilíbrio distintos) do fluxo de carga é detectado sob condições de carregamento muito pesado do SEP. Então, formula-se um problema de otimização e soluciona-se através de técnicas sequenciais de minimização não restritas.

Conforme notado nas referências anteriores, vários métodos usufruem da análise de sensibilidade para classificar as ações de controle de tensão em ordem de eficácia na mitigação do problema de estabilidade de tensão. Dadas as ações de controles mais eficazes, faz-se necessário ajustar os valores de tais controles para a manutenção da MET. Para tal, os métodos de otimização são bastante empregados para obter soluções ótimas, conforme pode ser visto nas próximas referências. O método de pontos interiores direto para calcular o corte de carga mínimo para restabelecer a factibilidade do fluxo de carga foi aplicado em (GRANVILLE; MELLO; MELO, 1996). O mesmo método de otimização foi aplicado em (WANG et al., 1997) para solucionar o problema de controle preventivo e corretivo. Neste trabalho, os limites da MET foram incorporados nas restrições de desigualdade para aumentar confiabilidade operacional do SEP.

BALANATHAN et al. (1998) propuseram um critério de UVLS (do inglês, *Under Voltage Load Shedding*) usando modelo de carga dinâmica. Uma técnica de otimização não linear foi usada para estimar os parâmetros do modelo de carga dinâmica. Contudo, a velocidade do processo de estimação restrigiu a implementação do critério UVLS somente aos problemas de estabilidade de tensão de curto prazo (WANG; AJJARAPU, 2001).

Em (FENG; AJJARAPU; MARATUKULAM, 2000), foi proposta uma metodologia que combina ações de controle corretivo e preventivo em SEP estressados. Para casos com MET insuficiente, a sensibilidade da margem é primeiro calculada para identificar os controles preventivos mais efetivos, então através da otimização linear minimiza-se o custo do controle para coordenar as ações do mesmo. Em casos nos quais não existem pontos de equilíbrio causados, na sua totalidade, pelas contingências severas, uma estratégia de controle parametrizado é primeiro utilizada para restabelecer a factibilidade do SEP (FENG; AJJARAPU; MARATUKULAM, 1998).

A referência (FENG; AJJARAPU; LONG, 2000) apresenta uma metodologia que simultaneamente resolve as equações algébricas e diferenciais baseada no método da continuação, identificando rapidamente o ponto de colapso de tensão durante o processo em que traça o equilíbrio direto, sem a reconstrução da matriz de estado dinâmico do SEP e sem a verificação custosa da singularidade. Depois, no ponto de colapso de tensão, o método proposto em (GREENE; DOBSON; ALVARADO, 1997; LONG; AJJARAPU, 1999) é utilizado para calcular as sensibilidades da MET em relação a cada controle. Geralmente, no projeto de controle preventivo e corretivo, as restrições de igualdades (equações do fluxo de carga, incluindo o cenário da mudança de carga) devem ser consideradas na formulação do problema. Finalmente, a otimização linear é aplicada para obter a solução ótima ou sub-ótima do problema. Se as restrições de desigualdade são violadas, o ponto de equilíbrio e a sensibilidade da MET devem ser recalculados iterativamente com o objetivo de analisar precisamente o problema.

Em (MALACHI; SINGER, 2006), foi apresentado um algoritmo para a seleção de ações de controle corretivo. Um algoritmo genético usando aproximações lineares das equações de fluxo de caga e uma seleção heurística da partição dos controles foram combinados em um método de busca do mínimo número das ações de controle. Em (VARGAS; CANIZARES, 2000), foi estudado o efeito de dependência do tempo das ações de controle (corte de carga e compensação reativa) para evitar o colapso de tensão. Tal problema foi estudado em um cenário real de um colapso de tensão do equivalente do sistema interconectado chileno. As análises apresentadas mostram que os tipos, quantidade e tempo da atuação dos controles são críticos para o sucesso dos controles de emergência. Este aspecto do tempo é muito importante para o desenvolvimento de estratégias para minimizar a interrupção de carga.

Em (BEDRINANA; CASTRO; BEDOYA, 2008), é proposto um método para resolver o problema de maximização da MET considerando a Compensação Reativa Ótima (CRO). O método foi formulado através dos métodos diretos e uma solução desacoplada foi proposta. O problema de CRO foi resolvido analiticamente nos sistemas teste. O tratamento dos limites de potência reativa da geração das barras PV e a existência de infinitas soluções com a presença de ramos com resistências nulas são discutidas.

### 8.3 Considerações Finais

A maioria das técnicas para a seleção dos melhores controles de tensão é baseada na análise de sensibilidade nas vizinhanças do PMC. Entretanto, acredita-se que o estudo das contingências que causam uma grande perturbação no sistema, quando feito através da análise de sensibilidade do PMC do caso base, não reflete o impacto de ações de controle quando estas contingências são levadas em consideração. Por outro lado, o cálculo do PMC para todas as contingências resulta em um grande esforço computacional.

Dentro deste contexto, um método rápido para a classificação e seleção de controles preventivos, no âmbito de análise de estabilidade de tensão em SEP, é proposto neste presente trabalho. Para tal, calcula-se a sensibilidade da MET estimada pelo método *QLook-Ahead* em relação à variação de algum parâmetro de controle de tensão. Após a obtenção da sensibilidade de cada elemento de controle, os mesmos são classificados em ordem decrescente de acordo com o seu grau de sensibilidade, e os controles mais eficazes são selecionados com o objetivo de melhorar a MET.

No próximo capítulo será descrita a metodologia proposta para a classificação dos controles preventivos.

## Capítulo g

# Metodologia Proposta para a Classificação de Controles Preventivos

### 9.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, será apresentado o desenvolvimento da proposta de análise de sensibilidade da MET estimada pelo *QLook-Ahead*, em relação aos parâmetros de controle. Obtidas as sensibilidades, estas são classificadas em ordem decrescente, ordenando assim as ações dos controles preventivos de acordo com a sua eficácia na ação sobre a MET.

Na Seção 9.2, é apresentada a formulação geral da metodologia proposta para a classificação dos controles preventivos; na Seção 9.3, é apresentada a formulação da metodologia de classificação dos controles preventivos para um determinado conjuntos de banco de capacitores; e, na Seção 9.4, são apresentadas as considerações finais a respeito do presente capítulo.

# 9.2 Classificação de Controles Preventivos para a Estabilidade de Tensão

O método para a classificação de controles preventivos, no contexto da estabilidade de tensão, proposto neste trabalho tem por objetivo avaliar a sensibilidade da MET, estimada pelo método *QLook-Ahead*, em função da variação de algum parâmetro de controle. Na Figura 9.1, a curva *PV* é representada por uma linha sólida e a linha tracejada representa a curva *PV* perturbada por uma determinada ação de controle definida por  $u_c$ . Ainda na figura,  $\lambda'_{max}$  é o PMC obtido com a ação do controle  $u_c$  e  $\lambda_{max}$  é o PMC da curva sem ação do controle  $u_c$ . Desta forma, almeja-se calcular a sensibilidade do PMC da curva *PV* original em relação ao controle  $u_c$ , para determinar o grau de sua eficácia de  $u_c$ .



Figura 9.1: Curva PV perturbada por uma ação de controle  $u_c$ .

A sensibilidade é calculada para todos os elementos de controle preventivo contidos no SEP. Assim, os controles que tiverem as maiores sensibilidades apresentarão uma ação mais eficaz na manutenção da MET. Para tal, as ações dos controles são classificadas em ordem decrescente de acordo com a sua sensibilidade e seleciona-se os controles mais efetivos para restaurar a MET.

Seja  $u_c \in \mathbb{R}$ , onde  $u_c$  varia em [0, 1], a variável do *c*-ésimo controle normalizada de tal forma que,

$$u_c = \begin{cases} 0, & \text{para variável de controle no valor atual} \\ 1, & \text{para variável de controle no valor máximo.} \end{cases}$$
(9.1)

Considere a Equação (7.15) da estimativa do PMC. A estimativa da sensibilidade do PMC é dada pela derivada de (7.15) em relação à variável  $u_c$ , isto é,

$$\frac{d\lambda_{max}^*}{du_c} = \frac{\partial\alpha}{\partial u_c} - \frac{\beta}{2\gamma}\frac{\partial\beta}{\partial u_c} + \frac{\beta^2}{4\gamma^2}\frac{\partial\gamma}{\partial u_c}$$
(9.2)

Portanto, para determinar  $d\lambda_{max}^*/du_c$ , faz-se necessário calcular inicialmente as sensibilidades de  $\alpha$ ,  $\beta \in \gamma$  em relação à variável de controle  $u_c$ . Tais sensibilidades são obtidas calculando-se a inversa da Função (7.13). Obtendo-se assim as seguintes funções,

$$\alpha = f_{\alpha}(V_{p,1}, V_{p,2}, V_2, \lambda_1, \lambda_2)$$
  

$$\beta = f_{\beta}(V_{p,1}, V_{p,2}, \dot{V}_2, \lambda_1, \lambda_2)$$
  

$$\gamma = f_{\gamma}(V_{p,1}, V_{p,2}, \dot{V}_2, \lambda_1, \lambda_2.)$$
(9.3)

sendo,  $\dot{V}_2 = dV_{p,2}/d\lambda_2$  um elemento do vetor tangente. Calculando-se as sensibilidades (9.3) em relação à variável de controle  $u_c$  e fixando os parâmetros de crescimento de carga  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , têm-se

$$\frac{d\alpha}{du_c} = \frac{\partial f_\alpha}{\partial V_{p,1}} \frac{\partial V_{p,1}}{\partial u_c} + \frac{\partial f_\alpha}{\partial V_{p,2}} \frac{\partial V_{p,2}}{\partial u_c} + \frac{\partial f_\alpha}{\partial \dot{V}_2} \frac{\partial V_2}{\partial u_c} 
\frac{d\beta}{du_c} = \frac{\partial f_\beta}{\partial V_{p,1}} \frac{\partial V_{p,1}}{\partial u_c} + \frac{\partial f_\beta}{\partial V_{p,2}} \frac{\partial V_{p,2}}{\partial u_c} + \frac{\partial f_\beta}{\partial \dot{V}_2} \frac{\partial \dot{V}_2}{\partial u_c} 
\frac{d\gamma}{du_c} = \frac{\partial f_\gamma}{\partial V_{p,1}} \frac{\partial V_{p,1}}{\partial u_c} + \frac{\partial f_\gamma}{\partial V_{p,2}} \frac{\partial V_{p,2}}{\partial u_c} + \frac{\partial f_\gamma}{\partial \dot{V}_2} \frac{\partial \dot{V}_2}{\partial u_c}$$
(9.4)

sendo que  $\partial V_{p,1}/\partial u_c$ ,  $\partial V_{p,2}/\partial u_c$  e  $\partial \dot{V}_2/\partial u_c$  são desconhecidas. Sejam  $F(x, \lambda, u_c) = 0$  as equações de fluxo de carga com as cargas parametrizadas pelo  $\lambda$ , x um vetor de estados composto pelas magnitudes das tensões (V) e pelos ângulos das tensões  $\theta$  e  $u_c$  a variável de um determinado controle. Para a obtenção dos valores de  $\partial V_{p,1}/\partial u_c$  e  $\partial V_{p,2}/\partial u_c$ inicialmente deriva-se  $F(x, \lambda, u_c) = 0$ , isto é

$$\frac{\partial F}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial F}{\partial u_c}\Delta u_c + \frac{\partial F}{\partial \lambda}\Delta \lambda = 0$$
(9.5)

Considerando  $\lambda$  constante, têm-se:

$$\frac{\partial F}{\partial x}\frac{\Delta x}{\Delta u_c} = -\frac{\partial F}{\partial u_c} \tag{9.6}$$

sendo,  $\partial F/\partial x$  a matriz Jacobiana e  $\partial F/\partial u_c$  um vetor conhecido. Assim, basta resolver (9.6) para  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  para obter uma aproximação de  $\partial V_{p,1}/\partial u_c$  e  $\partial V_{p,2}/\partial u_c$ .

Para obter o valor de  $\partial V_2 / \partial u_c$ , a variável de controle  $u_c$  é fixada em (9.5), obtendo-se,

$$\frac{\partial F}{\partial x}\frac{\Delta x}{\Delta \lambda} + \frac{\partial F}{\partial \lambda} = 0. \tag{9.7}$$

Calculando-se a derivada de (9.7) em relação à variável de controle  $u_c$ , têm-se

$$\frac{\partial F}{\partial x}\frac{\Delta \dot{x}}{\Delta u_c} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial u_c}\frac{\Delta x}{\Delta \lambda} - \frac{\partial^2 F}{\partial \lambda \partial u_c}.$$
(9.8)

O valor de  $\Delta \dot{x}/\Delta u_c$  é obtido resolvendo (9.8). Deste modo, é possível determinar as sensibilidades (9.3) e, consequentemente, a sensibilidade da MET  $d\lambda_{max}^*/du_c$  em relação a alguma variável de controle  $u_c$  através de (9.2).

Este procedimento é repetido para cada variável de controle  $u_c$ , conforme o procedimento estabelecido no Algoritmo 4.

Após a execução do Algoritmo 4, uma lista é criada contendo as sensibilidades dos controles ordenadas em forma decrescente. Desta forma, basta escolher os controles mais efetivos e então um FPO ou o operador do SEP determinam quais são os valores das ações dos controles para restaurar a MET do SEP para uma determinada contingência. Algoritmo 4: Classificação dos controles preventivos

#### início

 $\begin{array}{l} \text{Definir } c \text{ como o indice da variável de controle a ser analisada e iniciar } c \leftarrow 1;\\ N_c \text{ é o número de variáveis de controle contidas no SEP e $\mathcal{S}$ é o conjunto das sensibilidades calculadas em relação a cada variável de controle, onde inicialmente $\mathcal{S} \leftarrow \{\}$;\\ \text{Estimar o PMC } \lambda_{max}^* \text{ utilizando o método QLook-Ahead;}\\ \textbf{enquanto } (c \leq N_c) \textbf{faça} \\ \\ \text{Resolver o sistema (9.6) em } \lambda_i \text{ para obter } \partial V_{p,i} / \partial u_c, \text{ sendo } i = 1, 2;\\ \text{Resolver o sistema (9.8) para obter } \Delta \dot{x} / \Delta u_c;\\ \text{Calcular as sensibilidades utilizando as equações (9.3);}\\ \text{Calcular a sensibilidade } d\lambda_{max}^* / du_c \text{ da MET utilizando a equação (9.2);}\\ \text{Inserir a sensibilidade } d\lambda_{max}^* / du_c \text{ no conjunto $\mathcal{S}$, fazendo } \\ \mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \cup \{d\lambda_{max}^* / du_c\};\\ c \leftarrow c + 1;\\ \end{array}$ Classificar em ordem decrescente as sensibilidades contidas no conjunto \$\mathcal{S}\$.} \end{array}

## 9.3 Parametrização da Variável de Controle para um Banco de Capacitores

Nesta seção será modelada a parametrização de um banco de capacitores utilizando a metodologia proposta. Para tal, seja  $b_k^{sh}$  a susceptância *shunt* na barra k, reescreve-se (5.4) desacoplando o elemento  $b_k^{sh}$  da matriz de admitância nodal, como segue,

$$Q_{calc_k} = -(b_k^{sh} + B_{kk})V_k^2 + \sum_{m \in \Omega_k}^{NB} V_k V_m \left[G_{km}sen(\theta_{km}) - B_{km}cos(\theta_{km})\right]$$
(9.9)

sendo  $\Omega_k$  o conjunto de barras vizinhas a barra k. Para os capacitores em análise, são definidos limites operacionais máximos e mínimos, tal que  $b_{min_k}^{sh}$  seja o limite de operação mínimo e  $b_{max_k}^{sh}$  seja o limite de operação máximo. Deste modo, pode-se definir  $b_k^{sh}$  em função dos limites operacionais do capacitor e do parâmetro de controle do capacitor  $u_{cap_c}$ , como segue:

$$b_k^{sh} = b_{min_k}^{sh} + u_{cap_c} (b_{max_k}^{sh} - b_{min_k}^{sh})$$
(9.10)

sendo  $0 \leq u_{cap_c} \leq 1$ , conforme definido em (9.1). Entretanto, a Equação (9.10) não considera a disponibilidade dos capacitores. Para tal, seja o valor atual do capacitor representado por  $b_{atual_k}^{sh}$ , a disponibilidade do capacitor pode ser avaliada pela inserção do parâmetro  $b_{D_k}^{sh} = b_{min_k}^{sh} + b_{atual_k}^{sh}$ . Portanto, re-escrevendo (9.10), obtém-se

$$b_k^{sh} = b_{D_k}^{sh} + u_{cap_c} (b_{max_k}^{sh} - b_{D_k}^{sh}).$$
(9.11)

Substituindo (9.11) em (9.9), tem-se,

$$Q_{calc_{k}} = \left[b_{D_{k}}^{sh} + u_{cap_{c}}(b_{max_{k}}^{sh} - b_{D_{k}}^{sh}) + B_{kk}\right] V_{k}^{2} + \sum_{m \in \Omega_{k}}^{NB} V_{k}V_{m} \left[G_{km}sen(\theta_{km}) - B_{km}cos(\theta_{km})\right].$$
(9.12)

Para obter a estimativa da sensibilidade do PMC em relação a um banco de capacitores  $u_{cap_c}$ , reescreve-se (9.2) da seguinte forma

$$\frac{d\lambda_{max}^*}{du_{cap_c}} = \frac{\partial\alpha}{\partial u_{cap_c}} - \frac{\beta}{2\gamma} \frac{\partial\beta}{\partial u_{cap_c}} + \frac{\beta^2}{4\gamma^2} \frac{\partial\gamma}{\partial u_{cap_c}}.$$
(9.13)

Portanto, para determinar  $d\lambda_{max}^*/du_{capc}$ , faz-se necessário calcular inicialmente as sensibilidades de  $\alpha$ ,  $\beta \in \gamma$  em relação à variável de controle  $u_{capc}$ . Conforme abordado na Seção 9.2, o cálculo de tais sensibilidades é dependente dos valores de  $\partial V_{p,1}/\partial u_{capc}$ ,  $\partial V_{p,2}/\partial u_{capc} \in \partial \dot{V}_2/\partial u_{capc}$ . Portanto, reescrevendo (9.6) em termos de  $u_{capc}$ , têm-se,

$$\frac{\partial F}{\partial x} \frac{\Delta x}{\Delta u_{cap_c}} = -\frac{\partial F}{\partial u_{cap_c}} \tag{9.14}$$

sendo  $\partial F/\partial x$  a matriz Jacobiana e  $\partial F/\partial u_{cap_c}$  dado por,

$$\frac{\partial F}{\partial u_{cap_c}} = \frac{1}{\partial u_{cap_c}} \left( \begin{array}{c} P_{ger}(\lambda, u_{cap_c}) - P_{load}(\lambda, u_{cap_c}) - P_{calc}(x, u_{cap_c}) \\ Q_{ger}(\lambda, u_{cap_c}) - Q_{load}(\lambda, u_{cap_c}) - Q_{calc}(x, u_{cap_c}) \end{array} \right).$$
(9.15)

Em (9.15),  $P_{ger}(\lambda, u_{cap_c}) \in Q_{ger}(\lambda, u_{cap_c})$  são a potência ativa e reativa gerada, respectivamente;  $P_{load}(\lambda, u_{cap_c}) \in Q_{load}(\lambda, u_{cap_c})$  são a carga ativa e reativa, respectivamente; e  $P_{calc}(x, u_{cap_c}) \in Q_{calc}(x, u_{cap_c})$  são a potência ativa e reativa calculada, respectivamente. Como a potência gerada e a carga não dependem, a princípio, de  $u_{cap_c}$ , pode-se reescrever (9.15) como,

$$\frac{\partial F(x,\lambda,u_{cap_c})}{\partial u_{cap_c}} = \begin{pmatrix} 0\\ \frac{-Q_{calc}(x,u_{cap_c})}{\partial u_{cap_c}} \end{pmatrix}.$$
(9.16)

A obtenção de  $Q_{calc}(x, u_{capc})/\partial u_{capc}$  em (9.16), para cada barra k do SEP, é dada por

$$\frac{Q_{calc_k}(x, u_{cap_c})}{\partial u_{cap_c}} = -\left(b_{max_k}^{sh} - b_{D_k}^{sh}\right) V_k^2.$$

$$(9.17)$$

Assim, basta resolver (9.14) para os níveis de carregamento  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , obtendo assim uma aproximação de  $\partial V_{p,1}/\partial u_{cap_c}$  e  $\partial V_{p,2}/\partial u_{cap_c}$ , respectivamente. Para calcular o valor de  $\partial \dot{V}_2/\partial u_{cap_c}$ , primeiramente, reescreve-se (9.8) em termos de  $u_{cap_c}$ , logo

$$\frac{\partial F}{\partial x} \frac{\Delta \dot{x}}{\Delta u_{cap_c}} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial u_{cap_c}} \frac{\Delta x}{\Delta \lambda} - \frac{\partial^2 F}{\partial \lambda \partial u_{cap_c}}$$
(9.18)

sendo  $\partial F/\partial x$  a matriz Jacobiana;  $\Delta x/\Delta \lambda$  é o vetor tangente obtido via o método *Look-Ahead*;  $\partial^2 F/\partial \lambda \partial u_{cap_c}$  é igual a zero, pois o elemento  $\partial F/\partial \lambda$  não depende de  $u_{cap_c}$  e  $\partial^2 F/\partial x \partial u_{cap_c}$  é obtido como segue:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial u_{cap_c}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 P_{calc}(x, u_{cap_c})}{\partial \theta \partial u_{cap_c}} & \frac{\partial^2 P_{calc}(x, u_{cap_c})}{\partial V \partial u_{cap_c}} \\ \frac{\partial^2 Q_{calc}(x, u_{cap_c})}{\partial \theta \partial u_{cap_c}} & \frac{\partial^2 Q_{calc}(x, u_{cap_c})}{\partial V \partial u_{cap_c}} \end{bmatrix}.$$
(9.19)

Todas as derivadas em (9.19), com exceção  $\partial Q_{calc}(x, u_{cap_c})/\partial V$ , são iguais a zero. Logo, o Sistema (9.19) pode ser reescrito da seguinte forma,

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial u_{cap_c}} = \begin{bmatrix} 0 & 0\\ 0 & \frac{\partial^2 Q_{calc}(x, u_{cap_c})}{\partial V \partial u_{cap_c}} \end{bmatrix}.$$
(9.20)

A obtenção de  $\partial^2 Q_{calc}(x,u_{cap_c})/\partial V \partial u_{cap_c}$ em (9.20) , para cada barra kdo SEP, é dada por

$$\frac{\partial^2 Q_{calc_k}(x, u_{cap_c})}{\partial V_k \partial u_{cap_c}} = -2V_k (b^{sh}_{max_k} - b^{sh}_{D_k}).$$
(9.21)

O valor de  $\Delta \dot{x} / \Delta u_{cap_c}$  é obtido resolvendo o sistema de equações (9.18). Deste modo, é possível calcular a sensibilidade  $d\lambda^*_{max}/du_{cap_c}$  em relação ao bancos de capacitores  $u_{cap_c}$ , através da equação (9.13).

#### 9.4 Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentada a metodologia proposta neste doutorado para a classificação dos controles preventivos considerando a disponibilidade dos mesmos. A nova técnica utiliza a análise de sensibilidade do PMC, em relação aos controles preventivos, para determinar o impacto de cada ação de controle sobre a MET. Uma lista de sensibilidades é gerada no final do algoritmo proposto. A lista é classificada em ordem decrescente, de tal modo que, os controles mais eficazes terão as maiores sensibilidades, sendo então, os primeiros na lista.

Uma característica da metodologia proposta é levar em consideração as características não lineares do sistema e o baixo custo computacional para a obtenção dos controles mais efetivos. Caracterizando assim um método rápido, podendo ser aplicado na operação em tempo real para análise de um grande número de contingências e classificação de controles.

Após obtida a lista de sensibilidades, faz-se necessário selecionar os controles preventivos a serem aplicados. Tradicionalmente, estratégias de escolha dos controles preventivos são formuladas como um problema de otimização não linear, os quais envolvem função objetivo; restrições de igualdade, como por exemplo o balanço de potência em cada barra da rede; e restrições de desigualdade referentes aos limites de operação das variáveis de estado e dos dispositivos de controle (WANG; AJJARAPU, 2001). Geralmente, os principais objetivos a serem alcançados nestes problemas são: minimizar o número de equipamentos de controle; minimizar o montante de controle de cada equipamento; minimizar o corte de carga; minimizar o custo do controle; maximizar a MET; minimizar o custo da geração; dentre outros.

A grande dificuldade desta formulação para a seleção de controle preventivo é que não é possível escrever as restrições de MET na forma de restrições de desigualdade, pois a avaliação da MET é o resultado de um procedimento numérico de análise realizado por exemplo pelo método *Look-Ahead* ou *CPFLOW*. É usual incorporar restrições de estabilidade de tensão de forma aproximada e heurística, vide por exemplo (WANG; AJJARAPU, 2001).

Apesar desta dificuldade intrínseca, as facilidades atuais do uso de técnicas computacionais fazem com que planejadores e operadores optem pelo desenvolvimento de ferramentas analíticas do tipo FPO para a otimização da ação dos controles (MOUNTFORD, 1997).

Métodos de programação não linear, em geral, são computacionalmente intensivos. Com o objetivo de reduzir este esforço computacional, divide-se o problema de seleção e ajuste do controle preventivo em duas fases. Na primeira fase, é aplicada alguma técnica para a redução do número de controles preventivos efetivos a serem utilizados no FPO, isto reduz significativamente o número de variáveis na formulação de otimização que é utilizada para o ajuste dos controles selecionados. E na segunda fase, é aplicado o método de FPO para o ajuste dos controles preventivos.

Dentro deste contexto, este trabalho almeja minimizar o número de ações de controles preventivos a serem ajustadas, minimizando assim o esforço computacional no processo de otimização dos ajustes as ações de controle. Para tal, neste trabalho foram propostas duas novas abordagens distintas para a seleção dos controles a serem aplicados na manutenção do SEP.

