TESE
1003

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Uma Avaliação da Estabilidade de Tensão Abordando Perdas Elétricas em Sistemas Elétricos de Potência

Luiz Cláudio de Araújo Ferreira

ITAJUBÁ - MG
Março - 1999

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
BIM

Uma Avaliação da Estabilidade de Tensão Abordando Perdas Elétricas em Sistemas Elétricos de Potência

Dissertação apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Luiz Cláudio de Araújo Ferreira

Itajubá, Março de 1999

Uma Avaliação da Estabilidade de Tensão Abordando Perdas Elétricas em Sistemas Elétricos de Potência

Dissertação apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Sistemas Elétricos de Potência

Orientador:
Antônio Carlos Zambroni de Souza

Co-orientador:
Sérgio Granville

Luiz Cláudio de Araújo Ferreira

Itajubá, Março de 1999

© 1999, Luiz Cláudio de Araújo Ferreira

Ficha Catalográfica

FERREIRA, LUIZ CLÁUDIO DE ARAÚJO

Uma avaliação da estabilidade de tensão abordando perdas elétricas em sistemas elétricos de potência [Itajubá] 1999.

XI, 118p. 29,7 cm (IEE/EFEI, M.Sc., Engenharia Elétrica, 1999)

Dissertação - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Estabilidade de tensão
I. IEE/EFEI II. Título (série)

Uma Avaliação da Estabilidade de Tensão Abordando Perdas Elétricas em Sistema Elétricos de Potência

Luiz Cláudio de Araújo Ferreira

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de

Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica,

Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência,

e aprovada pela Banca Examinadora abaixo assinada:

_____

Dr. Hermínio Pereira Pinto, D. Sc.
1° Examinador - CEPEL

_____

Prof. Germano Lambert Torres, Ph.D.
2° Examinador - EFEI

_____

Dr. Sérgio Granville, Ph.D.
3° Examinador - CEPEL (Co-orientador)

_____

Prof. Antônio Carlos Zambroni de Souza, Ph.D.
4° Examinador - EFEI (Orientador)

Ao meu filho,

Igor,

mestre amoroso e paciente

das lições que mais preciso aprender

"A ignorância tem uma inocência
exatamente igual à da sabedoria.
O ignorante ainda não começou a jornada,
ele está em casa;
O sábio já alcançou a meta,
também está em casa.
O instruído está no meio:
é ignorante e pensa que é sábio.

Osho

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Joary Ferreira e Dulcir de Araújo Ferreira, pela formação que tornou possível minha chegada até aqui.

À minha esposa, Silvania, pela paciência e compreensão.

Ao amigo, Antônio Carlos Zambroni de Souza, pelo permanente incentivo e sincera amizade.

À Sérgio Granville, pelas lições de humildade e incansável atenção.

Aos engenheiros, Carlos Alberto de S. Neto e Jorge Luiz de Araújo Jardim, de Furnas Centrais Elétricas, pelos inteligentes comentários e valiosas contribuições.

Ao Centro Nacional de Operação do Sistema - CNOS, especialmente ao engenheiro Décio Nunes Teixeira Junior, pela gentileza e cessão de diagrama ilustrativo.

Aos funcionários da PPG-EFEI, especialmente a funcionária Cristina, pela presteza e carinho sempre dispensados.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO ..... **VIII**

RESUMO ..... **X**

ABSTRACT ..... **XI**

CAPÍTULO 1 ..... **1**

ESTABILIDADE DE TENSÃO: ASPECTOS GERAIS 1
Introdução *1*
Conceitos, definições e classificações *2*
Estabilidade Angular 3
Estabilidade a Pequenos Sinais (ou de regime permanente) 3
Estabilidade Transitória 3
Estabilidade de Frequência 4
Estabilidade de Tensão 4
Fatores de Influência 5
Estabilidade de Tensão a Grandes Perturbações 9
Estabilidade de Tensão a Pequenas Perturbações 10
Histórico de Ocorrências *11*
Ocorrências no Brasil 12
Métodos de Análise da Estabilidade de Tensão *14*
A Análise Dinâmica 15
A Análise Estática 15
Proposta de Trabalho *17*

CAPÍTULO 2 ..... **21**

TÉCNICAS DE ANÁLISE ESTÁTICA 21
Introdução *21*
Métodos para Cálculo da Margem de Carga *22*
A Teoria da Bifurcação 23
Sela-nó em Sistemas de Potência 23
Análise por Decomposição de Matrizes por Autovalores e Valores Singulares 27
Análise pelo Determinante Reduzido 28
Técnica da Função de Energia 28
Método Direto 29
Técnicas de Partição de Redes 30
Métodos de análise adotados *31*
Método da Continuação 32
Formulação Matemática 33
Previsor, Controle do Tamanho do Passo e Parametrização 34
Corretor 36
Síntese do Método da Continuação 36
Método do Vetor Tangente 37
Análise de Perdas Elétricas 39
Análise de Contingências 41
Técnicas de Otimização 42
Conclusões *44*

CAPÍTULO 3 ..... **46**

FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO 46
Introdução *46*
Fluxo de Potência *47*
Histórico do Fluxo de Potência Ótimo *50*
Modelagem do Problema de Fluxo de Potência Ótimo *55*
Variáveis 55
Funções Objetivo 56
Mínimo Custo de Geração Ativa 56
Mínimo Custo de Geração Reativa 57

Mínima Alocação de Potência Reativa 57
Mínima Alocação de Potência Ativa 58
Mínima Perda: 58
Mínimo Corte de Carga 58
Mínimo Desvio de Potência Ativa Gerada 59
Mínimo Desvio de Ângulo de Defasamento 59
Mínimo Desvio de Tensão 60
Mínimo Desvio de Tap 60
Mínimo Desvio de Intercâmbio 60
Mínimo Desvio de Ponto de Operação 61
Restrições de Igualdade 61
Equações de Balanço de Potência Ativa 61
Restrições de Balanço de Potência Reativa 62
Intercâmbio Líquido entre Áreas 63
Restrições de Desigualdade 64
Módulo de Tensão: 64
Potência Ativa Gerada: 64
Potência Reativa Gerada: 65
Potência Reativa Alocada Capacitiva: 65
Potência Reativa Alocada Indutiva: 65
Potência Ativa Alocada: 65
Tap do Transformador: 66
Ângulo de Defasamento: 66
Rejeição de Carga: 66
Intercâmbio entre Áreas: 67
Máximo Carregamento nos Circuitos 67
Método de Pontos Interiores Primal-Dual *67*

CAPÍTULO 4 ..... **73**

METODOLOGIA E RESULTADOS 73
Introdução *73*
Metodologia *74*
Primeira Etapa 74
Estratégias das Otimizações 75
Segunda Etapa 77
Resultados *78*
Caso Base 78
Minimizando Perdas e Gerações de Potência Reativa 79
Margens de Carga e Grupos de Barras 81
Minimizando Geração em Síncronos e Perdas do Sistema 84
Compensando o Sistema 88
Montantes e Localização 88
Novas Margens de Carga e Barras Críticas 91
Conclusões *94*

CAPÍTULO 5 ..... **96**

CONCLUSÕES 96
Problema Examinado *96*
Contribuições *97*
Sugestões para desenvolvimentos futuros *99*

ANEXO I **101**

ANEXO II **103**

ANEXO III **105**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **107**

RESUMO

A operação de linhas de transmissão fortemente carregadas tem direcionado os sistemas de potência para problemas como o aumento das perdas de potência reativa, esgotamento dos recursos deste tipo de potência e para a instabilidade de tensão.

Neste cenário, uma política de máxima redução de perdas e de completa exploração dos recursos de potência reativa, mostrou-se como importante estratégia de operação. De forma a atender esta estratégia neste horizonte, restou às equipes de planejamento, o estudo de novas compensações de potência reativa, além da otimização dos recursos de controle de tensão existentes.

Alguns resultados de otimizações mostraram que os ajustes nos recursos de controle de tensão de forma a reduzir as perdas de potência reativa, algumas vezes poderiam não ser os mais recomendados para o aumento da margem de carga do sistema, apesar do ponto de colapso de tensão estar geralmente associado a um ponto de operação com altas perdas elétricas.

Este trabalho estuda a relação entre as ações de controle que visam a redução de perdas de potência reativa e as ações que possibilitam o aumento da margem de carga em um sistema elétrico de potência. Numa primeira etapa, são comparadas otimizações que objetivam a redução de perdas com outras otimizações que favoreçam o aumento de carga do sistema; numa segunda etapa são analisados os efeitos de uma compensação shunt adicional na margem de carga do sistema. Neste caso, esta compensação é feita nos conjuntos de barras críticas à estabilidade de tensão e/ou nos conjuntos de barras candidatas à redução de perdas.

Os resultados obtidos qualificam a técnica proposta nos estudos de planejamento da operação elétrica de sistemas de potência.

ABSTRACT

The operation of transmission lines heavily loaded have driven the power systems to experiment problems like reactive power losses increase, exhaustion of reactive power resources and voltage instability.

In this scenario, reducing the system losses maximally and exploring the reactive power resources at most has shown to be an important strategy of operation. In order to make this strategy feasible in a short term horizon, planning working groups have been driven to study new capacitor installations and optimization of the existing voltage control devices.

Some results obtained with the use of optimization techniques show that reducing the system reactive power losses, not necessarily provide a larger load margin, even though a voltage collapse point may be associated with high values of active and reactive power losses.

This work studies the relation between the control actions recommended to reduce the system losses and the actions that take place to increase the load margin associated with a power system. Firstly, optimization techniques are carried out, and the results obtained for losses reduction and load margin increase are compared; secondly, the effects of shunt capacitor compensation in the system load margin are analyzed. In this case, such compensation is done in two groups of buses: critical buses for voltage collapse purpose and buses whose capacitor installation reduces at most the system losses.

The results obtained qualify the proposed technique to be employed in the planning studies of power systems operation.

CAPÍTULO 1

ESTABILIDADE DE TENSÃO: ASPECTOS GERAIS

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos sistemas elétricos de potência resultou em modos mais complexos de instabilidade, requerendo uma compreensão mais abrangente dos vários aspectos da estabilidade do sistema.

O crescimento contínuo da carga, o aumento das interligações, o maior uso de novas tecnologias e controles, somadas às pressões econômicas que apontavam para a necessidade de operação do sistema elétrico em condições cada vez mais estressadas, formaram um campo para que diferentes formas de instabilidade surgissem.

Até recentemente, o maior foco de interesse e esforços eram concentrados na área de estabilidade angular na forma de estabilidade transitória, mas o crescimento constante da carga sendo suprido cada vez mais por distantes parques geradores através de longas linhas de transmissão, fez com que surgissem problemas ligados com a demanda de potência reativa e com a estabilidade de tensão. Além disso, muitos fatores que influenciam a estabilidade de tensão não são modelados nos programas convencionais de estabilidade transitória, ou a modelagem existente não é apropriada para a simulação da característica, muitas vezes lenta, da instabilidade de tensão.

A instabilidade em sistemas de potência pode ter diferentes formas e ser influenciada por uma ampla gama de fatores. O desempenho dinâmico do sistema de potência é influenciado por uma diversidade de mecanismos com características e classes de respostas diferentes. Assim, a classificação da estabilidade em categorias facilita a

análise dos problemas de estabilidade na medida que incluem a identificação dos fatores essenciais que contribuem para a instabilidade, ao mesmo tempo em que estabelecem métodos de planejamento para a melhoria da operação.

2 CONCEITOS, DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÕES

Estabilidade de um sistema de potência é a capacidade que este sistema tem de manter um ponto de equilíbrio sob condições normais de operação e permanecer num estado aceitável de equilíbrio depois de ter sofrido uma perturbação. Estabilidade é uma condição de equilíbrio entre forças opostas [1].

Tradicionalmente o problema de estabilidade foi tratado como uma manutenção de sincronismo. Entretanto, a instabilidade em sistemas de potência pode se manifestar em diferentes formas, dependendo da configuração do sistema, do modo de operação e da forma do distúrbio. A instabilidade pode ocorrer sem perda de sincronismo, como, por exemplo, a instabilidade devido ao colapso de tensão de um motor de indução suprido por um gerador síncrono através de uma linha de transmissão [2].

Outra possibilidade de evento é a ocorrência de um desbalanço significativo entre carga e geração, onde tanto o gerador como seu regulador de velocidade tornam-se importantes na análise da estabilidade, juntos com os demais controles do sistema e proteções especiais. Não havendo uma coordenação apropriada entre estes dispositivos, a perda intempestiva de geradores e/ou cargas podem colapsar o sistema devido à instabilidade da frequência.

Kundur [1, 3] propõe uma classificação para estudos de estabilidade baseada na natureza física da instabilidade resultante (ângulo, frequência ou tensão), na dimensão da perturbação considerada, no método apropriado para análise, nos mecanismos, nos processos e extensão dos tempos envolvidos.

2.1 Estabilidade Angular

É a habilidade das máquinas síncronas interligadas de permanecer em sincronismo sob condições normais de operação e após estarem sujeitas a um distúrbio. Isto depende da capacidade para manter/restaurar o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o mecânico de cada máquina. Se este equilíbrio não se manifestar, a instabilidade resultante ocorre em forma de aumento das oscilações angulares de algum gerador, levando a perda de sincronismo com outros geradores. Duas categorias de estabilidade podem auxiliar a caracterizar a estabilidade de ângulo do rotor.

2.1.1 Estabilidade a pequenos sinais (ou de regime permanente)

É a habilidade do sistema de potência em manter o sincronismo sob pequenos distúrbios. Os distúrbios são considerados suficientemente pequenos, o que permite a linearização do sistema de equações para a análise.

A análise a pequenos sinais usando técnicas lineares dependem do ponto de operação do sistema e trazem informações valiosas a respeito da característica dinâmica do sistema de potência neste ponto.

A técnica de análise modal da matriz de estado do sistema é apropriada para a análise deste tipo de estabilidade [4, 5].

2.1.2 Estabilidade transitória

É a habilidade do sistema de potência em manter o sincronismo após um distúrbio transitório severo. A resposta do sistema resultante envolve grandes excursões do ângulo do rotor do gerador e é influenciada pela relação não linear entre potência-ângulo.

A estabilidade transitória depende tanto do ponto de operação inicial do sistema como da severidade da perturbação.

O intervalo de tempo de interesse dos estudos de estabilidade transitória é usualmente limitado em 3 a 5 segundos após a perturbação, podendo ser estendido para 10 segundos em grandes sistemas interligados.

A técnica de simulação não-linear no domínio do tempo e com modelagem transitória convencional, é a empregada nos estudos de estabilidade transitória.

2.2 Estabilidade de Frequência

Estabilidade de freqüência é a habilidade do sistema de potência em manter a freqüência dentro de uma faixa nominal, seguindo-se a uma severa oscilação no sistema, que pode ou não particioná-lo em subsistemas. Esta habilidade é dependente da capacidade do sistema em restaurar o balanço geração / carga com um mínimo de perda de carga.

Geralmente, os problemas de estabilidade de frequência são associados às inadequadas respostas de equipamentos, fraca coordenação de controles e equipamentos de proteção, ou reserva de geração insuficiente.

Os efeitos da atuação dos controles automáticos de geração (CAG), saturação de transformadores e comportamento da carga fora das condições nominais, são importantes nesta análise.

A técnica de simulação não-linear no domínio do tempo com modelagens mais aprimoradas para as dinâmicas associadas às severas excursões de parâmetros e intervalos de tempo estendidos, é indicada para esta análise [6, 7].

2.3 Estabilidade de Tensão

Estabilidade de tensão é a habilidade do sistema de potência em manter as tensões de regime permanente aceitáveis em todas as barras do sistema, tanto sob condições normais de operação, como também após um distúrbio [3].

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

Um sistema sofre instabilidade de tensão quando uma perturbação, crescimento na demanda de carga ou uma mudança nas condições de operação, causa uma progressiva e incontrolável queda ou elevação na tensão [2].

2.3.1 Fatores de influência

O principal fator responsável pela instabilidade de tensão é a inabilidade do sistema de potência em manter um apropriado balanço de potência reativa e prover um suporte adequado de tensão através do sistema [1]. Entre os principais fatores que influem na estabilidade de tensão, destacam-se [2, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]:

- Capacidade dos Geradores

A atuação dos limitadores das correntes de campo e armadura dos reguladores de tensão dos geradores pode provocar a redução da potência reativa gerada, embora transitoriamente estes equipamentos possam fornecer potência reativa além desses limites.

- Características das Linhas de Transmissão

Uma linha de transmissão apresenta um comportamento diferenciado em função de seu carregamento. Ela produz potência reativa proporcionalmente ao quadrado da tensão e consome potência ativa e reativa, proporcionalmente ao quadrado da corrente. Dessa forma, a potência reativa líquida proporcionada por uma linha de transmissão variará com seu ciclo de carga, sendo as condições de carga pesada as mais críticas sob o aspecto de estabilidade de tensão, quando as perdas elétricas e quedas de tensão podem tornar-se elevadas.

- Compensadores de Potência Reativa

Os bancos de capacitores "shunt", apesar de melhorarem o suporte local de potência reativa, têm o inconveniente de fornecer essa potência como função do quadrado da tensão. Portanto, podem não produzir bons resultados na operação com baixos perfis de tensão. Mesmo os compensadores estáticos, apesar de proporcionarem maior flexibilidade, ao atingirem seus limites de geração de potência reativa, tornam-se simples capacitores "shunt".

Os capacitores série têm tradicionalmente sido associados a longas linhas de transmissão para proporcionarem benefícios do ponto de vista da estabilidade angular, reduzindo o ângulo de fase entre os terminais transmissor e receptor. Eles produzem potência reativa proporcionalmente ao quadrado da corrente e independentemente da tensão nas barras, possibilitando reduzir a queda de tensão resultante da reatância da linha. Esta característica de auto-regulação faz com que estes equipamentos venham encontrando aplicações em linhas de transmissão curtas com o objetivo final de melhorar a estabilidade de tensão, em razão de serem tão mais efetivos quanto mais se necessita de compensação. Entretanto, os capacitores série têm a desvantagem de propiciarem o aparecimento de ressonância subsíncrona e a necessidade da utilização de dispositivos especiais de proteção contra sobretensões decorrentes de curto-circuito na rede elétrica [15]. De forma similar à compensação "shunt", uma maior flexibilidade pode ser obtida através do uso de compensação série controlável [16, 17].

- Característica das Cargas

A modelagem da carga total de uma subestação é usualmente representada por um modelo composto que considera parcelas de carga com diferentes comportamentos em função da tensão. Cargas industriais, onde predomina o comportamento do tipo potência constante, são mais críticas sob o aspecto de estabilidade de tensão. Por outro lado,

cargas residenciais, que de uma maneira geral apresentam redução de suas potências sob situações de queda de tensão, proporcionam uma certa "autocorreção", sendo portanto mais favoráveis do ponto de vista de estabilidade de tensão. Cabe ressaltar que a utilização intensiva de condicionadores de ar pode mudar bastante o comportamento das cargas residenciais [18].

Também é importante destacar que algumas cargas, apesar de, em um primeiro momento, apresentarem redução de suas potências com a queda da tensão, podem, alguns instantes depois, elevar suas potências, quer pela presença de transformadores com tapes comutáveis sob carga junto às mesmas, quer por usarem termostatos [2, 11].

Os modelos representativos do comportamento da carga com a tensão são tradicionalmente classificados em duas categorias: modelos estáticos e modelos dinâmicos.

Os modelos estáticos de carga expressam as potências ativa e reativa de uma barra em um determinado instante de tempo como função da magnitude da tensão nessa barra para o mesmo instante. Esses modelos são usados para representar componentes essencialmente estáticos da carga, por exemplo, cargas de aquecimento e iluminação, e como uma aproximação para componentes dinâmicos da carga, por exemplo, cargas acionadas por motores. Um modelo estático bastante utilizado é o modelo ZIP, no qual as cargas ativa e reativa são expressas através das seguintes equações algébricas:

$$P = P_0\left[a_1\left(\frac{V}{V_o}\right)^2 + a_2\left(\frac{V}{V_o}\right) + a_3\right] \tag{2.1}$$

$$Q = Q_0\left[a_4\left(\frac{V}{V_o}\right)^2 + a_5\left(\frac{V}{V_o}\right) + a_6\right] \tag{2.2}$$

onde **P** e **Q** são as componentes de potência ativa e reativa da carga quando a magnitude da tensão na barra é **V** e o subscrito **o** identifica os valores das respectivas variáveis na condição inicial de operação. Os parâmetros desse modelo são os coeficientes a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 e a_6, os quais definem as proporções das parcelas de carga que se comportam como impedância constante (a_1 e a_4), corrente constante (a_2 e a_5) e potência constante (a_3 e a_6).

Os modelos dinâmicos de carga expressam as potências ativa e reativa de uma barra em um determinado instante de tempo como função da magnitude da tensão nessa barra em um instante passado de tempo e, usualmente, incluindo o instante presente. Cargas constituídas essencialmente por motores, onde a resposta a um distúrbio não ocorre instantaneamente, mas sim com determinada constante de tempo, podem requerer esses modelos, cuja representação faz uso de equações diferenciais.

Destaca-se que sob o ponto de vista da fidelidade da representação da carga, a maneira mais apropriada para identificar-se seu modelo seria através de testes nas diversas subestações de um sistema. Entretanto, tal procedimento é de difícil execução, uma vez que as empresas relutam em permitir que seus consumidores sejam submetidos a distúrbios voluntários. Adicionalmente, a composição da carga de uma subestação pode variar em função do horário, o que exigiria repetidos testes para cada subestação.

Assim sendo, a tendência predominante tem sido a de recorrer-se a outros expedientes, tais como levantamento das características das cargas com base na sua composição por classe de consumidores (industrial, comercial e residencial), bem como baseando-se na reprodução de determinadas ocorrências registradas.

Recentemente a referência [2] apresentou uma metodologia para testes de campo onde pequenas variações de tapes são suficientes para o levantamento dinâmico da carga,

concluindo que, de uma maneira geral, a resposta natural da carga pode ser representada através de modelos estáticos.