Na primeira abordagem, foi desenvolvida uma metodologia baseada na técnica de agrupamento de dados (do inglês, *Clustering*) para a seleção dos controles preventivos mais eficazes, auxiliando assim ao operador do SEP na escolha dos controles a serem utilizados para um evento em particular, por exemplo, para uma determinada contingência. Esta abordagem foi denominada de **Abordagem Local** e será descrita no Capítulo 10.

Considerando que um SEP possui, na maioria dos casos, mais de uma contingência crítica e a hipótese de que um conjunto de controles preventivos é capaz de eliminar a criticalidade de um grupo de contingências por vez. Dada a classificação dos controles preventivos de todas as contingências críticas selecionadas, na segunda abordagem foi desenvolvida uma nova metodologia capaz de determinar um grupo composto por um número mínimo de controles preventivos para a manutenção de todas as contingências críticas no SEP. Esta nova abordagem foi denominada de **Abordagem Global** e será descrita no Capítulo 11.

### Capítulo 10

# Metodologia Proposta para a Seleção de Controles Preventivos: Abordagem Local

### 10.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo será apresentada a metodologia desenvolvida para a seleção dos controles preventivos mais eficazes, auxiliando assim o operador do SEP na escolha dos controles a serem utilizados para um evento em particular, por exemplo, para uma determinada contingência. Basicamente, o principal foco desta abordagem é a redução do número de variáveis de controle através da técnica de agrupamento de dados (do inglês, *Clustering*). A técnica de agrupamento de dados tem por objetivo encontrar uma estrutura de dados, em que os objetos pertencentes a cada grupo (do inglês, *cluster*) compartilham alguma característica ou propriedade relevante para o domínio do problema em estudo, ou seja, são de alguma maneira similares entre si (GAN; MA; WU, 2007). Neste caso, similares do ponto de vista de sua influência no problema de estabilidade de tensão.

Na Seção 10.2, uma introdução ao problema de agrupamento de dados é apresentada. Na Seção 10.3, é apresentado o agrupamento de dados hierárquico; na Seção 10.4, são descritos os principais métodos de agrupamento de dados hierárquico aglomerativos; na Seção 10.6, são descritos, de forma sucinta, alguns trabalhos que aplicam a técnica de agrupamento de dados em SEP; na Seção 10.7, a metodologia proposta para minimizar o número de controles preventivo é apresentada; e, na Seção 10.8, são discutidas as considerações finais a respeito do presente capítulo.

### 10.2 Introdução ao Agrupamentos de Dados

A técnica de agrupamento de dados relaciona objetos baseando-se apenas em informações encontradas nos dados que descrevem os objetos e seus relacionamentos. O objetivo é que os objetos dentro de um grupo sejam semelhantes (ou relacionados) entre si e diferentes (ou não relacionados) aos outros objetos de outros grupos. Quanto maior a semelhança (ou homogeneidade) dentro de um grupo e maior a diferença entre grupos, melhor ou mais distinto será o agrupamento (TAN; STEINBACH; KUMAR, 2009). Segundo (EVERITT, 1993), um grupo poder ter as seguintes definições:

- **Definição 1:** um grupo é um conjunto de entidades semelhantes, e entidades pertencentes a grupos diferentes não são semelhantes.
- **Definição 2:** um grupo é um agrupamento de pontos no espaço de objetos de tal maneira que a distância entre quaisquer dois pontos em um mesmo grupo é menor que a distância entre qualquer ponto desse grupo com um outro ponto qualquer não pertencente a ele.

Um conceito fundamental na utilização das técnicas de agrupamento de dados é na escolha de um critério que meça a distância entre dois objetos, ou que quantifique o quanto eles são parecidos. Esta medida é geralmente denominada **coeficiente de parecença**. Cabe observar que tecnicamente pode-se dividir o critério de medição da distância entre dois objetos em duas categorias: medidas de similaridades e de dissimilaridade. Em relação a segunda categoria, quanto maior a distância entre dois objetos menos parecidos (mais dissimilares) eles serão. Coeficiente de correlação é um exemplo de medida de similaridade, enquanto que distância euclidiana é um exemplo de dissimilaridade (OLI-VEIRA BUSSAB; SHIZUE MIAZAKI; ANDRADE, 1990). Na Tabela 10.1 são apresentadas algumas medidas para o cálculo da similaridade ou dissimilaridade entre dois objetos  $x_i e x_j$ , cuja matriz de distância, para n objetos, é dada por (10.1).

$$D = \begin{array}{cccc} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ x_1 & d(1,1) & d(1,2) & \cdots & d(1,n) \\ d(2,1) & d(2,2) & \cdots & d(2,n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d(n,1) & d(n,2) & \cdots & d(n,n) \end{array}$$
(10.1)

UNSCH, 2005)	Exemplos e aplicações	<ul> <li><i>A Fuzzy c-means</i> com medi-</li> <li>das baseadas na familia de</li> <li>Minkowski (HATHAWAY; BEZDEK; HU, 2000).</li> </ul>	e Algoritmo <i>K-means</i> (MAC-QUEEN, 1967).	<ul> <li><i>Fuzzy</i> ART (CARPEN- TER; GROSSBERG;</li> <li>ROSEN, 1991).</li> </ul>	s Fuzzy c-means com norma sup (BOBROWSKI; BEZ- DEK, 1991).	s Algoritmo <i>Hyperellipsoidal</i> ) clustering (MAO; JAIN, 1996).	- Utilizada como medida para a análise de dados de ge- nes (EISEN et al., 1998).	- É a medida mais comu- mente utilizada no agrupa- mento de documentos.
milaridade e dissimilaridade. Adaptado de (XU; W	Descrição	É uma forma genérica para calcular a distânci entre dois pontos no espaço <i>n</i> -dimensional $(\Re^n)$ de acordo com o valor do parâmetro <i>r</i> , o qual deter mina a medida utilizada.	Expressa a distância geométrica Euclidiana entr dois objetos em um espaço multi-dimensional.	É definida como a distância entre dois objetos ne espaço Euclidiano, com um sistema de coordena das cartesianas fixo, como sendo a soma dos com primentos das projeções dos segmentos de reta en tre os pontos dos eixos das coordenadas.	$\acute{\mathrm{E}}$ a máxima diferença absoluta entre os valores do objetos.	Essa distância incorpora a correlação entre objeto: e os padroniza de modo que suas médias sejam ( (zero) e desvio padrão 1(um).	Esse coeficiente mede o grau de correlação e a di reção dessa correlação entre dois objetos.	$\hat{\mathrm{E}}$ a medida de semelhança entre dois vetores, me dindo o ângulo entre eles.
abela 10.1: Algumas medidas de si	Equação	$D_{ij} = \left(\sum_{l=1}^{d}  x_{il} - x_{il} ^{\frac{1}{r}}\right)^{r}$	$D_{ij} = \left(\sum_{l=1}^{d}  x_{il} - x_{il} ^{\frac{1}{2}}\right)^2$	$D_{ij} = \sum_{l=1}^{d}  x_{ll} - x_{il} $	$D_{ij} = max_{1 \le l \le d}  x_{il} - x_{il} $	$D_{ij} = (x_i - x_j)^T S^{-1} (x_i - x_j),$ onde <i>S</i> é uma matriz de covariância dos objetos	$y_{ij} = (1 - y_{ij})/2,  ext{ onde} \ \sum_{k=1}^{d} (x_{il} - x_i)(x_{jl} - x_{j}) \ \sqrt{\sum_{l=1}^{d} (x_{il} - x_{l})^2 \sum_{l=1}^{d} (x_{jl} - x_{j})^2}$	$S_{ij} = \cos \alpha = \frac{x_i^T x_j}{\ x_i\  \ x_j\ }$
T	Medida	Distância de Minkowski	Distância Euclidiana	Distância de Manhattan ou <i>City-block</i>	Distância de Sup ou <i>Chebyshev</i>	Distância de Mahalanobis	Correlação de Pearson	Similaridade de Cosseno

Os algoritmos de agrupamento de dados podem ser classificados considerando diferentes aspectos. Uma abordagem bastante aceita na literatura é apresentada em (JAIN; MURTY; FLYNN, 1999), na qual os algoritmos são classificados de acordo com a técnica adotada para definir os grupos. A seguir serão apresentados, de forma sucinta, alguns dos diferentes tipos de agrupamento de dados.

- Agrupamento Particional: o objetivo desta abordagem é formar agrupamentos ótimos sobre os dados, dividindo iterativamente o conjunto em k-partições mutuamente exclusivas, as quais devem maximizar uma função objetivo pré-definida. Um problema associado a esta abordagem é a necessidade de informar, com antecedência, o número de grupos desejados (BERKHIN, 2002). Os algoritmos mais utilizados nesta abordagem são o k-means (SELIM; ISMAIL, 1984; KANUNGO et al., 2004) e o k-medoids (ZHANG; COULOIGNER, 2005).
- Agrupamento Baseado em Grade: essa abordagem define uma grade para o espaço de objetos e realiza todas as operações nesse espaço quantizado. Em termos gerais, essa abordagem é capaz de encontrar os grupos de formatos arbitrários, não apresenta alta sensibilidade aos *outliers*<sup>15</sup> e é muito eficiente para grandes conjuntos de dados. Os algoritmos mais utilizados nesta abordagem são o CLIQUE (AGRAWAL et al., 1998), MAFIA (GOIL; NAGESH; CHOUDHARY, 1999), OptiGrid (HINNE-BURG; KEIM, 1999) e STING (WANG; YANG; MUNTZ, 1997).
- Agrupamento Baseado em Densidade: essa abordagem assume que os grupos são regiões de alta densidade separadas por regiões de baixa densidade no espaço de objetos. A ideia dessa abordagem é que cada objeto do grupo deve manter uma vizinhança com número mínimo de vizinhos dentro de uma esfera de raio R. Os objetos que possuem uma vizinhança com densidade mínima, e estão em uma distância menor que R, pertencem ao mesmo grupo. Um dos algoritmos mais utilizados nesta abordagem é o DBSCAN (ESTER et al., 1996).
- Agrupamento com Sobreposição (*Clumping*): um agrupamento exclusivo é uma partição do conjunto de objetos, no qual cada objeto pertence exclusivamente a um único grupo. O resultado desse agrupamento pode ser dito *crisp*, quando a relação entre os objetos e os agrupamentos resume-se em pertencer ou não a um dado grupo. Na abordagem de agrupamento não exclusivo (com sobreposição), pode-se associar um objeto a vários grupos. Nesse caso, a cada objeto é atribuído um grau de pertinência em relação aos grupos encontrados. Assim, um objeto pode estar em mais de um agrupamento, com probabilidades diferentes. Um dos algoritmos que implementa esta técnica é o AutoClass (CHEESEMAN; STUTZ, 1996).

 $<sup>^{15}</sup>Outlier$  é geralmente un atributo que apresenta un grande afastamento dos demais atributos, ou que é inconsistente.

Redes Auto-Organizáveis: também conhecidas como redes SOM - Self Organizing Map (KOHONEN, 1982), são frequentemente utilizadas para a tarefa de agrupamento de visualização. As redes SOM são redes neurais artificiais não-supervisionadas cujos neurônios são organizados em um reticulado bidimensional, onde cada neurônio está conectado a todas as entradas da rede. A cada objeto de entrada apresentado à rede, os neurônios atualizam seus pesos e ativam uma região diferente do reticulado determinando a localização espacial de uma vizinhança topográfica de neurônios excitados, centrada no neurônio mais semelhante ao objeto apresentado.

O objetivo da rede SOM é encontrar um conjunto de neurônios de referência e associar cada objeto do conjunto de dados ao neurônio de referência mais próximo. O resultado consiste de um conjunto de neurônios que definem implicitamente os grupos. Os dois algoritmos mais utilizados que implementam as redes SOM são o SOTA (HERRERO; VALENCIA; DOPAZO, 2001) e o SomPack (KOHONEN et al., 1996).

- Agrupamento Conceitual: nesse tipo de abordagem o resultado depende do objetivo da classificação e dos conceitos disponíveis ao sistema de caracterização das coleções de objetos. A premissa básica dessa abordagem é que os objetos devem ser organizados em grupos que tenham algum significado conceitual simples e que seja útil do ponto de vista da aplicação. Desse modo, objetos de um mesmo grupo não são similares somente segundo alguma medida de similaridade definida matematicamente, mas também segundo um mesmo significado conceitual descrito pelo grupo (BHATIA; DEOGUN, 1998; MISHRA; RON; SWAMINATHAN, 2004).
- Agrupamento Hierárquico: essa abordagem, assim como as outras, constrói o agrupamento de modo que os objetos pertencentes ao mesmo grupo possuem alta similaridade e objetos pertencentes à grupos diferentes possuem baixa similaridade. Entretanto, uma distinção entre essa abordagem e as demais é que o resultado obtido não é constituído apenas de uma única partição do conjunto de dados inicial, mas sim de uma hierarquia que descreve um particionamento diferente à cada nível analisado.

Essa abordagem foi a utilizada para seleção dos controles preventivos pelo fato da mesma permitir analisar os grupos em diferentes níveis de granularidade, pois cada nível descreve um conjunto diferente de agrupamentos. Isso facilitará a seleção dos grupos dos controles preventivos e, portanto, na próxima seção, esta abordagem será discutida em mais detalhes.

### 10.3 Agrupamento Hierárquico

Geralmente, um conjunto de dados contém diversos grupos e esses grupos, por sua vez, são compostos de sub-grupos. Os sub-grupos podem ainda ser formados a partir do agrupamento de outros grupos menores, e assim sucessivamente. Essa sucessão de níveis e sub-níveis constitui naturalmente uma hierarquia (DUDA; HART; STORK, 2001). A hierarquia de agrupamentos pode ser descrita por meio de uma sequência de partições de N amostras em k grupos, em que o nível 1(um) corresponde a um grupo contendo todos os objetos do conjunto de dados e o último nível corresponde a um conjunto de grupos unitários (folhas), nos quais cada objeto constitui um grupo. Um agrupamento hierárquico agrupa os dados de modo que se dois objetos são agrupados em algum momento e, nas próximas iterações eles continuam fazendo parte do mesmo grupo, mesmo se forem agrupados em outros grupos mais gerais, caracterizando assim uma hierarquia de grupos. Essa técnica permite analisar os grupos em diferentes níveis de granularidade, pois cada nível descreve um conjunto diferente de agrupamentos.

Existem duas abordagens básicas para a implementação de algoritmos de agrupamento de dados hierárquicos (MURTAGH, 1983):

- **Aglomerativa:** cada objeto é considerado um grupo unitário. Em seguida, pares desses grupos são iterativamente agrupados de acordo com um índice de similaridade, até que todos os objetos pertençam a um só grupo.
- **Divisiva:** a abordagem divisiva é iniciada com apenas um agrupamento contendo todos os objetos e procede dividindo o conjunto de objetos em grupos cada vez menores, até que cada objeto pertença exclusivamente a um grupo ou até que se alcance o critério de parada, que frequentemente é o número de grupos desejados.

A representação dos resultados, geralmente, é realizada de forma simbólica por alguma estrutura que permite analisar a sequência com que os agrupamentos foram gerados. Existem diversas representações que podem ser utilizadas. Entretanto, o aspecto fundamental em cada uma delas é que seja possível identificar a hierarquia dos agrupamentos, em quais grupos estão distribuídos os objetos, em que iteração do processo um determinado objeto foi agrupado ou qual o grau de similaridade que resultou no agrupamento (METZ, 2006).

Uma representação bastante utilizada é denominada **diagrama de Venn** (ver Figura 10.1). Esta estrutura é baseada em conjuntos, na qual cada conjunto é formado por outros conjuntos menores. Essa representação revela a estrutura hierárquica e facilita a interpretação dos dados bi-dimensionais, mas não apresenta a similaridade dos grupos e não pode ser diretamente utilizada para conjuntos de dados multi-dimensionais. Por esse motivo, outras representações são mais utilizadas, como por exemplo, o dendrograma.

O dendrograma é a representação mais utilizada em algoritmos de agrupamento hierárquico, uma vez que ele fornece como informação a similaridade em que os grupos são



Figura 10.1: Agrupamento de dados representado por meio de um Diagrama de Venn.

formados. Essa estrutura é uma árvore com N folhas e altura N-1, na qual os objetos são dispostos no eixo horizontal, enquanto que o eixo vertical indica a distância (ou a similaridade) com que os agrupamentos são criados. O primeiro nível do dendrograma corresponde a um grupo contendo todos os N objetos do conjunto de dados; o segundo nível corresponde à divisão do grupo presente no primeiro nível, o que resulta em outros dois grupos. Cada um desses grupos contém uma parte dos objetos que estavam agrupados pelo único grupo do nível anterior. O nível N corresponde a um conjunto de grupos unitários (folhas), no qual cada objeto constitui um grupo. É possível afirmar que, no nível k, C = N - k + 1, sendo C o número de grupos. Para a construção dessa estrutura a partir da abordagem aglomerativa, os grupos presentes em um nível são agrupados e passam a fazer parte de outros grupos maiores e mais gerais, representados pelo nós ancestrais da árvores, até que toda a hierarquia seja construída. Desse modo, o dendrograma não é apenas um conjunto de agrupamentos, mas uma estrutura com toda a hierarquia dos agrupamentos gerados sobre o conjunto de objetos inicial. Em consequência, essa forma de representação possibilita ao pesquisador escolher o nível de corte do dendrograma que corresponde ao conjunto de grupos mais apropriado para a aplicação (METZ, 2006).

Para montar um dendrograma gráfico são desenhados arcos que representam os agrupamentos entre os grupos. A altura de cada arco indica a distância (ou similaridade) que resultou no agrupamento dos grupos aos quais suas extremidades estão conectadas (Ver Figura 10.2).

Nas próximas seções serão discutidas as duas abordagens de implementação dos algoritmos de agrupamento de dados hierárquico, destacando os métodos aglomerativos.

### 10.4 Algoritmo de Agrupamento Hierárquico Aglomerativo

Nesta abordagem, o primeiro passo é criar uma matriz de distância entre os grupos, destacando que, no início do algoritmo, cada objeto é um grupo. Criada a matriz de distância, a próxima etapa é encontrar o menor valor na matriz de distância. Esse valor



Figura 10.2: Agrupamento de dados representado por meio de um Dendrograma.

identifica os dois grupos mais similares entre si. Feito isso, esses dois grupos são agrupados, formando assim um novo grupo. Logo em seguida, a matriz de distância é atualizada, contendo agora um grupo a menos. Esse procedimento é realizado até restar apenas um único grupo. O Algoritmo (5) descreve de forma geral o algoritmo de um agrupamento hierárquico aglomerativo.

Algoritmo 5: Algoritmo de agrupamento hierárquico aglomerativo básico					
início					
Calcular a matriz de distância;					
repita					
Formar um novo grupo pela união dos grupos com maior grau de					
similaridade;					
Atualizar a matriz de distância para refletir a proximidade entre o novo					
grupo e os grupos originais;					
até (Todos os objetos estejam em um único grupo);					

Em geral, o que diferencia os diversos algoritmos aglomerativos é o método ou a estratégia utilizada para identificar os pares de grupos mais semelhantes, e, também, algumas heurísticas que podem ser utilizadas com o objetivo de melhorar os resultados. Nesse contexto, diversos algoritmos foram propostos: *Single Link, Complete Link, Average Link, Centroid-Based* e *Ward*. Estes algoritmos são frequentemente referenciados como os algoritmos clássicos da literatura de agrupamento de dados hierárquico (METZ, 2006).

Para ilustrar o comportamento dos algoritmos supracitados de agrupamento de dados hierárquico aglomerativo, serão utilizados dados de amostras que consistem de 6 objetos bidimensionais, apresentados na Tabela 10.2. A Matriz de distância (10.2) correspondente foi obtida através da métrica da distância Euclidiana (TAN; STEINBACH; KUMAR,
Ponto	Coordenadas		
	x	<i>y</i>	
$p_1$	0.4	0.53	
$p_2$	0.22	0.38	
$p_3$	0.35	0.32	
$p_4$	0.26	0.19	
$p_5$	0.08	0.41	
$p_6$	0.45	0.30	

Tabela 10.2: Coordenadas (x, y) do exemplo ilustrativo.

$$D = \begin{array}{cccccccccc} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 & p_6 \\ p_1 \begin{pmatrix} 0 & 0, 24 & 0, 22 & 0, 37 & 0, 34 & 0, 23 \\ 0, 24 & 0 & 0, 15 & 0, 20 & 0, 14 & 0, 25 \\ 0, 22 & 0, 15 & 0 & 0, 15 & 0, 28 & 0, 11 \\ 0, 37 & 0, 20 & 0, 15 & 0 & 0, 29 & 0, 22 \\ 0, 34 & 0, 14 & 0, 28 & 0, 29 & 0 & 0, 39 \\ p_6 \begin{pmatrix} 0, 23 & 0, 25 & 0, 11 & 0, 22 & 0, 39 & 0 \end{pmatrix} \end{array}$$
(10.2)

#### Single Link

E um dos algoritmos de agrupamento hierárquico mais simples. Basicamente, a proximidade de dois grupos é definida como a mínima distância (máximo de semelhança) entre dois objetos qualquer nos dois grupos diferentes. Assim, dados os conjuntos de objetos  $X \in Y$ , a distância entre eles será definida como:

$$d(X,Y) = \min D(i,j) : i \in X \ e \ j \in Y.$$

As Figuras 10.3 e 10.4 mostram o resultado da aplicação do algoritmo *Single Link*. A Figura 10.3 apresenta os grupos aninhados como uma sequência de elipses aninhadas, onde os números (em azul) associados com as elipses indicam a ordem do agrupamento. A Figura 10.4 mostra o dendrograma obtido. A altura na qual dois grupos são fundidos no dendrograma reflete a distância dos dois grupos (TAN; STEINBACH; KUMAR, 2009).

#### Complete Link

Ao contrário do Single Link, no algoritmo Complete Link a proximidade de dois grupos é definida como o máximo de distância (mínimo da semelhança) entre quaisquer dois objetos nos dois grupos diferentes. Assim, dados os conjuntos de objetos  $X \in Y$ , a distância entre eles será definida como:

$$d(X,Y) = max \ D(i,j) : i \in X \ e \ j \in Y.$$



Figura 10.3: Diagrama de Venn - Single Link.

Figura 10.4: Dendrograma Single Link.

As Figuras 10.5 e 10.6 mostram o resultado da aplicação do algoritmo Complete Link. A Figura 10.5 ilustra os grupos aninhados como uma sequência de elipses aninhadas, onde os números (em azul) associados com as elipses indicam a ordem do agrupamento. A Figura 10.6 apresenta o dendrograma obtido. Da mesma forma, a altura na qual dois grupos são fundidos no dendrograma reflete a distância dos dois grupos (TAN; STEIN-BACH; KUMAR, 2009).



Figura 10.5: Diagrama de Venn - Complete Link.

#### Figura 10.6: Dendrograma Complete Link.

#### Average Link

Neste algoritmo, a proximidade de dois grupos é definida como a proximidade média de pares entre todos os pares de objetos de diferentes grupos. Esta é uma abordagem intermediária entre as abordagens Single Link e Complete Link (TAN; STEINBACH; KUMAR, 2009). Assim, dados os conjuntos de objetos  $X \in Y$ , a distância entre eles será definida como:

$$d(X,Y) = \frac{1}{|X||Y|} \sum D(i,j) : i \in X \ e \ j \in Y.$$

sendo  $|X| \in |Y|$  o número de objetos nos conjuntos de grupos X e Y, respectivamente.

As Figuras 10.7 e 10.8 mostram o resultado da aplicação do algoritmo Average Link. A Figura 10.7 apresenta os grupos aninhados como uma sequência de elipses aninhadas, onde os números (em azul) associados com as elipses indicam a ordem do agrupamento. A Figura 10.8 apresenta o dendrograma obtido. A altura na qual dois grupos são fundidos no dendrograma reflete a distância dos dois grupos (TAN; STEINBACH; KUMAR, 2009).





Figura 10.7: Diagrama de Venn - Average Link.

Figura 10.8: Dendrograma Average Link.

#### Centroid Link

Os três métodos descritos anteriormente operam sobre a matriz de distância e não necessitam acesso direto aos objetos, enquanto que o método baseado no centroide deve ter acesso direto aos objetos. Com esse algoritmo, os grupos identificados são representados por um vetor que armazena a média de cada objeto. Assim, a distância entre os grupos é definida em termos da distância no espaço Euclidiano entre o representante de cada grupo.

As Figuras 10.9 e 10.10 mostram o resultado da aplicação do algoritmo *Centroid Link*. A Figura 10.9 ilustra os grupos aninhados como uma sequência de elipses aninhadas, onde os números (em azul) associados com as elipses indicam a ordem do agrupamento. A Figura 10.10 apresenta o dendrograma obtido. Da mesma forma, a altura na qual dois grupos são fundidos no dendrograma reflete a distância dos dois grupos (TAN; STEIN-BACH; KUMAR, 2009).

#### Ward Link

Este algoritmo foi desenvolvido de modo que duas partições formadas minimizam a dispersão associada a cada agrupamento, o qual deve ser facilmente quantizada e de simples interpretação. Nesse procedimento, a cada passo, todas as possíveis uniões entre pares de grupos são consideradas e os grupos que apresentam a mínima dispersão de informação



Figura 10.9: Diagrama de Venn - *Centroid* Figura 10.10: Dendrograma *Centroid Link*. *Link*.

são selecionados para o agrupamento. Essa perda de informação é definida em termos da soma dos erros quadrados (METZ, 2006).

As Figuras 10.11 e 10.12 mostram o resultado da aplicação do algoritmo *Ward Link*. A Figura 10.11 apresenta os grupos aninhados como uma sequência de elipses aninhadas, onde os números (em azul) associados com as elipses indicam a ordem do agrupamento. A Figura 10.12 apresenta o dendrograma obtido. A altura na qual dois grupos são fundidos no dendrograma reflete a distância dos dois grupos (TAN; STEINBACH; KUMAR, 2009).



Figura 10.11: Diagrama de Venn - *Ward Link*.



Figura 10.12: Dendrograma Ward Link.

## 10.5 Algoritmo de Agrupamento Hierárquico Divisivo

Esse método começa com um único grupo formado por todos os objetos e, gradualmente, vai dividindo os grupos em grupos menores até que se obtenha um agrupamento por padrão. A principal ideia deste método é encontrar uma partição que minimiza a matriz de distância. O Algoritmo (6) descreve, de forma geral, o algoritmo de um agrupamento hierárquico divisivo.

Algoritmo 6: Algoritmo de agrupamento hierárquico divisivo básico
início
Um único grupo contendo todos os objetos;
repita
Calcular a matriz de distância entre todos os possíveis pares de grupos;
Formar um grupo pela divisão dos pares de grupos com menor grau de
similaridade;
até (Ter um grupo por objeto);

Nota-se que, o Algoritmo (6) envolve todas as divisões possíveis dos objetos em dois grupos. Observa-se que, existe um grande número de combinações de grupos para um elevado número de objetos, o que pode acarretar em uma possível explosão combinatorial (EVERITT, 1993). Os métodos divisivos são menos comuns entre os métodos hierárquicos, devido ao fato de serem ineficientes e exigirem uma capacidade computacional maior que os métodos de agrupamento de dados aglomerativos (COSTA, 1999). Dentro deste contexto, neste trabalho não serão abordados os métodos utilizados para a obtenção dos grupos através do agrupamento de dados hierárquico divisivo.

# 10.6 Aplicação de Técnicas de Agrupamento de Dados em Problemas de SEP

Nesta seção serão discutidos alguns dos trabalhos presentes na literatura que utilizam, de alguna forma, técnicas de agrupamento de dados para resolver um determinado problema em sistemas elétricos de potência. Vale destacar que, até o presente momento em que este texto de doutoramento estava sendo escrito, não foram encontrados trabalhos na literatura que utilizam técnicas de agrupamento de dados para seleção de controles preventivos.

Em (CARDOSO et al., 2008), foi utilizada a técnica de agrupamento de dados hierárquico aglomerativo para propor uma nova metodologia com o objetivo de classificar os tipos de faltas que ocorrem nas linhas de transmissão de um SEP. Para tal, utilizou-se o algoritmo Ward em conjunto com a métrica da distância Euclidiana. Outros trabalhos utilizam a técnica de agrupamento de dados baseadas em particionamento (TAN; STEIN-BACH; KUMAR, 2009), por exemplo, em (SATSANGI; SAINI; SARASWAT, 2011), para o agrupamento de dados para determinar áreas para o controle tensão. Para tal, foi proposto um algoritmo k-means modificado em conjunto com a métrica da distância Euclidiana. Para identificar as áreas de controle de tensão, aplica-se o algoritmo k-means à execução de um fluxo de carga e o cálculo de uma matriz de sensibilidade, denominada matriz  $\partial V/\partial Q$ , que é utilizada para calcular a matriz de distância. Para validar a ferramenta desenvolvida, foram realizados testes nos SEPs do IEEE de 14 e 30 barras. Comparações foram realizadas com os resultados obtidos por um agrupamento de dados hierárquico. Destaca-se que outros trabalhos, tais como (ZHONG et al., 2004; SONG et al., 2006; EL-SAMAHY, 2008), utilizam o agrupamento de dados hierárquico para determinar áreas de controle de tensão, levando em consideração os problemas da gestão da potência reativa.

Um outro problema no qual os algoritmos de agrupamento de dados tem sido bastante explorados é na determinação de grupos de geradores coerentes. Em (MEI; ROVNYAK; ONG, 2008), foi proposto um novo método para a localização em tempo real de eventos dinâmicos que possam ocorrer em um SEP. Esta metodologia baseia-se em duas etapas: particionamento offline e localização online. No particionamento offline, os geradores são agrupados via um agrupamento de dados hierárquico em diversos grupos coerentes, baseando-se na coerência do ângulo do rotor dos geradores. A localização dos eventos online é formulada com o objetivo de encontrar o grupo com a maior probabilidade do evento ocorrer. Para tal, utiliza-se a frequência do rotor do gerador representante de cada grupo para identificar o grupo com a maior oscilação inicial. Outros trabalhos, tais como (JUAREZ et al., 2011), (ALSAFIH; DUNN, 2010), (DAVODI; REIHANI; NOROUZIZADEH, 2010) e (YAGANG et al., 2009), também utilizam alguma técnica de agrupamento de dados para determinar grupos de geradores coerentes.

Conforme pode ser observado, a utilização de técnicas de agrupamento de dados em problemas de SEP é relativamente recente e apresenta resultados promissores. Diante deste contexto, neste trabalho de doutorado é proposto a aplicação das técnicas de agrupamento de dados para a minimização do número de controles preventivos a serem aplicados para a manutenção da MET de uma determinada contingência.

### 10.7 Metodologia Proposta

Neste trabalho é proposta a aplicação da técnica de agrupamento de dados hierárquicos para o agrupamento dos controles preventivos. Basicamente, almeja-se a obtenção de grupos de controles de tensão, no qual cada grupo conterá os controles com sensibilidades similares. Após a criação dos grupos, torna-se fácil a escolha dos controles a serem aplicados para a manutenção da MET. Assim, cada grupo representará uma determinada eficácia em relação à manutenção da MET.

Para o agrupamento dos controles preventivos utiliza-se a informação da análise de sensibilidade de cada controle  $u_c$  em relação ao PMC  $(d\lambda_{max}^*/du_c)$ . Tal sensibilidade é obtida através da metodologia apresentada no Capítulo 9. Deste modo, obtém-se o vetor  $d\lambda_{max}^*/du$  que é composto por:

$$\frac{d\lambda_{max}^*}{du_c} = \left[\frac{\partial\lambda_{max}^*}{\partial u_1}, \frac{\partial\lambda_{max}^*}{\partial u_2}, \dots, \frac{\partial\lambda_{max}^*}{\partial u_{NC}}\right]$$
(10.3)

sendo, NC o número de controles preventivos no SEP em análise.

A matriz de distância é calculada através do vetor (10.3), utilizando a métrica da distância Euclidiana, da seguinte forma:

$$D_{u} = \begin{array}{c} u_{1} & u_{2} & \cdots & u_{NC} \\ u_{1} & \left( \left| \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{1}} - \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{1}} \right|^{\frac{1}{2}} \right)^{2} & \left( \left| \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{1}} - \frac{\partial \lambda_{max}}{\partial u_{2}} \right|^{\frac{1}{2}} \right)^{2} & \cdots & \left( \left| \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{1}} - \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{NC}} \right|^{\frac{1}{2}} \right)^{2} \\ \left( \left| \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{2}} - \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{1}} \right|^{\frac{1}{2}} \right)^{2} & \left( \left| \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{2}} - \frac{\partial \lambda_{max}}{\partial u_{2}} \right|^{\frac{1}{2}} \right)^{2} & \cdots & \left( \left| \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{2}} - \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{NC}} \right|^{\frac{1}{2}} \right)^{2} \\ & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{NC} & \left( \left| \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{NC}} - \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{1}} \right|^{\frac{1}{2}} \right)^{2} & \left( \left| \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{NC}} - \frac{\partial \lambda_{max}}{\partial u_{2}} \right|^{\frac{1}{2}} \right)^{2} & \cdots & \left( \left| \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{NC}} - \frac{\partial \lambda_{max}^{*}}{\partial u_{NC}} \right|^{\frac{1}{2}} \right)^{2} \right) \\ & (10.4)$$

Os passos necessários para a obtenção dos grupos dos controles de tensão mais similares são descritos no Algoritmo (7). Obtidos tais grupos, faz-se necessário selecionar os grupos para a manutenção da MET.

Algoritmo 7: Algoritmo de agrupamento hierárquico de controles preventivos
início
Calcular $d\lambda_{max}/du$ usando o Algoritmo 4 do Capítulo 9;
Calcular a matriz de distância $D_u$ (10.4);
repita
Formar um novo grupo pela união dos grupos com maior grau de
similaridade;
Atualizar a matriz de distância $D_u$ (10.4) para refletir a proximidade entre o
novo grupo e os grupos originais;
<b>até</b> (Todos os controles estejam em um único grupo);

A seleção dos controles preventivos é dada através de um corte realizado em um determinado nível do dendrograma, produzindo assim uma classificação de  $\mathbf{k}$  subgrupos, onde cada um deles é referente a um grupo de controles preventivos. Na Figura 10.13 é exemplificada a aplicação do corte em um dendrograma.

Na Figura 10.13 é realizado um corte no nível 4 no dendrograma, deste modo são obtidos 4 subgrupos, que são:  $\{p_6, p_1\}, \{p_2, p_3\}, \{p_4\} \in \{p_5\}$ . Utilizando esta abordagem, pretende-se determinar níveis de corte no dendrograma para que o operador do SEP possa selecionar eficientemente os controles a serem aplicados para a manutenção do SEP.

# 10.8 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada uma nova metodologia para minimizar o número de controles preventivos a serem utilizados na manutenção do SEP, cujos ajustes são realizados, geralmente, via métodos de otimização. Para a minimização do número de controles



Figura 10.13: Corte no nível 4 no dendrograma.

preventivos, foi proposto o agrupamento dos mesmos, de tal forma que, cada grupo seja composto pelos controles preventivos que são de alguma forma similares. A proposta baseia-se na informação da sensibilidade da MET em relação aos controles preventivos  $(d\lambda_{max}^*/du_{capc})$ , obtida através da metodologia proposta no Capítulo 9 e no agrupamento de dados hierárquico aglomerativo.

O agrupamento de dados é aplicado para determinar os grupos de controles preventivos que sejam similares de acordo com a sensibilidade  $d\lambda_{max}^*/du_{cap_c}$ . Após a execução da metodologia proposta, é obtido um agrupamento de controles preventivos ordenados de forma hierárquica. Para a seleção dos grupos, é realizado um corte de nível no agrupamento obtido, gerando-se **k** grupos. Obtidos estes grupos, cabe ao operador do SEP determinar quais são os controles em cada grupo a serem utilizados, utilizando por exemplo um método de otimização para ajustar os controles selecionados.

# Capítulo 11

# Metodologia Proposta para a Seleção de Controles Preventivos: Abordagem Global

## 11.1 Considerações Iniciais

Conforme abordado nos capítulos anteriores, diversas metodologias para a classificação e seleção dos controles preventivos foram propostas na literatura. Geralmente estes métodos determinam os controles mais efetivos para apenas uma única contingência, não sendo capazes, a princípio, de determinar um conjunto de controles preventivos para a segurança da MET de todas as contingências em questão.

Dentro deste contexto, neste capítulo será apresentada a metodologia desenvolvida neste trabalho para a determinação de um grupo global de controles preventivos para eliminar simultaneamente a criticalidade de todas as contingências selecionadas. Para tal, esta metodologia baseia-se na análise da sensibilidade da MET em relação à variação dos parâmetros de controle e em um novo método para o agrupamento de controles preventivos. Destaca-se que, análise de sensibilidade utilizada nesta abordagem é a desenvolvida no Capítulo 9. No entanto, outras técnicas para este fim podem ser utilizadas, como por exemplo o método proposto em (GREENE; DOBSON; ALVARADO, 1997), fazendo com que a abordagem global seja independente da técnica utilizada para calcular a sensibilidade.

Na próxima seção será apresentado em detalhes o desenvolvimento desta abordagem.

## 11.2 Agrupamento Global dos Controles Preventivos

O método para a classificação dos controles preventivos proposto no Capítulo 9 determina uma lista de controles preventivos ordenados de acordo com a sua eficácia em relação à manutenção da MET de uma única contingência. Entretanto, é sabido que um controle de tensão pode ser efetivo em mais de uma contingência simultaneamente. Em face a esta característica, faz-se possível vislumbrar o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de determinar um conjunto de controles preventivos, para eliminar simultaneamente a criticalidade de todas as contingências selecionadas.

Dentro deste cenário, neste trabalho foi desenvolvida uma nova metodologia para a determinação de um conjunto de controles preventivos considerando a eficácia dos mesmos em relação a todas as contingências críticas. Para tal, são calculadas as sensibilidades da MET de cada contingência i em relação as variáveis de controle  $u_c$ . Obtendo assim, para cada contingência i, uma lista  $S_i$  contendo todos os controles ordenados de acordo com a sua eficácia (ver Capítulo 9). Após obtidas as listas  $S_i$ , a inserção de um controle  $u_c$  dentro de um grupo em comum é dada através de um processo de avaliação e mapeamento do mesmo em relação a todas as contingências críticas.

Portanto, seja  $\mathcal{S}_i^n$  uma lista normalizada de  $\mathcal{S}_i$ , isto é,

$$\mathcal{S}_i^n = \mathcal{S}_i / max(\mathcal{S}_i) \tag{11.1}$$

considerando  $max(S_i)$  a sensibilidade do controle mais efetivo em relação a *i*-ésima contingência. A avaliação de um controle  $u_c$  é realizada através da inspeção do Grau de Eficácia  $(GE_c)$  do mesmo em relação a todas as contingências críticas. A obtenção deste grau é dada pela soma de todas as sensibilidades normalizadas de  $u_c$  em relação às contingências críticas, isto é,

$$GE_c = \sum_{i=1}^{NCT} \mathcal{S}_{ic}^n.$$
(11.2)

sendo NCT o número de contingências críticas e  $S_{ic}^n$  a sensibilidade normalizada da MET da *i*-ésima contingência em relação ao *c*-ésimo controle. Este grau é calculado para cada controle  $u_c$ , obtendo assim um vetor GE composto por,

$$GE = [GE_1, GE_2, ..., GE_{NC}]$$
(11.3)

em que NC é o número de controles preventivos.

Este grau indica apenas a eficácia de um determinado controle  $u_c$  em relação às contingências críticas, não informando em quais contingências o mesmo é de fato efetivo. A informação de quais contingências um certo controle é efetivo pode ser obtida através de um processo de mapeamento. Este mapeamento é realizado via uma matriz de relação  $\mathbf{R}$ , que é obtida avaliando-se a sensibilidade normalizada de cada controle  $u_c$  em relação a um *limiar* pré-determinado<sup>16</sup>. Cada elemento da matriz  $\mathbf{R}$  é calculado como segue,

$$\mathbf{R}_{ic} = \begin{cases} 1, & \text{Se } \mathcal{S}_{ic}^{n} \ge (\mathcal{S}_{i}^{n*}.limiar) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$
(11.4)

 $<sup>^{16}</sup>$ Este limiar define, a princípio, o nível de eficácia que é exigido de cada ação de controle.

sendo  $S_{ic}^{n*}$  a sensibilidade do controle mais efetivo (a maior sensibilidade normalizada) e  $\mathbf{R}_{ic}$  o elemento referente a *i*-ésima contingência crítica e *c*-ésimo controle. Em (11.4), o valor 1 é atribuído a todos os controles  $u_c$  que possuem  $S_{ic}^n$  maior ou igual a multiplicação entre  $S_i^{n*}$  e o *limiar* pré-determinado, garantindo assim que apenas os controles mais efetivos em relação à contingência *i* sejam selecionados.

A estratégia proposta para a obtenção do grupo de controles preventivos ( $\mathcal{G}$ ), capaz de eliminar a criticalidade de todas as contingências selecionadas, baseia-se na seleção dos controles preventivos que possuem o maior grau de eficácia GE em relação a cada contingência analisada. Este procedimento é realizado de forma sequencial, iniciando pelos controles considerados mais efetivos até atender um determinado critério de parada, que é composto por duas condições:

- 1. A aplicação das ações dos controles preventivos em  $\mathcal{G}$  implica na obtenção de uma MET maior ou igual a um valor pré-determinado  $(\lambda_{limiar}^*)$ ;
- Todos os controles preventivos do SEP foram avaliados pela estratégia e o critério de parada 1) não foi satisfeito.

No Algoritmo 8, para cada contingência i, verifica-se se o controle  $u_c$  pode ser inserido no grupo  $\mathcal{G}$ . Este processo é realizado selecionando os controles que apresentam o maior grau de eficácia GE e verificando se estes controles são de fato efetivos, através do mapeamento realizado na matriz  $\mathbf{R}$ . O valor da sensibilidade de cada controle selecionado é então somado às METs de todas as contingências. Esta estratégia proporciona uma aproximação de o quanto o grupo poderá aumentar a MET. O Algoritmo 8 termina a sua execução quando os critérios de parada 1) ou 2) são atendidos.

$\mathbf{A}$	goritmo	8: /	Seleção	qlobal	dos	controles	preventivos.	
--------------	---------	------	---------	--------	-----	-----------	--------------	--

## 11.3 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada uma nova metodologia para determinar um grupo de controles preventivos a serem utilizados na manutenção da MET de todos as contingências críticas selecionadas. A estratégia proposta baseia-se na informação da sensibilidade da MET em relação aos controles preventivos  $(d\lambda_{max}^*/du_{cap_c})$ , obtida através da metodologia proposta no Capítulo 9, e em um novo método de agrupamento desenvolvido para este fim.

Esta abordagem fornece ao operador do SEP uma nova forma de tratar o problema de seleção de controles para a manutenção da MET na análise de contingências. O grupo obtido contém um número mínimo de controles preventivos capazes de eliminar a criticalidade das contingências, cabendo assim ao operador avaliar a factibilidade da aplicação dos mesmo.

Mesmo que a metodologia esteja baseada na análise de sensibilidade proposta neste doutoramento, a mesma é facilmente ajustável para o emprego de outras técnicas. Uma alternativa eficaz para otimização das ações de controle preventivo é utilizar o grupo obtido como solução inicial em um problema de otimização, e ajustar as ações através de um FPO.

# Parte IV

Resultados, Considerações Finais e Perspectivas Futuras

# Capítulo 12

# Simulações e Resultados

## 12.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação das metodologias propostas neste trabalho em um sistema brasileiro reduzido composto por 107 barras, descrito na Seção 12.2. A estimação, passo a passo, da MET via o método *QLook-Ahead* para o caso base é apresentada na Seção 12.3. Ainda nesta seção é realizada uma comparação entre os métodos *CPFLOW* e *Look-Ahead*.

Na Seção 12.4, realiza-se a análise de contingências no sistema-teste. Selecionadas as contingências críticas, na Seção 12.5, é apresentada a classificação e a seleção dos controles preventivos para a melhoria da MET das contingências selecionadas através da abordagem local na Seção 12.4 e, na Seção 12.6, é apresentada a classificação e a seleção dos controles preventivos para a melhoria da MET de contingências selecionadas através da abordagem global. O capítulo é finalizado com uma breve discussão a respeito dos resultados obtidos pelos métodos propostos na tese.

#### 12.2 Sistema-Teste

O sistema-teste utilizado nas simulações é o sistema brasileiro reduzido de 107 barras, das quais 23 barras são de geração (tipo PV) e 83 barras são de carga (tipo PQ). Este sistema está dividido em três subsistemas denominados Sul, Sudeste e Mato Grosso, com capacidade total de geração de 22.080 MW e possuindo uma carga total de 13.059,37 MW. O subsistema Sudeste concentra a maior capacidade de geração; cerca de 56% de toda a geração disponível no sistema. Para mais informações ver Apêndice D (ALVES, 2007).

Como o sistema é dividido em 3 áreas (Sul, Sudeste e Mato Grosso), cada área possui um fator de participação, cuja função é controlar o aumento de carga em cada uma das áreas. Além dos fatores de participação das áreas, existem os fatores de participação das barras (ativa e reativa) que controlam o aumento de carga em cada uma das barras do sistema (ver Capítulo 5).



Figura 12.1: Localização dos capacitores e contingências críticas no sistema-teste brasileiro de 107 barras.

Para efeito de simulação, foram adotados fatores de participação iguais para todas as barras e áreas do sistema.

Os fatores de participação utilizados nesta simulação são:

- Fator de participação das barras igual a 0,3;
- Fator de participação das áreas igual a 1.

Nas próximas seções serão abordados mais detalhes sobre o sistema-teste.

## 12.3 Obtenção da MET via método QLook-Ahead

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos aplicando o método *QLook-Ahead* no sistema-teste. Inicialmente será apresentada, passo a passo, a obtenção da MET através do *QLook-Ahead* e, em seguida, a comparação dos resultados com os demais métodos, sendo eles, o método *Look-Ahead* e o *CPFLOW*.

Conforme o Algoritmo (3), após obtida a MET via o método *Look-Ahead*, é realizada a análise de sensibilidade para verificar quais são os geradores mais sensíveis do sistema. A seguir são apresentados os passos para obtenção da MET via o *QLook-Ahead*. Destaca-se

que, como o sistema possui 23 geradores, serão apresentadas apenas as sensibilidades dos 10 primeiros geradores.

#### 1. Iteração 1:

a) Passo 1: Obter a MET ( $\lambda_{max}$ ) via método Look-Ahead com  $\lambda_1 = 1$  e  $\lambda_2 = 1.03$  (ver Algoritmo 2):

 $\lambda_{max} = 1,1151 (\approx 11\%).$ 

b) Passos 2 e 3: Obter a lista de sensibilidade  $\Delta G$  (ver Equação (7.29)) e o gerador com a maior sensibilidade denotado por k:

$$\Delta G = \begin{pmatrix} Gerador & \Delta G_{n_i} \\ 904 & 1 \\ 20 & 0,634967 \\ 4523 & 0,449483 \\ 16 & 0,398688 \\ 4596 & 0,277483 \\ 21 & 0,232422 \\ 500 & 0,204963 \\ 48 & 0,192899 \\ 35 & 0,18663 \\ 4804 & 0,180395 \end{pmatrix}; com \ valor \ de \ k \ = \ 904.$$

Analisando a lista  $\Delta G$ , percebe-se que os geradores mais sensíveis do SEP são o 904 e o 20. Esses provavelmente atingirão os limites de potência reativa. Entretanto, o gerador 904 apresenta a maior sensibilidade. Portanto esse será o primeiro a atingir o limite de potência reativa. O segundo gerador a atingir o limite de potência reativa será o gerador 20, e assim sucessivamente, seguindo a ordem da lista  $\Delta G$ .

c) Passos 4, 5 e 6: Estimar o valor de  $\lambda_{Q_{904_{lim}}}$  (ver Equações (7.37), (7.40) e (7.42)):

$$\lambda_{Q_{904_{lim}}} = 1,075.$$

- d) Passo 7: Se  $\lambda_{Q_{k_{lim}}} > \lambda_{max}$  fim do algoritmo, caso contrário continue: Como 1,075 < 1,1151, portanto, continue;
- e) Passos 8 e 9: Trocar o tipo de barra referente ao gerador 904 para PQ; fazer  $\lambda_2 = \lambda_{Q_{904_{lim}}}$ , isto é,  $\lambda_2 = 1,075$  e voltar para o Passo 1.

#### 2. Iteração 2:

a) Passo 1: Obter a MET ( $\lambda_{max}$ ) via método Look-Ahead com  $\lambda_1 = 1 \text{ e } \lambda_2 = 1,075$ (ver Algoritmo 2):  $\lambda_{max} = 1,1121 (\approx 11\%).$ 

b) Passos 2 e 3: Obter a lista de sensibilidade  $\Delta G$  (ver Equação (7.29)) e o gerador com a maior sensibilidade denotado por k:

$$\Delta G = \begin{pmatrix} Gerador & \Delta G_{n_i} \\ 20 & 1 \\ 4523 & 0,678342 \\ 16 & 0,579881 \\ 915 & 0,4841 \\ 4596 & 0,435096 \\ 810 & 0,378248 \\ 21 & 0,369422 \\ 925 & 0,344872 \\ 500 & 0,319162 \\ 35 & 0,304905 \end{pmatrix}; com valor de k = 20.$$

c) Passos 4, 5 e 6: Estimar o valor de  $\lambda_{Q_{20_{lim}}}$  (ver Equações (7.37), (7.40) e (7.42)):

$$\lambda_{Q_{20_{lim}}} = 1,1032.$$

- d) Passo 7: Se  $\lambda_{Q_{k_{lim}}} > \lambda_{max}$  fim do algoritmo, caso contrário continue: Como 1, 1032 < 1, 1121, portanto, continue;
- e) Passos 8 e 9: Trocar o tipo de barra referente ao gerador 20 para PQ; fazer  $\lambda_2 = \lambda_{Q_{20_{lim}}}$ , isto é,  $\lambda_2 = 1,1032$  e voltar para o Passo 1.

#### 3. Iteração 3:

a) Passo 1: Obter a MET  $(\lambda_{max})$  via método Look-Ahead com  $\lambda_1 = 1$  e  $\lambda_2 = 1,1032$  (ver Algoritmo 2):

 $\lambda_{max} = 1,1053 (\approx 10\%).$ 

b) Passos 2 e 3: Obter a lista de sensibilidade  $\Delta G$  (ver Equação (7.29)) e o gerador com a maior sensibilidade denotado por k:

	Gerador	$\Delta G_{n_i}$	
	( 4523	1	
	16	0,907686	
	915	0,763608	
	500	0,694502	
$\Delta C =$	810	0,655394	$\cdot$ com valor de $k = 4522$
$\Delta G =$	4596	0,635902	$, com valor all \kappa = 4525.$
	925	0,568214	
	21	0,535473	
	48	0,531457	
	35	0,513268	

c) Passos 4, 5 e 6: Estimar o valor de  $\lambda_{Q_{4523_{lim}}}$  (ver Equações (7.37), (7.40) e (7.42)):

$$\lambda_{Q_{4523_{lim}}} = 1,1253.$$

d) Passo 7: Se  $\lambda_{Q_{k_{lim}}} > \lambda_{max}$  fim do algoritmo, caso contrário continue: Como 1, 1253 > 1, 1053, pare.

Portanto, após a aplicação do método *QLook-Ahead*, foi obtida uma MET 1,1053 ( $\approx 10\%$ ). A Figura 12.2 ilustra as curvas *PV* ao longo do processo iterativo do método *QLook-Ahead* para o sistema de 107 barras. Destaca-se que, a curva *PV* na cor azul é a original sem levar em consideração os limites de potência reativa (iteração 1); a curva *PV* na cor vermelha é obtida quando o gerador na barra 904 atinge o seu limite de potência reativa (iteração 2); e, a curva *PV* na cor verde é obtida quando o gerador na barra 20 atinge o seu limite de potência reativa (iteração 3). A curva *PV* do sistema, levando em consideração os limites de potência reativa dos geradores, é composta pelas três curvas *PV* obtidas, conforme pode ser visto na Figura 12.3.