Kundur [1] observa que a instabilidade de tensão nem sempre ocorre sozinha. Muitas vezes, a instabilidade de ângulo e tensão caminham juntas. Uma pode seguir a outra e a distinção entre elas é importante para o entendimento das causas reais dos problemas e para a adoção de procedimentos operativos no sistema.

As referências [1, 19] também alertam para a distinção entre instabilidade e colapso de tensão. O fenômeno de colapso de tensão está ligado à sequência de eventos que acompanham a instabilidade de tensão, como a queda, em níveis inaceitáveis, do perfil de tensão em uma significativa região do sistema. A instabilidade de tensão pode, diferentemente do colapso, provocar elevação da tensão. O colapso de tensão pode estar associado tanto com a instabilidade de tensão como com a instabilidade angular.

A estabilidade de tensão pode ser dividida em duas subclasses, de acordo com o tipo de evento: grandes ou pequenas perturbações [1].

2.3.2 Estabilidade de Tensão a Grandes Perturbações

Está ligada com a habilidade do sistema em manter a tensão após grandes perturbações. Esta habilidade é determinada pela característica de carga do sistema e pelas interações entre proteções e controles discretos e contínuos.

A determinação da estabilidade de tensão a uma grande perturbação normalmente requer o exame do desempenho dinâmico do sistema em um período de tempo suficiente para a captura das interações de dispositivos como LTCs e limitadores de corrente de campo de geradores. O período de tempo de interesse para o estudo pode variar de uns poucos segundos a 10 minutos.

Um critério para análise da estabilidade de tensão a grandes perturbações é o de alcance, em todas as barras, de níveis de tensão aceitáveis em regime permanente, após a ocorrência e ação dos controles do sistema.

A estabilidade de tensão a grandes perturbações deve ser estudada através de simulações no domínio do tempo [20, 21, 22, 23].

2.3.3 Estabilidade de Tensão a Pequenas Perturbações

Está ligada à habilidade do sistema de potência em manter a tensão sob controle após uma pequena perturbação. Esta forma de estabilidade é determinada através da característica de carga, controles contínuos e discretos, em um dado instante.

Este conceito é útil para determinar, num instante qualquer, como a tensão irá responder a uma pequena mudança no sistema, como, por exemplo, a transição entre períodos de carga. Para pequenos distúrbios, as análises que utilizam técnicas de linearização trazem valiosas informações sobre o mecanismo da instabilidade de tensão, identificando áreas potencialmente críticas.

Um critério para análise da estabilidade de tensão a pequenas perturbações é o de sensibilidade V-Q positiva para todas as barras do sistema, numa dada condição operativa, ou seja, a magnitude da tensão cresce com o aumento da injeção de potência reativa.

Na literatura, a maior parte dos artigos que estudam a estabilidade de tensão a pequenas perturbações utilizam técnicas de análise estática [24, 25, 26, 27, 28, 29].

3 HISTÓRICO DE OCORRÊNCIAS

A ocorrência de alguns incidentes envolvendo problemas de estabilidade de tensão fez com que o tema ganhasse destaque a nível mundial nos últimos anos. Dentre esses eventos pode-se citar os seguintes [2, 8]:

- Japão, 22 de Agosto de 1970
- França, 19 de Dezembro de 1978
- Dinamarca, 2 de Março de 1979
- Bélgica, 4 de Agosto de 1982
- Flórida, 2 de Setembro de 1982
- Flórida, 26 de Novembro de 1982
- Flórida, 28 de Dezembro de 1982
- Flórida, 30 de Dezembro de 1982
- Suécia, 27 de Dezembro de 1983
- Flórida, 17 de Maio de 1985
- Checoslováquia, 5 de Julho de 1985
- Inglaterra, 20 de Maio de 1986

- França, 12 de Janeiro de 1987

- Japão, 23 de Julho de 1987

- WSCC, 2 de Julho de 1996

3.1 Ocorrências no Brasil

As ocorrências de instabilidade de tensão no sistema elétrico brasileiro até recentemente estava restringida a área RJ/ES, área dependente de geração externa e com carga reativa fortemente influenciada pelas altas temperaturas locais. Entretanto, as ocorrências de Abril de 1997 na Área São Paulo mostraram na prática que este fenômeno pode também ocorrer em uma rede malhada e com um grande parque gerador.

As incertezas, as pressões econômicas e as dificuldades na previsão de carga a médio e longo prazo contribuíram para que os grupos de estudo não apontassem a necessidade de novos equipamentos e reforços no sistema interligado. O estressamento gradativo do sistema e o aumento das cargas reativas, levaram as empresas a buscarem compensação destas cargas de forma a reduzirem as perdas elétricas e garantir uma rápida flexibilidade operativa. Por outro lado, o sistema tornou-se extremamente dependente desta compensação.

As ocorrências de Abril e Novembro de 1997, mostram a dependência do sistema em relação aos recursos de potência reativa e a necessidade urgente de uma otimização destes recursos e do controle de tensão.

No dia 24 de Abril de 1997, uma demanda de carga recorde no sistema e uma combinação de manutenção em importantes equipamentos de controle de tensão,

culminaram com uma interrupção de suprimento de cerca de 7600 Mw no sistema S/SE/CO brasileiro [30] (Anexo I).

A área São Paulo já se encontrava com baixo perfil de tensão e com todos os recursos esgotados no início de sua rampa de carga (780 Mw/10 minutos). A rápida tomada de carga e o esgotamento dos compensadores síncronos de Ibiúna, fizeram com que a tensão do barramento de 345 kV, controlados por estes síncronos, caísse rapidamente, provocando a atuação da proteção de sobre-excitação de um dos três compensadores síncronos em operação nesta estação. A interrupção de cerca de 320 Mvar gerados por este síncrono ocasionou mais queda de tensão, provocando a atuação dos relés de subtensão dos centros de cargas essenciais de Ibiúna, a interrupção da alimentação para os serviços auxiliares dos síncronos remanescentes e o desligamento automático destes, indisponibilizando mais 650 Mvar.

A indisponibilidade de quase 1000 Mvar em acentuada rampa de carga provocou o desligamento automático do bipolo 2 do elo CC, ligado ao barramento de 345 kV de Ibiúna, pela atuação das proteções de mínima tensão DC, rejeitando 3000 Mw, e o desligamento automático de dois outros síncronos importantes para a área São Paulo - T. Preto (300 Mvar) e Embuguaçú (250 Mvar).

Após estes desligamentos o sistema operou num quadro de subfrequência e subtensão, com as ações pré-estabelecidas para corte de carga manual para subfrequência sendo tomadas no período de carga ainda crescente, dificultando o restabelecimento das condições normais de operação.

A entrada da rampa de carga da área vizinha à área São Paulo, área Rio de Janeiro/Espírito Santo, fez com que piorasse ainda mais o cenário de subtensão e houvesse o desligamento automático da unidade termonuclear Angra 1 (620 Mw), localizada nesta última área.

O desligamento automático do bipolo remanescente do elo CC com 2386 Mw, finalizou a sequência de eventos, fazendo com que a frequência atingisse 58,10 Hz e provocando a atuação dos 1 e 2os estágios do Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC).

No dia 13 de Novembro de 1997, a coincidência de temperaturas elevadas na região sudeste também provocou um rápido esgotamento dos recursos de potência reativa e um afundamento generalizado da tensão do sistema. O desligamento automático de uma linha de transmissão em 230 kV, com cerca de 160 Mw, provocou um colapso de tensão, e rejeição de 1210 Mw na Área Rio de Janeiro / Espírito Santo (Anexo II).

4 MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TENSÃO

A análise da estabilidade de tensão deve responder às perguntas [2]:

- Estado: O ponto de operação do sistema é estável ou instável ?
- Proximidade: Se estável, qual a margem de estabilidade ?

  Quais são as ações com influência na margem de estabilidade ?
- Mecanismo: Se instável, quais são as áreas envolvidas ?

  Por que a instabilidade ocorreu ?

  Quais fatores contribuíram ?

  Quais são as medidas que podem prevenir ou controlar a instabilidade ?

A estabilidade de tensão vem sendo estudada sob o ponto de vista estático e dinâmico, sendo a escolha da abordagem basicamente dependente da perturbação estudada.

4.1 A Análise Dinâmica

A análise dinâmica usa técnicas não-lineares de simulação no domínio do tempo ou técnicas não-lineares no domínio da frequência. É importante para estudos envolvendo coordenação de controles e proteções, nas análises de ocorrências e como uma base para algumas análises estáticas [2].

As vantagens da análise dinâmica residem na possibilidade de captura e cronologia dos eventos e na reprodução fiel da dinâmica da instabilidade de tensão.

As desvantagens dessa análise residem na necessidade de aquisição de uma quantidade considerável de dados, de longos tempos de simulação e o não fornecimento direto de informações a respeito da margem e área crítica da estabilidade.

Técnicas de simulação com passo de integração variável, processamento paralelo [31] e de simulação quasi-dinâmica [22], vem reduzindo drasticamente o esforço computacional nas análises dinâmicas, tornando possível, inclusive, a utilização deste tipo de análise em tempo real.

4.2 A Análise Estática

O modelo dinâmico de um sistema de potência pode ser representado através de um conjunto de equações diferenciais da seguinte forma geral:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \tag{4.1}$$

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

onde

$\mathbf{x}$ representa as variáveis de estado do sistema

A análise estática considera que, em muitos casos, a dinâmica do sistema com influência na estabilidade de tensão varia lentamente. Assim sendo, as derivadas das variáveis de

estado $(\dot{\mathbf{x}})$ em relação ao tempo podem ser consideradas iguais a zero e a equação (4.1) reduz-se a uma equação puramente algébrica para cada ponto de equilíbrio, isto é,

$$\mathbf{f(x) = 0} \tag{4.2}$$

permitindo a obtenção, identificação e estudo de instantâneos da operação e que a análise da estabilidade de tensão seja desenvolvida considerando-se apenas o modelo de sistema utilizado nos estudos de fluxo de potência [2].

A referência [32] mostra que, sob certas condições, a análise estática proposta por este modelo pode também ser suficiente para a análise dinâmica do sistema.

A análise estática é recomendada, por seu baixo custo computacional, na análise em tempo real e onde há a necessidade de estudo de uma grande quantidade de condições e/ou contingências no sistema.

As vantagens adicionais da análise estática são: a capacidade de proporcionar informações a respeito da condição de estabilidade do ponto de equilíbrio considerado, o limite de máximo carregamento, a margem de estabilidade de uma determinada condição operativa, as áreas críticas do sistema, a classificação de contingências críticas [33], e a melhor localização e quantidade necessária de potência reativa para compensação ou obtenção de reserva girante. A riqueza de informações que a análise estática pode proporcionar, também qualifica esta técnica para a complementação das análises dinâmicas de estabilidade de tensão.

Uma vez que a trajetória no tempo não é simulada na abordagem estática, a indicação dos pontos de operação estudados podem não ser viáveis do ponto de vista operativo. Esta consideração somada a necessidade de cautela na retenção e simplificação de mecanismos essenciais para o estudo, são as desvantagens desta tipo de análise [2].

5 PROPOSTA DE TRABALHO

A combinação do acentuado e constante crescimento do consumo de energia elétrica com o aumento das incertezas no âmbito do planejamento da expansão, contribuíram para a ampliação das dificuldades de decisão de novos investimentos em sistemas elétricos e no conseqüente esgotamento de recursos deste sistema no horizonte de operação a curto-prazo.

A operação dos grandes troncos de transmissão com carregamentos próximos dos limites, ajudada pelas soluções hoje apresentadas para estabilidade angular, contribuíram para o aumento das perdas de potência reativa, para o esgotamento dos recursos deste tipo de potência e para os problemas de estabilidade de tensão.

As ocorrências no sistema elétrico ilustram com casos reais o mecanismo de colapso de tensão e confirmam as conclusões à respeito da natureza do fenômeno, mostrando que o sistema pode atingir um ponto de colapso através de pequenas perturbações. Esta característica, junto com outras considerações, permite a abordagem estática e o uso de equações de fluxo de carga para modelar alguns comportamentos dinâmicos de um sistema elétrico [34]. Este modelo será empregado neste trabalho.

As perturbações sofridas pelo sistema elétrico brasileiro também confirmaram a relação da instabilidade de tensão com o esgotamento dos recursos de potência reativa do sistema, indicando a urgente necessidade da otimização destes recursos [35]. Neste cenário, uma política de máxima redução de perdas mostrou-se como importante estratégia de recuperação da margem operativa do sistema a curto-prazo, restando às equipes de planejamento o estudo de otimização dos recursos através de ajustes e compensação de potência reativa shunt adicional de forma a atender a esta estratégia neste horizonte.

Um método de convergência robusto que otimiza o despacho de potência reativa foi proposto [36] e incorporado em um programa de fluxo de potência ótimo – FLUPOT (CEPEL) [37, 38]. Este programa tornou-se uma ferramenta importante na análise de sistemas elétricos de potência, sobretudo pela necessidade de consideração, na análise de colapso de tensão, de todos os limites e recursos para controle de tensão do sistema e as crescentes dificuldades de convergência dos programas de fluxo de potência convencional sob esta consideração [35, 39]. O FLUPOT tem como estratégia, aplicar diretamente o algoritmo de pontos interiores ao problema original de programação não linear que é o fluxo de potência ótimo [36, 40, 41]. Esta estratégia mostrou-se apropriada por não depender da convergência de algoritmos de fluxo de potência no seu processo de convergência, com as equações de balanço de potência ativa / reativa sendo somente satisfeitas na solução ótima. A possibilidade de representação de várias opções de controles (inclusive do elo CC), a grande variedade de funções objetivo, a possibilidade de combinação e no uso direto destas funções em problemas atuais da operação do sistema elétrico brasileiro, consagraram o FLUPOT nos grupos de estudos do planejamento da operação e da expansão do sistema.

Em alguns desses estudos, os resultados das otimizações mostraram que os ajustes nos recursos de controle de tensão de forma a reduzir as perdas de potência reativa, algumas vezes poderiam não ser os mais recomendados para o aumento da margem de carga do sistema, apesar do ponto de colapso de tensão estar geralmente associado a um ponto de operação com altas perdas elétricas.

Desta maneira, a certeza de um desempenho seguro através do gerenciamento da margem de disponibilidade de potência reativa do sistema, afetada principalmente pelas perdas de potência reativa, não estava garantida.

Assim, surgiu a motivação de estudo da relação entre as ações de controle que visam a redução de perdas de potência reativa e as ações que possibilitam o aumento da margem de carga para colapso de tensão em um sistema elétrico de potência.

A proposta consiste em comparar, numa primeira etapa, otimizações que objetivem a redução de perdas com outras otimizações que favoreçam o aumento de carga do sistema; em segunda etapa serão analisados os efeitos de uma compensação shunt adicional na margem de carga do sistema, quando esta compensação é feita nos conjuntos de barras críticas à estabilidade de tensão e/ou nos conjuntos de barras candidatas à redução de perdas. Para este fim, é utilizado o método de pontos interiores nas otimizações, incluído no programa FLUPOT [38], o método da continuação [26] no cálculo da margem de carga e a técnica do vetor tangente [24, 27, 28, 29] para a sinalização de barras críticas e candidatas à redução de perdas, incorporados no programa de fluxo de potência LFLOW (FURNAS) [42].

O LFLOW nasceu da necessidade de se ter um programa de fluxo de potência rápido e com garantia de convergência para a preparação de casos base para processamentos dinâmicos do Sistema de Avaliação da Segurança Dinâmica de Furnas (atualmente em fase de conclusão). Este sistema tornará possível informar, em tempo real, aos operadores do sistema, o nível de segurança operativa frente às piores contingências em rede completa ou alterada [31]. O LFLOW faz uso de técnicas avançadas para melhoria da convergência (Full-Newton com passo controlado e método continuado). Os controles do elo CC, controles de tapes e de tensão em barras remotas, são representados na matriz Jacobiana, o que o torna muito robusto. Além disso, tendo incorporado o método da continuação baseado no vetor tangente, o LFLOW é capaz de simular, de forma eficiente, diferentes direções de crescimento de carga, assinalando as barras mais críticas, calculando margens de crescimento e traçando curvas do

comportamento da tensão em função deste crescimento. O programa converge para qualquer crescimento de carga viável, ou seja, caso exista solução.

Este trabalho está dividido em capítulos de forma a apresentar gradualmente as técnicas e estratégias utilizadas. O Capítulo 2 descreverá as principais técnicas de análise estática, justificando as escolhas do método da continuação para o cálculo da margem de carga do sistema e do método do vetor tangente como técnica para identificação tanto das barras críticas à estabilidade de tensão, como também para identificação das barras candidatas à redução de perdas.

O Capítulo 3 está organizado de forma que inicialmente é abordada uma introdução ao problema de fluxo de potência junto com a definição das equações básicas do fluxo de potência ótimo (FPO). Nas seções seguintes desse capítulo, há um breve histórico dos principais métodos desenvolvidos para a resolução do FPO, são dados alguns exemplos de aplicações práticas em sistemas elétricos de potência, e uma descrição detalhada de cada elemento que compõe o FPO (suas variáveis, funções objetivo e restrições). A formulação matemática da metodologia de otimização utilizada no FLUPOT – a de Pontos Interiores – encerra este capítulo.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e compara as ações visando a redução de perdas com as ações objetivando o aumento da margem de carga de um caso real do sistema elétrico brasileiro.

A proposição de um elenco de conclusões baseadas nos resultados obtidos e as sugestões para desenvolvimentos futuros, encerram este trabalho no Capítulo 5.

CAPÍTULO 2

TÉCNICAS DE ANÁLISE ESTÁTICA

1 INTRODUÇÃO

O capítulo anterior mostrou que a estabilidade de tensão vem sendo estudada sob o ponto de vista estático e dinâmico, sendo a escolha da abordagem basicamente dependente da perturbação estudada.

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

Para pequenos distúrbios, as análises que utilizam técnicas de linearização trazem valiosas informações sobre o mecanismo da instabilidade de tensão, como informações a respeito da condição de estabilidade do ponto de equilíbrio considerado, o limite de máximo carregamento, a margem de estabilidade de uma determinada condição operativa, as áreas críticas do sistema, a classificação de contingências críticas, e a melhor localização e quantidade necessária de potência reativa para compensação ou obtenção de reserva girante.

As ocorrências de colapso de tensão no sistema elétrico brasileiro mostraram a importância do conhecimento da distância entre um ponto de operação e o ponto de máximo carregamento do sistema. Uma vez que o colapso de tensão tem sido reconhecido como um fenômeno que se inicia localmente e se espalha pela vizinhança [3], a sinalização de áreas ou barras críticas do sistema, tem importância fundamental para a otimização das ações de controle do fenômeno.

A distância entre um ponto de operação conhecido (caso base) e o ponto de máximo carregamento do sistema será denominada neste trabalho como "***margem de carga***"; as barras cujas variações de carga produzam maiores variações de tensão no ponto de colapso, serão referidas como "***barras críticas***".

O fenômeno de colapso de tensão tem relação com sistemas fortemente carregados. Esta característica tem levado as equipes de planejamento da operação recomendarem medidas de forma a reduzir as perdas ou geração de potência reativa nos geradores do sistema, com o objetivo final de redução dos níveis de carregamento da rede. Desta forma, uma técnica para a sinalização de barras, onde fossem mais efetivas as medidas visando a redução de perdas – denominadas aqui pela abreviação "***barras candidatas***" -, seria de grande auxílio a estas equipes.

Este capítulo apresentará a teoria em que se baseiam as técnicas utilizadas neste trabalho para o cálculo da ***margem de carga*** (método da continuação) e das ***barras críticas*** e ***candidatas*** (método do vetor tangente) e as razões técnicas para as escolhas destes métodos.

2 MÉTODOS PARA CÁLCULO DA MARGEM DE CARGA

O cálculo da margem de carga entre o ponto de operação conhecido e o ponto de colapso de tensão implica no conhecimento de um método que identifique o ponto de

colapso de tensão. A teoria da bifurcação tem sido reconhecida na literatura como uma ferramenta importante para a análise do fenômeno, muito embora não se constitua um pré-requisito para o entendimento do problema e o seu detalhamento teórico fuja do escopo deste trabalho.

2.1 A Teoria da Bifurcação

O estudo do comportamento de um sistema de equações não lineares pode ser obtido através da teoria da bifurcação [43]. De todos os tipos de bifurcação, as bifurcações de Sela-nó e Hopf são as mais comuns em estudos da estabilidade da tensão. Se um modelo dinâmico de sistema é empregado, ambos os tipos podem ser detectados. Entretanto, se o modelo de fluxo de carga (estático) é escolhido, somente a bifurcação de Sela-nó é possível de ser encontrada [44]. A bifurcação de Hopf é caracterizada pela existência de um par de autovalores puramente imaginários, enquanto que a bifurcação de Sela-nó é caracterizada pela existência de um autovalor real nulo (matriz Jacobiana singular). Esta importante característica tem sido largamente explorada na literatura. As técnicas citadas nas seções subsequentes reconhecem o ponto de colapso de tensão como um ponto de bifurcação de Sela-nó.

2.1.1 Sela-nó em Sistemas de Potência

Nesta seção o sistema simples de duas barras mostrado na Figura 2.1 é utilizado para a análise de colapso de tensão. O modelo de fluxo de carga empregado é baseado nas considerações desenvolvidas nas referências [34, 45]. A carga é modelada como potências ativa e reativa constantes e deve sempre ser suprida. Isto implica que nenhum limite de geração será considerado e a linha de transmissão é o único fator limitador .

A impedância Z da linha de transmissão é dada por 0,21 pu com ângulo β de 75°. A tensão na barra de carga é desconhecida, enquanto a tensão na barra de geração é fixada em 1,0 pu com ângulo δ_1 de 0°.