Na Tabela 12.1 é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos pelos métodos *CPFLOW* e *Look-Ahead*, no qual ambos não consideram os limites de potência reativa dos geradores (sem Q-Limite); e *CPFLOW* e *QLook-Ahead*, no qual ambos consideram os limites de potência reativa dos geradores (com Q-Limite). Em carregamento normal de operação, a MET máxima para as metodologias *CPFLOW* e *Look-Ahead* é de aproximadamente 11%. Entretanto, devido a incapacidade dos geradores suprirem a demanda de potência reativa, a MET do SEP é reduzida para 10%. Portanto, houve uma redução de aproximadamente 1% na MET devido à limitação de potência reativa nos geradores.

Analisando ainda a Tabela 12.1, observa-se a eficiência numérica da metodologia proposta, quando comparada com o método *CPFLOW* com Q-limite, cuja diferença de um para o outro é de aproximadamente 0,0012 p.u. Destaca-se que o método CPFLOW com Q-limite exigiu um esforço computacional de 74,2 segundos para calcular a MET enquanto



Figura 12.2: Curvas PV obtidas pelo método QLook-Ahead.



Figura 12.3: Curva PVobtida pelo método $QLook\mathchar`-Ahead.$ 

Sem Q	elimite	Com	Q-limite
CPFLOW	$Look ext{-}Ahead$	CPFLOW	$QLook ext{-}Ahead$
1,1175 p.u.	1,1151 p.u.	1,1041 p.u.	1,1053 p.u.

Tabela 12.1: Comparação dos métodos para obtenção da MET.

que a mesma tarefa foi realizada em 11,2 segundos pelo *QLook-Ahead*, evidenciando assim a eficiência computacional do método proposto.

Nessa seção foi considerado apenas o caso base do sistema-teste. Nas próximas seções serão consideradas as contingências no sistema-teste, objetivando assim avaliar a eficiência da metodologia proposta para a estimação da MET levando em consideração os limites de potência reativa dos geradores.

## 12.4 Classificação e Seleção de Contingências

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pelo método *QLook-Ahead* para as contingências simples no sistema-teste, sendo consideradas apenas contingências nas linhas de transmissão. A Tabela 12.2 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos pelos métodos *QLook-Ahead* e o *CPFLOW* com Q-limite. Destaca-se que foram incluídas na tabela apenas as contingências que obtiveram solução, sendo linhas em vermelho as contingências cuja MET é menor que 4% e as linhas em azul são as que obtiveram uma MET menor que 7%. O sistema-teste é composto por 170 linhas de transmissão, das quais, quando analisadas as respectivas contingências, em 120 casos foi possível obter a MET (contingências com solução); em 27 houve a ocorrência de algum tipo de ilhamento causado pela perda da linha; e, em 23 casos não foi possível obter solução através dos dois métodos utilizados na análise.

Ainda na Tabela 12.2, destaca-se que a coluna Contingência equivale a linha de transmissão na qual ocorreu a falta; a coluna Barra Piloto é a barra que possui a maior variação relativa da tensão (ver Seção 7.2); na coluna *CPFLOW*,  $\lambda_{max}$  representa a MET obtida pelo método *CPFLOW* e  $V_{crit}$  a tensão crítica (na barra piloto) calculada no ponto  $\lambda_{max}$ ; e, na coluna *QLook-Ahead*,  $\lambda_{max}$  representa a MET obtida pelo método *QLook-Ahead* e  $V_{crit}$  a tensão crítica (na barra piloto) calculada no ponto  $\lambda_{max}$ .

		CPFLOW		QLook	-Ahead
Contingência	Barra Piloto	$\lambda_{max}$	$V_{crit}$	$\lambda^*_{max}$	$V_{crit}$
(86 - 122)	88	1,0947	0,8501	1,0944	0,8601
(100 - 101)	<b>24</b>	1,0625	0,8096	1,0622	0,7757

Tabela 12.2: Análise de contingências no sistema-teste.

		CPFLOW		$QLook ext{-}Ahead$	
Contingência	Barra Piloto	$\lambda_{max}$	$V_{crit}$	$\lambda^*_{max}$	$V_{crit}$
(100 - 101)	<b>24</b>	1,0622	0,7761	1,0620	0,7714
(100 - 210)	86	1,0918	$0,\!8087$	1,0924	0,7869
(100 - 213)	86	1,0934	0,8418	$1,\!0957$	$0,\!8049$
(100 - 535)	86	1,0889	0,8120	1,0912	0,7700
(101 - 102)	24	1,0474	0,7669	1,0472	0,7613
(101 - 103)	<b>24</b>	1,0368	0,8595	1,0364	0,7761
(102 - 120)	86	1,0896	$0,\!8015$	$1,\!0893$	0,7861
(103 - 123)	24	1,0929	0,7990	1,0928	0,7917
(104 - 1503)	<b>24</b>	1,0099	0,7698	1,0097	0,7898
(106 - 104)	24	1,0779	0,3526	1,0775	0,7153
(106 - 104)	24	1,0778	0,5775	1,0774	0,7149
(106 - 140)	24	$1,\!0935$	0,8095	$1,\!0951$	0,7773
(106 - 140)	24	$1,\!0935$	0,7999	$1,\!0948$	0,7714
(122 - 103)	86	1,0540	0,7961	1,0536	0,7996
(123 - 120)	24	$1,\!0861$	0,7644	$1,\!0856$	0,7750
(126 - 86)	24	$1,\!0934$	0,8262	$1,\!0948$	0,7963
(126 - 86)	24	1,0934	0,8265	$1,\!0948$	0,7963
(126 - 120)	24	$1,\!0904$	0,7785	$1,\!0901$	0,7681
(126 - 120)	24	$1,\!0904$	0,7576	$1,\!0902$	0,7689
(134 - 131)	86	1,0930	0,7835	$1,\!0938$	0,7935
(134 - 396)	88	$1,\!0934$	0,8553	$1,\!0932$	0,8568
(136 - 120)	24	$1,\!0815$	0,7484	$1,\!0812$	0,7677
(136 - 120)	24	$1,\!0815$	0,7484	$1,\!0812$	0,7677
(136 - 131)	24	$1,\!0890$	0,7931	$1,\!0885$	0,7798
(136 - 134)	24	1,0883	0,7674	$1,\!0881$	0,7730
(136 - 138)	<b>24</b>	1,0659	0,7701	1,0656	0,7771
(136 - 138)	<b>24</b>	1,0626	0,7538	1,0623	0,7745
(140 - 138)	<b>24</b>	1,0645	0,7244	1,0642	0,7439
(140 - 138)	<b>24</b>	1,0610	0,7409	1,0606	0,7463
(210 - 217)	88	$1,\!0848$	$0,\!8487$	$1,\!0844$	0,8602
(210 - 217)	88	$1,\!0848$	$0,\!8487$	$1,\!0844$	0,8602
(210 - 370)	88	$1,\!0903$	0,8534	$1,\!0901$	$0,\!8548$
(213 - 216)	86	$1,\!0935$	$0,\!8385$	$1,\!0956$	0,8226
(216 - 396)	88	$1,\!0935$	0,8448	$1,\!0932$	0,8591
(217 - 216)	88	1,0900	0,8729	$1,\!0895$	0,8598
(217 - 218)	88	$1,\!0879$	0,8529	$1,\!0875$	0,8561
(217 - 218)	88	$1,\!0879$	0,8529	$1,\!0875$	0,8561
(218 - 234)	88	$1,\!0905$	0,8756	$1,\!0902$	0,8556
(218 - 234)	88	$1,\!0905$	0,8756	$1,\!0902$	$0,\!8556$

Tabela 12.2: Análise de Contingências no sistema-teste.

\_

\_

		CPF	LOW	QLook	-Ahead
Contingência	Barra Piloto	$\lambda_{max}$	$V_{crit}$	$\lambda^*_{max}$	$V_{crit}$
(219 - 234)	88	1,0935	0,8421	1,0932	0,8574
(219 - 234)	88	1.0935	0,8421	1.0932	0.8574
(220 - 217)	88	1.0916	0.8509	1.0913	0.8589
(220 - 219)	88	1.0878	0.8559	1.0874	0.8553
(225 - 217)	34	1.0820	0.8652	1.0816	0.8712
(225 - 217)	88	1.0837	0.8420	1.0834	0.8720
(225 - 231)	34	1.0311	0.8620	1.0308	0.8575
(231 - 4501)	88	1.0394	0.8664	1.0392	0.8573
(233 - 210)	88	1.0761	0.8432	1.0756	0.8507
(233 - 320)	88	1,0692	0.8512	1,0690	0.8431
(234 - 233)	88	1.0908	0.8484	1.0904	0.8580
(234 - 233)	88	1.0901	0.8552	1.0896	0.8592
(320 - 210)	88	1.0913	0.8485	1.0911	0.8549
(320 - 360)	88	1,0928	0,8462	1,0924	0,8592
(325 - 326)	24	1,0935	0,8388	1,0958	0,8225
(325 - 326)	24	1,0935	0,8388	1,0958	0,8225
(325 - 360)	86	1,0929	0,8443	1.0956	0.8251
(325 - 370)	24	1,0921	0,8425	1,0948	0,8340
(326 - 134)	86	1,0933	0,8259	1,0947	0,7963
(326 - 396)	88	1,0934	0,8360	1,0932	0,8570
(370 - 535)	24	1,0937	0,8356	1,0958	0,8302
(536 - 535)	88	1,0936	0,8712	1,0933	0,8583
(536 - 535)	88	1,0935	0,8681	1,0933	0,8581
(814 - 895)	24	1,0935	0,7968	1,0955	0,7996
(814 - 895)	24	1,0935	0,8349	1,0956	0,8297
(824 - 933)	24	1,0936	0,8427	1,0962	0,8339
(824 - 933)	24	1,0936	0,8423	1,0962	0,8339
(834 - 934)	24	1,0935	0,8306	1,0955	0,8194
(839 - 840)	88	1,0937	0,8505	1,0933	0,8593
(839 - 840)	88	1,0937	0,8224	1,0933	0,8593
(839 - 898)	24	1,0936	0,8429	1,0962	$0,\!8337$
(839 - 1047)	24	1,0936	0,8406	1,0962	0,8334
(839 - 2458)	88	1,0937	0,8565	1,0933	0,8593
(839 - 2458)	88	1,0937	0,8513	1,0933	0,8593
(856 - 1060)	24	1,0934	0,7773	1,0950	0,7973
(895 - 122)	24	1,0850	0,7525	$1,\!0845$	0,7639
(895 - 122)	24	1,0850	0,7525	$1,\!0845$	0,7639
(896 - 897)	58	1,0471	0,6105	1,0468	0,6047
(898 - 1047)	24	$1,\!0936$	$0,\!8178$	$1,\!0959$	$0,\!8015$

Tabela 12.2: Análise de Contingências no sistema-teste.

		CPF	LOW	QLook	-Ahead
Contingência	Barra Piloto	$\lambda_{max}$	$V_{crit}$	$\lambda^*_{max}$	$V_{crit}$
(933 - 955)	24	1,0920	0,7715	1,0915	0,7726
(934 - 933)	88	1,0937	0,8452	1,0933	0,8592
(934 - 1047)	24	1,0936	0,8402	1,0960	0,8026
(934 - 1047)	24	1,0936	0,8396	1,0960	0,8026
(938 - 959)	24	1,0912	0,7513	1,0910	0,7629
(939 - 938)	24	1,0936	0,8025	1,0958	0,8014
(939 - 938)	24	1,0936	0,8374	1,0958	0,8215
(939 - 938)	24	1,0936	0,8381	$1,\!0959$	$0,\!8217$
(939 - 1015)	88	$1,\!0937$	0,8421	1,0933	$0,\!8590$
(939 - 1015)	88	$1,\!0937$	0,8586	1,0933	$0,\!8590$
(959 - 895)	75	1,0751	0,7391	1,0747	0,7485
(960 - 834)	24	$1,\!0935$	$0,\!8346$	$1,\!0955$	0,7998
(960 - 959)	24	1,0934	0,8284	$1,\!0950$	$0,\!8197$
(960 - 959)	24	$1,\!0934$	0,8284	$1,\!0950$	$0,\!8197$
(960 - 1015)	24	1,0936	0,8406	$1,\!0961$	$0,\!8431$
(960 - 1015)	24	1,0936	0,8401	$1,\!0961$	$0,\!8429$
(965 - 964)	24	1,0936	0,8383	1,0960	$0,\!8225$
(965 - 964)	24	1,0936	0,3383	1,0960	$0,\!8225$
(995 - 1030)	24	$1,\!0935$	0,8342	$1,\!0956$	$0,\!8302$
(995 - 1060)	24	1,0769	0,7719	$1,\!0765$	0,7844
(1030 - 955)	24	$1,\!0833$	0,7944	$1,\!0831$	0,7961
(1210 - 976)	24	1,0936	$0,\!8377$	$1,\!0958$	$0,\!8219$
(1210 - 976)	24	1,0936	0,7996	$1,\!0958$	0,8016
(1210 - 976)	24	$1,\!0936$	$0,\!8376$	$1,\!0959$	0,8119
(2458 - 896)	58	1,0474	$0,\!5849$	1,0472	0,6038
(4501 - 4522)	88	1,0586	$0,\!8426$	1,0583	0,8316
(4522 - 4532)	88	1,0722	0,9128	1,0720	$0,\!9082$
(4522 - 4532)	88	1,0722	0,9128	1,0720	$0,\!9082$
(4522 - 4623)	88	$1,\!0902$	$0,\!8349$	$1,\!0900$	0,8534
(4522 - 4623)	88	$1,\!0902$	$0,\!8349$	$1,\!0900$	0,8534
(4532 - 4533)	24	$1,\!0941$	0,8012	$1,\!0967$	$0,\!8039$
(4532 - 4533)	24	$1,\!0941$	0,8012	$1,\!0967$	$0,\!8039$
(4532 - 4533)	24	$1,\!0941$	0,8012	$1,\!0967$	$0,\!8039$
(4623 - 4533)	88	$1,\!0879$	0,9623	$1,\!0875$	$0,\!9561$
(4703 - 4533)	88	$1,\!0910$	0,8551	1,0906	0,8612
(4703 - 4533)	88	1,0910	0,8551	1,0906	0,8612
(4805 - 4807)	88	1,0928	0,8328	1,0924	0,8598
(4805 - 4807)	88	1,0928	0,8328	1,0924	0,8598
(4862 - 4532)	88	1,0821	0,8556	1,0816	0,8512

Tabela 12.2: Análise de Contingências no sistema-teste.

		CPFLOW		QLook	-Ahead
Contingência	Barra Piloto	$\lambda_{max}$	$V_{crit}$	$\lambda^*_{max}$	$V_{crit}$
(4862 - 4532)	88	1,0821	0,8556	1,0816	0,8512

Tabela 12.2: Análise de Contingências no sistema-teste.

Analisando a Tabela 12.2 nota-se que o sistema-teste apresenta um decréscimo da MET de aproximadamente 1% em relação ao caso base na maioria dos cenários estudados. Entretanto, existem contingências que apresentam um decréscimo bastante acentuado da MET, sendo elas as perdas das linhas: (100-101), (100-101), (101-102), (101-103), (104-1503), (122-103), (136-138), (136-138), (140-138), (140-138), (225-231), (231-4501), (233-320), (896-897), (2458-896) e (4501-4522), que apresentam uma MET menor que 7%, isto é, um decréscimo de aproximadamente 3% em relação a MET do caso base. Caso a análise em questão fosse realizada para a pré-operação (planejamento da operação), as contingências citadas seriam denominadas como críticas. No entanto, conforme visto no Preâmbulo, para a operação em tempo real, a ONS determina que contingências críticas são aquelas que apresentarem MET com valor menor que 4%. Desse modo, as contingências a serem selecionadas são (101-103), (104-1503) e (225-231) (em vermelho na Tabela 12.2).

Realizada a análise de contingências, a próxima etapa é classificar e selecionar os controles preventivos para a manutenção da MET das contingências selecionadas. Tais simulações serão abordadas nas próximas seções.

# 12.5 Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Local

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos pelos métodos propostos neste trabalho para classificar (ver Capítulo 9) e selecionar os controles preventivos (ver Capítulo 10) mais eficazes para a manutenção da MET. Para tal, o sistema-teste é composto por dispositivos de controle de tensão, sendo eles: 13 capacitores *shunt*, 20 reatores *shunt*, 1 compensador síncrono e 1 compensador estático. Contudo, por simplicidade, somente os capacitores *shunt* foram considerados para o controle de tensão. Na Tabela 12.3 são apresentados os capacitores utilizados na análise bem como a capacidade em var e a sua disponibilidade para o controle.

Com o objetivo de melhorar a MET das contingências selecionadas na Seção 12.4 o Algoritmo (4) foi aplicado para classificar os controles de acordo com a sua eficácia. A eficiência dos resultados obtidos foi confirmada por meio da implementação das ações

Barra	Nome	Mvar	Disponibilidade
1210	Gravataí	400	100%
939	Blumenau	250	100%
959	Curitiba	200	50%
104	Cachoeira Paulista	200	100%
122	Ibiúna	200	50%
1504	Itajubá	200	100%
123	Campinas	200	100%
120	Poços de Caldas	200	100%
234	Samambaia	150	100%
4522	Rondonópolis	30	0%
4533	Coxipó	86,4	100%
4582	Sinop	60	50%
231	Rio Verde	60	100%

Tabela 12.3: Capacitores disponíveis para o controle de tensão.

de controle preventivo. Para tal, para cada controle analisado é executado o CPFLOW considerando a ação da capacidade máxima do mesmo no sistema-teste, isto é,  $u_c = 1$ . Após obtido o PMC, é realizada uma classificação decrescente dos controles em relação ao PMC. Obtendo assim, a ordem dos controles mais eficazes para a manutenção da MET. A Figura 12.4 ilustra o diagrama unifilar do sistema-teste destacando a localização dos capacitores *shunt* (destacados com círculos na cor azul) e as 3 contingências críticas analisadas (destacadas em elipses na cor vermelha).

Na Tabela 12.4, as ações de controle (capacitores) estão classificadas de acordo com as suas sensibilidades  $(d\lambda_{max}^*/du_c)$  para a contingência na linha (101-103). O PMC é  $\lambda_{max}^* = 1,0364 ~(\approx 3\%)$  sem a aplicação dos controles, isto é,  $u_c = 0$ .

Analisando a Tabela 12.4, verifica-se que a ordem de eficácia dos capacitores mantevese a mesma quando comparada com a ordem de eficácia dos controles obtida por meio do método proposto neste trabalho. Destaca-se também que, os controles localizados nas barras 1504 e 104 têm uma eficácia superior, quando comparados com os demais controles. A aplicação de qualquer um desses controles possivelmente resultará em uma MET com valor maior que 5%. Nota-se também que, o método proposto classificou os controles considerando a disponibilidade dos mesmos, fato que pode ser observado analisando os controles 122, 959, 4522 e 4582. Este último com sensibilidade nula, pelo fato de estar 100% em uso.

Na Tabela 12.5, as ações de controle (capacitores) estão classificadas de acordo com as suas sensibilidades  $(d\lambda_{max}^*/du_c)$  para a contingência na linha (104-1503). O PMC é de  $\lambda_{max}^* = 1,0097$  sem a aplicação dos controles, isto é,  $u_c = 0$ . Analisando esta tabela, nota-se que a ordem de eficácia dos capacitores manteve-se a mesma quando comparada com a ordem de eficácia dos controles obtida por meio do método proposto neste trabalho.



Figura 12.4: Localização dos capacitores e contingências críticas no sistema-teste brasileiro de 107 barras.

Tabela 12.4: Classificação e aplicação dos controles de tensão na contingência na linha (101-103).

Barra	Sens.	CPFLOW					
de		$u_c = 1(100\%)$					
Controle	$\frac{d\lambda_{max}^*}{du_c}$	Barra	$\lambda_{max}$				
1504	0,01761	1504	1,0551				
104	0,01466	104	1,0532				
123	0,00875	123	1,0483				
120	0,00739	120	1,0467				
939	0,00410	939	1,0429				
1210	0,00342	1210	1,0416				
122	0,00270	122	$1,\!0407$				
959	0,00180	959	1,0395				
234	0,00031	234	1,0372				
231	0,00016	231	1,037				
4533	0,00002	4533	1,0368				
4582	0,00002	4582	1,0368				
4522	0,00000	4522	1,0368				

Verifica-se também que, os controles localizados nas barras 104 e 123 têm uma eficácia superior, quando comparados com os demais controles. Entretanto, aplicando uma ação de 100% apenas no capacitor 104 possivelmente será obtida uma MET de 5%, que representa

Barra	Sens.	CPFLOW					
de		$u_c = 1(100\%)$					
Controle	$\frac{d\lambda_{max}^*}{du_c}$	Barra	$\lambda_{max}$				
104	0,04008	104	1,0506				
123	0,01756	123	$1,0308 \\ 1,0278$				
1504	0,01255	1504					
120	0,01129	120	1,0237				
939	0,00891	939	1,0209				
1210	0,00635	1210	1,0178				
122	0,00624	122	1,0176				
959	0,00397	959	1,0148				
234	0,00061	234	1,0107				
231	0,00027	231	1,0103				
4533	0,00004	4533	1,01				
4582	0,00002	4522	1,0099				
4522	0,00000	4582	1,0099				

Tabela 12.5: Classificação e aplicação dos controles de tensão na contingência na linha (104-1503).

um aumento de mais de 4% em relação a MET obtida sem a ação dos controles.

Tabela 12.6: Classificação e aplicação dos controles de tensão na contingência na linha (225-231).

Barra	Sens.	CPFLOW					
de		$u_c = 1$	(100%)				
Controle	$\frac{d\lambda_{max}^*}{du_c}$	Barra	$\lambda_{max}$				
231	0,02655	231	1,0576				
4533	0,00410	4533	$1,\!0362$				
234	0,00406	234	$1,\!0356$				
4582	0,00358	4582	$1,\!0331$				
104	0,00076	1504	1,0321				
1504	0,00075	104	1,032				
123	0,00056	123	1,0318				
120	0,00045	120	$1,\!0317$				
939	0,00024	939	1,0314				
122	0,00018	122	1,0314				
1210	0,00017	1210	1,0313				
959	0,00011	959	$1,\!0313$				
4522	0,00000	4522	$1,\!0311$				

Para a contingência (225-231), cujo PMC é  $\lambda_{max}^* = 1,0308 \ (\approx 3\%)$ , analisando a Tabela 12.6, verifica-se que a ordem dos capacitores 1504 e 104 foi invertida, isto possivelmente ocorre pelo fato da sensibilidade  $(d\lambda_{max}^*/u_c)$  de ambos os capacitores ser aproxi-

madamente a mesma  $(d\lambda_{max}^*/u_{1504} = 0,00075 \text{ e } d\lambda_{max}^*/u_{104} = 0,00076)$ . Contudo, nota-se que a MET obtida com a aplicação de ambos os capacitores é praticamente a mesma. Verifica-se também que, o controle localizado na barra 231 têm uma eficácia superior, quando comparado com os demais controles. A aplicação deste controle possivelmente resultará em uma MET com valor de aproximadamente 5%, que representa um aumento de aproximadamente 2% em relação a MET obtida sem a ação dos controles.

Analisando as Tabelas 12.4, 12.5 e 12.6, observa-se que o método proposto classificou corretamente os controles mais efetivos considerando a disponibilidade dos mesmos, isto é, a classificação do método proposto foi a mesma da obtida utilizando o *CPFLOW*. Observa-se que, para as contingências localizadas nas linhas (101-103) e (104-1503) a ordem de eficácia manteve-se a mesma. Entretanto, para a contingência na linha (225-231), a ordem entre os capacitores 1504 e 104 foi invertida. Isso ocorre pelo fato da sensibilidade ser uma análise local e, possivelmente, pelo fato de ambos os capacitores apresentarem sensibilidades bastante próximas.

Deste modo, pode-se concluir que o método proposto apresenta resultados eficazes, levando em consideração as características não lineares do problema para calcular a sensibilidade da curva PV estimada pelo método QLook-Ahead, e identifica, de forma eficaz, os controles mais efetivos para melhorar a MET. Destaca-se que o método proposto é rápido e requer um baixo custo computacional para a análise e portanto, o mesmo pode ser adequado para aplicações em tempo real.

Entretanto, mesmo obtendo a ordem por eficácia das ações de controle, nota-se que mesmo com a aplicação de 100% da capacidade da ação dos capacitores, não foi possível obter um aumento significativo da MET nos três casos analisados. Isto ocorre pelo fato de ser realizada a aplicação unitária da ações de controle, isto é, foi analisado um controle por vez. Para a obtenção de uma melhoria mais significativa da MET, faz-se necessária a seleção de ações de controle preventivos, para que os mesmos tenham os seus valores ajustados de tal forma que seja realizada a manutenção da MET. Contudo, a seleção das ações de controle não é uma tarefa trivial, visto que um SEP pode apresentar um número elevado de controles. Para tal, neste trabalho, foi proposta a aplicação de métodos de agrupamento de dados para a obtenção de grupos de controles preventivos considerando a eficácia dos mesmos.

Para o agrupamento dos controles preventivos é aplicado o Algoritmo (7). As simulações são realizadas nas contingências críticas obtidas na fase de classificação e seleção de contingências (ver Seção 12.5). Estas contingências têm os seus controles preventivos analisados através do método proposto neste trabalho (ver Capítulo 9), e uma lista de sensibilidades S é obtida para cada contingência crítica, conforme pode ser visto nas Tabelas 12.4, 12.5 e 12.6 (coluna  $d\lambda_{max}^*/du_c$ ). O método escolhido para obter o agrupamento dos controles é o *Complete link*, pois este método apresentou melhores resultados quando comparado com os demais métodos apresentados no Capítulo 10.



Figura 12.5: Dendrograma da contingência na linha (101-103).

O Dendrograma 12.5 ilustra o agrupamento dos controles preventivos para a contingência (101-103). Os grupos são determinados considerando a similaridade na eficácia obtida pela sensibilidade calculada pelo método de classificação dos controles preventivos. Para determinar quais grupos devem ser selecionados para a etapa de ajuste das ações de controle preventivo, deve ser realizado um corte de nível. Por exemplo, caso seja realizado um corte no nível 0,003 no Dendrograma 12.5 é obtido o Dendrograma 12.6, gerando assim os seguintes grupos:

Grupo 1: 1504, 104;

Grupo 2: 123, 120;

Grupo 3: 1210, 939, 122, 959;

Grupo 4: 231, 234, 4582, 4533, 4522.

A ordem dos grupos supracitados é determinada tomando-se como base a lista de sensibilidades S, isto é, o grupo 1 é constituído pelos capacitores mais eficazes, o grupo 2 é constituído pelos capacitores que tem uma eficácia superior ao grupo 3 mas inferior ao grupo 1, e assim sucessivamente. Deste modo, cabe ao operador, ou a algum método heurístico, determinar quais são os controles, em cada grupo, a serem utilizados na manutenção da MET.



Figura 12.6: Dendrograma da contingência na linha (101-103) após o corte no nível 0,003.



Figura 12.7: Dendrograma da contingência na linha (104-1503).

O Dendrograma 12.7 ilustra o agrupamento dos controles preventivos para a contingência (104-1503). Caso seja realizado um corte no nível 0,005 no Dendrograma 12.7 é obtido o Dendrograma 12.8, gerando assim os seguintes grupos:

Grupo 1: 104;

Grupo 2: 123;

Grupo 3: 939, 1504, 120;

**Grupo 4:** 959, 122, 1210; e

Grupo 5: 231, 234, 4582, 4533, 4522.



Figura 12.8: Dendrograma da contingência na linha (104-1503) após o corte no nível 0,005.

Analisando o Dendrograma 12.9, que ilustra o agrupamento dos controles preventivos para a contingência (225-231), caso seja realizado um corte no nível 0,004, é obtido o Dendrograma 12.10, gerando assim os seguintes grupos:

Grupo 1: 231;

Grupo 2: 4582, 234, 4533;

Grupo 3: 123, 120, 1504, 104; e

Grupo 4: 122, 1210, 939, 959, 4522.



Figura 12.9: Dendrograma da contingência na linha (225-231).



Figura 12.10: Dendrograma da contingência na linha (225-231) após o corte no nível 0,004.



Figura 12.11: Localização dos capacitores e contingências críticas no sistema-teste brasileiro de 107 barras.

Conforme pode ser visto nos três dendrogramas apresentados, a metodologia proposta para agrupar os controles preventivos de acordo com a sua eficácia obteve, de forma satisfatória, os grupos dos controles preventivos mais similares. Deste modo, é possível fornecer um conjunto de grupos, dado um determinado nível de corte, onde estes são classificados de acordo com a eficácia dada pela lista de sensibilidade S. Isso possibilita a redução do número de ações de controle preventivos, dado que pode ser utilizado um ou mais controles preventivos em um grupo ou mais grupos, esta fase sendo definida pelo operador do SEP ou por algum método heurístico.

# 12.6 Classificação e Seleção dos Controles Preventivos via Abordagem Global

Até então, foi apresentada a classificação e seleção de controles preventivos para eliminar a criticalidade de apenas uma contingência por vez. Entretanto, um SEP geralmente apresenta mais de uma contingência crítica e é desejável, se possível, eliminar simultaneamente a criticalidade de todas de uma única vez. Assim, nesta seção será utilizada a metodologia proposta neste trabalho para a seleção de controles preventivos considerando todas as contingências selecionadas (ver Capítulo 11).

Conforme visto na Tabela 12.2, o sistema-teste possui apenas três contingências críticas

do ponto de vista da operação em tempo real. Entretanto, como o objetivo é também avaliar a eficácia da abordagem global, optou-se em aumentar o número de contingências críticas. Deste modo, os resultados a serem apresentados nesta seção consideram como críticas as contingências que apresentaram uma MET menor que 7%, isto é, critério para análise do SEP para estudos de planejamento da operação do SEP. Estas contingências estão descritas na Tabela 12.7 e destacadas em elipses vermelhas na Figura 12.11. As letras A e B foram inseridas para diferenciar as linhas paralelas no sistema-teste, conforme pode ser visto na Tabela 12.7, por exemplo entre as barras 100 e 101 existem duas linhas paralelas, a linha (100-101)A e a (100-101)B.

i	Contingência	$\lambda^*_{max}$
1	(100 - 101)A	1,0622
2	(100 - 101)B	1,0620
3	(101 - 102)	1,0472
4	(101 - 103)	$1,\!0364$
5	(104 - 1503)	$1,\!0097$
6	(122 - 103)	$1,\!0536$
7	(136 - 138)A	1,0656
8	(136 - 138)B	1,0623
9	(140 - 138)A	1,0642
10	(140 - 138)B	1,0606
11	(225 - 231)	1,0308
12	(231 - 4501)	1,0392
13	(233 - 320)	1,0690
14	(896 - 897)	1,0468
15	(2458 - 896)	1,0472
16	(4501 - 4522)	$1,\!0583$

Tabela 12.7: Contingências críticas.

i é a i-ésima contingência.

Inicialmente, o Algoritmo (4) foi aplicado para a obtenção da sensibilidade da MET, de cada contingência *i* na Tabela 12.7, em relação aos controles preventivos na Tabela 12.3. Após obtidas estas sensibilidades (ver Tabela 12.8), o Algoritmo (8) foi aplicado para a obtenção de um grupo contendo os controles preventivos mais eficazes para eliminar as criticalidades das contingências supracitadas.

Para tal, inicialmente são calculados o Grau de Eficácia (GE) de cada controle e a matriz de relação  $\mathbf{R}$ , como pode ser observado nas Tabelas 12.9 e 12.10, respectivamente. Analisando a Tabela 12.9, verifica-se que os controles 1504 e 104 possuem um grau de eficácia elevado em comparação aos demais controles. Possivelmente, ambos os controles resultam na manutenção da MET na maioria das contingências. Contudo, o GE não informa em quais contingências estes controles são de fato eficazes. Informação obtida através do mapeamento dos controles realizado pela matriz  $\mathbf{R}$ .

	231	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0003	0,0004	0,0004	0,0003	0,0004	0,0004	0,0266	0,0205	0,0189	0	0	0,0217
D	4582	0	0	0	0	0	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0036	0,0054	0,0047	0	0	0,006
	4533	0	0	0	0	0	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0041	0,0048	0,0034	0	0	0,0045
	4522	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	234	0,0004	0,0004	0,0005	0,0003	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0041	0,0037	0,0074	0,0001	0,0001	0,0039
2	120	0,0095	0,0097	0,0121	0,0074	0,0113	0,0105	0,0106	0,0103	0,0108	0,0107	0,0004	0,0005	0,0008	0,0016	0,0015	0,0006
	123	0,0118	0,012	0,0138	0,0088	0,0176	0,0159	0,0133	0,013	0,0136	0,0135	0,0006	0,0006	0,001	0,0024	0,0023	0,0007
-	1504	0,0205	0,0208	0,0253	0,0176	0,0126	0,0282	0,0256	0,0249	0,0259	0,0258	0,0008	0,0008	0,0015	0,0028	0,0027	0,001
n	122	0,0036	0,0037	0,0042	0,0027	0,0063	0,0007	0,0042	0,004	0,0042	0,0043	0,0002	0,0002	0,0003	0,0017	0,0017	0,0002
i de la	104	0,0201	0,0205	0,0249	0,0147	0,0401	0,0242	0,0258	0,0252	0,0259	0,0259	0,0008	0,0008	0,0015	0,0028	0,0028	0,001
0111	959	0,0023	0,0024	0,0027	0,0018	0,004	0,0005	0,0026	0,0026	0,0027	0,0027	0,0001	0,0001	0,0002	0,0032	0,0031	0,0001
	939	0,0053	0,0054	0,0062	0,0041	0,0089	0,0012	0,0059	0,0058	0,0061	0,0061	0,0002	0,0003	0,0005	0,0078	0,0076	0,0003
	1210	0,0045	0,0046	0,005	0,0034	0,0062	0,0014	0,0049	0,0047	0,0051	0,005	0,0002	0,0002	0,0004	0,0077	0,0075	0,0003
	Cont.	-	2	က	4	ю	9	7	$\infty$	6	10	11	12	13	14	15	16

em relação ao parâmetro de controle  $u_c$  considerando todas as contingências críticas. Tabela 12.8: Sensinbilidades de  $\lambda_m^*$
Barra de Controle	Grau de Eficácia (GE)
1210	3,8431
939	4,2582
959	1,8196
104	$10,\!5684$
122	1,9973
1504	10,2013
123	6,0284
120	$4,\!6558$
234	1,1325
4522	0,0000
4533	0,7995
4582	0,9414
231	4,1294

Tabela 12.9: Grau de Eficácia dos capacitores.

Na Tabela 12.10 é apresentado o mapeamento realizado pela matriz  $\mathbf{R}$  dos controles eficazes para cada contingência *i*. Lembrando que, o valor 1 representa que o controle é de fato eficaz na contingência *i*, caso contrário, o valor 0 é atribuído. Para a determinação da matriz  $\mathbf{R}$  é necessário escolher um *limiar*, este valor pode ser obtido verificando o quanto cada controle é efetivo em relação ao controle mais eficaz na lista  $S_i$  ou através da experiência do operador. Por exemplo, para a contingência 12 é obtida a lista de sensibilidades  $S_{12}$  (ver Tabela 12.8), o controle mais eficaz está localizado na barra 231 com uma sensibilidade em relação a MET de 0,0205. A determinação do *limiar* é feita pela análise de quanto o próximo controle é eficaz quando comparado com o controle na barra 231. Neste exemplo, caso o *limiar* seja igual a 80%, serão mapeados na matriz  $\mathbf{R}$ apenas os controles que tiverem seus valores superiores a 0,0164<sup>17</sup>. No caso da lista  $S_{12}$ 

Nas simulações realizadas neste trabalho, o mapeamento da eficácia dos controles em relação as contingências foi determinado para um *limiar* igual a 20%, obtendo assim a Tabela 12.10.

Para obtenção do grupo de controles preventivos para eliminar simultaneamente a criticalidade das contingências é aplicado o Algoritmo (8). Definindo 1,07 como sendo o  $\lambda_{limiar}$ , obteve-se o grupo  $\mathcal{G}$  composto pelos controles localizados na barras 104, 1504, 231, 1210 e 939. Na Tabela 12.11 são apresentados os valores aproximados do PMC ( $\lambda_{max}^*$ ) das contingências *i* obtidos pelo Algoritmo (8) para a determinação do grupo  $\mathcal{G}$ .

A validação do grupo  $\mathcal{G}$  foi realizada implementando os controles no SEP considerando 100% de sua capacidade, isto é,  $u_c = 1$  e obtendo a MET de cada contingência selecionada através do *CPFLOW*. Na Tabela 12.11 é apresentado o PMC ( $\lambda_{max}$ ) obtido

 $<sup>^{17} \</sup>rm Este$ valor é obtido multiplicando 0,0205 por 80%, representando assim uma variação de 0,0041 em relação ao controle mais eficaz.

Cont.	1210	939	959	104	122	1504	123	120	234	4522	4533	4582	231
1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
3	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
4	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
5	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
7	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
8	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
9	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
10	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
14	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
15	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

Tabela 12.10: Matriz de relação **R**.

Tabela 12.11: Análise dos PMCs obtidos após a aplicação do grupo  $\mathcal{G}$ .

i	Contingência	Aproximação	CPFLOW		
		$\lambda^*_{max}$	$\lambda_{max}$		
1	(100 - 101)A	1,1132	1,1322		
2	(100 - 101)B	$1,\!1138$	1,1322		
3	(101 - 102)	$1,\!109$	1,1328		
4	(101 - 103)	1,0767	$1,\!1066$		
5	(104 - 1503)	1,078	$1,\!1204$		
6	(122 - 103)	1,1092	$1,\!1339$		
7	(136 - 138)A	1,1286	1,1362		
8	(136 - 138)B	1,1236	$1,\!1361$		
9	(140 - 138)A	1,1278	$1,\!1357$		
10	(140 - 138)B	1,1242	$1,\!1356$		
11	(225 - 231)	1,0701	1,0801		
12	(231 - 4501)	1,0716	1,0796		
13	(233 - 320)	1,092	$1,\!1113$		
14	(896 - 897)	1,0719	1,0819		
15	(2458 - 896)	1,0722	1,0792		
16	(4501 - 4522)	$1,\!083$	1,0974		

i é a i-ésima contingência.

pelo *CPFLOW* para cada contingência. Conforme pode ser visto pelos resultados apresentados nesta tabela, a abordagem global determinou um grupo de controles preventivos capazes de eliminar a criticalidade de todas as contingências selecionadas. Isso possibilita a determinação de um número mínimo de ações de controle para a manutenção das mesmas. Destaca-se que, os controles foram obtidos considerando  $u_c = 1$ , portanto, cabe ao operador do SEP ou a algum método de otimização determinar os valores das ações dos controles selecionados.

#### 12.7 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos nas simulações das metodologias propostas neste trabalho em um sistema brasileiro reduzido de 107 barras (sistema-teste). Para tal, o capítulo foi dividido em quatro seções, na primeira foi realizada uma simulação no caso base do sistema-teste para a obtenção da MET levando em consideração os limites de potência reativa dos geradores, sendo aplicada a metodologia proposta neste trabalho, denominada *QLook-Ahead*. Para comprovar a eficiência do *QLook-Ahead*, comparações foram realizadas com o método *CPFLOW* levando em consideração os limites de potência reativa dos geradores. Os resultados obtidos mostraram que o *QLook-Ahead* estima, de forma bastante satisfatória, a MET e leva em consideração o comportamento não linear do sistema, determinando a MET de forma rápida e eficaz.

A segunda parte das simulações foi a classificação e a seleção das contingências. Para tal foi aplicado o método *QLook-Ahead*, e, para comparações, o método *CPFLOW*. Novamente, o método *QLook-Ahead* apresentou resultados bastante satisfatórios na obtenção da MET para todos os cenários simulados, quando comparado com o *CPFLOW*.

A terceira parte das simulações envolveu a classificação e a seleção dos controles preventivos. Para tal, foram aplicadas as metodologias de classificação de controles preventivos e a abordagem local para a seleção dos mesmos. Nesta etapa, foram realizadas simulações nas três contingências críticas (com METs menores que 4%) selecionadas na análise de contingências. Foram considerados disponíveis 13 capacitores *shunt* para o controle de tensão no sistema-teste. Após obtida a lista de sensibilidades S, para cada contingência, foi obtida a MET via o método *CPFLOW* e os controles foram ordenados de acordo com a sua eficácia, obtendo desta forma uma classificação dos controles mais efetivos via o método *CPFLOW*, que foi equivalente com a classificação dada pelo método proposto.

Deste modo, foi possível avaliar a robustez da metodologia proposta para classificação dos controles preventivos. O que nos leva a concluir que o método proposto é robusto, levando em consideração as características não lineares do problema para calcular a sensibilidade da curva *PV* estimada pelo método *QLook-Ahead*. O mesmo identifica de forma eficaz os controles mais efetivos para a manutenção da MET. Destaca-se que o método proposto requer um baixo custo computacional e pode ser adequado para aplicações que requerem uma análise rápida, como por exemplo, a operação em tempo real do SEP.

Visando a redução do número de ações de controle preventivo, para que posteriormente seja possível aplicar um método de otimização para ajustar os seus valores, ainda na terceira parte deste capítulo, foram realizadas simulações da metodologia proposta para a seleção de controles preventivos, levando em consideração a lista de sensibilidades S.

Para tal, para cada contingência, foi obtido um agrupamento de controles, nos quais foram agrupados os controles que apresentavam similaridade de acordo com a sua eficácia. Obtidos os agrupamentos, basta aplicar um corte de nível para determinar os grupos a serem analisados, obtendo assim uma redução bastante significativa do número de variáveis de controle. Vale destacar que, nesta última etapa, faz-se necessária a intervenção do operador do SEP ou de algum método baseado em heurísticas para determinar qual o corte de nível ideal e quais as ações de controles preventivos e grupos de controles preventivos a serem utilizados.

Na quarta parte deste capítulo foram apresentados os resultados obtidos pela abordagem global proposta nesta tese. Para tal, foram consideradas como críticas as contingências cuja MET é menor que 7%. Após obtidas as contingências, foi aplicada a metodologia proposta para a determinação de um grupo de controles preventivos capazes de eliminar a criticalidade de todas de uma única vez.

A validação do grupo foi realizada implementando os controles no SEP considerando 100% de sua capacidade, isto é,  $u_c = 1$ , e obtendo a MET de cada contingência selecionada através do *CPFLOW*. Nesta análise verificou-se que a criticalidade de todas as contingências foi eliminada, onde foi obtida uma MET maior que 7% em todos os casos. Destaca-se que este grupo pode ser considerado como uma condição inicial de um método de otimização para o cálculo ótimo dos valores das ações dos controles preventivos

### Capítulo 13

## Considerações Gerais

Foi visto nesta trabalho que o problema de estabilidade de tensão pode ser causado por pertubações, como por exemplo, falta em alguma linha de transmissão, e o mesmo pode ser analisado sob três pontos de vista: dinâmico, quase-dinâmico e estático. Dentre os três, o último é o mais abordado nas ferramentas de análise do fenômeno em questão, devido a sua baixa complexidade de modelagem e baixo custo computacional exigido nas simulações de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) de grande porte.

A Margem de Estabilidade de Tensão (MET) é vista como uma das principais medidas para a estudo da estabilidade de tensão de um SEP, através desta pode-se estudar possíveis proximidades do SEP à instabilidade de tensão, evitando assim ocorrência de possíveis colapsos de tensão.

Geralmente, a MET é determinada para diferentes contingências. Caso a  $MET_i$  de uma contingência *i* seja menor que o limiar pré-definido (*Limiar\_MET*), isto é,  $MET_i < Limiar_MET$ , medidas de ações corretivas e/ou preventivas devem ser tomadas com o objetivo de eliminar possíveis cenários que possam comprometer a estabilidade de tensão do SEP.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a análise de contingências e a seleção de controles preventivos para a manutenção da segurança do SEP no contexto de estabilidade de tensão. Para tal, foram desenvolvidas novas metodologias rápidas para a estimação da MET, considerando os limites reativos dos gerador, e para a classificação e seleção de controles preventivos para a manutenção da MET.

Para a obtenção da MET, foi estudada a metodologia *Look-Ahead* (CHIANG; WANG; FLUECK, 1997). Por se tratar de uma metodologia relativamente rápida, ela pode ser adequada para o problema de análise de segurança em tempo real. Entretanto, essa metodologia não leva em consideração os limites de potência reativa dos geradores. Para tal, neste doutorado foi desenvolvida uma nova metodologia para a estimação da MET levando em consideração os limites de potência reativa dos geradores. Esta metodologia foi

denominada *QLook-Ahead*. Basicamente, o *QLook-Ahead* estima o carregamento limite  $(\lambda_{Q_{lim}})$  no qual ocorre a violação de potência reativa dos geradores do sistema  $(Q_{lim})$ . A partir do ponto  $Q_{lim}$  os geradores perdem a capacidade de fornecimento de potência reativa e a tensão terminal da máquina deixa de ser controlada e passa a ser variável. Uma vez determinado este ponto, efetua-se a troca do tipo de barra  $(PV \to PQ)$  e estima-se novamente a MET. Este procedimento é realizado até o ponto de carregamento  $\lambda_{Q_{lim}}$  seja maior que o Ponto de Máximo Carregamento (PMC).

Vale destacar que o método QLook-Ahead leva em consideração o comportamento não linear do SEP, isto é, ao invés de utilizar de aproximações lineares para determinar o ponto  $Q_{lim}$ , como por exemplo em (YORINO; LI; SASAKI, 2005), a metodologia proposta utiliza aproximações quadráticas para determinar tal finalidade, obtendo assim uma estimava mais realista do mesmo.

Obtida a MET, faz-se necessário adotar ações de controle preventivo para a manutenção da mesma. Deste modo, é necessário determinar as ações de controle mais eficazes. A maioria das técnicas de seleção dos melhores controles é baseada na análise de sensibilidade nas vizinhanças do PMC. Entretanto, acredita-se que o estudo das contingências que causam uma grande perturbação no SEP, quando feito através da análise da sensibilidade do PMC do caso base, não reflete o impacto de ações de controle quando estas contingências são levadas em consideração. Por outro lado, o cálculo do PMC para todas as contingências resulta em um grande esforço computacional.

Dentro deste prisma, um método rápido para a classificação e seleção de controles preventivos, no âmbito de análise de estabilidade de tensão em SEPs, foi desenvolvido neste doutorado. Para tal, na etapa de classificação de controles preventivos, calculase a sensibilidade da MET estimada pelo método *QLook-Ahead* em relação à variação de algum parâmetro de controle preventivo. Após a obtenção da sensibilidade de cada elemento de controle, os mesmos são classificados em ordem decrescente de acordo com o seu grau de sensibilidade, obtendo assim uma lista de sensibilidades S, cujos controles estão classificados de acordo com a sua eficácia.

Após a classificação dos controles preventivos, faz-se necessária a seleção daqueles que são mais eficazes para a manutenção da MET, deste modo, neste trabalho foram desenvolvidas duas técnicas para a seleção dos controles preventivos.

Inicialmente, foi desenvolvida uma metodologia para reduzir o número de controles preventivos a serem utilizados na manutenção de uma única contingência no SEP, cujos ajustes são realizados, geralmente, via métodos de otimização. Para a redução do número de controles preventivos, foi proposto o agrupamento dos mesmos, de tal forma que, cada grupo seja composto pelos controles preventivos que são de alguma forma similares. Esta estratégia foi denominada de **Abordagem Local** e baseia-se na informação da sensibilidade da MET em relação aos controles preventivos e no agrupamento de dados hierárquico. O agrupamento de dados é aplicado para determinar os grupos de controles preventivos que sejam similares de acordo com a sensibilidade  $d\lambda_{max}^*/du_{cap_c}$ . Após a aplicação da metodologia desenvolvida, é obtido um agrupamento de controles preventivos classificados de forma hierárquica. Para a seleção dos grupos de controles preventivos, é realizado um corte de nível no agrupamento obtido, gerando-se **k** grupos. Obtidos estes grupos, cabe ao operador do SEP, ou a um método heurístico, determinar quais são os controles em cada grupo a serem utilizados via o método de otimização para ajustar os controles selecionados.

Contudo, é sabido que um SEP possui, na maioria dos casos, mais de uma contingência crítica. Desta forma, se considerada a distância geométrica e elétrica das ações dos controles preventivos os mesmos podem eliminar simultaneamente a criticalidade de mais de uma contingência. Considerando esta hipótese, acredita-se que é possível determinar um conjunto mínimo de ações de controles preventivos para eliminar, simultaneamente, todas as contingências críticas do SEP. Para tanto, após obtidas as sensibilidades da MET de todas as contingências críticas em relação às variáveis de controle, na segunda abordagem foi desenvolvida uma nova metodologia capaz de determinar um grupo composto por um número mínimo de controles preventivos para eliminar a criticalidades de todas as contingências no SEP. Esta nova abordagem foi denominada de **Abordagem global**.

Esta abordagem fornece ao operador do SEP uma nova forma de tratar o problema de seleção de controles para a manutenção da MET na análise de contingências. O grupo obtido contém um número mínimo de controles preventivos capazes de eliminar a criticalidade das contingências, cabendo assim ao operador avaliar a factibilidade da aplicação dos mesmos. Uma alternativa eficaz para otimização das ações de controle preventivo é utilizar o grupo obtido como solução inicial em um problema de otimização, e ajustar as ações através de um FPO.

Mesmo que ambas as abordagens estejam baseadas na análise de sensibilidade proposta neste doutoramento, as mesmas são facilmente ajustáveis para o emprego de outras técnicas de análise de sensibilidade. Obtidos estes grupos, cabe ao operador do SEP, ou a um método heurístico, determinar quais são os controles em cada grupo a serem utilizados via o método de otimização para ajustar os controles selecionados.

As metodologias desenvolvidas foram testadas no sistema brasileiro reduzido de 107 barras, que é dividido em 3 áreas (Sul, Sudeste e Mato Grosso) e os resultados obtidos mostraram que as metodologias propostas são rápidas e eficazes, quando comparadas com o método de fluxo de carga continuado com limites de potência reativa nos geradores (*CPFLOW*).

#### 13.1 Artigos Aceitos em periódicos

**M. R. Mansour**; E. Geraldi; L. F. C. Alberto; R. Ramos; A New and Fast Method for Preventive Control Selection in Voltage Stability Analysis., IEEE Transactions on Power

Systems, 2013.

#### 13.2 Artigo Publicados e Aceitos em Congressos

E. Geraldi; R. Ramos; M. R. Mansour. Desenvolvimento de um Método Computacional para Resolução Numérica de Sistemas Lineares Esparsos Utilizando uma Abordagem Orientada a Objetos, 18° SIICUSP - 18° SIICUSP Simpósio Internacional de Iniciação Científica, 2010.

M. R. Mansour; E. Geraldi; R. Ramos; L. F. C. Alberto; *Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o cálculo de fluxo de carga continuado em sistemas de potência utilizando uma programação orientada a objetos*, XIV ERIAC - XIV Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ, Ciudad del Este, Paraguay, 2011.

**M. R. Mansour**; L. F. C. Alberto; R. Ramos; *Método Rápido para a Seleção de Controles Preventivos para Análise de Estabilidade de Tensão.*, XXI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica , Florianópolis-SC, Brasil, 2011.

M. R. Mansour; E. Geraldi; R. Ramos; L. F. C. Alberto; *Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a seleção de controles preventivos para análise de estabilidade de tensão utilizando uma programação orientada a objetos*, CLAGTEE 2011 - Ninth Latin-American Congress on Electricity Generation and transmission, Marde Plata, Argentina.

**M. R. Mansour**; L. F. C. Alberto; R. Ramos; *Look-Ahead Based Method for Selection of Preventive Control of Voltage Stability Analysis.*, IEEE International Conference on Industrial Technology - ICIT, Athens, Greece, 2012.

M. R. Mansour; L. F. C. Alberto; R. Ramos; *Identifying Groups of Preventive Controls for a Set of Critical Contingencies in the Context of Voltage Stability.*, IEEE International Symposium on Circuits and Systems - ISCAS, Beijing, China, 2013. (Artigo Aceito).