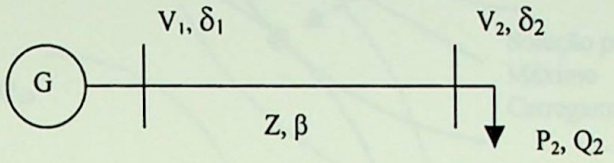


Figura 2.1 – Sistema de 2 Barras

As equações de fluxo de carga são representadas pelas equações da barra de carga abaixo:

$$\mathbf{P_2 = -V_2 \frac{V_1}{Z} \cos(\delta_2 - \delta_1 + \beta) + \frac{V_2^2}{Z} \cos(\beta)} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{Q_2 = -V_2 \frac{V_1}{Z} sen(\delta_2 - \delta_1 + \beta) + \frac{V_2^2}{Z} sen(\beta)} \quad (2.2)$$

Portanto, para cada valor de carga (P_2, Q_2) deseja-se determinar os valores de magnitude de tensão e ângulo de fase na barra de carga, uma vez que todas os outras variáveis são conhecidas. Note nas equações acima que para cada valor conhecido de ângulo de fase δ_2, dois valores de magnitude de tensão V_2 são obtidos. Se o ângulo de fase δ_2 variar nas equações acima, dois gráficos de V_2 em função de δ_2 podem ser obtidos, um para P_2 e outro para Q_2. Para uma dada carga (P_2, Q_2), portanto, o ponto de operação é dado pela interseção destas curvas. A Figura 2.2 mostra o gráfico de V_2 em função de δ_2 para três situações de carga distintas; $P_{21} < P_{22} < P_{23}$ e $Q_{21} < Q_{22} < Q_{23}$. O fator de potência é mantido constante para os três níveis de carga.

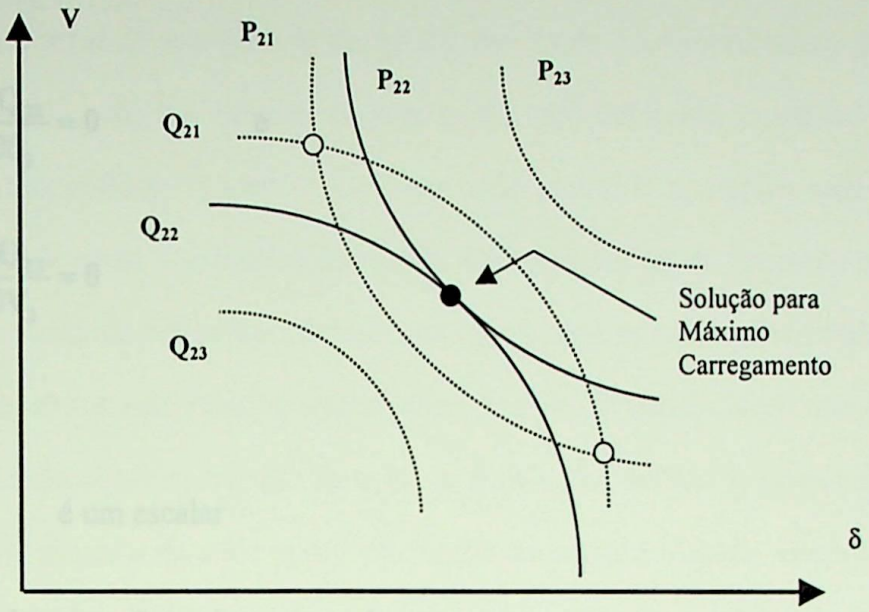


Figura 2.2 – Carregamentos no Sistema de 2 Barras

Note que para a condição de carga inicial (P_{21}, Q_{21}), duas soluções são obtidas; uma no ramo superior e outra no ramo inferior. A carga pode ser aumentada até uma condição tal em que somente uma solução possa ser determinada, como mostrado para a carga (P_{22}, Q_{22}). Este ponto, indicado na figura, é de extrema importância para a análise de estabilidade de tensão. A partir dele, não existe solução para nenhum valor de carga, como observado para a carga (P_{23}, Q_{23}). A carga (P_{22}, Q_{22}) representa o máximo carregamento possível de ser transmitido entre as Barras 1 e 2.

Pela Figura 2.2, a carga (P_{22}, Q_{22}) representa uma fronteira entre os ramos superior e inferior. O fato de existir somente uma solução implica que os vetores gradiente ∇P_2 e ∇Q_2 estão alinhados. Portanto, pode-se escrever:

$$\nabla P_{22} - \mu \nabla Q_{22} = 0$$

ou

$$\frac{\partial P_{22}}{\partial \delta_2} - \mu \frac{\partial Q_{22}}{\partial \delta_2} = 0 \quad \text{e} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial P_{22}}{\partial V_2} - \mu \frac{\partial Q_{22}}{\partial V_2} = 0$$

onde

μ é um escalar

A solução das equações acima para μ fornece:

$$\frac{\partial P_{22}}{\partial \delta_2} \frac{\partial Q_{22}}{\partial V_2} - \frac{\partial P_{22}}{\partial V_2} \frac{\partial Q_{22}}{\partial \delta_2} = 0 \quad (2.4)$$

A equação (2.4) indica que o Jacobiano do fluxo de carga para o sistema da Figura 2.2 é singular para a carga (P_{22}, Q_{22}), implicando num autovalor nulo. As condições de transversalidade de bifurcações do tipo Sela-nó [43] são satisfeitas na Figura 2.2:

- Duas soluções se aproximam em função de uma variação paramétrica (aumento de carga)
- No ponto de solução única, um autovalor real nulo é identificado
- Não existe solução para uma nova variação paramétrica

A satisfação das condições acima caracterizam o ponto (P_{22}, Q_{22}) como um ponto de Sela-nó. Como a matriz Jacobiana do fluxo de carga no ponto de colapso é singular, alguns métodos buscam a determinação do ponto de colapso através da identificação da singularidade desta matriz. Estes métodos serão analisados na próxima seção.

2.2 Análise por Decomposição de Matrizes por Autovalores e Valores Singulares

A idéia de análise de estabilidade de tensão através de decomposição de matrizes por autovalores [25, 46] ou valores singulares [47, 48] tem sido proposta, onde bons resultados são obtidos. A idéia é, para um dado ponto de operação, uma direção de crescimento de carga e geração é escolhida. Diversos pontos de operação são obtidos, até que o ponto de bifurcação Sela-nó (colapso) seja atingido. Para cada ponto de operação, o menor autovalor ou menor valor singular da matriz Jacobiana do fluxo de carga é anotado. Após a obtenção de todos os pontos, um gráfico do menor autovalor ou menor valor singular de cada ponto em função da carga é traçado. O comportamento deste gráfico indica se é possível, para um ponto de operação inicial, prever o ponto de colapso de tensão. Por exemplo, a obtenção de um comportamento quadrático ou linear permite estimar o ponto de colapso a partir de dois ou três pontos de operação conhecidos.

Apesar do cálculo dos autovalores sinalizarem o ponto de colapso, estes índices, por si só, não possibilitam a localização da área crítica, havendo a necessidade de serem associados os cálculos dos autovetores para este fim. A referência [32] mostra, na interpretação dos autovetores, que o autovetor à direita está associado a sensibilidade de tensão e ângulo, enquanto que o autovetor à esquerda está associado a sensibilidade de injeção de potências ativa e reativa. Portanto, o maior componente no autovetor à direita indica a variável mais sensível, i. e., a componente que mais fortemente direciona o sistema à singularidade.

A referência [49] mostra, entretanto, que os índices por autovalores e valores singulares sofrem uma variação brusca no ponto de colapso de tensão e que o autovetor à direita somente identifica a barra crítica no ponto de colapso, dificultando as ações para controle do fenômeno. Desta forma, tais métodos tendem a falhar na prévia identificação do ponto de colapso de tensão.

2.3 Análise pelo Determinante Reduzido

Este método baseia-se na redução da matriz Jacobiana à dimensão das equações de potências ativa e reativa de cada barra de carga em relação ao seu ângulo de fase e módulo da tensão [50]. Esta matriz de dimensão 2x2 é calculada para todas as barras de carga do sistema. Para cada barra de carga, a matriz reduzida tem seu determinante calculado. A barra de carga associada ao menor determinante é a barra crítica do sistema naquele ponto de operação. Entretanto, a barra crítica avaliada em um ponto de operação conhecido pode não ser a mesma no ponto de operação seguinte. A referência [51] mostra que a barra crítica do sistema muda com o aumento do carregamento. Se a barra crítica no ponto de bifurcação é conhecida e os limites de geração de potência reativa são desprezados, o determinante reduzido calculado em relação a esta barra fornece um comportamento quadrático em relação ao fator de crescimento de carga. Entretanto, se estes limites forem considerados (situação mais realista), uma descontinuidade é observada, conforme relatado na referência [49]. A descontinuidade do comportamento da barra crítica é menos abrupta do que aquela observada no comportamento do menor autovalor e valor singular e ocorre antes do ponto de bifurcação, mas o comportamento do determinante reduzido associado a outras barras de carga, aproxima-se do comportamento obtido para os menores autovalor e valor singular.

Este método pode ter também um alto custo computacional em sistemas de grande porte, uma vez que o determinante reduzido é calculado para cada barra de carga.

2.4 Técnica da Função de Energia

Funções de energia foram inicialmente empregadas em sistemas de potência para estudos de estabilidade transitória [52]. O método consiste em avaliar a energia total (cinética e potencial) de um sistema de potência durante um distúrbio (curto-circuito,

por exemplo) no sistema. Para o sistema operar estável, a energia máxima que este pode vir a ter durante o tempo de distúrbio deve ser igual a um nível de energia associado a uma condição pós-falta. Esta metodologia determina o tempo crítico de abertura para o qual o sistema se mantém estável.

O método pode também produzir resultados interessantes para a análise de estabilidade de tensão. Nesta aplicação, somente a energia potencial do sistema é necessária, dispensando a inclusão de amortecimento e modelos complexos de geradores. As referências [53, 54] mostram que a variação de função de energia pode ter um comportamento linear em função de um aumento de carga, possibilitando uma medida relativa no índice de colapso de tensão para qualquer ponto de operação. Como a distância até o ponto de colapso pode ser estimada, informações a respeito da margem de carga podem ser obtidas para qualquer ponto de operação, o que é um aspecto importante a ser considerado.

A aplicação da função de energia à análise de estabilidade de tensão baseia-se na medida da distância entre os pontos de equilíbrio estável e instável de um sistema. Como um sistema elétrico de n barras tem 2^n -1 possíveis soluções de fluxo de carga, a determinação da solução instável de interesse não é trivial, como relatado nas referências [53, 54]. Na medida em que aumenta-se o carregamento do sistema, o número possível de soluções diminui, até que somente uma solução exista, com nível de energia zero (ponto de bifurcação). Note que uma vez que o objetivo é determinar a margem de carga do sistema, deve-se considerar a inclusão de perdas, de forma que a função de energia não é estritamente relacionada com a função de Lyapunov.

2.5 Método Direto

A referência [44] emprega outro método para a obtenção do ponto de Sela-nó através do método de Newton-Raphson modificado – método direto. Neste método, ao conjunto de

equações de fluxo de carga é incorporado um conjunto de equações para impor a singularidade da matriz Jacobiana e uma outra equação, para garantir a não trivialidade da solução (autovetor não nulo). O método direto acha corretamente o ponto de colapso, mas pode falhar se os limites de geração de potência reativa forem considerados e problemas de convergência podem também ocorrer se a estimativa inicial estiver distante da solução [32].

2.6 Técnicas de Partição de Redes

Foi visto que o método da função de energia é capaz de estimar o ponto de colapso a partir de dois pontos de operação conhecidos, mas a determinação das soluções instáveis de interesse se constitui uma barreira. Baseado nestas dificuldades e na necessidade de propor um método para reduzir o esforço computacional requerido em alguns métodos, técnicas de partição de redes foram implementadas com o objetivo de reduzir a dimensão do sistema analisado.

Diversos artigos na literatura mostram que colapso de tensão é um fenômeno que começa localmente e se espalha pelas barras vizinhas. Baseado nesta característica, procura-se analisar o índice de segurança de um sistema de potência através do estudo de uma pequena parte do sistema (subsistemas).

A referência [32] mostra que, com as técnicas de partição de redes, um melhor desempenho computacional pode ser obtido, mas a determinação de subsistemas ainda é uma barreira, uma vez que a determinação imprecisa destes pode levar a resultados bem distantes dos reais. Além do mais, uma partição de redes avaliada em relação ao primeiro ponto de operação pode induzir a erros grosseiros, uma vez que uma área não considerada crítica pode vir a ser crítica durante o processo de colapso.

3 MÉTODOS DE ANÁLISE ADOTADOS

Na seção anterior foram abordadas as bases em que se fundamentam alguns métodos de análise estática e algumas conclusões podem ser feitas.

Foi visto que em sistemas elétricos de potência, as bifurcações mais comuns encontradas são as de Hopf e de Sela-nó. Quando utilizado o modelo de equações algébricas do fluxo de carga, apenas a bifurcação de Sela-nó é identificada e esta é caracterizada por um autovalor nulo (matriz Jacobiana singular) no ponto de bifurcação. Esta característica é bastante explorada na avaliação de estabilidade de tensão.

Os métodos de análise por decomposição de matrizes por autovalores e valores singulares não são adequados como previsores do ponto de colapso, pois apresentam uma variação brusca neste ponto.

O método de análise através do determinante do Jacobiano reduzido, requer o conhecimento prévio da barra crítica para o seu sucesso e falha se os limites de geração de potência reativa são considerados. Além disso, este método pode ter um alto custo computacional em sistemas de grande porte, uma vez que o determinante reduzido é calculado para cada barra de carga.

Outra desvantagem desses três índices é a indicação da barra crítica somente muito próximo ao ponto de colapso.

Inicialmente utilizada em estudo de estabilidade transitória, a técnica da função de energia dispensa modelagem complexa de geradores e inclusão de amortecimento para estudos de estabilidade de tensão. Esta função pode ter um comportamento linear em função de um aumento de carga, possibilitando uma medida relativa do índice de colapso para qualquer ponto de operação. Isto possibilita informar a margem de carga

para qualquer um destes pontos. Tem a desvantagem da não trivialidade da obtenção da solução instável de interesse, necessária à técnica.

O método direto apresenta as desvantagens de necessitar de uma boa estimativa inicial para convergência e falha quando limites de geração de potência reativa são incluídos.

As técnicas de partição de redes são adequadas quando se deseja reduzir o esforço computacional requerido para o estudo de estabilidade para grandes sistemas, dividindo-os em subsistemas menores. Entretanto, a determinação de subsistemas ainda é uma barreira, uma vez que a determinação imprecisa destes pode levar a resultados bem distantes dos reais. Além do mais, uma partição de redes avaliada em relação ao primeiro ponto de operação pode induzir a erros grosseiros, uma vez que uma área não considerada crítica pode vir a ser crítica durante o processo de colapso.

Os índices para prevenção de colapso de tensão abordados até este ponto, não fornecem os resultados esperados. Na próxima seção, serão estudados os métodos de análise adotados neste trabalho e descritas as razões para as escolhas destas técnicas.

3.1 Método da Continuação

Na Figura 2.1, observou-se que na medida em que o sistema aproxima-se do ponto de Sela-nó, o sistema de equações lineares pode não ter solução devido a singularidade e o mal condicionamento da matriz Jacobiana do fluxo de carga. Desta maneira, o modelo de fluxo de carga convencional pode não ser suficiente para a determinação do ponto de colapso. Este problema pode ser superado pelo método da continuação.

3.1.1 Formulação Matemática

O método da continuação permite traçar os pontos de equilíbrio à medida que um parâmetro varia no sistema. Deste modo, o modelo de fluxo de potência pode ser representado por:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x},\lambda) = \mathbf{0} \tag{2.5}$$

onde

λ é o parâmetro que conduz o sistema de um ponto de equilíbrio para outro, usualmente um fator aplicado à carga total

$\mathbf{x}$ representa as variáveis de estado (módulo e ângulo das tensões nodais)

O método da continuação tem sido usado por vários pesquisadores para, dadas variações de carga ou geração, determinar o ponto de colapso e traçar o diagrama de bifurcação [26, 55, 56].

Pode-se caracterizar os seguintes elementos básicos utilizados nesse método:

- Passo Previsor
- Controle do tamanho do passo
- Parametrização
- Passo Corretor

Apesar desses elementos serem tomados como básicos, alguns aspectos específicos diferenciam as implementações do método da continuação propostas pelos pesquisadores nas análises de colapso de tensão.

3.1.2 Previsor, Controle do Tamanho do Passo e Parametrização

Na fase do previsor, uma aproximação linear é usada para estimar a próxima solução para uma dada variação no parâmetro.

Um meio de calcular a direção do vetor Δx em um ponto de equilíbrio conhecido (x^i, λ^i) na curva de soluções é determinar o vetor tangente naquele ponto. Então, derivando-se a equação (2.5) em relação a λ obtém-se a seguinte equação linear:

$$\left.\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}\right|^{i} \left.\frac{\mathbf{dx}}{\mathbf{d}\lambda}\right|^{i} + \left.\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \lambda}\right|^{i} = \mathbf{0} \qquad \text{ou} \qquad (2.6)$$

$$\left.\frac{dx}{d\lambda}\right|^{i} = -\left(\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|^{i}\right)^{-1} \left.\frac{\partial f}{\partial \lambda}\right|^{i} \qquad (2.7)$$

onde

$\frac{\mathbf{dx}}{\mathbf{d}\lambda}$ é o vetor tangente

$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}$ é o Jacobiano do fluxo de carga

Destaca-se que um elemento importante para a eficiência computacional do método da continuação é o controle do tamanho do passo de variação do parâmetro. A escolha de um passo constante não é conveniente pois, assim como em algumas regiões a curva de solução apresenta pequena curvatura, onde é adequado um tamanho de passo relativamente grande para diminuir o esforço computacional, em outras regiões de maior curvatura, passos menores são mais apropriados.

O tamanho do passo pode ser calculado a partir de uma normalização do vetor tangente, isto é:

$$\Delta\lambda^i = \frac{\mathbf{k}}{\left\| \left| \frac{\mathbf{dx}}{\mathbf{d\lambda}} \right|^i \right\|} \tag{2.8}$$

onde

k é uma constante

A referência [26] relata bons resultados para k = 1.

A equação (2.8) resulta na redução do tamanho do passo à medida que o sistema aproxima-se do ponto crítico, uma vez que a magnitude do vetor tangente aumenta quando o sistema se aproxima desse ponto.

Definida a variação do parâmetro a partir da equação (2.8), a direção desejada para o vetor das variáveis de estado será dada por:

$$\Delta\mathbf{x}^i = \Delta\lambda^i \left| \frac{\mathbf{dx}}{\mathbf{d\lambda}} \right|^i \tag{2.9}$$

E o ponto estimado como próxima solução será:

$$\left(\bar{\mathbf{x}}^{i+1}, \bar{\lambda}^{i+1} \right) = \left(\mathbf{x}^i + \Delta\mathbf{x}^i, \lambda^i + \Delta\lambda^i \right) \tag{2.10}$$

Até aqui o problema de mal condicionamento da matriz Jacobiana do fluxo de potência não foi resolvido, trazendo problemas para o cálculo de vetor tangente, este também dependente da inversão daquela matriz (equação 2.7). Essa dificuldade é superada através da parametrização local, que transforma em parâmetro a variável de estado que apresentar maior variação relativa no último ponto calculado, isto é:

$$\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{max} \left\{ \left| \frac{\Delta x_1}{x_1} \right|^i, \left| \frac{\Delta x_2}{x_2} \right|^i, \ldots, \left| \frac{\Delta x_n}{x_n} \right|^i, \left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right|^i \right\} \tag{2.11}$$

A parametrização é a responsável pela remoção da singularidade da matriz Jacobiana.

É importante esclarecer ainda dois aspectos adicionais. Um deles diz respeito a obtenção do ponto inicial do processo da continuação ($\lambda = 0$), o qual é conseguido a partir da solução de um caso base, usando-se uma técnica convencional de solução de fluxo de potência; outro aspecto refere-se a passagem pelo ponto crítico, após a qual o sinal de $\Delta\lambda$ deve ser invertido para a obtenção dos pontos inferiores da curva P-V.

3.1.3 Corretor

Após ser estimada uma nova solução ($x^i + \Delta x^i$, $\lambda^i + \Delta\lambda^i$), a próxima etapa é corrigir essa solução prevista para obter-se o novo ponto de equilíbrio (x^{i+1} , λ^{i+1}) na curva de soluções. Matematicamente, essa etapa corresponde a solução simultânea das equações originais sujeitas a restrição de que a nova solução seja um plano perpendicular a direção prevista, isto é:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x},\lambda) = \mathbf{0}$$

$$(\Delta\mathbf{x}^i)^T[\mathbf{x} - (\mathbf{x}^i + \Delta\mathbf{x}^i)] + \Delta\lambda^i[\lambda - (\lambda^i - (\Delta\lambda^i)] = \mathbf{0} \qquad (2.12)$$

Em princípio, qualquer procedimento para solução de um sistema de equações algébricas não-lineares pode ser empregado no passo corretor. O ponto de operação ($x^i + \Delta x^i$, $\lambda^i + \Delta\lambda^i$), determinado no passo previsor, é usado como estimativa inicial. Outra alternativa é usar o ponto obtido pelo passo previsor como estimativa inicial no programa de fluxo de carga modificado pela restrição adicional.

3.1.4 Síntese do Método da Continuação

A Figura 2.3. ilustra o significado dos passos previsor e corretor, cuja descrição matemática foi realizada. Considerando-se um determinado ponto de operação (x^i , λ^i) conhecido, pode-se estimar no passo previsor um novo ponto ($x^i + \Delta x^i$, $\lambda^i + \Delta\lambda^i$).

Entretanto esse ponto não é solução de f (x , λ) = 0, a qual será determinada no passo corretor e corresponderá ao ponto (x^{i+1} , λ^{i+1}):

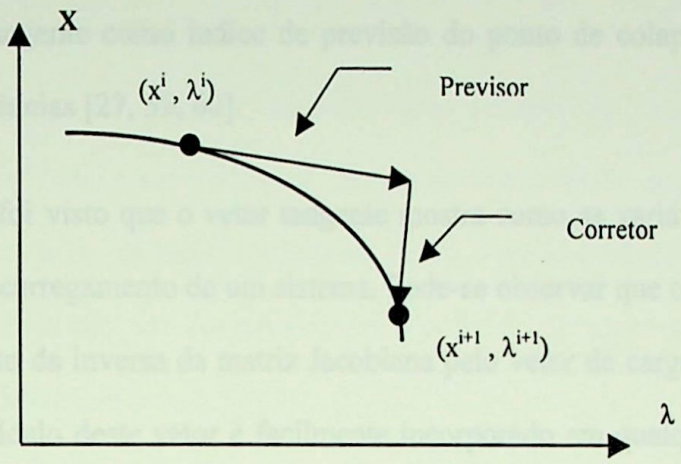


Figura 2.3 – Processo do Método da Continuação

O resultado de repetidas execuções dos passos previsor e corretor é um conjunto de pontos que formam o diagrama de bifurcação, onde a margem de carga será dada pela parcela de carregamento que ao ser adicionada à carga inicial fará com que o sistema atinja o ponto crítico ("nariz" da curva P-V).

A robustez e os resultados precisos fornecidos pelo método da continuação fazem com que essa técnica seja usada em diversas referências [26, 57, 58].

3.2 Método do Vetor Tangente

Na seção anterior foi mostrada a determinação do vetor tangente e sua aplicação no método da continuação.

A referência [44] mostra que este vetor converge para o autovetor à direita associado ao autovalor nulo. Logo, no ponto de colapso, este vetor identifica as barras críticas. Sabe-se também que, no ponto de colapso, pequenas variações de carga produzem grandes

variações de tensão. Como consequência, o vetor tangente tem componentes infinitos, e a inversa de cada componente tende a zero. Portanto, pode ser de interesse a monitoração do vetor tangente em função do carregamento do sistema.

O uso do vetor tangente como índice de previsão do ponto de colapso de tensão foi proposto nas referências [27, 59, 60].

Na equação (2.7) foi visto que o vetor tangente mostra como as variáveis de estado se modificam com o carregamento de um sistema. Pode-se observar que o vetor tangente é obtido pelo produto da inversa da matriz Jacobiana pelo vetor de carga/geração inicial. Desta forma, o cálculo deste vetor é facilmente incorporado em qualquer programa de fluxo de carga convencional e sua facilidade de obtenção constitui-se em uma grande vantagem em relação aos métodos previamente descritos.

Uma outra vantagem deste método refere-se à identificação da barra crítica, obtida para pontos de operação diferentes do ponto de bifurcação. Tendo-se determinado o vetor tangente, a maior entrada nesse vetor identifica a variável que mais se modifica para uma variação de carga, e a barra à qual essa variável estiver relacionada é, consequentemente, a barra crítica.

A identificação da barra crítica, por qualquer das técnicas apresentadas, pode sofrer alterações entre o ponto de operação de um sistema até o ponto de colapso, dependendo do ponto analisado, em função das não-linearidades envolvidas e descontinuidades.

A referência [60] estudou o comportamento do vetor tangente como ferramenta de identificação da barra crítica. Nesta referência é mostrado que este vetor identifica estas variáveis (barras) para pontos de operação distantes do ponto de colapso de tensão, qualidade até então inédita entre as técnicas estudadas. É mostrado que, embora o vetor tangente convirja para o autovetor à direita no ponto crítico, estas técnicas proporcionam diferentes informações durante o processo de carregamento do sistema.

Baseado neste resultado, a técnica do vetor tangente será usada neste trabalho com este propósito.

A desvantagem deste método é que seu comportamento em função do aumento de carga produz a mesma descontinuidade observada no comportamento do determinante reduzido, qualificando este método também como incapaz de estimar o ponto de bifurcação. Este problema é superado pela técnica da extrapolação quadrática [60], que a partir de dois pontos de operação conhecidos busca o ponto de bifurcação, através de tentativa e erro, baseado no comportamento do vetor tangente como função do carregamento do sistema.

A referência [60] mostra que a aplicação do método do vetor tangente através da extrapolação quadrática apresenta resultados tão precisos quanto os obtidos pelo método da continuação. A aplicação do método em cálculos da margem de carga é justificada em função do baixo esforço computacional envolvido (em torno de 1/3 do tempo requerido pelo método da continuação), tornando-o atraente principalmente em sistemas de grande porte e em aplicações de tempo real.

O método da extrapolação quadrática não será adotado neste trabalho em virtude de ainda não existirem no mercado programas utilizando este método em sistemas de grande porte. Para o cálculo da margem de carga será adotado neste trabalho o método da continuação, incorporado no programa LFLOW (FURNAS) [42].

As referências [29, 32] lançam uma abordagem da sensibilidade das perdas elétricas através do vetor tangente. Esta técnica é exposta na próxima seção.

3.2.1 Análise de Perdas Elétricas

Problemas de colapso de tensão têm sido reportados em sistemas fortemente carregados. Esta característica tem levado alguns pesquisadores a associarem o fenômeno do

colapso de tensão a uma condição de carregamento de sistema onde as perdas elétricas são elevadas. Essa afirmação, a princípio correta, pode levar um estudioso do assunto a conclusões errôneas, se este resolver analisar o fenômeno de colapso de tensão puramente através da análise de perdas elétricas. Os resultados obtidos nas referências [29, 32] indicam que em alguns casos as análises de estabilidade de tensão e sensibilidade das perdas elétricas fornecem os mesmos resultados. Para outros casos entretanto, onde a barra crítica muda de acordo com o carregamento do sistema, as análises produzem resultados diferentes.

As perdas de potência ativa em um sistema elétrico são dadas por:

$$\mathbf{P_{ativas}} = \sum_{k=1}^{nl} \mathbf{V_{ik} V_{jk} G_k} \left[\cos(\delta_{(ij)k}) + \cos(\delta_{(ji)k})\right] - \mathbf{G_k}(\mathbf{V_{ik}^2} + \mathbf{V_{jk}^2}) \qquad (2.13)$$

onde

nl é o número de linhas de transmissão

$\mathbf{V_{ik}}$ e $\mathbf{V_{jk}}$ são os níveis de tensão nas barras *(i)* e *(j)* conectadas à linha de transmissão *k*

$\mathbf{G_k}$ é a susceptância da linha de transmissão *k*

$\delta_{(ij)k}$ e $\delta_{(ji)k}$ representa o ângulo de fase entra as barras *i* e *j*

Se a equação (2.13) for derivada em relação ao parâmetro do sistema λ, obtêm-se:

$$\frac{\mathbf{dP_{ativas}}}{\mathbf{d\lambda}} = \sum_{k=1}^{nl} \mathbf{G_k} \left(\frac{\mathbf{dV_{ik}}}{\mathbf{d\lambda}} \mathbf{V_{jk}} + \frac{\mathbf{dV_{jk}}}{\mathbf{d\lambda}} \mathbf{V_{ik}} \right) \mathbf{A} + \mathbf{V_{ik} V_{jk}} \frac{\mathbf{dA}}{\mathbf{d\lambda}} - 2\mathbf{G_k} \left(\frac{\mathbf{dV_{ik}}}{\mathbf{d\lambda}} \mathbf{V_{ik}} + \frac{\mathbf{dV_{jk}}}{\mathbf{d\lambda}} \mathbf{V_{jk}} \right) \qquad (2.14)$$

onde

$$\mathbf{A} = \mathbf{G_k} \left[\cos(\delta_{(ij)k}) + \cos(\delta_{(ji)k})\right]$$

$$\frac{dA}{d\lambda} = G_k \left[2 \operatorname{sen}\left(\delta_{(ji)k}\right) \left(\frac{d\delta_{(i)k}}{d\lambda} - \frac{d\delta_{(j)k}}{d\lambda} \right) \right]$$

A equação (2.14) mostra como as perdas ativas variam em função do parâmetro λ . Note que todas as derivadas parciais desta equação são conhecidas do cálculo do vetor tangente. Portanto, calcular a equação (2.14), não requer um grande esforço computacional.

Assumindo que o lado direito da equação (2.7) seja levemente perturbado através da instalação de um capacitor em uma barra de carga genérica " l ", o novo vetor tangente pode ser obtido sem a necessidade de se calcular o novo ponto de operação. Se a equação (2.14) for então calculada, a variação das perdas elétricas ativas em função do parâmetro λ será conhecida. Se " l " representar cada barra de carga, uma a uma, o cálculo das equações (2.7) e (2.14) indica a barra de carga cuja instalação de capacitores reduzem de forma mais efetiva as perdas do sistema. Note que o fluxo de carga é executado somente uma vez, quando o caso base é analisado. De maneira semelhante é calculada a sensibilidade para as perdas de potência reativa no sistema.

Esta idéia tem seus resultados expostos nas referências [29, 32], onde é mostrado que nem sempre a barra crítica do sistema, sob o ponto de vista de colapso de tensão, é a mais indicada para a redução de perdas elétricas.

3.2.2 Análise de Contingências

A identificação de contingências críticas para a estabilidade de tensão pode não ser trivial especialmente em sistemas carregados. Nestes sistemas, a simples indisponibilidade de um recurso de controle de tensão como, por exemplo um estratégico banco de capacitores, pode reduzir drasticamente a margem de carga do sistema.

As referências [31, 33] propõem a classificação de contingências críticas através da norma do vetor tangente. Esta técnica explora a relação existente entre o aumento da norma do vetor tangente e a diminuição da margem de carga. Baseado nisto, é proposto:

- Para um caso base, calcule a norma do vetor tangente;
- Para cada contingência, calcule o ponto de equilíbrio e a norma do vetor tangente;
- Ordene as normas de forma a identificar a contingência mais crítica

Note que a metodologia proposta é capaz de identificar e ordenar as contingências críticas, mas não espera fornecer uma relação direta da variação da norma do vetor tangente com a margem de carga. Além disso a metodologia não pretende estudar o período transitório das contingências, analisando somente as contingências que ofereçam um ponto de equilíbrio em regime permanente após a perturbação.

A referência [31] aplica esta técnica como um filtro identificador das contingências mais severas na análise de segurança em tempo real. Se a margem de carga for de fato requerida, esta deverá ser calculada, através de técnicas adequadas, para um reduzido elenco de contingências, reduzindo dramaticamente o esforço computacional.

3.3 Técnicas de Otimização

As técnicas de otimização tornaram-se ferramentas importantes na análise de sistemas elétricos de potência, sobretudo pela necessidade de consideração, na análise de colapso de tensão, de todos os limites e recursos para controle de tensão do sistema e as crescentes dificuldades de convergência dos programas de fluxo de potência convencional sob esta consideração [37, 61].

O fenômeno de instabilidade de tensão está associado ao esgotamento dos recursos de potência reativa do sistema. Assim, a procura de uma filosofia de controle de tensão que possibilite a otimização da disponibilidade destes recursos, poderia aumentar a margem operativa do sistema a curto-prazo.

O estudo da influência de recursos de controle de tensão baseados nas matrizes de sensibilidade do Jacobiano do fluxo de carga, tendem a falhar na medida que não consideram todas as ações de controle e restrições operativas do sistema.

Além disso, as matrizes de sensibilidade fornecem resultados para um ponto de operação conhecido. Nesta análise, são listadas as variáveis de estado que variam com maior ou menor intensidade em relação a uma variação de carga. Devido a não linearidade das equações de sistemas de potência, as informações obtidas para um ponto de operação conhecido podem não ser válidas para outros pontos de operação.

A combinação de programas de colapso de tensão e de fluxo de potência ótimo é capaz de determinar com melhor precisão a influência da variação de carga no sistema porque é capaz de levar em conta todas as ações de controle de tensão, além de considerar restrições do sistema que são difíceis de modelar em programas convencionais de fluxo de potência [35, 39].

Um método de convergência robusto que otimiza o despacho de potência reativa foi proposto [36, 37] e incorporado em um programa de fluxo de potência ótimo – FLUPOT [38].

O FLUPOT tem como estratégia, aplicar diretamente o algoritmo de pontos interiores ao problema original de programação não linear que é o fluxo de potência ótimo [36, 40, 41]. Esta estratégia mostrou-se apropriada por não depender da convergência de algoritmos de fluxo de potência no seu processo de convergência, com as equações de balanço de potência ativa / reativa sendo somente satisfeitas na solução ótima. Além

disso, experiências numéricas recentes mostraram que o método de pontos interiores diretos mostrou-se muito eficiente no tratamento de redes de grande porte mal condicionadas e com problemas de tensão. A possibilidade de representação de várias opções de controles (inclusive do elo CC), e a grande variedade de funções objetivo e suas combinações, consagraram o FLUPOT nos grupos de estudos do planejamento da operação e da expansão do sistema.

O capítulo 3 deste trabalho aborda com mais detalhe esta técnica de análise.

4 CONCLUSÕES

As ocorrências no sistema elétrico ilustram com casos reais o mecanismo de colapso de tensão e confirmam as discussões a respeito da natureza do fenômeno, mostrando que o sistema pode atingir um ponto de colapso através de pequenas perturbações. Esta característica, junto com outras considerações, permite a abordagem estática e o uso de equações de fluxo de carga para modelar alguns comportamentos dinâmicos de um sistema elétrico [34].

Nas proximidades do ponto de colapso de tensão a matriz Jacobiana torna-se mal condicionada e a convergência do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson pode não ser possível. A referência [49] compara diversos métodos para identificação do ponto de colapso, mostrando que nenhum deles apresenta comportamento previsível. Como estes métodos utilizam o fluxo de carga convencional (Newton-Raphson), algumas informações importantes, como identificação da barra crítica, podem ser erroneamente interpretadas, uma vez que variações bruscas no comportamento destes índices podem ocorrer próximo ao ponto de colapso de tensão [27]. Cañizares e Alvarado [26] compararam estes índices com o auxílio do método da continuação, de forma que o problema de mal condicionamento da matriz Jacobiana não se manifestou.

Um método de simulação estática capaz de monitorar o comportamento do vetor tangente associado ao comportamento da curva de crescimento de carga do sistema foi recentemente desenvolvido com excelentes resultados comprovados [27, 28]. Este método é capaz de prever, com baixo esforço computacional e com bastante antecedência, o ponto de colapso e as barras críticas do sistema, mesmo quando os limites operativos do sistema são considerados. Recentemente esta técnica foi estendida à análise de perdas elétricas, com bons resultados obtidos [29].

Outro método de convergência robusto que otimiza o despacho de potência reativa foi proposto [36] e incorporado em um programa de fluxo de potência ótimo – FLUPOT [37, 38]. Este programa tornou-se uma ferramenta importante na análise de sistemas elétricos de potência, sobretudo pela necessidade de consideração, na análise de colapso de tensão, de todos os limites e recursos para controle de tensão do sistema e as crescentes dificuldades de convergência dos programas de fluxo de potência convencional sob esta consideração [35, 39].

Devido aos bons resultados apresentados pelo método de otimização e do vetor tangente, estas técnicas serão utilizadas no estudo da relação entre as ações de controle que visam a redução de perdas de potência reativa e as ações que possibilitam o aumento da margem de carga para o colapso de tensão. Os efeitos das ações de controle serão avaliados através do cálculo e comparação da margem de carga, utilizando-se o método da continuação.

CAPÍTULO 3

FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

1 INTRODUÇÃO

O problema de fluxo de potência ótimo em regime permenente pode ser definido como sendo a determinação do estado de uma rede elétrica que otimiza uma determinada função objetivo e satisfaz um conjunto de restrições físicas e operacionais. Ele é caracterizado matematicamente como um problema de programação não linear com centenas a milhares de variáveis/restrições, podendo ser formulado como:

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

$$\begin{aligned} \textbf{Min} \quad & \mathbf{f(x)} \\ \textbf{s.a.} \quad & \mathbf{g(x) = 0} \\ & \mathbf{h(x) \leq 0} \\ & \mathbf{l \leq x \leq u} \end{aligned} \tag{3.1}$$

As restrições de igualdade correspondem basicamente às equações de balanço de potência ativa e reativa em cada nó da rede e, dependendo da aplicação, a outras restrições auxiliares. As desigualdades são restrições funcionais, monitoramento de fluxo em circuitos por exemplo, e restrições de canalização que representam limites físicos e operacionais do sistema. A seção 5 deste capítulo contém uma descrição detalhada de cada elemento que compõe o FPO.

O problema de fluxo de potência ótimo começou a ser formulado ainda na década de 60 com Carpentier e desde então já teve diferentes abordagens, seja através de programação linear, quadrática e não-linear. A partir da década de 80 houve um ganho

significativo de desempenho, principalmente em se tratando de sistemas elétricos de grande porte, com o surgimento do método de pontos interiores, proposto inicialmente por Karmakar para problemas de programação linear e depois estendido para problemas gerais de programação não linear.

Este capítulo está organizado de forma que, na seção 2, é abordada uma introdução ao problema de fluxo de potência junto com a definição das equações básicas do FPO. Nas seções seguintes há, na seção 3, um breve histórico dos principais métodos desenvolvidos para a resolução do FPO; na seção 4, são dados alguns exemplos de aplicações práticas do FPO em sistemas elétricos de potência; a seção 5 contém uma descrição detalhada de cada elemento que compõe o FPO (suas variáveis, funções objetivo e restrições).

A formulação matemática da metodologia de otimização utilizada no FLUPOT – a de Pontos Interiores – encerra este capítulo.

2 FLUXO DE POTÊNCIA

O cálculo do fluxo de potência em uma rede de energia elétrica consiste essencialmente na determinação do estado da rede. A modelagem do sistema é estática, significando que a rede é representada por um conjunto de equações e inequações algébricas [62].

Os componentes de um sistema de energia elétrica podem ser classificados em dois grupos: os componentes externos tais como geradores e cargas que são modelados através de injeções de potência nos nós da rede e os componentes internos como linhas de transmissão, transformadores, defasadores, reatores e capacitores que são modelados por equações algébricas que representam o fluxo de potência que flui por estes equipamentos.

As equações básicas de fluxo de potência correspondem à Primeira Lei de Kirchhoff que estabelece que a potência líquida injetada em cada nó da rede deve ser igual à soma das potências nos componentes internos que tem o nó especificado como um de seus extremos. Isto corresponde a impor a conservação das potências ativa e reativa em cada nó da rede.

Na formulação básica do fluxo de potência, são associadas, a cada barra da rede, quatro variáveis:

θ_i ângulo de tensão na barra i

V_i módulo de tensão na barra i

P_i geração líquida (geração menos carga) de potência ativa na barra i

Q_i geração líquida de potência reativa na barra i

Na resolução do problema, duas delas entram como dados e duas como incógnitas. Dependendo de quais variáveis são fixadas, podem ser definidos três tipos de barras:

PQ são dados P_i e Q_i e calculados V_i e θ_i

PV são dados P_i e V_i e calculados Q_i e θ_i

Vθ (barra de referência) são dados V_i e θ_i e calculados P_i e Q_i

Seguindo esta convenção, as variáveis podem ser classificadas em variáveis de controle u (dados) e variáveis de estado x (incógnitas). Assim, o problema geral de fluxo de potência pode ser formulado através de um conjunto de equações e inequações algébricas da seguinte forma:

$$g(x,u) = 0 \tag{3.2}$$

$$h(x,u) \leq 0 \tag{3.3}$$

O conjunto de restrições de igualdade (3.2) é formado por duas equações para cada barra:

$$\sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} = P_i \tag{3.4}$$

$$\sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} = Q_i + V_i^2 bsh_i \tag{3.5}$$

onde

Ω_i conjunto de barras ligadas à barra i

P_{ij} fluxo ativo no circuito i-j

Q_{ij} fluxo reativo no circuito i-j

bsh_i susceptância shunt na barra i

As expressões gerais dos fluxos de potência ativa e reativa em linhas de transmissão, transformadores e defasadores são:

$$P_{ij} = a_{ij}^2 V_i^2 g_{ij} - a_{ij} V_i V_j [g_{ij} \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) + b_{ij} sen(\theta_{ij} + \varphi_{ij})] \tag{3.6}$$

$$P_{ji} = V_j^2 g_{ij} - a_{ij} V_i V_j [g_{ij} \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) - b_{ij} sen(\theta_{ij} + \varphi_{ij})] \tag{3.7}$$

$$Q_{ij} = -a_{ij}^2 V_i^2 (b_{ij} + bsh_{ij}) - a_{ij} V_i V_j [g_{ij} sen(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) - b_{ij} \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij})] \tag{3.8}$$

$$Q_{ji} = -V_j^2 (b_{ij} + bsh_{ij}) + a_{ij} V_i V_j [g_{ij} sen(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) + b_{ij} \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij})] \tag{3.9}$$

onde:

θ_{ij} diferença angular θ_i - θ_j

a_{ij} tap do transformador i-j

φ_{ij} ângulo de defasamento no circuito i-j

g_{ij} condutância série no circuito i-j

b_{ij} susceptância série no circuito i-j

bsh_{ij} susceptância shunt no circuito i-j

A diferença angular θ_{ij} que aparece na formulação das equações (3.6)-(3.9) faz necessário fixar uma barra de referência, caso contrário o sistema resultaria indeterminado. A seguinte convenção de sinais foi adotada nas respectivas equações: uma injeção de potência é considerada positiva quando entra na barra (geração) e negativa quando sai dela (carga). Por outro lado, os fluxos em circuitos são positivos quando saem da barra e negativos quando entram.

O conjunto de inequações associadas a (3.3) são as restrições operacionais:

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \tag{3.10}$$

$$Q_i^{min} \leq Q_i \leq Q_i^{max} \tag{3.11}$$

Normalmente os algoritmos para resolução do problema de fluxo de potência podem ser divididos em duas partes. A primeira corresponde a um processo iterativo que resolve o sistema de equações (3.4)-(3.5) pelo método de Newton-Raphson por exemplo. A segunda parte leva em consideração a atuação dos dispositivos de controle e da representação dos limites de operação do sistema. As duas partes são resolvidas alternadamente intercalando a solução das equações básicas com a representação dos controles e limites de operação.