**M. R. Mansour**; L. F. C. Alberto; R. Ramos; A Global Group of Preventive Controls for Critical Contingencies in the Context of Voltage Stability., IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, British Columbia, Canada, 2013. (Artigo Aceito).

M. R. Mansour; L. F. C. Alberto; R. Ramos; A Tool to Group and Coordinate Preventive Controls Actions on the Context of Voltage Stability Assessment., Institute for Research and Education in Power Systems - IREP, Island of Crete, Greece, 2013. (Artigo Aceito).

#### **13.3** Artigos Pendentes

Outros dois artigos para periódicos estão em fase de escrita sendo um deles a respeito da abordagem global de seleção de controles preventivos e o outro abordando toda a ferramenta desenvolvida nesta tese para a análise de segurança do SEP no contexto de estabilidade de tensão.

## Capítulo 14

### Perspectivas Futuras

Não obstante o desempenho satisfatório apresentado pelas metodologias propostas, este trabalho ainda apresenta lacunas a serem preenchidas e novas que foram abertas ao longo do desenvolvimento da tese. Desta forma, para que este trabalho, em um futuro próximo, seja viabilizado para a utilização em estudos de operação, algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros nesta área são propostas.

Em início, apresenta-se a necessidade da inclusão de critérios de convergência em caso de aparecimento de Bifurcações Induzidas por Limites (BILs) na metodologia *QLook-Ahead* desenvolvida nesta tese. Após determinado o ponto no qual ocorre a BIL, faz-se necessário determinar controle preventivos para a manutenção da MET. Portanto, um outro ramo de pesquisa seria análise deste ponto para a seleção dos controles preventivos.

Um outro aspecto interessante é a determinação de controles corretivos para as contingências com ausência de solubilidade, dentre as análises realizadas, houve casos que contingências não apresentaram solubilidade por possuírem MET negativa. Portanto, sugere-se como pesquisa a incorporação no método *QLook-Ahead* a obtenção da MET negativa destas contingências e a seleção de controles preventivos para a restauração da solubilidade das mesmas.

A seleção dos controles preventivos proposta nesta tese, tanto na abordagem local quanto na global, não leva em consideração os aspectos econômicos relacionados a implantação dos mesmos no SEP. Como este é um item a ser considerado na seleção dos controles preventivos, sugere-se como pesquisa a incorporação de análise de custo por controle na seleção dos controles. Uma outra informação necessária é a verificação do impacto da seleção dos controles. Em diversos trabalhos na literatura é apresentado que quando os controles de tensão aplicados simultaneamente, podem apresentar efeito negativo na MET. Portanto, sugere-se estudos destes casos.

A fim de fornecer um dendrograma mais informativo ao operador, sugere-se também o desenvolvimento de heurísticas para a determinação automática de um corte de nível ótimo na abordagem local.

# Parte V

Textos de Suporte

# Referências

- AFFONSO, C. N.; DA SILVA, L. C. P. Melhoria da margem de estabilidade de tensão via minimização das perdas e maximização das reservas de potência reativa. In: XV CBA CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2004, Gramado, Brasil. Anais... [S.l.: s.n.], 2004.
- AGRAWAL, R.; GEHRKE, J.; GUNOPULOS, D.; RAGHAVAN, P. Automatic subspace clustering of high dimensional data for data mining applications. SIGMOD Rec., New York, NY, USA, v.27, n.2, p.94–105, June 1998.
- AJJARAPU, V. Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control. [S.l.]: Springer, 2006.
- AJJARAPU, V.; CHRISTY, C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis. Power Industry Computer Application Conference, 1991. Conference Proceedings, [S.l.], p.304 –311, May 1991.
- AJJARAPU, V.; FENG, Z. A novel approach for voltage collapse analysis and control. In: POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 1998. PROCEEDINGS. POWERCON '98. 1998 INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 1998. Anais... [S.l.: s.n.], 1998. v.2, p.1499 –1503 vol.2.
- ALBUQUERQUE, M. de Almeida e. Seleção de contingências com relação à estabilidade de tensão para análise de segurança em tempo real. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — UNICAMP, Campinas, SP.
- ALSAFIH, H.; DUNN, R. Determination of coherent clusters in a multi-machine power system based on wide-area signal measurements. In: POWER AND ENERGY SOCI-ETY GENERAL MEETING, 2010 IEEE, 2010. Anais... [S.l.: s.n.], 2010. p.1 –8.
- ALVES, D. A.; CASTRO, C. A.; SILVA, L. C. P.; COSTA, V. F. Determinação do ponto de máximo carregamento de sistemas de potência, utilizando o fluxo de carga desacolpado parametrizado. Revista de Controle & Automação, [S.l.], v.14, n.2, Junho 2003.

- ALVES, W. F. Proposição de Sistemas-Teste para Análise Computacional de Sistemas de Potência. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidades Federal Fluminense.
- ANDRADE, A.; BARBOSA, F. Detection of the point of voltage collapse using the FSQV method. In: POWER TECH, 2005 IEEE RUSSIA, 2005. Anais... [S.l.: s.n.], 2005. p.1 –7.
- ANEEL. "REN RESOLUCÃO No 676 de 19/12/2003 (ANEEL) publicado em 22/12/2003". Disponível em: http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2001505.pdf. Acessado em: 12/04/2012.
- ASSIS, T.; FALCAO, D.; TARANTO, G. Dynamic Transmission Capability Calculation Using Integrated Analysis Tools and Intelligent Systems. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.22, n.4, p.1760–1770, 2007.
- ASTEIFEL, M.; OBERG, R. Application Development Using C# and .Net. [S.1.]: Prentice Hall PTR, 2002. (The Integrated .Net Series from Object Innovations and Prentice Hall Ptr).
- AVALOS, R.; CANIZARES, C.; MILANO, F.; CONEJO, A. Equivalency of Continuation and Optimization Methods to Determine Saddle-Node and Limit-Induced Bifurcations in Power Systems. Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on, [S.l.], v.56, n.1, p.210–223, jan. 2009.
- BALANATHAN, R.; PAHALAWATHTHA, N.; ANNAKKAGE, U.; SHARP, P. Undervoltage load shedding to avoid voltage instability. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, [S.l.], v.145, n.2, p.175–181, mar 1998.
- BALU, N.; BERTRAM, T.; BOSE, A.; BRANDWAJN, V.; CAULEY, G.; CURTICE, D.; FOUAD, A.; FINK, L.; LAUBY, M. G.; WOLLENBERG, B. F.; WRUBEL, J. N. Online power system security analysis. Proceedings of The IEEE, [S.l.], v.80, p.262–282, 1992.
- BARQUIN, J.; GOMEZ, T.; PAGOLA, F. Estimating the loading limit margin taking into account voltage collapse areas. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.10, n.4, p.1952 –1962, nov. 1995.
- BASS, L.; CLEMENTS, P.; KAZMAN, R. Software Architecture in Practice. [S.1.]: Pearson Education, 2012. (SEI Series in Software Engineering).
- BEDRINANA, M.; CASTRO, C.; BEDOYA, D. Maximization of voltage stability margin by optimal reactive compensation. In: POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING - CONVERSION AND DELIVERY OF ELECTRICAL ENERGY IN THE 21ST CENTURY, 2008 IEEE, 2008. Anais... [S.l.: s.n.], 2008. p.1 –7.

BERKHIN, P. Survey Of Clustering Data Mining Techniques. [S.l.: s.n.], 2002.

- BHATIA, S.; DEOGUN, J. Conceptual clustering in information retrieval. Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on, [S.l.], v.28, n.3, p.427 –436, jun 1998.
- BOBROWSKI, L.; BEZDEK, J. c-means clustering with the ll and l infin; norms. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, [S.l.], v.21, n.3, p.545 –554, may/jun 1991.
- CANIZARES, C. Voltage stability assessment, procedures and guides. **IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publication**, [S.1.], 2001.
- CANIZARES, C.; DE SOUZA, A.; QUINTANA, V. Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse. **Power Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.11, n.3, p.1441–1450, aug 1996.
- CAO, G.-Y.; CHEN, C. Novel Techniques for Continuation Method to Calculate the Limit-induced Bifurcation of the Power Flow Equation. Electric Power Components and Systems, [S.l.], v.38, n.9, p.1061–1075, 2010.
- CARDOSO, C.; PIRES, Y.; MORAIS, J.; KLAUTAU, A. Hierarchical Agglomerative Clustering of Short-Circuit Faults in Transmission Lines. In: BRAZILIAN SYMPO-SIUM ON NEURAL NETWORKS, 2008., 2008, Washington, DC, USA. Proceedings... IEEE Computer Society, 2008. p.87–92. (SBRN '08).
- CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S.; ROSEN, D. B. Fuzzy ART: fast stable learning and categorization of analog patterns by an adaptive resonance system. Neural Netw., Oxford, UK, UK, v.4, n.6, p.759–771, Nov. 1991.
- CASTRO, C. A. **Curso de análise de alteração da rede**. http://www.fee.unicamp.br/cursos/it615/Material-IT615-2011.zip. Acessado em: 08/09/2011.
- CASTRO, C. A.; BRAZ, L. M. C. Uma nova abordagem para a solução do problema de fuxo de carga pelo método de Newton com otimização de passo. Revista de Controle & Automação, [S.l.], v.8, n.3, p.121–133, setembro-dezembro 1997.
- CHEESEMAN, P.; STUTZ, J. Advances in knowledge discovery and data mining. Menlo Park, CA, USA: American Association for Artificial Intelligence, 1996. 153–180p.
- CHEN, L.; MIN, Y. Limit Induced Bifurcation Caused by SVC Capacity Limit. In: POWER TECH, 2007 IEEE LAUSANNE, 2007. Anais... [S.l.: s.n.], 2007. p.250 – 254.

- CHIANG, H.-D.; FLUECK, A.; SHAH, K.; BALU, N. CPFLOW: a practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.10, n.2, p.623–634, May 1995.
- CHIANG, H.-D.; JEAN-JUMEAU, R. Toward a practical performance index for predicting voltage collapse in electric power systems. **Power Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.10, n.2, p.584–592, may 1995.
- CHIANG, H.-D.; WANG, C.-S.; FLUECK, A. Look-ahead voltage and load margin contingency selection functions for large-scale power systems. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.12, n.1, p.173–180, Feb 1997.
- COSTA, J. A. F. Classificação Automática e Análise de Dados por Redes Neurais Auto-Ortanizáveis. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação (FEEC/UNICAMP).
- DAVODI, M.; REIHANI, E.; NOROUZIZADEH, R. Power System Decomposition Based on Hierarchical Tree Structure. In: POWER AND ENERGY ENGINEERING CON-FERENCE (APPEEC), 2010 ASIA-PACIFIC, 2010. Anais... [S.l.: s.n.], 2010. p.1 -4.
- DESTER, M. Estudo para classificação de contingencies sob o aspecto da estabilidade de tensão. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP.
- DOBSON, I.; LU, L. New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.8, n.3, p.905–913, Aug 1993.
- DUDA, R. O.; HART, P. E.; STORK, D. G. Pattern Classification (2nd Edition). 2.ed. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2001.
- DY LIACCO, T. The Adaptive Reliability Control System. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.PAS-86, n.5, p.517–531, may 1967.
- EISEN, M. B.; SPELLMAN, P. T.; BROWN, P. O.; BOTSTEIN, D. Cluster analysis and display of genome-wide expression patterns. Proceedings of the National Academy of Sciences, Department of Genetics, Stanford University School of Medicine, 300 Pasteur Avenue, Stanford, CA 94305, USA., v.95, n.25, p.14863–14868, Dec. 1998.
- EJEBE, G.; IRISARRI, G.; MOKHTARI, S.; OBADINA, O.; RISTANOVIC, P.; TONG, J. Methods for contingency screening and ranking for voltage stability analysis of power systems. **Power Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.11, n.1, p.350 –356, feb 1996.

- EKWUE, A.; WAN, H.; CHENG, D.; SONG, Y. Singular value decomposition method for voltage stability analysis on the National Grid system (NGC). International Journal of Electrical Power & amp; Energy Systems, [S.l.], v.21, n.6, p.425 – 432, 1999.
- EL-SAMAHY, I. Secure Provision of Reactive Power Ancillary Services in Competitive Electricity Markets. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Electrical and Computer Engineering - Waterloo.
- ESTER, M.; KRIEGEL, H.-P.; S, J.; XU, X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In: SECOND INTERNATIONAL CON-FERENCE ON KNOWLEDGE DISCOVERY AND DATA MINING, 1996. Anais... AAAI Press, 1996. p.226–231.
- ARNOLD, E. (Ed.). Cluster Analysis. 3.ed. [S.l.: s.n.], 1993.
- FENG, Z.; AJJARAPU, V.; LONG, B. Identification of voltage collapse through direct equilibrium tracing. IEEE Transactions on Power Systems, [S.l.], v.1, n.15, p.342– 349, 2000.
- FENG, Z.; AJJARAPU, V.; MARATUKULAM, D. J. A practical minimum load shedding strategy to mitigate voltage collapse. IEEE Transactions on Power Systems, [S.I.], v.4, n.14, p.1285–1291, 1998.
- FENG, Z.; AJJARAPU, V.; MARATUKULAM, D. J. A comprehensive approach for preventive and corretive control to mitigate voltage collapse. IEEE Transactions on Power Systems, [S.l.], v.3, n.15, p.791–798, 2000.
- FERREIRA, A. S. Q. Estratégias de controle preventivo para a manutenção de margens de segurança com relação à estabilidade de tensão em tempo real. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — UNICAMP, Campinas, SP.
- FERREIRA, C. A.; COSTA, V. M.; DE SOUZA B, B.; REIS, A. L. S. Uma nova abordagem para avaliação do ponto de máximo carregamento de sistemas elétricos de potência. In: XV CBA - CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2004, Gramado, Brasil. Anais... [S.l.: s.n.], 2004.
- FERREIRA, L. C. A.; SOUZA, A. C. Z.; GRANVILLE, S. Uma proposta para implantação de controle automático de colapso de tensão em sistemas elétricos de potência. In: XII CBA - CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 1998, Uberlândia. Anais... [S.l.: s.n.], 1998.
- FOSSO, O.; FLATABO, N.; HAHAVIK, B.; HOLEN, A. Comparison of Methods for Calculation of Margins to Voltage Instability. In: ATHENS POWER TECH, 1993. APT 93. PROCEEDINGS. JOINT INTERNATIONAL POWER CONFERENCE, 1993.
  Anais... [S.l.: s.n.], 1993. v.1, p.216 –221.

- GAN, G.; MA, C.; WU, J. **Data Clustering**: theory, algorithms, and applications (asasiam series on statistics and applied probability). [S.I.]: SIAM, 2007.
- GAO, B.; MORISON, G. K.; KUNDUR, P. Voltage stability evaluation using modal analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, [S.l.], v.7, p.1529–1542, 1992.
- GAO, B.; MORISON, G. K.; KUNDUR, P. Toward the development of a systematic approach for voltage stability assessment of large-scale power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, [S.l.], v.11, p.1314–1324, 1996.
- GARCIA, A. V.; ALMEIDA, M. C. Identificação de ramos críticos para estabilidade de tensão baseada na análise modal do sistema. In: XV SNPTEE - SEMINÁRIO NACI-ONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 1999, Foz do Iguaçu, Brasil. Anais... [S.l.: s.n.], 1999.
- GLOBO, O. Relembre os apagões mais recentes no Brasil. http://oglobo.globo.com/economia/mat/2011/02/04/relembre-os-apagoes-mais-recentes-no-brasil-923736403.asp. Acessado em: 08/09/2011.
- GOIL, S.; NAGESH, H.; CHOUDHARY, A. **MAFIA**: efficient and scalable subspace clustering for very large data sets. [S.l.: s.n.], 1999.
- GOLUB, G. H.; LOAN, C. F. V. Matrix Computations. 3rd.ed. [S.l.]: The Johns Hopkins University Press, 1996.
- GRANVILLE, S.; MELLO, J. C. O.; MELO, A. C. G. Application of interior point methods to power flow unsolvability. IEEE Power Systems, Trans on, [S.l.], v.11, p.1096–1103, 1996.
- GREENE, S.; DOBSON, I.; ALVARADO, F. Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.12, n.1, p.262–272, Feb 1997.
- GUEDES, R.; ALBERTO, L.; BRETAS, N. Power System Low-Voltage Solutions Using an Auxiliary Gradient System for Voltage Collapse Purposes. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.1.], v.20, n.3, p.1528–1537, Aug. 2005.
- HALE, J.; KOçAK, H. Dynamics and Bifurcations. [S.l.]: Springer-Verlag, 1991.
- HASELGROVE, C. B. The Solution of Non-Linear Equations and of Differential Equations with Two-Point Boundary Conditions. The Computer Journal, [S.l.], v.4, n.3, p.255–259, 1961.
- HATHAWAY, R.; BEZDEK, J.; HU, Y. Generalized fuzzy c-means clustering strategies using Lp norm distances. Fuzzy Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.8, n.5, p.576–582, oct 2000.

- HERRERO, J.; VALENCIA, A.; DOPAZO, J. A hierarchical unsupervised growing neural network for clustering gene expression patterns. Bioinformatics, [S.l.], v.17, n.1, p.126–136, 2001.
- HINNEBURG, A.; KEIM, D. A. Optimal Grid-Clustering: towards breaking the curse of dimensionality in high-dimensional clustering. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON VERY LARGE DATA BASES, 25., 1999, San Francisco, CA, USA. Proceedings... Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999. p.506–517. (VLDB '99).
- HISKENS, I.; TAYLOR, C. Criteria and countermeasures for voltage collapse'. Paris: CIGRE Task Force 38.02.12, 1995.
- HUNEAULT, M.; FAHMIDEH-VOJDANI, A.; JUMAN, M.; CALDERON, R.; GALI-ANA, F. The Continuation Method in Power System Optimization: applications to economy-security functions. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.PAS-104, n.1, p.114–124, jan. 1985.
- IWAMOTO, S.; TAMURA, Y. A Fast Load Flow Method Retaining Nonlinearity. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.PAS-97, n.5, p.1586 – 1599, sept. 1978.
- IWAMOTO, S.; TAMURA, Y. A Load Flow Calculation Method for Ill-Conditioned Power Systems. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.PAS-100, n.4, p.1736 –1743, april 1981.
- JAIN, A. K.; MURTY, M. N.; FLYNN, P. J. Data clustering: a review. ACM Comput. Surv., New York, NY, USA, v.31, n.3, p.264–323, Sept. 1999.
- JEAN-JUMEAU, R.; CHIANG, H.-D. Parameterizations of the load-flow equations for eliminating ill-conditioning load flow solutions. **Power Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.8, n.3, p.1004 –1012, aug 1993.
- JUAREZ, C.; MESSINA, A.; CASTELLANOS, R.; ESPINOSA-PEREZ, G. Characterization of Multimachine System Behavior Using a Hierarchical Trajectory Cluster Analysis. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.26, n.3, p.972 –981, aug. 2011.
- KANUNGO, T.; MOUNT, D. M.; NETANYAHU, N. S.; PIATKO, C. D.; SILVERMAN, R.; WU, A. Y. A local search approximation algorithm for k-means clustering. Comput. Geom. Theory Appl., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v.28, n.2-3, p.89–112, June 2004.
- KESSEL, P.; GLAVITSCH, H. Estimating the Voltage Stability of a Power System. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.1, n.3, p.346–354, july 1986.

- KOHONEN, T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. Biological Cybernetics, [S.l.], v.43, n.1, p.59–69, Jan. 1982.
- KOHONEN, T.; HYNNINEN, J.; KANGAS, J.; LAAKSONEN, J. **SOM PAK**: the self-organizing map program package. 1996.
- KRAUER, T. R. O. Uma metodologia de análise de sistemas de potência aplicando o continuado QV e PV no ambiente de planejamento de sistemas elétricos. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — EFEI, Itajubá, MG.
- KUBIVCEK, M. Algorithm 502: dependence of solution of nonlinear systems on a parameter [c5]. ACM Trans. Math. Softw., New York, NY, USA, v.2, n.1, p.98–107, 1976.
- KUMANO, T. Detection of closest critical point and sub-optimal preventive controle of voltage stability. Electrical Engineering in Japan, [S.l.], v.111, p.89–97, 1991.
- KUMANO, T.; YOKOYAMA, A.; SEKINE, Y. Fast monitoring and optimal preventive control of voltage instability. Electrical Power and Energy Systems, [S.l.], v.1, p.117–125, 1994.
- KUNDUR, P.; BALU, N. **Power System Stability and Control**. [S.l.]: IEEE, 1998. (Epri Power System Engineering Series).
- KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSSON, G.; BOSE, A.; CA-NIZARES, C.; HATZIARGYRIOU, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; VAN CUTSEM, T.; VITTAL, V. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.19, n.3, p.1387 – 1401, aug. 2004.
- KWATNY, H.; FISCHL, R.; NWANKPA, C. Local bifurcation in power systems: theory, computation, and application. Proceedings of the IEEE, [S.l.], v.83, n.11, p.1456 -1483, nov 1995.
- LEITE, L. C. G.; COSTA, V. M. Fluxo de potência continuado via equações de injeção de corrente. **Revista de Controle & Automação**, [S.l.], v.14, n.4, Dezembro 2003.
- LI, H.; CHIANG, H.-D.; TONG, J. An On-Line Tool for Voltage Stability Assessment and Control of Large-Scale Power Systems. **IREP Symposium**, [S.l.], p.1–11, Aug 2004.
- LI, S.-H.; CHIANG, H.-D. Look-ahead Q-constrained load margin for large-scale power systems. In: POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING - CONVER-SION AND DELIVERY OF ELECTRICAL ENERGY IN THE 21ST CENTURY, 2008 IEEE, 2008. Anais... [S.l.: s.n.], 2008. p.1–6.

- LIMA GUEDES, R. B. de. Aplicação de Métodos Estáticos para Estudo do Colapso de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo.
- LIMA LOPES, B. I. de. ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE PO-TÊNCIA NO HORIZONTE DE CURTO E LONGO PRAZOS. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG.
- LOF, P.-A.; ANDERSSON, G.; HILL, D. Voltage stability indices for stressed power systems. **Power Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.8, n.1, p.326–335, feb 1993.
- LOF, P.-A.; ANDERSSON, G.; HILL, D. Voltage dependent reactive power limits for voltage stability studies. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.10, n.1, p.220 –228, feb 1995.
- LOF, P.-A.; SMED, T.; ANDERSSON, G.; HILL, D. Fast calculation of a voltage stability index. **Power Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.7, n.1, p.54–64, Feb 1992.
- LONG, B.; AJJARAPU, V. The sparse formulation of ISPS and its application to voltage stability margin sensitivity and estimation. IEEE Transactions on Power Systems, [S.l.], v.3, n.14, p.944–957, 1999.
- MACQUEEN, J. B. Some Methods for Classification and Analysis of MultiVariate Observations. In: BERKELEY SYMPOSIUM ON MATHEMATICAL STATISTICS AND PROBABILITY, 1967. Proceedings... University of California Press, 1967. v.1, p.281–297.
- MALACHI, Y.; SINGER, S. A genetic algorithm for the corrective control of voltage and reactive power. **Power Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.21, n.1, p.295–300, Feb. 2006.
- MAO, J.; JAIN, A. A self-organizing network for hyperellipsoidal clustering (HEC). Neural Networks, IEEE Transactions on, [S.l.], v.7, n.1, p.16–29, jan 1996.
- MARTINS L. F. B. ; MARTINS, A. C. P. Análise do Desempenho dos Métodos do Fuxo de Carga Continuado e do Look Ahead Modificados. In: BOOK OF ABSTRACTS AND PROCEEDING OF THE 8TH LATINA AMERICAN CONGRESS: ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 2009. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2009. p.1 –7.
- MEI, K.; ROVNYAK, S.; ONG, C.-M. Clustering-Based Dynamic Event Location Using Wide-Area Phasor Measurements. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.23, n.2, p.673 –679, may 2008.

- METZ, J. Interpretação de Clusters Gerados por Algoritmos de Clustering HIerárquico. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - ICMC.
- MISHRA, N.; RON, D.; SWAMINATHAN, R. A New Conceptual Clustering Framework. 2004.
- MOGHAVVEMI, M.; FARUQUE, M. Power system security and voltage collapse: a line outage based indicator for prediction. International Journal of Electrical Power & amp; Energy Systems, [S.l.], v.21, n.6, p.455 – 461, 1999.
- MONTICELLI, A. J. Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.
- MORISON, G.; GAO, B.; KUNDUR, P. Voltage stability analysis using static and dynamic approaches. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.8, n.3, p.1159 -1171, aug 1993.
- MORISON, K.; WANG, L.; KUNDUR, P. Power system security assessment. Power and Energy Magazine, IEEE, [S.l.], v.2, n.5, p.30–39, Sept.-Oct. 2004.
- MOUNTFORD, J. Practical applications of optimal power flow. Optimal Power Flow -Invaluable Tool or Expensive Toy? (Digest No.: 1997/102), IEE Colloquium on, [S.l.], p.3/1–3/7, May 1997.
- MURTAGH, F. A survey of recent advances in hierarchical clustering algorithms. Computer Journal, [S.l.], v.26, n.4, p.354–359, 1983.
- OLIVEIRA BUSSAB, W. de; SHIZUE MIAZAKI Édina; ANDRADE, D. F. de. Introdução à Análise de Agrupamentos. [S.l.]: Associação Brasileira de Estaística (ABE,, 1990.
- OLIVEIRA, K. R. C. de. Método Rápido para Avaliação da Margem de Estabilidade de Tensão devido a Bifurcação de Hopf. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- ONS. Submódulo 23.3: diretrizes e critérios para estudos elétricos. 2011.
- OVERBYE, T. Computation of a practical method to restore power flow solvability. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.10, n.1, p.280 –287, feb 1995.
- PAIXãO, R. L. D. A COMPENSAÇÃO SÉRIE CHAVEADA COMO SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DO COLAPSO TRANSITÓRIO DE TENSÃO NA INTERLIGAÇÃO NORTE-NORDESTE. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UnB.