3 HISTÓRICO DO FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

A primeira formulação matemática do FPO surgiu em 1962 com Carpentier [63]. Desde então, uma série de métodos foram propostos para a sua resolução:

- Dommel-Tinney (1968);
- Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) (1969) – Abadie, Carpentier;
- Método de Injeções Diferenciais (1973) – Carpentier;
- Métodos Baseados em Programação Linear (1979) – Stott, Marinho, Alsaç;
- Programação Quadrática Sequencial (1982, 1984) – Tinney, Sun, Burchett, Happ, Han, Powell;
- Lagrangiano Aumentado Projetado (1982) – Murtagh, Saunders;
- Métodos de Continuação (1983) – Galiana;
- Métodos de Pontos Interiores Lineares (1984, 1992) – Karmakar, Quintana;
- Métodos de Pontos Interiores Não Lineares (1993) – Granville, Debs, Lasdon, Wang, Monteiro, Vanderbei, Shano;

Dommel-Tinney [64] apresentou, em 1968, um método de "gradiente reduzido" onde as variáveis do problema são divididas em variáveis independentes que são os controles (geração de potência ativa, tensão em barras de geração, taps entre outros) e as variáveis de estado ou dependentes (ângulo de módulo de tensão nas barras e tensão em barras de carga). As restrições funcionais e as restrições de canalização sobre as variáveis de estado são incluídas na função objetivo através de penalização externa. A direção de descida é o gradiente reduzido nas variáveis de controle e os limites sobre os controles são tratados através de um gradiente projetado. Uma vez obtido os valores das variáveis independentes, os valores das variáveis de estado são conhecidos resolvendo um sistema de equações correspondente às restrições de igualdade (fluxo de potência). A maior dificuldade do método está relacionada à

determinação do valor correto do parâmetro de penalidade no processo iterativo, de forma tal a não interferir demasiadamente na solução ótima do problema original, por um lado, ou não perder a viabilidade, por outro. Outro aspecto importante é a degradação do condicionamento da matriz Hessiana como consequência do uso da função de penalidade.

Um método de Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), considerado como uma extensão do gradiente reduzido a problemas não lineares, foi proposto pela primeira vez por Abadie-Carpentier [65]. As variáveis são divididas em variáveis dependentes e independentes, e uma linearização das restrições ativas é considerada como uma aproximação do conjunto viável. A cada iteração, é calculado o gradiente reduzido nas variáveis independentes e resolvido um sistema de igualdade para achar o incremento nas variáveis dependentes. Dado que o novo ponto é somente viável nas restrições linearizadas, uma correção na direção de descida na busca linear é considerada de tal forma a viabilizar a solução e assegurar um decréscimo da função objetivo. Quando o problema inclui restrições de desigualdade, como é o caso do FPO, uma estratégia de conjunto ativo é implementada. Um algoritmo específico baseado no GRG para resolução do FPO, o "Método de Injeções Diferenciais", foi implementado pelo próprio Carpentier [66]. Este método considera uma partição do conjunto ativo similarmente ao gradiente reduzido de Dommel-Tinney. O algoritmo é dividido em duas etapas que são resolvidas alternadamente. Na primeira delas, é formulado um subproblema reduzido do problema original onde se obtém a direção de descida nas variáveis de controle via um método de GRG. Na etapa seguinte, as variáveis de estado são calculadas resolvendo-se um fluxo de potência convencional.

O problema de FPO pode ser resolvido também por técnicas de programação linear considerando linearizações sucessivas. Existem fortes argumentos teóricos [67] para a aplicação de programação linear sucessiva a problemas de programação não linear em

forma geral, onde as linearizações são consideradas válidas dentro de uma região de confiança. Em aplicações práticas, uma das dificuldades encontradas é a determinação de tal região a cada iteração. Entre as técnicas de programação linear para resolver o FPO, a versão dual [68] com relaxação das restrições, intercalada com a resolução de um fluxo de potência, é considerada como uma das mais eficientes.

Um avanço importante nos problemas de FPO deve-se aos problemas quadráticos. Um dos primeiros métodos de segunda ordem foi o método de "Lagrangeano aumentado projetado" proposto por Burchett [69]. O algoritmo resolve a cada iteração um problema aproximado, onde a função objetivo é o Lagrangeano aumentado e as restrições são linearizadas. As variáveis são divididas em variáveis básicas (dependentes), super-básicas (independentes) e não básicas (restrições ativas). Esta partição do conjunto de variáveis pode ser alterada durante o processo iterativo a medida que algumas variáveis são fixadas e outras relaxadas de seus limites. A direção de descida nas variáveis independentes é obtida através do método de Quase-Newton no espaço reduzido. Os valores das variáves dependentes são calculados resolvendo-se um sistema de equações correspondente às restrições de igualdade linearizadas. Um excessivo tempo de processamento, dada a densidade da matriz Hessiana aproximada, foi sua principal desvantagem. Aperfeiçoamentos deste método foram propostos pelo próprio Burchett [70] utilizando Programação Quadrática Sequencial (PQS) - com aproximação quadrática da função objetivo e linearização das restricões. Neste caso, o problema original é transformado numa sequência de problemas quadráticos. A cada iteração, estes problemas são resolvidos utilizando uma estratégia de conjunto ativo baseada na formulação IQP e a direção de descida é escolhida utilizando um algoritmo de Quase-Newton similarmente ao caso descrito acima.

Trabalhos mais recentes [71, 72], resolvem o problema de FPO formulado como um problema de programação quadrática sequencial pelo método de Newton-Raphson com um cálculo exato da matriz Hessiana. Um tratamento especial da matriz de fatoração através de técnicas de esparsidade e uma estratégia para a identificação do conjunto ativo (EQP) são implementadas. A dificuldade apresentada por este método reside na determinação ("predição") a cada iteração do conjunto de variáveis que fazem parte do conjunto ativo.

Neste trabalho será considerado o método de pontos interiores direto baseado no algoritmo primal-dual de barreira logarítmica [36, 40, 41, 73], implementado no programa de FPO – FLUPOT [38] do Cepel. Métodos de pontos interiores pertencem a uma classe de algoritmos de otimização originalmente designados para problemas de programação linear [74]. Mas, dado o alto grau de desempenho destes métodos nesta classe de problemas, eles foram rapidamente estendidos para problemas de programação quadrática, convexa e problemas gerais de otimização diferenciáveis [75, 76].

Na aplicação de métodos de pontos interiores ao FPO duas estratégias distintas são normalmente adotadas. A primeira é baseada em um esquema iterativo do tipo: fluxo de potência-otimização onde o algoritmo de pontos interiores é aplicado a um problema de programação linear ou quadrática obtido a partir da linearização das equações de balanço de potência ativa e reativa na solução do fluxo de potência [77, 78]. A segunda estratégia, chamada de ***pontos interiores diretos***, consiste em aplicar diretamente o algoritmo de pontos interiores ao problema original de programação não linear que é o FPO [36, 40, 41]. Esta segunda estratégia, adotada no FLUPOT, é mais apropriada para o tipo de aplicação considerado aqui pois não depende da convergência de algoritmos de fluxo de potência - no seu processo de convergência as equações de balanço de potência ativa / reativa só serão necessariamente satisfeitas na

solução ótima. Além disso, experiências numéricas recentes [79, 80, 81] mostraram que o método de pontos interiores diretos mostrou-se muito eficiente no tratamento de redes de grande porte mal condicionadas e com problemas de tensão.

4 MODELAGEM DO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

Como já foi mencionado, o FPO é um problema de programação não linear e pode ser formulado como:

$$\begin{aligned} \textbf{Min} \quad & \mathbf{f(x)} \\ \textbf{s.a.} \quad & \mathbf{g(x) = 0} \\ & \mathbf{h(x) \leq 0} \\ & \mathbf{l \leq x \leq u} \end{aligned} \tag{3.12}$$

onde:

x	vetor de variáveis do sistema
g(x)	restrições de igualdade
h(x)	restrições de desigualdade (funcionais)
u, l	limites superior e inferior sobre os controles

4.1 Variáveis

As variáveis mais comuns em um problema de Fluxo de Potência Ótimo são:

θ_i	ângulo da tensão na barra i
$\mathbf{V_i}$	módulo da tensão na barra i
$\mathbf{PG_i}$	geração de potência ativa no gerador i
$\mathbf{QG_i}$	geração de potência reativa no gerador i

a_{ij} tap do transformador i-j

φ_{ij} ângulo de defasamento no circuito i-j

QC_i potência reativa capacitiva alocada na barra i

QI_i potência reativa indutiva alocada na barra i

PA_i potência ativa alocada na barra i

FC_i fração de carga efetiva na barra i (em pu)

IT_i intercâmbio da área i

bsh_i controle de susceptância shunt em banco de capacitor/indutor na barra i

x_{ij} controle de reatância de capacitor série no circuito i-j

4.2 Funções Objetivo

A classe de funções objetivo que serão apresentadas incluem funções lineares ou não lineares. Dependendo do tipo de aplicação, o problema pode ser formulado combinando uma ou mais funções objetivo ao mesmo tempo. Em seguida, serão apresentadas as funções objetivo mais comuns e seus modelos matemáticos.

4.2.1 Mínimo Custo de Geração Ativa

$$f = \sum_{i \in I_G} CP_i \, PG_i \qquad (3.13)$$

onde:

I_G conjunto de geradores de potência ativa controláveis

CP_i custo de geração de potência ativa do gerador i

PG_i geração de potência ativa no gerador i

4.2.2 Mínimo Custo de Geração Reativa

$$f = 1/2 \sum_{i \in I_G} CQ_i \, QG_i^2 \quad \text{ou} \quad (3.14)$$

$$f = \sum_{i \in I_G} CQ_i \, QG_i$$

onde:

I_G conjunto de geradores controláveis de potência reativa

CQ_i custo de geração de potência reativa do gerador i

QG_i geração de potência reativa no gerador i

4.2.3 Mínima Alocação de Potência Reativa

$$f = \sum_{i \in IQ_c} CQ_{Ci} QC_i + \sum_{i \in IQ_I} CQ_{Ii} QI_i \quad (3.15)$$

onde:

IQ_c conjunto de barras de alocação de potência reativa capacitiva

CQ_{Ci} custo de alocação de potência reativa capacitiva na barra i

QC_i potência reativa capacitiva alocada na barra i

IQ_I conjunto de barras de alocação de potência reativa indutiva

CQ_{Ii} custo de alocação de potência reativa indutiva na barra i

QI_i potência reativa indutiva alocada na barra i

4.2.4 Mínima Alocação de Potência Ativa

$$f = 1/2 \sum_{i \in I_P} CP_i PA_i^2 \qquad (3.16)$$

onde:

I_P conjunto de barras de alocação de potência ativa

CP_i custo de alocação de potência ativa na barra i

PA_i potência ativa alocada na barra i

4.2.5 Mínima Perda:

$$f = \sum_{i,j \in I_C} (P_{ij} + P_{ji}) \qquad (3.17)$$

onde:

I_C conjunto de circuitos do sistema

P_{ij}, P_{ji} fluxo ativo nos circuitos i-j e j-i

Note que $P_{ij} + P_{ji}$ é igual a perda no circuito i-j. As expressões dos fluxos P_{ij} e P_{ji} são relativas às fórmulas (3.6) e (3.7), respectivamente.

4.2.6 Mínimo Corte de Carga

$$f = \sum_{i \in I_C} C_{FC_i} (1 - FC_i) PL_i \qquad (3.18)$$

onde:

I_C conjunto de barras de carga

C_{FC_i} custo de corte de carga na barra i

$\mathbf{FC_i}$ fração de carga efetiva na barra i (em pu)

$\mathbf{PL_i}$ carga original da barra i

Observe que $FC_i\ PL_i$ representa a carga efetiva na barra i enquanto que $(1-FC_i)\,PL_i$ é o corte de carga nessa barra.

4.2.7 Mínimo Desvio de Potência Ativa Gerada

$$\mathbf{f = 1/2 \sum_{i,\,I_G} \rho(PG_i - \overline{PG_i})^2} \qquad (3.19)$$

onde:

$\mathbf{I_G}$ conjunto de geradores controláveis de potência ativa

ρ peso associado ao desvio de potência ativa

$\mathbf{PG_i}$ geração de potência ativa no gerador i

$\overline{\mathbf{PG_i}}$ geração de potência ativa inicial no gerador i

4.2.8 Mínimo Desvio de Ângulo de Defasamento

$$\mathbf{f = 1/2 \sum_{i,j \in I_\varphi} \rho\,(\varphi_{ij} - \overline{\varphi}_{ij})^2} \qquad (3.20)$$

onde:

$\mathbf{I_\varphi}$ conjunto de barras com controle de ângulo de defasamento

ρ peso associado ao desvio de ângulo de defasamento

φ_{ij} ângulo de defasamento no circuito i-j

$\overline{\varphi}_{ij}$ ângulo de defasamento inicial no circuito i-j

4.2.9 Mínimo Desvio de Tensão

$$f = 1/2 \sum_{i \in I} \rho (V_i - \overline{V}_i)^2 \qquad (3.21)$$

onde:

I conjunto de barras do sistema

ρ peso associado ao desvio de tensão

V_i tensão na barra i

$\overline{V}_i$ tensão inicial na barra i

4.2.10 Mínimo Desvio de Tap

$$f = 1/2 \sum_{i,j \in I_T} \rho (a_{ij} - \overline{a}_{ij})^2 \qquad (3.22)$$

onde:

I_T conjunto de transformadores controláveis

ρ peso associado ao desvio de tap

a_{ij} tap do transformador i-j

$\overline{a}_{ij}$ tap inicial no transformador i-j

4.2.11 Mínimo Desvio de Intercâmbio

$$f = 1/2 \sum_{i \in J_I} \rho (IT_i - \overline{IT}_i)^2 \qquad (3.23)$$

onde:

J_I conjunto de áreas de intercâmbio

ρ peso associado ao intercâmbio entre áreas

IT_i intercâmbio da área i

$\overline{IT}_i$ intercâmbio inicial da área i

4.2.12 Mínimo Desvio de Ponto de Operação

Esta função objetivo é uma combinação das funções objetivo de desvio apresentadas anteriormente.

4.3 Restrições de Igualdade

As restrições de igualdade básicas do FPO correspondem as equações (3.4) e (3.5) do fluxo de potência como estabelecidas na seção 2 deste capítulo. Dependendo do tipo de aplicação, novas equações podem ser acrescentadas ao FPO como as relativas ao intercâmbio líquido entre áreas ou outras restrições adicionais a critério do usuário.

A seguir, serão apresentadas as restrições acima mencionadas em sua forma geral. Cada problema a ser estudado é um caso particular, tendo um objetivo específico, portanto alguns dos controles podem ser considerados fixos, assim como algumas das variáveis zeradas dependendo da rede analisada.

4.3.1 Equações de Balanço de Potência Ativa

$$\sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} = PG_i + PA_i - FC_i(1 - A_i - B_i - A_i V_i - B_i V_i^2) PL_i \qquad (3.24)$$

onde:

Ω_i conjunto de barras ligadas à barra i

P_{ij} fluxo de potência ativa no circuito i-j

PG_i potência ativa gerada na barra i

PL_i carga ativa na barra i

FC_i fator de carga (em pu) na barra i

V_i módulo de tensão na barra i

A_i fator de carga (em pu) da variação linear da carga ativa em relação à tensão

B_i fator de carga (em pu) da variação quadrática da carga ativa em relação à tensão

PA_i alocação de potência ativa na barra i

As expressões dos fluxos P_{ij} e P_{ji} correspondem as equações (3.6) e (3.7), respectivamente.

4.3.2 Restrições de Balanço de Potência Reativa

$$\sum_{j\in\Omega_i} Q_{ij} = QG_i + QC_i - QI_i + V_i^2 bsh_i - FC_i\,(1 - C_i - D_i - C_i V_i - D_i V_i^2)\,QL_i \qquad (3.25)$$

onde:

Ω_i conjunto de barras ligadas à barra i

Q_{ij} fluxo de potência reativa no circuito i-j

QG_i potência reativa gerada na barra i

QC_i alocação de potência reativa capacitiva na barra i

QI_i alocação de potência reativa indutiva na barra i

V_i módulo de tensão na barra i

$\mathbf{bsh_i}$ shunt na barra i

$\mathbf{QL_i}$ carga reativa na barra i

$\mathbf{FC_i}$ fator de carga (em pu) na barra i

$\mathbf{C_i}$ fator de carga (em pu) da variação linear da carga reativa em relação à tensão

$\mathbf{D_i}$ fator de carga (em pu) da variação quadrática da carga reativa em relação à tensão

Nas equações apresentadas, é incluído um fator de variação das cargas em relação à tensão. Não considerar esta hipótese é equivalente a declarar $A_i = B_i = C_i = D_i = 0$ em cada barra da rede. As expressões dos fluxos Q_{ij} e Q_{ji} correspondem as equações (3.8) e (3.9), respectivamente.

4.3.3 Intercâmbio Líquido entre Áreas

$$\mathbf{IT_l} = \sum_{\mathbf{I_1}} \mathbf{P_{ij}} + \sum_{\mathbf{I_2}} \mathbf{P_{ji}} - \sum_{\mathbf{I_3}} \mathbf{P_{ij}} - \sum_{\mathbf{I_4}} \mathbf{P_{ji}} \qquad (3.26)$$

onde:

$\mathbf{IT_l}$ intercâmbio líquido na área l

$\mathbf{P_{ij}}$ fluxo ativo no circuito i-j

$\mathbf{I_1}$ conjunto de circuitos de interligação i-j tal que:
1) a medição é realizada no nó i
2) e o nó $i \in l$

$\mathbf{I_2}$ conjunto de circuitos de interligação i-j tal que:
1) a medição é realizada no nó j
2) e o nó $j \in l$

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

$\mathbf{I_3}$ conjunto de circuitos de interligação i-j tal que:

1) a medição é realizada no nó i
2) o nó i $\notin$ l

$\mathbf{I_4}$ conjunto de circuitos de interligação i-j tal que

1) a medição é realizada no nó j
2) o nó j $\notin$ l

4.4 Restrições de Desigualdade

As restrições de desigualdade correspondem às restrições de canalização nas variáveis e restrições funcionais do tipo máximo carregamento nos circuitos. Estas restrições refletem limites de operação dos equipamentos ou alguma política operativa específica.

4.4.1 Módulo de Tensão:

$$\mathbf{V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}} \tag{3.27}$$

onde:

$\mathbf{V_i^{min}}$ valor mínimo permitido para a tensão na barra i

$\mathbf{V_i^{max}}$ valor máximo permitido para a tensão na barra i

4.4.2 Potência Ativa Gerada:

$$\mathbf{PG_i^{min} \leq PG_i \leq PG_i^{max}} \tag{3.28}$$

onde:

$\mathbf{PG_i^{min}}$ limite inferior para a geração de potência ativa no gerador i

$\mathbf{PG_i^{max}}$ limite superior para a geração de potência ativa no gerador i

4.4.3 Potência Reativa Gerada:

$$QG_i^{min} \leq QG_i \leq QG_i^{max} \tag{3.29}$$

onde:

QG_i^{min} limite inferior para a geração de potência reativa no gerador i

QG_i^{max} limite superior para a geração de potência reativa no gerador i

4.4.4 Potência Reativa Alocada Capacitiva:

$$0 \leq QC_i \leq QC_i^{max} \tag{3.30}$$

onde:

QC_i^{max} limite superior para a alocação de potência reativa capacitiva

4.4.5 Potência Reativa Alocada Indutiva:

$$0 \leq QI_i \leq QI_i^{max} \tag{3.31}$$

onde:

QI_i^{max} limite superior para a alocação de potência reativa indutiva

4.4.6 Potência Ativa Alocada:

$$0 \leq PA_i \leq PA_i^{max} \tag{3.32}$$

onde:

PA_i^{max} limite superior para a alocação de potência ativa

4.4.7 Tap do Transformador:

$$\mathbf{a}_{ij}^{min} \leq \mathbf{a}_{ij} \leq \mathbf{a}_{ij}^{max} \tag{3.33}$$

onde:

$\mathbf{a}_{ij}^{min}$ valor mínimo permitido para o tap do transformador no circuito i-j

$\mathbf{a}_{ij}^{max}$ valor máximo permitido para o tap do transformador no circuito i-j

4.4.8 Ângulo de Defasamento:

$$\varphi_{ij}^{min} \leq \varphi_{ij} \leq \varphi_{ij}^{max} \tag{3.34}$$

onde:

φ_{ij}^{min} valor mínimo permitido para o ângulo de defasamento no circuito i-j

φ_{ij}^{max} valor máximo permitido para o ângulo de defasamento no circuito i-j

4.4.9 Rejeição de Carga:

Existem algumas situações como por exemplo sistemas com problemas de tensão ou carregamento nos circuitos onde pode ser necessário diminuir a carga em determinadas barras de forma a viabilizar a operação do sistema. Estes cortes de carga são modelados matematicamente através do fator (FC_i) presente nas equações de balanço ativo e reativo, respeitando-se os limites:

$$\mathbf{0} \leq \mathbf{FC}_i \leq \mathbf{1} \tag{3.35}$$

Observar que $FC_i = 1$ significa que a carga total da barra é considerada enquanto $FC_i = 0$ anula o valor de sua carga.

4.4.10 Intercâmbio entre Áreas:

$$IT_l^{min} \leq IT_l \leq IT_l^{max} \tag{3.36}$$

onde:

IT_l^{min} limite inferior para a intercâmbio líquido na área l

IT_l^{max} limite superior para a intercâmbio líquido na área l

4.4.11 Máximo Carregamento nos Circuitos

O máximo carregamento de fluxo num circuito i-j pode ser considerado como:

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq S_{ij}^{max} \tag{3.37}$$

onde:

S_{ij}^{max} é o máximo carregamento do circuito em termos de potência aparente.

Alternativamente, o carregamento pode ser especificado em termos de potência ativa como segue:

$$-S_{ij}^{max} \leq P_{ij} \leq S_{ij}^{max} \tag{3.38}$$

5 MÉTODOS DE PONTOS INTERIORES PRIMAL-DUAL

Seja o problema de fluxo de potência ótimo, formulado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} &\textbf{Min} \quad f(z) \\ &\textbf{s.a.} \quad h(z) = 0 \\ &\qquad l \leq z \leq u \end{aligned} \tag{3.39}$$

onde:

z é um vetor que corresponde às variáveis de controle e estado no fluxo de potência, e variáveis de folga associadas a restrições de desigualdade no problema original;

f(z) é a função objetivo;

h(z) corresponde às equações de balanço de potência nas barras e restrições funcionais (carregamento de circuitos, fator de potência, etc.)

l e u são vetores que expressam limites físicos e de operação dos equipamentos.

O problema (3.39) pode ser reescrito como:

$$\begin{aligned} \textbf{Min} \quad & \mathbf{f(z)} \\ \textbf{s.a.} \quad & \mathbf{h(z)=0} \\ & \mathbf{z-s_1=l} \\ & \mathbf{z+s_2=u} \\ & \mathbf{s_1 \geq 0,\ s_2 \geq 0} \end{aligned} \tag{3.40}$$

onde:

$\mathbf{s_1, s_2}$ são variáveis auxiliares.

O passo seguinte é eliminar as restrições de desigualdade através da introdução de funções de barreira logarítmica:

$$\textbf{Min} \quad \left\{ \mathbf{f(z)} - \mu \sum_{j=1}^{n} \log(s_{1j}) - \mu \sum_{j=1}^{n} \log(s_{2j}) \right\} \tag{3.41}$$

$$\begin{aligned} \textbf{s.a.} \quad & \mathbf{h(z)=0} \\ & \mathbf{z-s_1=l} \\ & \mathbf{z+s_2=u} \end{aligned}$$

onde:

μ é o parâmetro de barreira, $\mu > 0$.

A idéia básica do algoritmo é resolver aproximadamente o problema (3.41) para cada μ e fazer μ tender para zero. No limite obtém-se a solução do problema (3.39).

As condições de otimalidade de primeira ordem associadas ao problema (3.41) são:

$$\nabla \mathbf{f(z)} - \mathbf{J(z)}^{t}\lambda - \pi_1 - \pi_2 = \mathbf{0} \qquad (3.42)$$

$$\mathbf{h(z)} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{z} - \mathbf{s}_1 - \mathbf{1} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{z} + \mathbf{s}_2 - \mathbf{u} = \mathbf{0}$$

$$\mu\mathbf{e} - \mathbf{S}_1\pi_1 = \mathbf{0}$$

$$\mu\mathbf{e} + \mathbf{S}_2\pi_2 = \mathbf{0}$$

onde:

$\nabla \mathbf{f(z)}$ é o gradiente de f(z)

$\mathbf{J(z)}$ é o jacobiano de h(z)

λ corresponde aos multiplicadores de Lagrange (ou variáveis duais) associados as restrições $h(z) = 0$

π_1, π_2 correspondem aos multiplicadores de Lagrange (ou variáveis duais) das restrições $z - s_1 = 1$ e $z + s_2 = u$, respectivamente

$\mathbf{e}$ é um vetor unitário, $e = (1,..., 1)^t$;

$\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2$ são matrizes diagonais cujos elementos das diagonais são s_{1j}, s_{2j}, respectivamente.

Inicialmente os valores das variáveis primais e duais são definidos de tal forma que:

$$\mathbf{s}_1 > \mathbf{0},\ \mathbf{s}_2 > \mathbf{0} \tag{3.43}$$

$$\pi_1 > 0,\ \pi_2 < 0$$

$$\mathbf{z} - \mathbf{s}_1 = \mathbf{1}$$

$$\mathbf{z} + \mathbf{s}_2 = \mathbf{u}$$

Através da aplicação de uma iteração do método de Newton-Rapson ao sistema (3.42), são calculados os incrementos para variáveis primais (Δz, Δs_1, Δs_2) e duais ($\Delta\lambda$, $\Delta\pi_1$, $\Delta\pi_2$). Para isto resolve-se primeiro o sistema:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}(\mathbf{z},\lambda) - \mathbf{J}^{\mathbf{t}}(\mathbf{z}) \\ -\mathbf{J}(\mathbf{z}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{z} \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{t} \\ \mathbf{h}(\mathbf{z}) \end{bmatrix} \tag{3.44}$$

onde:

$$\mathbf{W}(\mathbf{z},\lambda) = \nabla^2\mathbf{f}(\mathbf{z}) - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \nabla^2 \mathbf{h}_i(\mathbf{z}) + \mathbf{S}_1^{-1}\Pi_1 - \mathbf{S}_2^{-1}\Pi_2$$

$$\mathbf{t} = -\nabla\mathbf{f}(\mathbf{z}) + \mathbf{J}(\mathbf{z})^{\mathbf{t}}\lambda + \pi_1 + \pi_2 + \mathbf{S}_1^{-1}\mathbf{v}_1 - \mathbf{S}_2^{-1}\mathbf{v}_2$$

$\nabla^2\mathbf{f}(\mathbf{z}), \nabla^2\mathbf{h}_i(\mathbf{z})$ são matrizes hessianas de f(z) e $h_i(z)$, i =1, ...n

$\prod_1$, $\prod_2$ são matrizes diagonais cujos elementos da diagonal são π_{1j}, π_{2j} , respectivamente

$$\mathbf{v}_1 = \mu\mathbf{e} - \mathbf{S}_1\pi_1$$

$$\mathbf{v}_2 = \mu\mathbf{e} - \mathbf{S}_2\pi_2$$

O restante das variáveis são calculadas de acordo com as fórmulas:

$$\Delta\mathbf{s}_1 = \Delta\mathbf{z} \tag{3.45}$$

$$\Delta s_2 = -\Delta z \tag{3.46}$$

$$S_1 \Delta \pi_1 = v_1 - \prod_1 \Delta s_1 \tag{3.47}$$

$$S_2 \Delta \pi_2 = -v_2 - \prod_2 \Delta s_2 \tag{3.48}$$

Em seguida calculam-se os passos nos espaços primal e dual:

$$\alpha_p = \min\left[\min_{\Delta s_{1j} < -\delta} \frac{s_{1j}}{|\Delta s_{1j}|}, \min_{\Delta s_{2j} < -\delta} \frac{s_{2j}}{|\Delta s_{2j}|}, 1{,}0 \right] \tag{3.49}$$

$$\alpha_d = \min\left[\min_{\Delta \pi_{1j} < -\delta} \frac{\pi_{1j}}{|\Delta \pi_{1j}|}, \min_{\Delta \pi_{2j} > \delta} \frac{-\pi_{2j}}{|\Delta \pi_{2j}|}, 1{,}0 \right] \tag{3.50}$$

onde δ é uma tolerância para cálculo da razão, cujo valor "default" é $1{,}0 \times 10^{-6}$.

Uma nova aproximação para a solução ótima é então:

$$z := z + \sigma \alpha_p \Delta z \tag{3.51}$$

$$s_1 := s_1 + \sigma \alpha_p \Delta s_1 \tag{3.52}$$

$$s_2 := s_2 + \sigma \alpha_p \Delta s_2 \tag{3.53}$$

$$\lambda := \lambda + \sigma \alpha_d \Delta \lambda \tag{3.54}$$

$$\pi_1 := \pi_1 + \sigma \alpha_d \Delta \pi_1 \tag{3.55}$$

$$\pi_2 := \pi_2 + \sigma \alpha_d \Delta \pi_2 \tag{3.56}$$

onde o valor "default" de σ é de 0,9995.

Um ponto crítico no algoritmo primal-dual é o controle do parâmetro de barreira μ. No programa FLUPOT o valor inicial "default" de μ é igual a 5,0. Este valor é usado para atribuir valores iniciais para as variáveis duais π_1 e π_2, e nas iterações intermediárias a seguinte formula é usada:

$$\mu = \mathbf{gap}/\beta \tag{3.57}$$

onde:

$$\mathbf{gap} = \frac{\mathbf{s}_1^t \pi_1 - \mathbf{s}_2^t \pi_2}{\mathbf{2n}} \tag{3.58}$$

β é o valor divisor do "gap" cujo valor "default" é igual a 10,0.

A Figura 1 mostra as etapas básicas do processo iterativo.

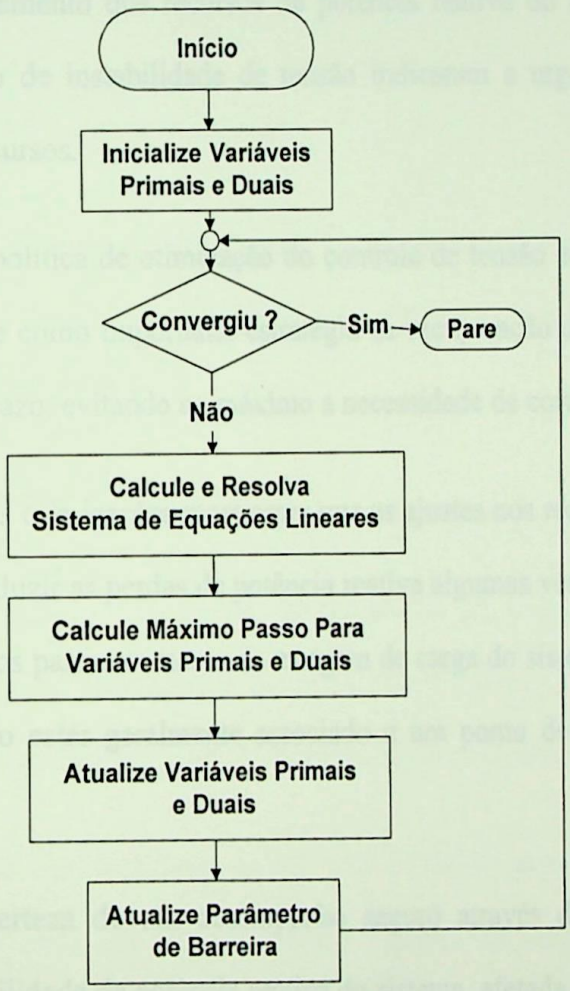


Figura 1 – Agoritmo de Pontos Interiores

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA E RESULTADOS

1 INTRODUÇÃO

Associadas ao esgotamento dos recursos de potência reativa do sistema, ocorrências ligadas ao fenômeno de instabilidade de tensão indicaram a urgente necessidade da otimização destes recursos.

Neste cenário, uma política de otimização do controle de tensão e de máxima redução de perdas mostrou-se como importante estratégia de recuperação da margem operativa do sistema a curto-prazo, evitando ao máximo a necessidade de corte de carga.

Alguns resultados das otimizações mostraram que os ajustes nos recursos de controle de tensão de forma a reduzir as perdas de potência reativa algumas vezes poderiam não ser os mais recomendados para o aumento da margem de carga do sistema, apesar do ponto de colapso de tensão estar geralmente associado a um ponto de operação com altas perdas elétricas.

Desta maneira, a certeza de um desempenho seguro através do gerenciamento da margem de disponibilidade de potência reativa do sistema, afetada principalmente pelas perdas de potência reativa, não estava garantida.

Assim, surgiu a motivação de estudo da relação entre as ações de controle que visam a redução de perdas de potência reativa e as ações que possibilitam o aumento da margem de carga para colapso de tensão em um sistema elétrico de potência.

Este capítulo explicará as duas fases da metodologia adotada. A primeira etapa, compara otimizações que objetivem a redução de perdas com outras otimizações que favoreçam o aumento de carga do sistema; a segunda etapa analisa os efeitos de uma compensação shunt adicional na margem de carga do sistema, quando esta compensação é feita nos conjuntos de barras críticas e/ou candidatas à redução de perdas.

Os resultados alcançados através da aplicação da metodologia proposta em um caso real do sistema elétrico brasileiro habilitam a técnica proposta.

2 METODOLOGIA

A metodologia está dividida em duas etapas com o objetivo de separar as ações que requerem apenas ajustes nos controles do sistema, das ações que impliquem em custo para o planejamento da operação.

2.1 Primeira Etapa

A primeira etapa consiste, através de um programa de fluxo de potência ótimo (FLUPOT), em comparar otimizações que objetivam a redução de perdas com outras otimizações que favoreçam o aumento da margem de carga do sistema.

Em todas otimizações, são respeitadas as restrições de tensão, tapes e limites de geração de potências ativa e reativa e utilizados como variáveis de controle, LTC, tensão e geração de potência reativa das máquinas da área de interesse. Para as variáveis fora da área de interesse, são liberadas as gerações de potência reativa das barras PV e as tensões das barras PQ e fixadas as tensões das barras PV e demais controles.

A carga da região de interesse de estudo é do tipo potência constante.

Para cada otimização estudada, é calculada a margem de carga pelo método da continuação, com direção única de crescimento de carga na área de interesse, mantendo-se o fator de potência das cargas e redistribuindo-se as perdas pelos geradores da área. As áreas não pertencentes à área de interesse, não experimentam crescimento de carga.

Durante o processo de carregamento, são respeitadas as lógicas de controle remoto dos geradores e compensadores síncronos da área de interesse e, no ponto de máximo carregamento, são obtidos os grupos de barras críticas e de barras candidatas à redução de perdas, pelo método do vetor tangente, para cada caso analisado.

Os grupos de barras candidatas à redução de perdas e de barras críticas serão mencionados, respectivamente, neste texto pelas abreviações – "barras candidatas" e "barras críticas" - com o objetivo de facilitar a referência a estes grupos na análise dos resultados.

2.1.1 Estratégias das Otimizações

Como o fenômeno de instabilidade de tensão está associado ao esgotamento dos recursos de potência reativa do sistema, a estratégia inicial na procura de uma filosofia de controle de tensão foi a da otimização da disponibilidade destes recursos.

As manobras de equipamentos de controle de tensão requerem coordenação, e as solicitações de atendimento à carga costumam ser rápidas. Desta maneira, a busca de uma filosofia que privilegiasse a pronta disponibilidade de potência reativa foi perseguida.

A disponibilidade de potência reativa relativa entre dois casos (DRR) é composta pela soma: das diferenças das potências reativas fornecidas pela compensação shunt (SHUNT), das diferenças das potências reativas geradas pelos geradores do sistema (GER) e pelas diferenças entre as perdas de potência reativa na rede (PERDAS), com

estas últimas tendo peso significativo neste total. Assim, assumindo-se índices para cada caso, tem-se:

$$DRR = (GER_1 - GER_2) + (PERDAS_1 - PERDAS_2) - (SHUNT_1 - SHUNT_2) \quad (4.1)$$

Em sistemas de grande porte e com grandes troncos de transmissão, as perdas de potência reativa costumam ter sinal negativo, indicando que a capacidade de geração de potência reativa da rede através do "line charging", é maior que aquelas perdas.

As variações de potência reativa fornecida pelas compensações shunt são limitadas pelas restrições de tensão nas barras do sistema. Além disso, sistemas de grande porte com elevados carregamentos, já operam com perfis de tensão próximos dos limites, dando pouca margem para a otimização deste recurso. Assim, as variações na DRR dependem principalmente das otimizações das perdas e geração de potência reativa.

Com o objetivo de aumentar a margem de carga do sistema em relação ao colapso de tensão, buscou-se otimizações dos recursos de controle de tensão do sistema de forma a melhorar sua disponibilidade de potência reativa, através de funções objetivo que minimizassem as perdas elétricas e/ou minimizassem a geração de potência reativa nos geradores do sistema.

2.1.1.1 Minimização de Perdas

Até a presente data, o FLUPOT só minimiza perdas de potência ativa. A inclusão da função objetivo de minimização de perdas de potência reativa é um dos itens do projeto de ampliação futura do programa.

Uma significativa redução das perdas de potência reativa foi conseguida de forma indireta, através da fixação dos despachos dos geradores da área com significativo ganho na disponibilidade de potência reativa geral do sistema. A barra de referência do

sistema (Ilha Solteira), situada na região de interesse, assume o novo despacho provocado pela redução das perdas da rede.

2.1.1.2 Minimização de Potência Reativa Gerada

A alocação de potência reativa nos geradores do sistema tem como vantagens adicionais, além da pronta disponibilidade, a facilidade de monitoração e de serem estes equipamentos bons representantes dos cenários de carregamento.

As minimizações de geração de potência reativa em todos os geradores da área de interesse estudada (região sudeste) são comparadas com as otimizações que privilegiam a minimização deste recurso nos compensadores síncronos próximos aos grandes centros de carga. Desta maneira, é comparada a influência da localização e dos totais das disponibilidades de potência reativa na margem de carga do sistema.

A função custo adotada nas minimizações de geração de potência reativa, é a quadrática passando pela origem dos eixos (ver item 5.2.2 do capítulo 3), ou seja, os ajustes no sistema são buscados de forma a minimizar a geração ou absorção deste recurso nos geradores da área de interesse.

Dentro da área de interesse, os geradores que não têm suas gerações de potência reativa otimizadas, participam da otimização através da variação de suas tensões de excitação e gerações de potência reativa, respeitando-se ambos os limites.

2.2 Segunda Etapa

Na segunda etapa são alocadas, nos casos com máximo carregamento, compensação shunt adicional nos conjuntos de barras críticas, candidatas e na combinação destes grupos e analisados seus efeitos nas perdas elétricas e margem de carga do sistema.

Após a alocação da compensação adicional, os métodos do vetor tangente e da continuação são mais uma vez aplicados para a obtenção dos novos grupos de barras críticas e margem de carga.

3 RESULTADOS

A metodologia proposta é aplicada em um caso do planejamento da operação do sistema sudeste brasileiro para o mês de Novembro de 1997 (Anexo III). Foi escolhido um caso de carga média em razão de ser este o mais crítico período de carga para o controle de tensão, nesta época do ano, devido a grande demanda de potência reativa.

Os resultados serão apresentados na cronologia das etapas da metodologia adotada. Desta forma, serão detalhados inicialmente os resultados das otimizações que objetivam a redução de perdas com outras otimizações que favoreçam o aumento da margem de carga do sistema e, em segunda parte, os resultados da compensação shunt adicional nos conjuntos de barras críticas, candidatas e combinação destes grupos, analisando-se seus efeitos nas perdas elétricas e margem de carga do sistema.

3.1 Caso Base

A Tabela 4.1 apresenta um sumário do caso base escolhido e compara a participação da geração e carga da área de interesse (Sudeste) na geração e carga totais do sistema.

Tabela 4.1 - Sumário Caso Base

Novembro 1997 Carga Média		Sumário
Geração Total (S/SE/CO)		36096,0 + j 2918,5
Carga Total (S/SE/CO)		34323,0 + j 14735,1
Geração Sudeste		18555,9 +j 1336,8
Carga Sudeste		25158,1 + j 7769,4
C. Síncronos (Mvar)	Grajaú (-300 a 400)	35
	Vitória (-30 a 60)	25
	Ibiúna (-800 a 1200)	135
	T.Preto (-200 a 300)	220
	S.Ângelo (-170 a 250)	155
	Embuguaçú (-170 a 250)	190
Shunt (Mvar)		4873,9
Perdas		1773,0 – j 6942,7

3.2 Minimizando Perdas e Gerações de Potência Reativa

O fenômeno de instabilidade de tensão está associado ao esgotamento dos recursos de potência reativa do sistema. Desta maneira, buscou-se, inicialmente, otimizações dos recursos de controle de tensão do sistema de forma a melhorar a disponibilidade destes recursos. Isto foi feito através de funções objetivo de minimização das perdas elétricas ou de minimização da geração de potência reativa em geradores do sistema.

Com a intenção de facilitar a referência às otimizações praticadas, ficam estabelecidas as seguintes abreviações:

- ***Perdas:*** Minimização de perdas de potência ativa na rede da área de interesse

- ***Máquinas:*** Minimização de geração de potência reativa nos geradores da área de interesse (exceto Itaipu)

- ***MaqSin:*** Minimização de geração de potência reativa nos geradores da área de interesse (exceto Itaipu) com custo 2 vezes mais alto para os compensadores síncronos

- ***Síncronos:*** Minimização de geração de potência reativa nos compensadores síncronos da área de interesse

A Tabela 4.2 mostra um sumário das otimizações estudadas.

Tab. 4.2 - Sumário das Otimizações

Sumário		Caso Base	Perdas	Máquinas	MaqSin	Síncronos
Geração Reativa Global (Mvar)		2918,5	2167,4	4239,0	4160,3	3650,8
Geração Reativa Sudeste (Mvar)		-164	-634	752	665	248
C.S. (Mvar)	Grajaú	35	200	75	10	0
	Vitória	25	5	20	5	0
	Ibiúna	140	90	45	10	0
	T.Preto	220	205	45	10	0
Shunt (Mvar)		4873,9	4958,6	4936,6	4930,4	4879,9
Perdas Ativas (Mw)		1773,1	1749,9	1837,5	1834,7	1801,7
Perdas Reativas (Mvar)		-6942,7	-7602,4	-5552,8	-5632,0	-6195,5
Disponibilidade Potência Reativa Relativa (Mvar)		-	1495,5	-2647,7	-2496,0	-1473,5

Na Tabela 4.2 observa-se que a otimização que visou a redução de perdas, dentre todas as funções objetivo escolhidas, foi a única que possibilitou uma Disponibilidade de Potência Reativa Relativa (DRR) positiva, ou seja, um ganho na margem de potência reativa do sistema. Com os despachos de potência ativa fixados, esta otimização buscou ajustes nos recursos de controle de tensão do sistema de forma a reduzir,

principalmente, as perdas de potência reativa na rede (660 Mvar, ou 44% da DRR conseguida nesta otimização).

Por outro lado, registra-se nas otimizações ***Máquinas*** e ***MaqSin***, as maiores perdas de DRR. Os ajustes necessários para a minimização da geração e absorção de potência reativa em um grande número de geradores da área de interesse, provocou o aumento da importação deste recurso de potência reativa de geradores das áreas vizinhas (usinas do Sul), apesar da diminuição da potência reativa gerada na maioria dos geradores da área de interesse. O aumento da importação de potência reativa de geradores das áreas vizinhas, provocou o aumento das perdas e geração globais deste recurso.