- QUINTELA, A. S. Estudo de indices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e aplicação na seleção de contingencias. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UNICAMP, Campinas, SP.
- SANTOS, C. J. R. dos. Método Rápido Para Avaliação da Margem de Estabilidade de Tensão Considerando os Limites de Potência Reativa dos Geradores. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo.
- SATSANGI, S.; SAINI, A.; SARASWAT, A. Voltage control areas for reactive power management using clustering approach in deregulated power system. In: SUSTAINA-BLE ENERGY AND INTELLIGENT SYSTEMS (SEISCON 2011), INTERNATIO-NAL CONFERENCE ON, 2011. Anais... [S.l.: s.n.], 2011. p.409 –415.
- SAUER, P.; PAI, M. Power system steady-state stability and the load-flow Jacobian. **Power Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.5, n.4, p.1374 –1383, nov 1990.
- SAVULESCU, S. C. Real-time stability in power systems Techniques for early detection of the risk of blackout. [S.l.]: Springer-Verlag, 2006.
- SCHLUETER, R.; HU, I.-P.; CHANG, M.-W.; LO, J.; COSTI, A. Methods for determining proximity to voltage collapse. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.6, n.1, p.285 –292, feb 1991.
- SELIM, S. Z.; ISMAIL, M. A. K-Means-Type Algorithms: a generalized convergence theorem and characterization of local optimality. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, [S.l.], v.PAMI-6, n.1, p.81–87, jan. 1984.
- SEYDEL, R. From Equilibrium to chaos: practical bifurcation and stability analysis. NY, USA: Elseiver, 1947.
- SILVA, L. Uma Expansão dos Métodos da Curva PV e de Análise Modal Estática para o Estudo da Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — UNICAMP, Campinas, SP.
- SILVA, L. C. P.; DA COSTA, V. F. Uma metodologia estática para identificação do ponto de colapso de tensão incluindo características de regime permanente dos componentes dinâmicos do sistema de potência. In: XV SNPTEE - SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 1999, Foz do Iguaçu, Brasil. Anais... [S.l.: s.n.], 1999.
- SNELL, J.; TIDWELL, D.; KULCHENKO, P. Programming Web Services with SOAP. [S.l.]: O'Reilly Media, 2009.

- SONG, S.-H.; LEE, H.-C.; YOON, Y. T.; MOON, S.-I. Cluster design compatible with market for effective reactive power management. In: POWER ENGINEERING SOCI-ETY GENERAL MEETING, 2006. IEEE, 2006. Anais... [S.l.: s.n.], 2006. p.7 pp.
- STOTT, B.; ALSAC, O.; MONTICELLI, A. J. Security analysis and optimization. Proceedings of The IEEE, [S.l.], v.75, p.1623–1644, 1987.
- MODERNA, C. (Ed.). Introdução ao Data Mining. [S.l.: s.n.], 2009.
- TAYLOR, C. W. Concepts of under voltage load shedding for voltage stability. **Power Delivery, IEEE Trans. on**, [S.l.], v.7, p.480–488, 1992.
- TAYLOR, C. W. Power System Voltage Stability. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994.
- TIRANUCHIT, A.; THOMAS, R. J. A posturing strategy against voltage instability in electric power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, [S.l.], v.9, p.87–93, 1988.
- VALADARES, J. R.; VALE, M. H. M. Políticas, critérios e procedimentos para compensação reativa e controle de tensão. In: XVI SNPTEE - SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2001. GAT/10, 2001. Anais... [S.l.: s.n.], 2001. n.1-6, p.6 pp.
- VAN CUTSEM, T. Voltage instability: phenomena, countermeasures, and analysis methods. **Proceedings of the IEEE**, [S.1.], v.88, n.2, p.208–227, Feb 2000.
- VAN CUTSEM, T.; VOURNAS, C. Voltage stability analysis in transient and mid-term time scales. **Power Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.11, n.1, p.146–154, feb 1996.
- VARGAS, L.; CANIZARES, C. Time dependence of controls to avoid voltage collapse. **Power Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.15, n.4, p.1367 –1375, nov 2000.
- VARGHESE, M.; SALEM-NATARAJAN, D.; GHOSH, S.; CHIANG, H.-D.; LI, H. Conceptual Design of Real-Time Voltage Stability Analysis Implementation at CAISO. 2008.
- VENKATASUBRAMANIAN, V.; SCHATTLER, H.; ZABORSKY, J. Dynamics of large constrained nonlinear systems-a taxonomy theory [power system stability]. Proceedings of the IEEE, [S.l.], v.83, n.11, p.1530 –1561, nov 1995.
- WANG, L.; LIU, Y.; LUAN, Z. Power Transmission Paths Based Voltage Stability Assessment. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHI-BITION: ASIA AND PACIFIC, 2005 IEEE/PES, 2005. Anais... [S.l.: s.n.], 2005. p.1 -5.

- WANG, Q.; AJJARAPU, V. A critical review on preventive and corrective controle against voltage collapse. Electrical Power Components and Systems, [S.l.], v.29, p.1133–1144, 2001.
- WANG, W.; YANG, J.; MUNTZ, R. **STING**: a statistical information grid approach to spatial data mining. 1997.
- WANG, X.; EJEBE, G. C.; TONG, J.; G, W. J. preventive/corrective control for voltage stability using direct interior point method. IEEE/PES PICA Proceedings, [S.l.], p.312–317, 1997.
- WOOD, A. J.; WOLLENBERG, B. F. Power Generation Operation and Control. [S.l.: s.n.], 1996.
- XU, R.; WUNSCH, D. Survey of clustering algorithms. Neural Networks, IEEE Transactions on, [S.l.], v.16, n.3, p.645–678, May 2005.
- YAGANG, Z.; JING, M.; JINFANG, Z.; ZENGPING, W. Fault Diagnosis Based on Cluster Analysis Theory in Wide Area Backup Protection System. In: POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE, 2009. APPEEC 2009. ASIA-PACIFIC, 2009. Anais... [S.l.: s.n.], 2009. p.1 –4.
- YORINO, N.; LI, H.-Q.; SASAKI, H. A predictor/corrector scheme for obtaining Q-limit points for power flow studies. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.20, n.1, p.130–137, Feb. 2005.
- YUE, X.; VENKATASUBRAMANIAN, V. Complementary limit induced bifurcation theorem and analysis of Q limits in power-flow studies. In: BULK POWER SYSTEM DY-NAMICS AND CONTROL - VII. REVITALIZING OPERATIONAL RELIABILITY, 2007 IREP SYMPOSIUM, 2007. Anais... [S.l.: s.n.], 2007. p.1 –8.
- ZEFERINO, C. L.; SOUSA, V. A.; COSTA, G. R. M. Método da função lagrangeana barreira modificada versus método primal-dual barreira logarítmica na determinação do problema de máximo carregamento. In: XXXIX SBPO - SIMPóSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2007, Fortaleza, Ceará, Brasil. Anais... [S.l.: s.n.], 2007.
- ZHANG, Q.; COULOIGNER, I. A New and Efficient K-Medoid Algorithm for Spatial Clustering. In: Computational Science and Its Applications. [S.l.]: Springer, 2005. p.207–224. (Lecture Notes in Computer Science, v.3482).
- ZHAO, J.; CHIANG, H.-D.; LI, H. Enhanced look-ahead load margin estimation for voltage security assessment. Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, [S.I.], v.4, p.-2645 Vol. 4, July 2003.

- ZHONG, J.; NOBILE, E.; BOSE, A.; BHATTACHARYA, K. Localized reactive power markets using the concept of voltage control areas. Power Systems, IEEE Transactions on, [S.l.], v.19, n.3, p.1555 – 1561, aug. 2004.
- ZHU, P.; TAYLOR, G.; IRVING, M. A novel Q-Limit guided Continuation Power Flow method. In: POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING - CONVER-SION AND DELIVERY OF ELECTRICAL ENERGY IN THE 21ST CENTURY, 2008 IEEE, 2008. Anais... [S.l.: s.n.], 2008. p.1 –7.

Apêndices

### Apêndice A

## Look-Ahead: Embasamento Teórico

Seja (A.1) o modelo estático de fluxo de carga do SEP,

$$F(x,\lambda) = f(x) - \lambda b \tag{A.1}$$

sendo que,  $\lambda \in \mathbb{R}$  e  $b \in \mathbb{R}^n$  modelando a variação das demandas de potência ativa e reativa das barras de carga e as variações de potência ativa das barras de geração, onde n é o número de barras e x é o vetor de estados do SEP.

Linearizando (A.1) em torno de um ponto de equilíbrio  $(x_0, \lambda_0)$ , tem-se

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x}\Delta x - b\Delta \lambda = 0. \tag{A.2}$$

Em (A.2), se a matriz Jacobiana  $f_x = \frac{\partial f(x)}{\partial x}$  é não singular, então a mesma admite inversa obtendo assim (A.3).

$$\Delta x = f_x^{-1} b \Delta \lambda \tag{A.3}$$

A matriz  $f_x^T f_x$  é simétrica e pode ser diagonalizada ortogonalmente, a mesma possui todos os autovalores reais e não negativos. Para mostrar isso fazemos  $\xi$  o autovalor de  $f_x^T f_x$  com o correspondente autovetor unitário v. Então:

$$0 \le \|f_x v\|^2 = (f_x v)^T (f_x v) = v^T f_x^T f_x v = v^T \xi v = \xi v^T v = \xi \|v\|^2$$
(A.4)

Como v é um autovetor unitário, tem-se  $||v||^2 = 1$ , logo  $0 \leq \xi$ . Portanto, faz sentido extrair a raiz quadrada (positiva) desses autovalores obtendo assim os valores singulares ( $\sigma$ ) referentes a  $f_x$ . Com base nesta definição, de maneira similar à decomposição de autovalores há a decomposição de valores singulares da matriz  $f_x$ , cuja formulação é dada por,

$$f_x = U\Sigma V^T \tag{A.5}$$

sendo  $U \in V^T$  matrizes ortogonais <br/>e $\Sigma$ uma matriz diagonal composta por valores singulares. Expandindo (A.5), obtém-se

$$f_x = \sum_{i=1}^n \sigma_i U_i V_i^T, \tag{A.6}$$

sendo  $\sigma_i$  o *i*-ésimo valor singular de  $f_x$ . Assim, (A.3) pode ser representada por,

$$\Delta x = \left(\sum_{i=1}^{n} \sigma_i U_i V_i^T\right)^{-1} b \Delta \lambda$$
$$\Delta x = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i^{-1} U_i (V_i^T b \Delta \lambda). \tag{A.7}$$

No ponto de bifurcação sela-nó  $f_x$  terá um valor singular nulo. Portanto, quando o estado do SEP estiver próximo ao ponto de colapso de tensão, a resposta dinâmica local do sistema será predominada pelo termo relacionado ao menor valor singular ( $\sigma_1$ ). Desta forma, re-escrevendo (A.7) tem-se

$$\Delta x \approx \sigma_1^{-1} U_1(V_1^T b \Delta \lambda). \tag{A.8}$$

Com<br/>o $\sigma_1^{-1}$ e o produto  $V_1^T b \Delta \lambda$ são escalares, temos:

$$\Delta x \approx U_1 \Delta \alpha \tag{A.9}$$

sendo,  $\Delta \alpha = \sigma_1^{-1} V_1^T b \Delta \lambda$  um valor escalar que depende do parâmetro  $\Delta \lambda$ . Agora, considere a expansão em serie de Taylor em (A.1) na vizinha do ponto de bifurcação sela-nó

$$0 = f_x \Delta x + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} (\Delta x \otimes \Delta x) - b \Delta \lambda.$$
 (A.10)

Para a bifurcação sela-nó, desprezam-se os termos de ordem igual ou maior que três. Assim, (A.10) é composta por elementos de até segunda ordem, sendo  $\frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} (\Delta x \otimes \Delta x)$  o termo quadrático e  $\otimes$  o produto de Kronecker. Fazendo  $f_{xx} = \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2}$  e prémultiplicando (A.10) por  $f_x^{-1}$ , a seguinte expressão é obtida:

$$0 = f_x^{-1} f_x \Delta x + \frac{1}{2} f_x^{-1} f_{xx} (\Delta x \otimes \Delta x) - f_x^{-1} b \Delta \lambda.$$
(A.11)

Fazendo  $f_x^{-1} f_x = I$ , sendo I uma matriz identidade, e substituindo (A.9) em (A.11), obtém-se

$$0 = U_1 \Delta \alpha + \frac{1}{2} f_x^{-1} f_{xx} (U_1 \Delta \alpha \otimes U_1 \Delta \alpha) - f_x^{-1} b \Delta \lambda.$$
 (A.12)

Pela propriedade distributiva do produto de Kronecker, temos que  $(U_1 \otimes U_1)\Delta\alpha^2$ , portanto,

$$0 = U_1 \Delta \alpha + \frac{1}{2} f_x^{-1} f_{xx} (U_1 \otimes U_1) \Delta \alpha^2 - f_x^{-1} b \Delta \lambda.$$
(A.13)

Considerando  $W_1 = \frac{1}{2} f_x^{-1} f_{xx} (U_1 \otimes U_1)$  e  $W_2 = -f_x^{-1} b$ , sendo  $W_1$  e  $W_2$  vetores de dimensão n, chega-se a seguinte expressão quadrática

$$0 = U_1 \Delta \alpha + W_1 \Delta \alpha^2 + W_2 \Delta \lambda. \tag{A.14}$$

Portanto, para que o *i*-ésimo incremento de  $\Delta x_i$  da variável de estado x seja igual a  $\Delta \alpha U_1$ , utiliza-se a função quadrática (A.14) em  $\Delta x_i$ , para que esta possa ser aplicada para descrever a curva PV do SEP, como segue

$$0 = \alpha_{1i}\Delta x_i + \alpha_{2i}\Delta x^2 + \alpha_{0i}\Delta\lambda \tag{A.15}$$

sendo  $\alpha_{0i}$ ,  $\alpha_{1i} \in \alpha_{2i}$  incógnitas. Em (A.15), para  $\Delta \lambda$  fixo (A.1) é quadrática em  $\Delta x$ .

Em linhas gerais, os resultados analíticos apresentados neste Apêndice, no contexto de equações de fluxo de carga, mostram que a curva de soluções do fluxo de carga passa, pelo menos localmente, através do ponto de bifurcação sela-nó, na forma de uma curva quadrática. O método *Look-Ahead* usa esta característica para estimar o PMC do SEP (CHI-ANG; WANG; FLUECK, 1997).

### Apêndice B

# Arquitetura de Software Desenvolvida

Uma arquitetura de software (BASS; CLEMENTS; KAZMAN, 2012) é composta por estruturas que incluem componentes, suas propriedades externas e os relacionamentos entre eles, constituindo assim uma abstração do sistema de computação. Esta abstração suprime detalhes de componentes que não afetam a forma como eles são usados ou como eles usam outros componentes, auxiliando assim o gerenciamento da complexidade do desenvolvimento de software.

Dentro deste contexto, nesta tese foi projetada uma arquitetura de software para o desenvolvimento de sistemas computacionais para a análise de SEP. Tal arquitetura é baseada em n camadas, onde cada uma é composta por componentes de software específicos conforme pode ser visto na Figura B.1.



Figura B.1: Arquitetura de software.

Na Figura B.1, no centro da arquitetura (camada 1) estão contidas as estruturas de dados orientadas a objetos específicas (por exemplo, *SpMatrix - Sparse Matrix*), a camada 2 é composta por algoritmos de resolução numérica (por exemplo, *LSSolver - Linear System Solver*), a camada 3 é composta por métodos de análise de SEP (por exemplo, *CPFLOW - Continuation Power Flow*). A camada 4 é composta por estruturas de dados orientadas a objetos para as informações a serem armazendas na memória. A demais camadas acima da 4 são reservadas para interfaces homem-máquina (por exemplo, Interface Gráfica via Desktop ou via Web). Algumas das vantagens desta arquitetura são a facilidade e a eficiência para o desenvolvimento de sistemas para análise de SEP, sendo esta baseada no paradigma orientado a objetos e podendo ser estendida conforme a necessidade.

Alguns dos componentes computacionais que fazem parte da arquitetura de software e foram desenvolvidos neste trabalho estão brevemente descritos a seguir:

- SpMatrix: sigla referente a Sparse Matrix, é estrutura de dados orientada a objetos de uma matriz esparsa, este componente foi inserido na camada 1 da arquitetura;
- LSSolver: sigla referente a Linear System Solver, este componente é um método de resolução de sistemas esparsos otimizado, este componente foi inserido na camada 2 da arquitetura;
- *EigSolver*: sigla referente a *Eigenvalue Solver*, este componente é um método de cálculo de autovalores e autovetores de um determinado sistema, este componente foi inserido na camada 2 da arquitetura;
- CPFLOW: sigla referente a Continuation Power Flow, este componente é um conjunto de bibliotecas para o cálculo da MET via o fluxo de carga continuado, este componente foi inserido na camada 3 da arquitetura;
- OPF: sigla referente a Optimal Power Flow, este componente é um conjunto de bibliotecas baseado em um método de fluxo de potência ótimo, este componente foi inserido na camada 3 da arquitetura;
- QLook-Ahead: este componente é um conjunto de bibliotecas para a estimação da MET do SEP, este componente foi inserido na camada 3 da arquitetura;
- EPSD: sigla referente a Electric Power Systems Data, é uma estrutura de dados otimizada orientada a objetos para o armazenamento na memória das informações do SEP, este componente foi inserido na camada 4 da arquitetura;

Vale destacar que todos os componentes na camada 4 se comunicam com as aplicações das camadas superiores através de arquivos no padrão XML (*eXtensible Markup Language*), isto é, os dados de entrada que descrevem um SEP estão contidos em um arquivo
XML, cujo padrão é reconhecido mundialmente e é de fácil entendimento e manutenção. Desta forma, os componentes de análise de SEP não ficam dependentes de um padrão de entrada de dados específico. Entretanto, caso seja necessário utilizar algum outro padrão de dados, foi desenvolvido na arquitetura um componente conversor de dados automático, que é capaz de converter qualquer padrão de dados para o padrão XML. Para tal, basta incluir as especificações de tal padrão na implementação do conversor.

Foram desenvolvidas duas aplicações gráficas para a visualização da MET obtida pelos métodos desenvolvidos nesta tese. A primeira delas é uma aplicação baseada em *Graphical User Interface* (GUI) (ASTEIFEL; OBERG, 2002) que tem por finalidades interpretar os arquivos XML gerados pelas ferramentas *QLook-Ahead* ou *CPFLOW* e apresentar os dados nas simulações na tela para o usuário. Na Figura B.2 é ilustrada uma captura de tela da aplicação GUI.



Figura B.2: Tela do software de visualização das METs basendo em aplicações GUI.

Entretanto, a aplicação supracitada requer a instalação prévia do software. Com o objetivo de evitar esta instalação e apresentar as simulações em qualquer dispositivo que tenha um navegador de Internet, foi desenvolvida uma aplicação de visualização baseada em *webservice* (SNELL; TIDWELL; KULCHENKO, 2009). A finalidade desta ferramenta é a mesma da ferramenta GUI, tendo como vantagem a não necessidade de instalar a mesma em um computador pessoal. Na Figura B.3 é ilustrada uma captura de tela da aplicação baseada em *webservice*.

Uma das principais vantagens da arquitetura de software proposta é a decentralização dentre os componentes e a não necessidade de utilizar uma única linguagem de programação para o desenvolvimento dos mesmos ou das aplicações de visualização. Por exemplo, os componentes das camadas 1, 2, 3 e 4 foram desenvolvidos utilizando a linguagem C++. Entretanto, as aplicações de visualização GUI foi desenvolvida utilizando a linguagem C# e a aplicação baseada em *webservice* foi desenvolvida utilizando a linguagem

B Web Continuation Power	×									
← → C 🗋 http://loc	alhost:53329/									
A Esta página está em	inglês 🕶 Deseja traduzi-la? 🛛 Traduzir 🕅 Não	Nunca traduzir do inglês	Opções 🗸 🗙							
	WEB CPFLOW APPLICATION									
User Name:	User Test	Base case								
Main XML File	Escolher arquivo sul45.xml	1 05								
Power Flow XML File	Escolher arguivo PowerFlowsul45.xml	1,05	7							
	Simulate	1,00 1	-							
			1							
Suntann	Sul D - durida	₹ <sup>0,95</sup> ‡	1							
Number of Buses:	45	<b>5</b> 0.90 <sup>‡</sup>	1							
Number of PV Buses:	9	et all all all all all all all all all al								
Number of PQ Buses:	35	> 0,85	-							
Number of Lines:	57	Point V=0.8136(nul)								
Number of Areas:	2	λ=1,3322								
Number of Power Flows Executed:	52	t 1,0 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5	1,6							
	Analysis	λ								
Select the Bus	387 - GRAVATAI 52! 💌									
	view									

Figura B.3: Tela do software de vizualização das METs baseado em *webservice*.

Java (arquitetura J2EE - *Java2 Platform Enterprise Edition*). Portanto, é de se notar a flexibilidade da arquitetura no desenvolvimento de ferramentas computacionais para a análise de segurança do SEP.

## Apêndice C

## Sistema Brasileiro Reduzido de 16 Barras

Na Figura C.1 é apresentada a rede do sistema brasileiro reduzido de 16 barras, das quais, 2 barras são de geração (tipo PV) e 16 barras são de carga (tipo PQ). Este sistema está dividido em dois subsistemas denominados Área 1 e Área 2, com capacidade total de geração de 758 MW e possuindo uma carga total de 554 MW. A rede de transmissão em malha fechada com circuitos simples e duplos, totalizando quatorze circuitos. Destaca-se que trata-se de um sistema com aspecto didático (os nome das barras são fictícios), mas apresentando características de um sistema real (ALVES, 2007).



Figura C.1: Diagrama unifilar do sistema-teste brasileiro de 16 barras.

Na Tabela C.2 são apresetandos os dados das barras do sistema reduzido brasileiro de 16 barras e os componentes da mesma estão descritos na Tabela C.1.

Componente	Descrição	Unidade
V	Magnitude da tensão	p.u.
heta	Ângulo da tensão	graus
$P_g$	Potência ativa gerada	p.u.
$Q_g$	Potência reativa gerada	p.u.
$Q_g^{min}$	Limite mínimo de geração de potência reativa	p.u.
$Q_g^{max}$	Limite máximo de geração de potência reativa	p.u.
$P_L$	Potência ativa consumida	p.u.
$Q_g$	Potência reativa consumida	p.u.
$B_k^{sh}$	Shunt (reator ou capacitor)	p.u.

Tabela C.1: Descrição dos componentes da Tabela C.2.

Tabela C.2: Dados das barras do sistema brasileiro reduzido de 16 barras.

Id	Nome	Tipo	V	θ	$P_g$	$Q_g$	$Q_g^{min}$	$Q_g^{max}$	$P_L$	$Q_L$	$B_k^{sh}$	Area
1	GERADOR-1	$\mathbf{PV}$	0.97	0.52	2.00	-1.30	-1.80	1.80	0.00	0.00	0.00	1
2	BARRA-2	$\mathbf{PQ}$	0.99	-1.30	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
3	BARRA-3	$\mathbf{PQ}$	1.00	-4.20	0.00	0.00			0.26	0.16	-0.90	1
4	BARRA-4	$\mathbf{PQ}$	1.00	-5.60	0.00	0.00			0.58	0.39	0.00	2
5	BARRA-5	$\mathbf{PQ}$	1.01	-4.80	0.00	0.00			0.16	0.11	0.00	2
6	BARRA-6	$\mathbf{PQ}$	1.00	-3.20	0.00	0.00			0.10	0.07	0.00	2
7	BARRA-7	$\mathbf{PQ}$	1.01	-4.90	0.00	0.00			0.09	0.08	0.00	2
8	BARRA-8	$\mathbf{PQ}$	1.02	-6.00	0.00	0.00			0.21	0.13	0.00	2
9	C.SINCRONO	$\mathbf{PV}$	0.97	-6.00	0.00	-0.39	-0.50	0.70	0.00	0.00	0.00	2
10	BARRA-10	$\mathbf{PQ}$	0.97	-6.80	0.00	0.00			0.23	0.16	0.20	1
11	BARRA-11	$\mathbf{PQ}$	0.99	-6.70	0.00	0.00			0.22	0.15	-0.30	1
12	BARRA-12	$\mathbf{PQ}$	1.01	-6.00	0.00	0.00			0.56	0.31	0.00	1
13	BARRA-13	$\mathbf{PQ}$	1.01	-6.30	0.00	0.00			0.33	0.19	-0.30	1
14	BARRA-14	$\mathbf{PQ}$	1.01	-5.70	0.00	0.00			0.32	0.21	0.00	1
15	BARRA-15	$\mathbf{PQ}$	1.01	-4.80	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
16	GERADOR-2	$V\theta$	0.97	0.00	1.08	-0.53	-1.80	1.80	0.00	0.00	0.00	2

Na Tabela C.4 são apresetandos os dados das barras do sistema reduzido brasileiro de 16 barras e os componentes da mesma estão descritos na Tabela C.3

ComponenteDescriçãoUnidade $r_{km}$ Resistênciap.u. $x_{km}$ Reatânciap.u. $B_{km}^{Sh}$ Suscpetância shuntp.u.

Tabela C.3: Descrição dos componentes da Tabela C.4.

Barra de $(k)$	Barra para $(m)$	$r_{km}$	$x_{km}$	$B_{km}^{Sh}$	tap
1	2	0.0000	0.0150	0.0000	1.0000
2	3	0.0023	0.0248	1.6960	1.0000
3	12	0.0024	0.0264	0.4505	1.0000
3	14	0.0000	0.0833	0.0000	0.9742
3	15	0.0040	0.0419	0.6126	1.0000
4	5	0.0034	0.0368	0.5390	1.0000
4	15	0.0000	0.0667	0.0000	0.9991
5	6	0.0050	0.0536	0.1960	1.0000
6	7	0.0060	0.0637	0.2328	1.0000
6	16	0.0000	0.0500	0.0000	1.0000
7	8	0.0047	0.0503	0.1838	1.0000
8	9	0.0000	0.1250	0.0000	1.0000
10	8	0.0000	0.1000	0.0000	0.9030
10	11	0.0034	0.0372	0.6360	1.0000
11	12	0.0039	0.0434	0.7420	1.0000
12	13	0.0011	0.0124	0.8480	1.0000

Tabela C.4: Dados das linhas do sistema brasileiro reduzido de 16 barras.