Observa-se também nas otimizações ***Máquinas, MaqSin*** e ***Síncronos***, que a geração de potência reativa global e nos geradores da região sudeste, é reduzida na medida em que também há uma redução do número de geradores que participam da minimização, indicando, portanto, que algumas máquinas da área de interesse precisam ter suas gerações de potência reativa exploradas a fim de evitar a importação deste recurso de áreas vizinhas, e o aumento das perdas através de grandes troncos de transmissão.

3.2.1 Margens de Carga e Grupos de Barras

Para cada caso estudado, é calculada a margem de carga pelo método da continuação, com direção única de crescimento de carga na área de interesse, mantendo-se o fator de potência das cargas e redistribuindo-se as perdas e geração adicional pelos geradores da área. Pelo método do vetor tangente, são obtidos os grupos de barras críticas e de barras candidatas à redução de perdas nos pontos de máximo carregamento de cada caso.

A Tabela 4.3 mostra os resultados dos cálculos das margens de carga dos casos otimizados. Para cada caso, estão listadas as margens de crescimento de carga, λ (%) e λ (Mva), e o ganho em Mva para cada otimização em relação ao caso base.

A Tabela 4.4 lista os grupos de barras críticas e candidatas para cada caso estudado. Acompanhando o número da barra, é listada a área a que a barra pertence.

Tab. 4.3 - Margens de Carga

Margens de Carga	Base	Perdas	Máquinas	MaqSin	Síncronos
Geração Reativa (Mvar)	2918,5	2167,4	4239,0	4160,3	3650,8
Shunt (Mvar)	4873,9	4958,6	4936,6	4930,4	4879,9
Perdas Reativas (Mvar)	-6942,7	-7602,4	-5552,8	-5632,0	-6195,5
Disponibilidade Potência Reativa Relativa (Mvar)	-	1496	-2648	-2496	-1474
λ (%)	2,96	1,68	2,82	3,48	4,32
λ (Mva)	780	442	742	916	1138
Ganho (Mva)	-	-338	-38	136	358

Tab. 4.4 - Grupos de Barras Críticas e Candidatas

Grupo de Barras Críticas e Candidatas	Base	Perdas	Máquinas	MaqSin	Síncronos
Norma V. Tangente Grupo de B.Críticas	2,41	10,27	2,00	1,47	1,86
Barras Críticas	1746/10	1725/10	1746/10	2611/11	2611/11
	1725/10	1724/10	2611/11	2617/11	2617/11
	1724/10	1798/10	1725/10	2697/11	2697/11
	1799/10	1727/10	1724/10	2616/11	2616/11
	1727/10	1799/10	1727/10	2615/11	2615/11
	1798/10	1726/10	1798/10	2628/11	1746/10
	2611/11	1728/10	1799/10	2668/11	2668/11
	1726/10	1719/10	2617/11	2631/11	2628/11
	1728/10	1746/10	1726/10	2641/11	2631/11
	1719/10	1723/10	2697/11	2614/11	2641/11
	2617/11	1718/10	2616/11	1746/10	2614/11
	2697/11	1720/10	2615/11	2674/11	2674/11
	2616/11	1713/10	1728/10	2610/11	2610/11
	1745/10	1702/10	1745/10	2625/11	2625/11
	2615/11	1701/10	2628/11	2613/11	2613/11
	174/ 1	1738/10	1719/10	2635/11	2635/11
	1723/10	1708/10	174/ 1	2683/11	2683/11
	1718/10	1709/10	2631/11	2638/11	1725/10
	1720/10	1707/10	2641/11	2682/11	2638/11
	2628/11	1712/10	2614/11	2684/11	1724/10
Barras Candidatas	1725/10	1725/10	1725/10	1725/10	1725/10
	1724/10	1724/10	1724/10	1724/10	1724/10
	1727/10	1727/10	1727/10	1727/10	1727/10
	1799/10	1798/10	1798/10	1798/10	1799/10
	1798/10	1799/10	1799/10	1799/10	1798/10
	1726/10	1726/10	1726/10	1726/10	1726/10
	1719/10	1719/10	1728/10	1728/10	1702/10
	1746/10	1728/10	1719/10	1719/10	1701/10
	1702/10	1746/10	1702/10	1702/10	1713/10
	1713/10	1702/10	1701/10	1701/10	1746/10
	1728/10	1701/10	1713/10	1713/10	1707/10
	1701/10	1713/10	1707/10	1707/10	1708/10
	1708/10	1707/10	1708/10	1708/10	1709/10
	1707/10	1708/10	1709/10	1709/10	1719/10
	1709/10	1709/10	1712/10	1712/10	1712/10
	1712/10	1712/10	1700/10	1700/10	1728/10
	1700/10	1718/10	1718/10	1718/10	1700/10
	1718/10	1700/10	1723/10	1723/10	1715/10
	1715/10	1723/10	1715/10	1715/10	1718/10
	1723/10	1720/10	1720/10	1720/10	1723/10

Na Tabela 4.4 pode-se observar que os grupos de barras críticas e candidatas estão concentrados nas áreas 10 e 11 (Anexo III). Verifica-se também que, o grupo de barras

críticas, diferentemente do grupo de barras candidatas, varia significativamente com os ajustes e as variações de λ, mostrando a forte relação existente entre aqueles primeiros grupos de barras e a margem de carga.

Destaca-se nas otimizações ***Perdas*** e ***Máquinas*** a redução na margem de carga do sistema, apesar da melhor DRR conseguida naquele primeiro tipo de otimização (Tabela 4.3). Estes resultados podem ser explicados pela redução da disponibilidade de potência reativa próxima às áreas 10 e 11 (Anexo III). Na Tabela 4.2, nota-se que a geração dos compensadores síncronos de Grajaú têm sua geração aumentada, em relação ao caso base, nestas otimizações. Estes síncronos estão muito próximos das sub-áreas onde se localizam os grupos de barras indicados como críticos ou candidatos à redução de perdas, além de terem fundamental importância no controle de tensão das áreas.

É fácil observar nas Tabelas 4.3 e 4.4 que, para todos os casos, existe uma relação entre a norma do vetor tangente e a margem de carga, conforme a teoria mostrada em capítulo anterior, ou seja, quanto maior a norma do vetor tangente, menor a margem de carga do sistema. Neste quadro, destaca-se a significativa redução na margem de carga na otimização ***Perdas***, acompanhada do crescimento também significativo da norma do vetor tangente para o grupo de barras críticas.

O aumento da disponibilidade de geração nos compensadores síncronos próximos às áreas críticas, conseguido através das otimizações ***MaqSin*** e ***Síncronos***, resultou em ganho na margem de carga do sistema, apesar do aumento das perdas e da redução da DRR provocados pelos ajustes necessários a estas otimizações.

3.3 Minimizando Geração em Síncronos e Perdas do Sistema

Na otimização ***Perdas*** observou-se que os ajustes necessários para este objetivo possibilitaram um ganho de cerca de 1500 Mvar na disponibilidade de potência reativa relativa, mas com perda na margem de carga do sistema.

Por outro lado, a concentração da minimização da geração de potência reativa nos geradores próximos às áreas sinalizadas como críticas pelo método do vetor tangente - otimização ***Síncronos*** - resultou em ganho na margem de carga, mesmo com uma redução de cerca de 1500 Mvar na disponibilidade de potência reativa relativa do sistema.

Com a intenção de reunir os melhores desempenhos das otimizações ***Perdas*** e ***Síncronos***, instruiu-se o FLUPOT com dupla função objetivo: minimizar perdas e geração nos síncronos, dando origem à otimização ***Perdas + Síncronos***.

A Tabela 4.5 destaca o sucesso na busca de ajustes de forma a manter uma disponibilidade nos compensadores síncronos próximos às áreas críticas e garantir, ao mesmo tempo, um aumento na DRR provocado pela redução das perdas de potência reativa da região sudeste.

Tabela 4.5 - Otimização Perdas + Síncronos

Sumário		Caso Base	Perdas	Síncronos	Perdas + Síncronos
Geração Reativa Global (Mvar)		2918,5	2167,4	3650,8	2171,1
Geração Reativa Sudeste (Mvar)		1337	634	248	-671
C.S. (Mvar)	Grajaú	35	200	0	0
	Vitória	25	5	0	0
	Ibiúna	140	90	0	0
	T.Preto	220	205	0	0
Shunt (Mvar)		4873,9	4958,6	4879,9	4982,5
Perdas Ativas (Mw)		1773,1	1749,9	1801,7	1752,5
Perdas Reativas (Mvar)		-6942,7	-7602,4	-6195,5	-7574,6
Disponibilidade Potência Reativa Relativa (Mvar)		-	1495,5	-1473,5	1487,9

A Tabela 4.6 compara os resultados dos cálculos das margens de carga para a otimização ***Perdas + Síncronos***, enquanto a Tabela 4.7 relaciona os grupos de barras críticas e candidatas para esta otimização.

Tab. 4.6 - Perdas + Síncronos - Margens de Carga

Margens de Carga	Base	Perdas	Síncronos	Perdas + Síncronos
Geração Reativa (Mvar)	2918,5	2167,4	3650,8	2171,1
Shunt (Mvar)	4873,9	4958,6	4879,9	4982,5
Perdas Reativas (Mvar)	-6942,7	-7602,4	-6195,5	-7574,6
Disponibilidade Potência Reativa Relativa (Mvar)	-	1496	-1474	1488
λ (%)	2,96	1,68	4,32	4,53
λ (Mva)	780	442	1138	1194
Ganho (Mva)	-	-338	358	413

Tab. 4.7 - Perdas + Síncronos - Grupos de Barras Críticas e Candidatas

Grupo de Barras Críticas e Candidatas	Base	Perdas	Síncronos	Perdas + Síncronos
Norma V. Tangente Grupo de Barras Críticas	2,41	10,27	1,86	3,4
Barras Críticas	1746/10	1725/10	2611/11	2611/11
	1725/10	1724/10	2617/11	2617/11
	1724/10	1798/10	2697/11	2697/11
	1799/10	1727/10	2616/11	2616/11
	1727/10	1799/10	2615/11	2615/11
	1798/10	1726/10	1746/10	1746/10
	2611/11	1728/10	2668/11	2668/11
	1726/10	1719/10	2628/11	2628/11
	1728/10	1746/10	2631/11	2631/11
	1719/10	1723/10	2641/11	2641/11
	2617/11	1718/10	2614/11	2614/11
	2697/11	1720/10	2674/11	2674/11
	2616/11	1713/10	2610/11	1725/10
	1745/10	1702/10	2625/11	1724/10
	2615/11	1701/10	2613/11	2610/11
	174/ 1	1738/10	2635/11	1799/10
	1723/10	1708/10	2683/11	1798/10
	1718/10	1709/10	1725/10	1727/10
	1720/10	1707/10	2638/11	2625/11
	2628/11	1712/10	1724/10	2613/11
Barras Candidatas	1725/10	1725/10	1725/10	1725/10
	1724/10	1724/10	1724/10	1724/10
	1727/10	1727/10	1727/10	1798/10
	1799/10	1798/10	1799/10	1799/10
	1798/10	1799/10	1798/10	1727/10
	1726/10	1726/10	1726/10	1726/10
	1719/10	1719/10	1702/10	1728/10
	1746/10	1728/10	1701/10	1719/10
	1702/10	1746/10	1713/10	1702/10
	1713/10	1702/10	1746/10	1701/10
	1728/10	1701/10	1707/10	1713/10
	1701/10	1713/10	1708/10	1707/10
	1708/10	1707/10	1709/10	1708/10
	1707/10	1708/10	1719/10	1709/10
	1709/10	1709/10	1712/10	1712/10
	1712/10	1712/10	1728/10	1746/10
	1700/10	1718/10	1700/10	1718/10
	1718/10	1700/10	1715/10	1723/10
	1715/10	1723/10	1718/10	1700/10
	1723/10	1720/10	1723/10	1720/10

Os ajustes nos recursos de controle de tensão sugeridos na otimização ***Síncronos*** mostraram ser possível aumentar a margem de carga em cerca de 4,3 %, resultando

numa nova capacidade de atendimento de 27.470 Mva, ou 1.140 Mva adicionais na região sudeste (Tabela 4.3).

Na Tabela 4.6, observa-se que a otimização ***Perdas + Síncronos*** apresentou um pequeno ganho na margem de carga em relação a otimização ***Síncronos***, apesar da diferença de cerca de 3000 Mvar na disponibilidade de potência reativa entre estas otimizações.

Nota-se também, na Tabela 4.7, que o grupo de barras críticas não apresenta grandes variações entre estes casos otimizados, sugerindo uma limitação ao crescimento da margem de carga por parte desses grupos de barras e a necessidade de ações de controle para melhor exploração da disponibilidade conseguida.

3.4 Compensando o Sistema

A partir dos casos nos limites de 4,3 % de carregamento, instruiu-se adicionalmente o FLUPOT com a função objetivo de minimizar a compensação shunt adicional em grupos de barras críticas e/ou candidatas, além de manter as minimizações de perdas e geração nos compensadores síncronos da área de interesse. Os novos casos otimizados, com as compensações e o novos ajustes sugeridos pelo FLUPOT, foram levados ao LFLOW para o cálculo, através do método da continuação e do vetor tangente, das novas margens de carga e dos novos grupos de barras críticas.

3.4.1 Montantes e Localização

As Tabelas 4.8 e 4.9 mostram um sumário da compensação shunt adicional sugeridas pelo programa de otimização para os casos otimizados ***Síncronos*** e ***Perdas + Síncronos***. Nas duas tabelas estão listados, entre parêntesis, os montantes da compensação sugerida pelo programa. As últimas colunas das Tabelas 4.8 e 4.9, resultam da progressiva redução, no FLUPOT, do custo atribuído a alocação da

compensação shunt adicional em barras críticas até a equiparação destes montantes aos valores sugeridos de compensação, por este mesmo programa, em barras candidatas.

Tab. 4.8 – Sumário com Compensação - Otimização Síncronos

Sumário com Compensação Otimização Síncronos	Caso no Máximo Carregamento (4,3 %)	Compensação 116 Mvar Barras Críticas	Compensação 166 Mvar Barras Candidatas	Compensação 166 Mvar Barras Críticas
Grupo de Barras Fornecido para Compensação Adicional no FLUPOT	-	2611/11 2617/11 2697/11 2616/11 2615/11 1746/10 2668/11 2628/11 2631/11 2641/11 2614/11 2674/11 2610/11 2625/11 2613/11 2635/11 2683/11 1725/10 2638/11 1724/10	1725/10 1724/10 1727/10 1799/10 1798/10 1726/10 1702/10 1701/10 1713/10 1746/10 1707/10 1708/10 1709/10 1719/10 1712/10 1728/10 1700/10 1715/10 1718/10 1723/10	2611/11 2617/11 2697/11 2616/11 2615/11 1746/10 2668/11 2628/11 2631/11 2641/11 2614/11 2674/11 2610/11 2625/11 2613/11 2635/11 2683/11 1725/10 2638/11 1724/10
Compensação Adicional (Mvar)	-	116	166	166
Localização e Montante de Shunt Adicional (Mvar)	-	1725/10 (96) 1724/10 (10) 1746/10 (10)	1723/10 (134) 1798/10 (012) 1799/10 (006) 1728/10 (004) 1719/10 (002) 1718/10 (002) 1724/10 (002) 1725/10 (002) 1726/10 (001) 1746/10 (001)	1746/10 (068) 2668/11 (032) 2611/11 (016) 1725/10 (050)
Geração Reativa	4799,0	4644,8	4596,2	4677,4
Shunt	4957,8	5069,1	5108,9	5085,8
Perdas Ativas	1862,1	1857,9	1856,6	1859,4
Perdas Reativas	-5305,4	-5347,9	-5356,6	-5298,7
Disponibilidade Potência Reativa Relativa (Mvar)	-	308	405	243

Tab. 4.9 – Sumário com Compensação - Otimização Perdas + Síncronos

Sumário com Compensação Otimização Perdas + Síncronos	Caso no Máximo Carregamento (4,3 %)	Compensação 108 Mvar Barras Críticas	Compensação 170 Mvar Barras Candidatas	Compensação 170 Mvar Barras Críticas
Grupo de Barras Fornecido para Compensação Adicional no FLUPOT	-	2611/11 2617/11 2697/11 2616/11 2615/11 1746/10 2668/11 2628/11 2631/11 2641/11 2614/11 2674/11 1725/10 1724/10 2610/11 1799/10 1798/10 1727/10 2625/11 2613/11	1725/10 1724/10 1798/10 1799/10 1727/10 1726/10 1728/10 1719/10 1702/10 1701/10 1713/10 1707/10 1708/10 1709/10 1712/10 1746/10 1718/10 1723/10 1700/10 1720/10	2611/11 2617/11 2697/11 2616/11 2615/11 1746/10 2668/11 2628/11 2631/11 2641/11 2614/11 2674/11 1725/10 1724/10 2610/11 1799/10 1798/10 1727/10 2625/11 2613/11
Compensação Adicional (Mvar)	-	108	170	170
Localização e Montante de Shunt Adicional (Mvar)	-	1724/10 (057) 1798/10 (032) 1746/10 (014) 1725/10 (005)	1723/10 (130) 1799/10 (018) 1720/10 (007) 1719/10 (004) 1728/10 (003) 1718/10 (003) 1724/10 (002) 1746/10 (002) 1725/10 (001)	1725/10 (099) 1746/10 (045) 1724/10 (015) 2668/11 (007) 1799/10 (004)
Geração Reativa	4018,3	3552,2	3438,1	3479,3
Shunt	4997,9	5140,6	5207,6	5198,1
Perdas Ativas	1838,3	1824,0	1820,8	1823,1
Perdas Reativas	-6028,4	-6351,8	-6398,8	-6367,2
Disponibilidade Potência Reativa Relativa (Mvar)	-	932	1160	1078

Nas Tabelas 4.8 e 4.9 observa-se que o FLUPOT escolheu, para compensação ótima a custos iguais, totais menores de compensação shunt adicional quando o grupo de barras oferecido ao programa foi o de barras críticas. Neste grupo, as barras selecionadas pelo FLUPOT com os objetivos de minimizar a alocação shunt, tantos nas otimizações ***Síncronos*** como nas ***Perdas + Síncronos***, foram aquelas que também constam como candidatas à redução de perdas.

Observa-se também que, para um mesmo montante de compensação adicional, a alocação no grupo de barras candidatas possibilita uma maior DRR, devido a uma maior eficiência desta alocação na redução de perdas.

3.4.2 Novas Margens de Carga e Barras Críticas

Os novos casos otimizados, com as compensações e o novos ajustes sugeridos pelo FLUPOT para as otimizações ***Síncronos*** e ***Perdas + Síncronos***, foram levados ao LFLOW para cálculo das novas margens de carga e grupos de barras críticas.

As Tabelas 4.10 e 4.11 apresentam as novas margens de carga e as barras críticas para as otimizações compensadas ***Síncronos*** e ***Perdas + Síncronos***.

Tab. 4.10 – Margens de Carga após Compensação - Otimização Síncronos

Margens de Carga Otimização Síncronos	Caso no Máximo Carregamento (4,3 %)	Compensação 116 Mvar Barras Críticas	Compensação 166 Mvar Barras Candidatas	Compensação 166 Mvar Barras Críticas
Compensação Adicional (Mvar)	-	116	166	166
Disponibilidade Potência Reativa Relativa (Mvar)	-	308	405	243
Norma do Vetor Tangente	1,86	1,97	2,00	2,53
λ_s (%)	-	2,7631	2,7750	2,7474
λ_s (Mva)	-	759	762	755
Ganho/Shunt (Mva/Mvar)	-	6,5	4,6	4,5
Barras Críticas	2611/11	1746/10	1746/10	1725/10
	2617/11	1725/10	1725/10	1724/10
	2697/11	1724/10	1724/10	1799/10
	2616/11	1799/10	1727/10	1798/10
	2615/11	1798/10	1798/10	1727/10
	1746/10	1727/10	1799/10	1726/10
	2668/11	1726/10	1726/10	1728/10
	2628/11	1728/10	1728/10	1719/10
	2631/11	1719/10	1719/10	1746/10
	2641/11	1723/10	1723/10	1723/10
	2614/11	1718/10	1718/10	1718/10
	2674/11	1720/10	1720/10	1720/10
	2610/11	1745/10	1745/10	1713/10
	2625/11	174/ 1	174/ 1	1702/10
	2613/11	1713/10	1713/10	1701/10
	2635/11	1702/10	1702/10	1708/10
	2683/11	1701/10	1701/10	1709/10
	1725/10	1708/10	1708/10	1707/10
	2638/11	1709/10	1709/10	1712/10
	1724/10	1707/10	1707/10	1738/10

Tab. 4.11 – Margens de Carga após Compensação - Otimização Perdas + Síncronos

Margens de Carga Otimização Perdas + Síncronos	Caso no Máximo Carregamento (4,3 %)	Compensação 108 Mvar Barras Críticas	Compensação 170 Mvar Barras Candidatas	Compensação 170 Mvar Barras Críticas
Compensação Adicional (Mvar)	-	108	170	170
Disponibilidade Potência Reativa Relativa (Mvar)	-	932	1160	1078
Norma do Vetor Tangente	3,4	3,5	3,5	4,5
λ_s (%)	-	2,8993	2,9181	2,9079
λ_s (Mva)	-	796	802	799
Ganho/Shunt (Mva/Mvar)	-	7,4	4,7	4,7
Barras Críticas	2611/11	1725/0/10	1725/0/10	1725/10
	2617/11	1724/10	1724/10	1724/10
	2697/11	1798/10	1799/10	1799/10
	2616/11	1727/10	1727/10	1798/10
	2615/11	1799/10	1798/10	1727/10
	1746/10	1726/10	1726/10	1726/10
	2668/11	1746/10	1746/10	1728/10
	2628/11	1728/10	1728/10	1719/10
	2631/11	1719/10	1719/10	1746/10
	2641/11	1723/10	1723/10	1723/10
	2614/11	1718/10	1718/10	1718/10
	2674/11	1720/10	1720/10	1720/10
	1725/10	1713/10	1713/10	1713/10
	1724/10	1702/10	1702/10	1702/10
	2610/11	1701/10	1701/10	1701/10
	1799/10	1708/10	1708/10	1708/10
	1798/10	1709/10	1709/10	1709/10
	1727/10	1707/10	1707/10	1707/10
	2625/11	1712/10	1712/10	1712/10
	2613/11	1745/10	1745/10	1700/10

Da análise das Tabelas 4.10 e 4.11, constata-se a maior eficiência no ganho da margem de carga quando a localização da compensação adicional situa-se em barras comuns às áreas críticas e candidatas. Para um mesmo ganho na margem de carga, montantes menores de compensação foram necessários quando a compensação localizou-se nestes grupos de barras, com uma relação de até 740 Mva para cada 100 Mvar de

compensação, contra 470 Mva pelos mesmos 100 Mvar quando localizados no grupo de barras candidatas.