## Apêndice D

## Sistema Teste Brasileiro de 107 Barras

O sistema brasileiro reduzido de 107 barras é composto por 23 barras são de geração (tipo PV) e 83 barras são de carga (tipo PQ). Este sistema está dividido em três subsistemas denominados Sul, Sudeste e Mato Grosso, com capacidade total de geração de 22.080 MW e possuindo uma carga total de 13.059,37 MW. O subsistema Sudeste concentra a maior capacidade de geração; cerca de 56% de toda a geração disponível no sistema. Na Figura D.1 é apresentado o diagrama unifilar do sistema em questão (ALVES, 2007).

Na Tabela D.2 são apresentados os dados das barras do sistema reduzido brasileiro de 107 barras e os componentes da mesma estão descritos na Tabela D.1.

Componente	Descrição	Unidade
V	Magnitude da tensão	p.u.
heta	Ângulo da tensão	graus
$P_g$	Potência ativa gerada	p.u.
$Q_g$	Potência reativa gerada	p.u.
$Q_g^{min}$	Limite mínimo de geração de potência reativa	p.u.
$Q_g^{max}$	Limite máximo de geração de potência reativa	p.u.
$P_L$	Potência ativa consumida	p.u.
$Q_g$	Potência reativa consumida	p.u.
$B_k^{sh}$	Shunt (reator ou capacitor)	p.u.

Tabela D.1: Descrição dos componentes da Tabela D.2.

Tabela D.2: Dados das barras do sistema brasileiro reduzido de 107 barras.

Id	Nome	Tipo	V	θ	$P_g$	$Q_g$	$Q_g^{min}$	$Q_g^{max}$	$P_L$	$Q_L$	$B_k^{sh}$	Area
12	LCBARRET-4G	$_{\rm PV}$	1.00	-24.00	3.00	-2.03	-5.40	4.20	0.00	0.00	0.00	1
16	FURNAS—5G	$\mathbf{PV}$	1.00	-26.00	8.00	-1.34	-7.20	4.80	0.00	0.00	0.00	1
18	ITUMBIAR-6G	$V\theta$	1.02	-24.00	9.96	-3.99	-5.46	6.00	0.00	0.00	0.00	1

Id	Nome	Tipo	V	$\theta$	$P_g$	$Q_g$	$Q_g^{min}$	$Q_g^{max}$	$P_L$	$Q_L$	$B_k^{sh}$	Area
20	MARIMBON-5G	$\mathbf{PV}$	1.01	-22.00	9.00	-3.21	-6.40	6.40	0.00	0.00	0.00	1
21	MANSO—-3G	PV	1.00	-63.00	1.40	-0.22	-0.80	0.84	0.00	0.00	0.00	3
22	M.MOR.A–3G	$\mathbf{PV}$	1.00	-20.00	1.50	-0.21	-1.20	1.26	0.00	0.00	0.00	1
35	CORUMBA–2G	$\mathbf{PV}$	1.00	-27.00	2.00	-0.49	-1.80	1.80	0.00	0.00	0.00	1
48	IBIUNA—4C	$\mathbf{PV}$	1.00	-42.00	0.00	-4.61	-10.80	12.00	0.00	0.00	0.00	1
86	IBIUNA—34	$\mathbf{PQ}$	1.03	-42.00	0.00	0.00			0.66	0.01	0.00	1
100	MARIMBON-50	$\mathbf{PQ}$	1.06	-28.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
101	ARARAQUA-50	$\mathbf{PQ}$	1.07	-36.00	0.00	0.00			0.00	0.00	-2.00	1
102	POCOS-50	$\mathbf{PQ}$	1.06	-43.00	0.00	0.00			0.00	0.00	-1.00	1
103	CAMPINAS-50	$\mathbf{PQ}$	1.07	-43.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
104	C.PAULIS-50	$\mathbf{PQ}$	1.06	-51.00	0.00	0.00			9.10	2.35	0.00	1
106	ADRIANO-50	$\mathbf{PQ}$	1.05	-52.00	0.00	0.00			0.00	0.00	-1.00	1
120	P.CALDAS-34	$\mathbf{PQ}$	1.04	-41.00	0.00	0.00			1.80	0.90	0.00	1
122	IBIUNA—50	$\mathbf{PQ}$	1.07	-41.00	0.00	0.00			2.00	0.38	0.00	1
123	CAMPINAS-34	$\mathbf{PQ}$	1.03	-46.00	0.00	0.00			4.50	1.75	0.00	1
126	GUARULHOS34	$\mathbf{PQ}$	1.04	-43.00	0.00	0.00			2.90	0.95	0.00	1
131	M.MORAES-34	$\mathbf{PQ}$	1.03	-27.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
134	LBARRETO-34	$\mathbf{PQ}$	1.03	-26.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
136	FURNAS—34	$\mathbf{PQ}$	1.03	-33.00	0.00	0.00			0.54	0.23	0.00	1
138	ITUTINGA-34	$\mathbf{PQ}$	1.04	-44.00	0.00	0.00			0.72	0.34	0.00	1
140	ADRIANO–34	$\mathbf{PQ}$	1.02	-53.00	0.00	0.00			7.00	2.50	0.00	1
210	ITUMBIARA50	$\mathbf{PQ}$	1.05	-27.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
213	MARIMBON-34	$\mathbf{PQ}$	1.05	-29.00	0.00	0.00			0.93	0.39	0.00	1
216	PCOLOMBIA34	$\mathbf{PQ}$	1.05	-28.00	0.00	0.00			0.53	0.25	0.00	1
217	ITUMBIARA34	$\mathbf{PQ}$	1.05	-32.00	0.00	0.00			3.64	0.58	0.00	1
218	BANDEIRA-34	$\mathbf{PQ}$	1.02	-40.00	0.00	0.00			6.00	2.00	0.00	1
219	B.SUL34	$\mathbf{PQ}$	1.03	-39.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
220	CORUMBA–34	$\mathbf{PQ}$	1.05	-32.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
225	ITUMBIARA23	$\mathbf{PQ}$	1.00	-34.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
228	B.SUL23	PQ	1.02	-40.00	0.00	0.00			0.86	0.34	0.00	1
231	R.VERDE-230	$\mathbf{PQ}$	1.00	-49.00	0.00	0.00			0.90	0.32	0.00	3
233	SAMAMBAI-50	PQ	1.04	-36.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
234	SAMAMBAI-34	PQ	1.03	-39.00	0.00	0.00			10.00	3.50	0.00	1
300	EMBORCAC-3G	PV	1.02	-19.00	7.00	-1.83	-4.40	3.92	0.00	0.00	0.00	1
301	JAGUARA-4G	PV	1.01	-19.00	3.00	-1.28	-1.40	1.40	0.00	0.00	0.00	1
302	N.PONTE-3G	PV	1.02	-18.00	4.00	-1.25	-1.50	1.50	0.00	0.00	0.00	1
303	S.SIMAO–4G	PV	1.02	-24.00	2.00	-2.79	-6.00	6.00	0.00	0.00	0.00	1
305	V.GRANDE-4G	PV	1.00	-22.00	3.00	-0.60	-1.20	1.20	0.00	0.00	0.00	1
320	EMBORCAC-50	PQ	1.05	-24.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
325	JAGUARA-50	PQ	1.05	-23.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
326	JAGUARA-34	PQ	1.03	-26.00	0.00	0.00			2.74	1.04	0.00	1
360	NPONTE—50	PQ	1.05	-22.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
370	SSIMAO—50	PQ	1.05	-25.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
396	VGRANDE-34	PQ	1.04	-26.00	0.00	0.00	<b>F</b> 10	F 40	0.00	0.00	0.00	1
500	A.VERMEL-4G	PV	1.02	-21.00	8.00	-1.18	-5.40	5.40	0.00	0.00	0.00	1
535	AVERMELHA50	PQ	1.03	-26.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
536	AVERMELH-44	PQ	1.02	-29.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.00	1.50	0.00	1
800	GBMUNHUZ-2G	PV	1.02	-6.90	11.00	1.38	-8.00	8.00	0.00	0.00	0.00	2
808	SCAXIAS-4G	PV	1.02	3.72	11.50	1.14	-6.00	6.00 5 99	0.00	0.00	0.00	2
81U 814	DATELAS 22		1.02	-3.8U	12.00	-0.72	-4.00	5.32	0.00	0.00	0.00	2
014 004	DAI EIA5-25 CDMUNUOZ FO	rQ DO	1.00	-37.00	0.00	0.00			1.30	1.91	0.00	2
024 024	GDWUNHUZ-50	rų po	1.04	-11.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	2
034 820	S.MATEUS-23	rQ DO	0.99	-29.00 6.20	0.00	0.00			0.13	0.04	0.00	2
009 040	CASCAVEL 12	rQ PO	1.00	-0.20 0.20	0.00	0.00			1 50	0.00	0.00	∠ 2
04U 040	CASCAVEL-13 ECHODIM 12	rQ DO	0.99	-9.20	0.00	0.00			1.59	0.30	0.00	2
04ð 956	FUNUEIM-13 SECREDO EO	rų PO	1.00 1.09	-0.0U 11.00	0.00	0.00			0.94	0.18	0.00	∠ 2
000 805	BATEIAS 50	PO	1.05	-11.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	2 9
030	DATEIA5-50	тų	1.04	-00.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	4

Tabela D.2: Dados das barras do sistema brasileiro reduzido de 107 barras.

Id	Nome	Tipo	V	θ	$P_g$	$Q_g$	$Q_g^{min}$	$Q_g^{max}$	$P_L$	$Q_L$	$B_k^{sh}$	Area
896	CASCAVELO50	$\mathbf{PQ}$	1.03	-4.10	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	2
897	SCAXIAS-50	PQ	1.04	-2.80	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	2
898	FCHOPIM-23	PQ	1.01	-1.90	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	2
904	ITA——4G	$\overline{PV}$	1.02	-15.00	7.00	-2.36	-4.75	4.75	0.00	0.00	0.00	2
915	MACHADIN-2G	$_{\rm PV}$	1.02	-13.00	7.00	-1.09	-5.16	4.65	0.00	0.00	0.00	2
919	SOSOR1A4-4G	$_{\rm PV}$	1.00	5.98	7.00	0.89	-1.48	2.20	0.00	0.00	0.00	2
925	SSANTIAG-3G	PV	1.02	0.11	9.50	0.73	-4.40	4.20	0.00	0.00	0.00	2
933	AREIA—-50	$\mathbf{PQ}$	1.04	-18.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	2
934	AREIA—-23	$\mathbf{PQ}$	1.00	-18.00	0.00	0.00			2.37	0.59	0.00	2
938	BLUMENAU-50	$\mathbf{PQ}$	1.04	-37.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	2
939	BLUMENAU-23	$\mathbf{PQ}$	1.00	-40.00	0.00	0.00			11.49	0.53	0.00	2
955	CNOVOS-50	$\mathbf{PQ}$	1.06	-23.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	2
959	CURITIBA-50	$\mathbf{PQ}$	1.03	-35.00	0.00	0.00			0.00	0.00	1.00	2
960	CURITIBA-23	$\mathbf{PQ}$	1.00	-37.00	0.00	0.00			8.45	4.69	0.00	2
964	CAXIAS—50	$\mathbf{PQ}$	1.04	-31.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	2
965	CAXIAS—23	$\mathbf{PQ}$	1.00	-33.00	0.00	0.00			7.56	0.56	0.00	2
976	GRAVATAI-50	$\mathbf{PQ}$	1.01	-33.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	2
995	ITA50	$\mathbf{PQ}$	1.05	-19.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	2
1015	JOINVILLE23	$\mathbf{PQ}$	1.00	-39.00	0.00	0.00			0.70	0.02	0.00	2
1030	MACHADIN-50	$\mathbf{PQ}$	1.05	-21.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	2
1047	SOSORIO–23	$\mathbf{PQ}$	1.02	-0.92	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	2
1060	SSANTIAG-50	$\mathbf{PQ}$	1.04	-7.90	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	2
1210	GRAVATAI-23	$\mathbf{PQ}$	1.00	-36.00	0.00	0.00			12.28	4.25	0.00	2
1503	ITAJUBA-50	$\mathbf{PQ}$	1.06	-49.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	1
1504	ITAJUBA–13	$\mathbf{PQ}$	1.03	-53.00	0.00	0.00			1.45	0.63	0.00	1
2458	CASCAVEL-23	$\mathbf{PQ}$	1.00	-6.40	0.00	0.00			4.03	1.26	0.00	2
4501	B.PEIXE–23	$\mathbf{PQ}$	1.02	-61.00	0.00	0.00			0.31	0.07	-0.45	3
4521	ITIQUIRA-23	$\mathbf{PQ}$	1.03	-67.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	3
4522	RONDONOP-23	PQ	1.03	-69.00	0.00	0.00			0.00	0.00	-0.20	3
4523	ITIQUIR–2G	PV	1.01	-61.00	0.50	-0.08	-0.42	0.30	0.00	0.00	0.00	3
4530	COXIPO-CE-1	PQ	1.02	-73.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	3
4532	COXIPO-230	PQ	1.04	-73.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	3
4533	COXIPO-138	PQ	1.01	-74.00	0.00	0.00			0.75	0.16	0.00	3
4542	NOBRES-230	PQ	1.02	-72.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	3
4552	N.MUTUM-230	PQ	1.01	-80.00	0.00	0.00			0.13	0.01	-0.20	3
4562	SORRISO-230	PQ	1.01	-88.00	0.00	0.00			0.24	0.07	0.00	3
4572	LUCAS-RV230	PQ	1.01	-85.00	0.00	0.00			0.18	0.06	0.00	3
4582	SINOP-230	PQ	1.02	-91.00	0.00	0.00			0.66	0.17	0.30	3
4592	MANSO-230	PQ	1.02	-68.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	3
4596	CBA–GAS-2G	PV	1.00	-69.00	2.30	-0.27	-1.60	1.60	0.00	0.00	0.00	3
4623	RONDONOP-13	PQ	1.01	-72.00	0.00	0.00			1.28	0.41	0.00	3
4703	CUIABA-138	PQ	1.00	-75.00	0.00	0.00			1.82	0.30	0.00	3
4804	GUAPORE-2G	PV	1.00	-75.00	0.50	-0.17	-0.86	0.59	0.00	0.00	0.00	3
4805	GUAPORE-13	PQ	1.02	-79.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	3
4807	JAURU-138	PQ	1.02	-80.00	0.00	0.00			1.29	0.36	0.00	3
4862	JAURU-230	PQ	1.05	-78.00	0.00	0.00			0.00	0.00	-0.30	3

Tabela D.2: Dados das barras do sistema brasileiro reduzido de 107 barras.

Na Tabela D.4 são apresentados os dados das linhas do sistema reduzido brasileiro de 107 barras e os componentes da mesma estão descritos na Tabela D.3.



Figura D.1: Diagrama unifilar do sistema-teste brasileiro de 107 barras.

Componente	Descrição	Unidade
$r_{km} \\ x_{km} \\ B^{Sh}_{km}$	Resistência Reatância Suscpetância shunt	p.u. p.u. p.u.

Tabela D.3: Descrição dos componentes da Tabela D.4.

Tabela D.4: Dados das linhas do sistema brasileiro reduzido de 107 barras.

Barra de $(k)$	Barra para $(m)$	$r_{km}$	$x_{km}$	$B_{km}^{Sh}$	tap
86	48	0.0000	0.0071	0.0000	1.0000
86	122	0.0000	0.0191	0.0000	1.0000
100	20	0.0000	0.0126	0.0000	1.0000
100	101	0.0017	0.0272	2.3140	1.0000
100	101	0.0017	0.0270	2.3020	1.0000
100	210	0.0021	0.0294	2.5460	1.0000
100	213	0.0000	0.0236	0.0000	1.0000
100	535	0.0015	0.0240	2.0380	1.0000
101	102	0.0016	0.0246	2.0850	1.0000
101	103	0.0015	0.0239	2.0260	1.0000
102	120	0.0000	0.0240	0.0000	1.0000
102	1503	0.0011	0.0191	1.6185	1.0000
103	123	0.0000	0.0242	0.0000	1.0000
104	103	0.0020	0.0310	2.6490	1.0000
104	1503	0.0005	0.0082	0.6936	1.0000
106	104	0.0015	0.0239	2.0270	1.0000
106	104	0.0015	0.0239	2.0310	1.0000
106	140	0.0000	0.0292	0.0000	1.0000
106	140	0.0000	0.0267	0.0000	1.0000
122	103	0.0010	0.0162	1.3635	1.0000
123	120	0.0036	0.0394	0.6668	1.0000
126	86	0.0011	0.0183	0.5118	1.0000
126	86	0.0011	0.0182	0.5118	1.0000
126	120	0.0060	0.0595	0.9280	1.0000
126	120	0.0061	0.0602	0.9380	1.0000
131	22	0.0000	0.0883	0.0000	1.0000
134	12	0.0000	0.0133	0.0000	0.9990
134	131	0.0009	0.0101	0.1690	1.0000
134	396	0.0032	0.0351	0.5924	1.0000
136	16	0.0000	0.0154	0.0000	1.0000
136	120	0.0044	0.0430	0.6660	1.0000
136	120	0.0044	0.0430	0.6660	1.0000
136	131	0.0035	0.0342	0.5280	1.0000
136	134	0.0037	0.0413	0.6990	1.0000
136	138	0.0065	0.0646	1.0080	1.0000
136	138	0.0056	0.0619	1.0570	1.0000
140	138	0.0065	0.0650	1.0140	1.0000
140	138	0.0056	0.0619	1.0570	1.0000
210	18	0.0000	0.0067	0.0000	1.0000
210	217	0.0000	0.0172	0.0000	1.0000
210	21 (	0.0000	0.01/2	0.0000	1.0000
210	370	0.0015	0.0232	1.9000	1.0000
213	210 206	0.0022	0.0242	0.4070	1.0000
210	390 916	0.0013	0.0141	0.2377	1.0000
217	∠10 019	0.0050	0.0020	1.00/3	1.0000
21 <i>(</i> 217	∠1ð 010	0.0051	0.0501	0.9300	1.0000
211	210	0.0001	0.0001	0.9900	1.0000

Barra de $(k)$	Barra para $(m)$	$r_{km}$	$x_{km}$	$B_{l}^{Sh}$	tap
210	2014 para (110)	· ĸm	ω <i>κ</i> m	0.0000	1 0000
218	234	0.0043	0.0480	0.8220	1.0000
218	234	0.0043	0.0480	0.8220 0.0724	1.0000
219 210	234	0.0004	0.0043	0.0734 0.0734	1.0000
219	254	0.0004	0.0045	0.0754	1.0000 1.0250
220	217	0.0000	0.0400	0.0000 0.4324	1.0200
220	211	0.0025 0.0073	0.0240 0.0770	1.3801	1.0000
$220 \\ 225$	215	0.0000	0.0110 0.0272	0.0000	0.9500
225	217	0.0000	0.0294	0.0000	0.9500
225	231	0.0410	0.1976	0.3608	1.0000
225	231	0.0127	0.1362	0.4947	1.0000
228	219	0.0000	0.0360	0.0000	1.0000
231	4501	0.0451	0.2169	0.4025	1.0000
231	4501	0.0149	0.1609	0.5540	1.0000
233	210	0.0028	0.0399	3.5536	1.0000
233	320	0.0027	0.0387	3.4403	1.0000
234	233	0.0000	0.0111	0.0000	1.0000
234	233	0.0000	0.0100	0.0000	1.0000
320	210	0.0013	0.0194	1.4996	1.0000
320	300	0.0000	0.0136	0.0000	1.0000
320	360	0.0008	0.0126	0.9899	1.0000
325	301	0.0000	0.0263	0.0000	1.0000
325	326	0.0000	0.0216	0.0000	1.0000
325	326	0.0000	0.0216	0.0000	1.0000
325	360	0.0010	0.0152	1.1967	1.0000
325	370	0.0028	0.0484	4.1950	1.0000
326	134	0.0007	0.0076	0.1229	1.0000
326	396	0.0024	0.0274	0.4547	1.0000
360	302	0.0000	0.0194	0.0000	1.0000
370	303	0.0000	0.0106	0.0000	1.0000
370	535 205	0.0009	0.0138	1.1230	1.0000
390 E2E	305	0.0000	0.0220	0.0000	1.0250
000 526	500	0.0000	0.0102 0.0152	0.0000	1.0000
536	535	0.0000	0.0100 0.0140	0.0000	1.0000
814	805	0.0000	0.0142 0.0115	0.0000	0.0652
814	895	0.0003	0.0115 0.0117	0.0000	0.9052
824	800	0.0000	0.0117	0.0000	1.0240
824	933	0.0000	0.0100	0.0000 0.1520	1.0240 1.0000
824	933	0.0001	0.0012	0.1543	1.0000
834	934	0.0244	0.1265	0.2171	1.0000
839	840	0.0000	0.0664	0.0000	1.0000
839	840	0.0000	0.0629	0.0000	1.0000
839	898	0.0113	0.0699	0.1262	1.0000
839	1047	0.0122	0.0769	0.1381	1.0000
839	2458	0.0022	0.0109	0.0186	1.0000
839	2458	0.0017	0.0103	0.0205	1.0000
856	810	0.0000	0.0105	0.0000	1.0000
856	933	0.0005	0.0065	0.8049	1.0000
856	1060	0.0006	0.0070	0.8575	1.0000
895	122	0.0031	0.0396	4.4484	1.0000
895	122	0.0031	0.0396	4.4484	1.0000
896	897	0.0005	0.0073	0.7806	1.0000
897	808	0.0000	0.0102	0.0000	1.0240
898	848	0.0000	0.0636	0.0000	1.0000
898	1047	0.0015	0.0089	0.0163	1.0000
933	895	0.0020	0.0255	3.1272	1.0000
933	955	0.0016	0.0205	2.5017	1.0000

Tabela D.4: Dados das linhas do sistema brasileiro reduzido de 107 barras.

Barra de $(k)$	Barra para $(m)$	$r_{km}$	$x_{km}$	$B_{km}^{Sh}$	tap
033	050	0.0020	0.0260	3 26/0	1 0000
955 034	909 933	0.0020	0.0209	0.0040	0.9747
934 934	955 1047	0.0005	0.0121 0.1574	0.0000 0.2712	1 0000
934 934	1047	0.0304	0.1574 0.1572	0.2712 0.2709	1.0000
938	955	0.0026	0.0292	3.6040	1.0000
938	959	0.0013	0.0160	1.9589	1.0000
939	938	0.0003	0.0115	0.0000	0.9586
939	938	0.0003	0.0116	0.0000	0.9586
939	938	0.0000	0.0128	0.0000	0.9586
939	1015	0.0127	0.0656	0.1131	1.0000
939	1015	0.0128	0.0656	0.1152	1.0000
955	964	0.0019	0.0235	2.8724	1.0000
959	895	0.0005	0.0044	0.4758	1.0000
960	834	0.0221	0.1147	0.1969	1.0000
960	959	0.0003	0.0116	0.0000	0.9917
960	959	0.0003	0.0117	0.0000	0.9917
960	1015	0.0189	0.0978	0.1684	1.0000
960	1015	0.0190	0.0970	0.1703	1.0000
964 065	976	0.0007	0.0092	1.1217	1.0000
905	904	0.0002	0.0121	0.0000	0.9717
905 076	904	0.0002	0.0123	0.0000	0.9717
970	995	0.0028	0.0385 0.0115	4.9370	1.0000
995	904 064	0.0000	0.0113	3 5488	1.0000
995	904 1030	0.0010	0.0303	0.0400 1 1996	1.0000
995 995	1050	0.0007 0.0017	0.0092 0.0217	2.6516	1.0000
1030	915	0.0017	0.0217 0.0207	2.0010	1.0000
1030	955	0.0000	0.0201	0.0000 0.7182	1.0000
1047	919	0.0000	0.0170	0.0000	1.0250
1060	897	0.0008	0.0117	1.2458	1.0000
1060	925	0.0000	0.0151	0.0000	1.0240
1210	976	0.0003	0.0122	0.0000	1.0100
1210	976	0.0004	0.0114	0.0000	1.0100
1210	976	0.0004	0.0122	0.0000	1.0100
1503	1504	0.0000	0.0520	0.0000	0.9986
2458	896	0.0000	0.0127	0.0000	0.9938
4501	4522	0.0376	0.2068	0.3566	1.0000
4501	4522	0.0164	0.1246	0.6150	1.0000
4521	4523	0.0000	0.2071	0.0000	1.0000
4522	4521	0.0153	0.0760	0.1425	1.0000
4522	4532	0.0325	0.1792	0.3275	1.0000
4522	4532	0.0325	0.1792	0.3275	1.0000
4522	4623	0.0000	0.0795	0.0000	1.0000
4522	4623	0.0000	0.0795	0.0000	1.0000
4532	4530	0.0000	0.1430	0.0000	1.0000
4532	4533	0.0000	0.0860	0.0000	1.0000
4532	4533	0.0000	0.0860	0.0000	1.0000
4532	4533	0.0000	0.0860	0.0000	1.0000
4532	4542	0.0162	0.0968	0.1915	1.0000
4533	4596	0.0000	0.0376	0.0000	1.0000
4042	400Z 4579	0.0183	0.1032	0.1800	1.0000
4002 4569	4072	0.0140	0.0000	0.1700	1,0000
4002 4569	4072	0.0094	0.0009	0.1004	1 0000
4502	91	0.0124	0.0730	0.1328	1 0000
4502	4549	0.0000	0.0617	0.1260	1 0000
4623	4533	0.1706	0.4550	0.1139	1.0000
4703	4533	0.0090	0.0231	0.0058	1.0000

Tabela D.4: Dados das linhas do sistema brasileiro reduzido de 107 barras.

Barra de $(k)$	Barra para $(m)$	$r_{km}$	$x_{km}$	$B_{km}^{Sh}$	tap
4703	4533	0.0090	0.0231	0.0058	1.0000
4805	4804	0.0000	0.1333	0.0000	1.0000
4805	4807	0.0309	0.0813	0.0209	1.0000
4805	4807	0.0309	0.0813	0.0209	1.0000
4862	4532	0.0257	0.2368	0.9742	1.0000
4862	4532	0.0257	0.2368	0.9742	1.0000
4862	4807	0.0000	0.0405	0.0000	1.0000

Tabela D.4: Dados das linhas do sistema brasileiro reduzido de 107 barras.