4 CONCLUSÕES

O fenômeno de instabilidade de tensão está associado ao esgotamento dos recursos de potência reativa do sistema. Desta maneira, a procura de uma filosofia de controle de tensão baseada na otimização da disponibilidade destes recursos pode resultar em significativo ganho na margem de carga para o sistema elétrico de potência.

Os ajustes nos recursos de controle de tensão de forma a minimizar as perdas de potência reativa, podem reduzir a margem de carga do sistema, apesar do ponto de colapso de tensão estar geralmente associado a um ponto de operação com altas perdas elétricas e do aumento na disponibilidade de potência reativa que esta otimização oferece ao sistema. Estes ajustes elevam o perfil de tensão dos centros de carga, explorando a geração de potência de reativa dos geradores próximos a estes centros e minimizam as gerações de potência reativa de geradores mais afastados e ligados a grandes troncos de transmissão, com o objetivo final de redução das perdas de potência reativa na transmissão.

Por outro lado, a minimização de geração de potência reativa em todos os geradores de uma área de interesse, pode significar em aumento das perdas de potência reativa pela necessidade de importação da geração deste recurso de áreas vizinhas.

A concentração da minimização da geração de potência reativa nos geradores próximos às áreas sinalizadas como críticas pelo método do vetor tangente e a liberação da geração deste recurso nos demais geradores do sistema, pode resultar em uma melhor otimização desta geração nos geradores da área de interesse e em ganho na margem de

carga do sistema, mesmo que estes ajustes impliquem em redução da disponibilidade deste tipo de potência.

A união de otimizações que objetivem ao mesmo tempo a minimização de perdas e geração de potência reativa nos geradores próximos às áreas críticas, pode sugerir ajustes ótimos nos recursos do sistema de forma a elevar a disponibilidade de potência reativa e garantir a margem de carga do sistema até um limite em que uma ação de controle é necessária para a utilização da disponibilidade conseguida.

Variações na margem de carga do sistema são acompanhadas de significativa variação no elenco de barras críticas e de pouca variação no grupo de barras candidatas à redução de perdas, mostrando a forte relação existente entre aqueles primeiros grupos de barras com o colapso de tensão e avalizando a técnica proposta.

Para a ação de controle estudada, a união das técnicas de otimização e do vetor tangente foi capaz de especificar valores e localizar compensação shunt adicional de forma a se obter maior margem de carga com um mínimo de compensação. Mais uma vez, a técnica proposta mostrou que a compensação em grupos de barras candidatas à redução de perdas apresenta rendimento menor do que o da mesma ação em barras comuns a estes grupos e aos grupos de barras críticas, apesar de posssibilitarem uma maior redução de perdas de potência reativa do sistema.

Estes resultados candidatam o método proposto como uma atraente técnica para análise e ações de controle de colapso de tensão em sistemas elétricos de potência.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

1 PROBLEMA EXAMINADO

A operação dos grandes troncos de transmissão com carregamentos próximos dos limites contribuíram para o aumento das perdas de potência reativa, para o esgotamento dos recursos deste tipo de potência e para os problemas de estabilidade de tensão.

Neste cenário, uma política de máxima redução de perdas parecia ser uma importante estratégia de recuperação da margem operativa do sistema a curto-prazo, restando às equipes de planejamento o estudo de otimização dos recursos de potência reativa e compensação reativa shunt adicional de forma a atender a esta estratégia neste horizonte.

Alguns resultados de otimizações mostraram que os ajustes nos recursos de controle de tensão de forma a reduzir as perdas de potência reativa, algumas vezes poderiam não ser os mais recomendados para o aumento da margem de carga do sistema, apesar do ponto de colapso de tensão estar geralmente associado a um ponto de operação com altas perdas elétricas.

Desta maneira, a certeza de um desempenho seguro através do gerenciamento da margem de disponibilidade de potência reativa do sistema, afetada principalmente pelas perdas de potência reativa, não estava garantida.

Este trabalho estudou a relação entre as ações de controle que visam a redução de perdas de potência reativa e as ações que possibilitam o aumento da margem de carga para colapso de tensão em um sistema elétrico de potência.

A proposta deste trabalho consistiu na comparação, em primeira etapa, de otimizações que objetivassem a redução de perdas com outras otimizações que favorecessem o aumento de carga do sistema; numa segunda etapa foram analisados os efeitos de uma compensação shunt adicional na margem de carga do sistema, quando esta compensação foi feita nos conjuntos de barras críticas à estabilidade de tensão e/ou nos conjuntos de barras candidatas à redução de perdas. Para este fim, foi utilizado o método de pontos interiores nas otimizações, incluído no programa FLUPOT (CEPEL) [38], o método da continuação [26] no cálculo da margem de carga e a técnica do vetor tangente [24, 27] para a sinalização de barras críticas e candidatas à redução de perdas [29], incorporados no programa de fluxo de potência LFLOW (FURNAS) [42].

2 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho mostrou que os ajustes nos recursos de controle de tensão de forma a minimizar as perdas de potência reativa podem reduzir a margem de carga do sistema, apesar do aumento na disponibilidade de potência reativa que estes ajustes oferecem ao sistema.

A concentração da minimização da geração de potência reativa nos geradores próximos às áreas sinalizadas como críticas à estabilidade de tensão pelo método do vetor tangente e a liberação da geração deste recurso nos demais geradores do sistema, pode resultar em ganho na margem de carga do sistema, mesmo que estes ajustes signifiquem em redução na disponibilidade deste tipo de potência.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
BIM

A união de otimizações que objetivem ao mesmo tempo a minimização de perdas e geração de potência reativa nos geradores próximos às áreas críticas, pode sugerir ajustes ótimos nos recursos do sistema de forma a elevar significativamente sua margem de carga e a disponibilidade de potência reativa até um limite em que uma ação de controle é necessária para a utilização da disponibilidade conseguida.

Nestes casos, a união das técnicas propostas neste trabalho, foi capaz de especificar valores e localizar compensação shunt adicional de forma a se obter maior margem de carga com um mínimo de compensação. Mais uma vez, a técnica proposta mostrou que a compensação em grupos de barras candidatas à redução de perdas, também sinalizadas pela técnica do vetor tangente, apresenta rendimento menor do que o da mesma ação em barras comuns a estes grupos e aos grupos de barras críticas, apesar de posssibilitarem uma maior redução de perdas de potência reativa do sistema.

Estes resultados qualificam a técnica proposta em estudos do planejamento da operação, onde as ações visando o aumento de margem de carga são baseadas atualmente em ajustes ou alocação de compensação adicional de forma a reduzir as perdas ou geração de potência reativa no sistema, na medida em que alerta para os riscos dessa metodologia e propõe em troca, uma atraente estratégia de otimização dos recursos de potência reativa.

Por estar baseada em ágeis e robustas técnicas de análise estática, a metodologia proposta é também indicada para utilização em tempo real, sinalizando de forma segura aos operadores do sistema, ajustes nos recursos de controle de tensão, visando o aumento da margem de carga e os impactos de impedimentos destes recursos nesta margem a cada condição operativa.

A curto-prazo, o corte de carga é a ação de controle mais comum para controle de colapso de tensão na operação do sistema. A incorporação, em um programa de fluxo de

potência ótimo, de informações obtidas pela técnica do vetor tangente parece promissora por permitir previamente a identificação de barras críticas para a ação de controle, ao mesmo tempo que assegura a utilização de todos os recursos operativos do sistema, antes da tomada deste tipo de decisão.

3 SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Alguns desenvolvimentos adicionais podem ser realizados em trabalhos futuros:

- Analisar o efeito da modelagem de carga no estudo da relação entre as ações de controle que visam a redução de perdas de potência reativa e as ações que possibilitam o aumento da margem de carga.

- Estudar outras ações de controle como corte de carga, inibição de crescimento de carga, congelamento de tapes, instalação de compensação série em circuitos críticos.

- Estudar a influência de diferentes direções de crescimento de carga, crescimentos com alteração do fator de potência e influência da redistribuição de perdas em geradores do sistema durante estas simulações.

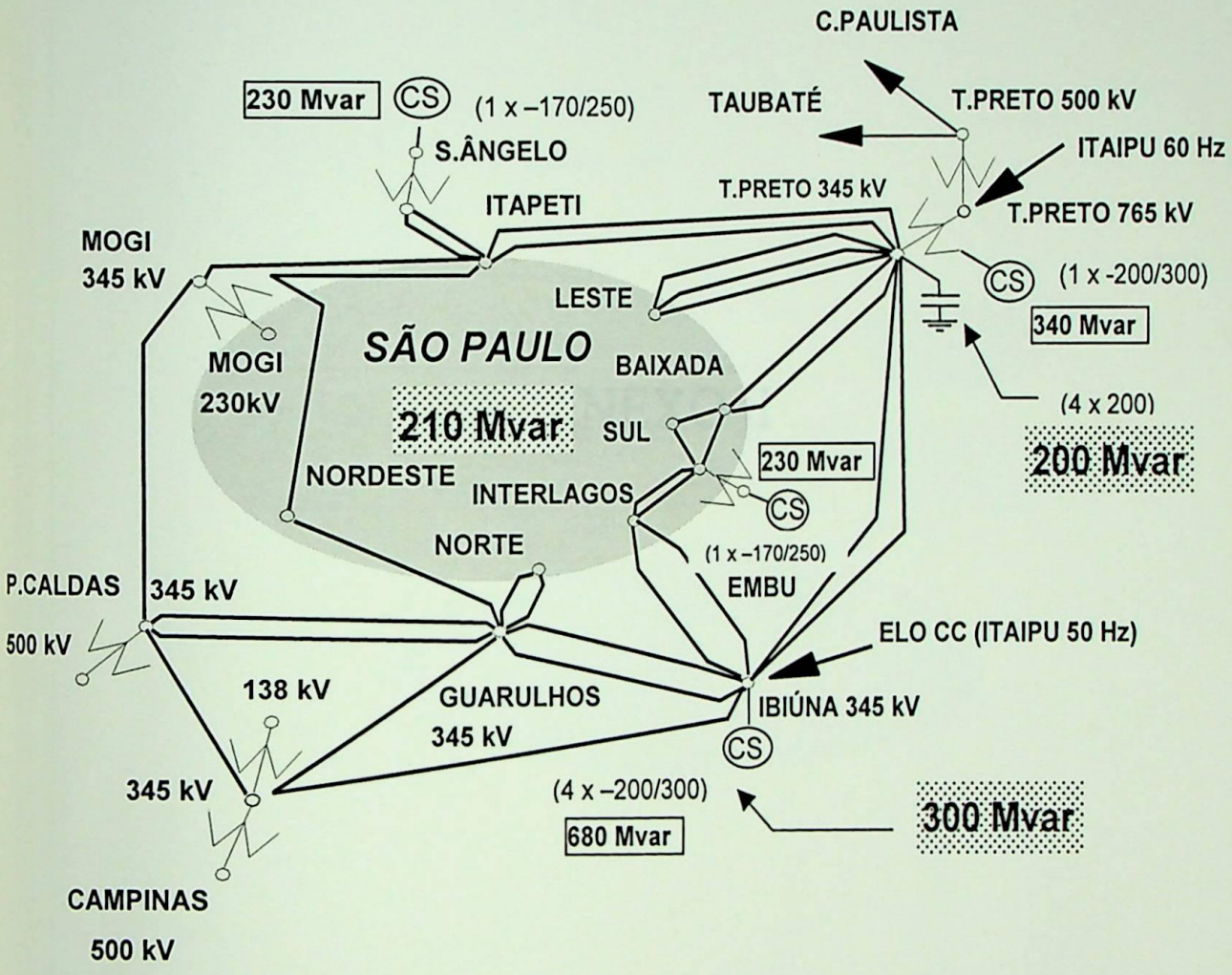
- Estudar variações das otimizações praticadas como minimizar geração de potência reativa nos geradores do sistema com custo através de função linear, minimização de perdas com possibilidade de redespacho, mínima compensação sugerida pelo programa de otimização para a função objetivo de máximo carregamento, mínima compensação sugerida pelo programa de otimização com chaveamento dos recursos shunts pré-existentes.

- Estudar a evolução no tempo das grandezas físicas, barras críticas e candidatas através da otimização de cada ponto de operacao fornecido pelo método da continuação.

ANEXO I

ANEXO I

PERTURBAÇÃO 24 DE ABRIL DE 1997



Carga Interrompida(S/SE/CO): 7600 Mw

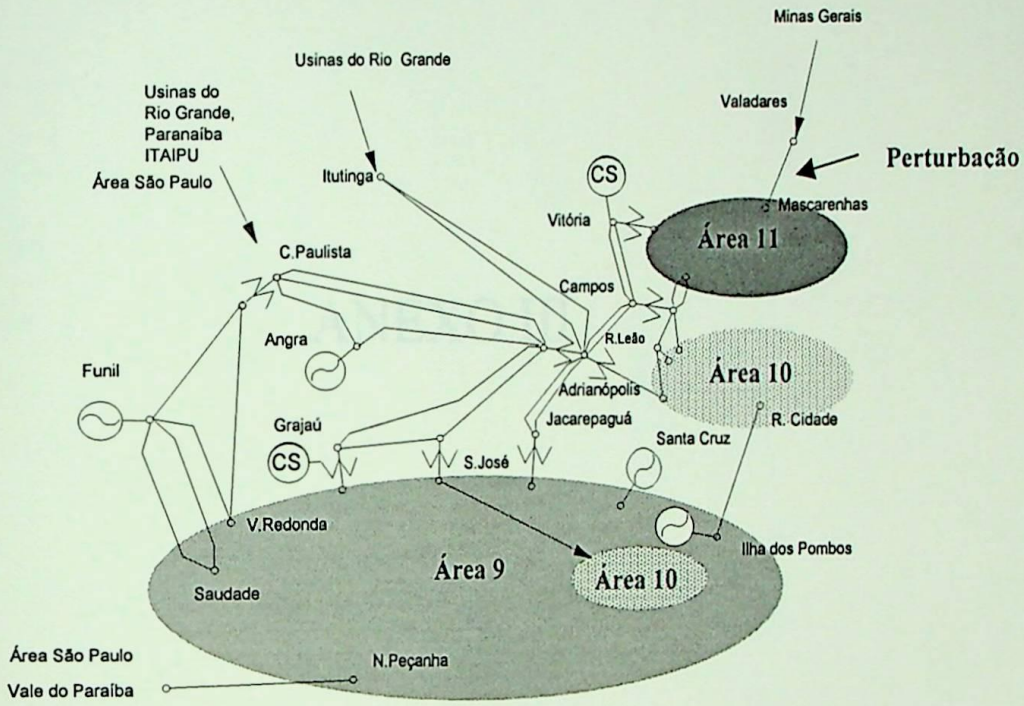
Recurso Total Impedido

Geração Pré-Distúrbio

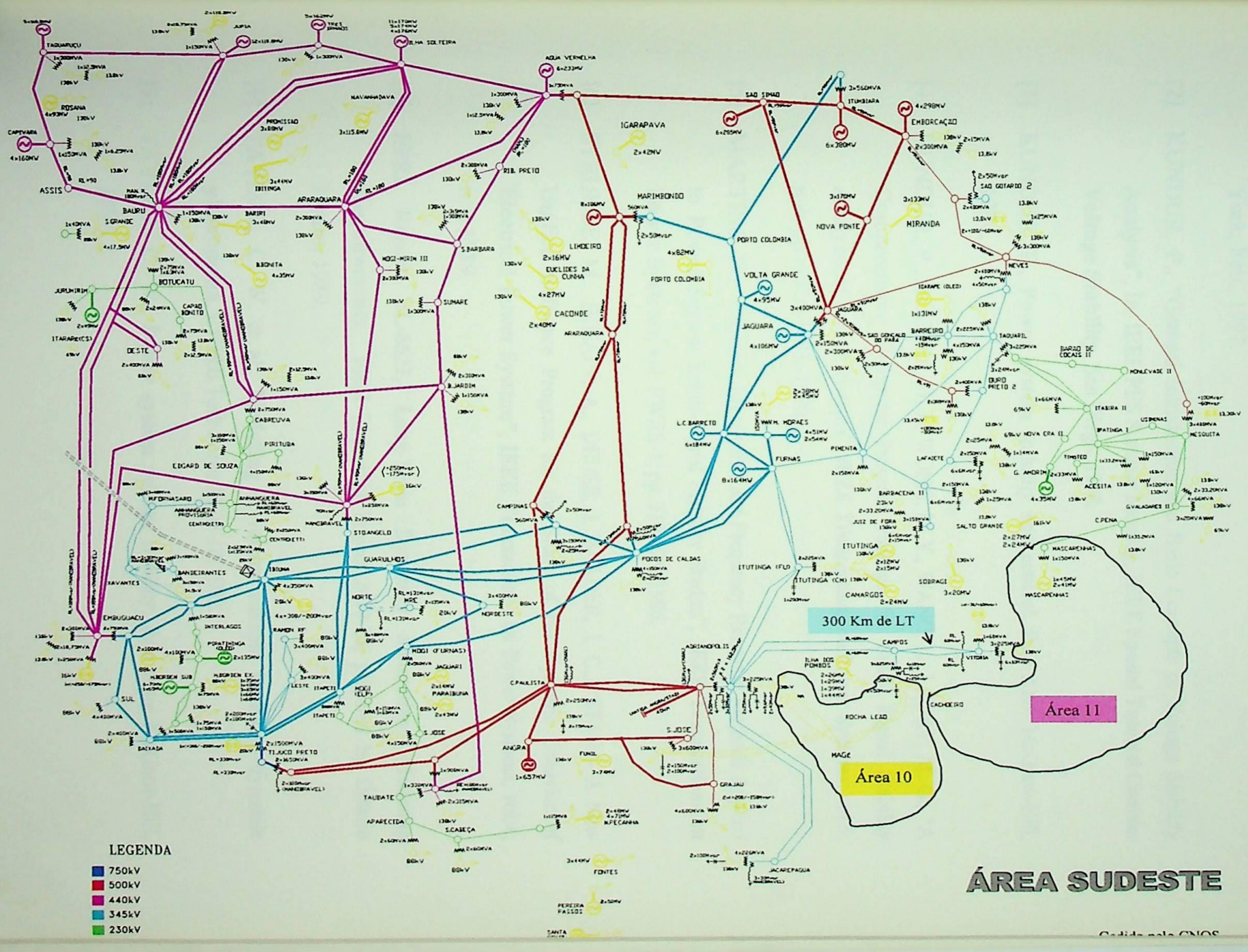
ANEXO II

ANEXO II

PERTURBAÇÃO 13 DE NOVEMBRO DE 1997 – ÁREA RJ / ES



ANEXO III



ÁREA SUDESTE

Cedido pela CNOS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] KUNDUR, P., MORISON, G. K., "A Review of Definitions and Classification of Stability Problems in Today´s Power Systems", **IEEE PES Meeting**, New York, Feb., 1997.

[2] KUNDUR, P., "General Introduction and Basic Concepts of Voltage Stability Analysis", In: IEEE PES Summer Meeting, **IEEE Special Tutorial Course: Voltage Stability**, San Diego, 1998.

[3] KUNDUR, P., **Power system stability and control**. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.

[4] KUNDUR, P., ROGERS, G. J., WONG, D. Y., WANG, L., LAUBY, M. G., "A Compreensive Computer Program Package for Small Signal Stability Analysis of Power Systems", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.5, n.4, pp. 1076-1083, 1990.

[5] MARTINS, N., "Efficient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to Power System Small-Signal Stability Studies", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. PWRS-1, pp. 217-225, 1986.

[6] STRUBBE, M., BIHAIN, A., DEUSE, J, BAADER, J. C., "STAG - A New Unified Software Program for the Study of the Dynamic Behavior of Electrical Power Systems", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.4, n.1, 1989.

[7] EPRI Report EL-6627, **Long-Term Dynamics Simulation: Modeling Requirements**, Final Report of Project 2473-22, prepared by Ontario Hydro, 1989.

[8] TAYLOR, C. W. et al., **Modelling of voltage collapse including dynamic phenomena**, CIGRE Task Force 38-02-10, 1992.

[9] TAYLOR, C. W., **Power system voltage stability**. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.

[10] CLARK, H. K., "New challenge: Voltage Stability", **IEEE Power Engineering Review**, 1990.

[11] KUNDUR, P., GAO, B., "Practical considerations in voltage stability assessment", **Proceedings of IV Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning**, Foz do Iguaçu, May 1994.

[12] GCOI - Grupo Coordenador para Operação Interligada, **Modelos de carga para estudos de estabilidade e fluxo de carga**, Relatório SCEL-GTEE-001/89, 1989.

[13] PRICE, W. W. et al., "Load representation for dynamic performance analysis", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.8, n.2, pp. 472-482, 1993.

[14] BRITO, N. H. M. N., **Ações de Controle Aplicadas à Análise de Estabilidade de Tensão**, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, Minas Gerais, 1996.

[15] D' AJUZ, A. et al., **Equipamentos elétricos - especificação e aplicação em subestações de alta tensão**, Niterói, FURNAS -: Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.

[16] TARANTO, G. N., PINTO, L. M. V. G., PEREIRA, M. V. F., "Representation of Facts Devices in Power System Economic Dispatch", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.7, n.2, pp. 572-576, May 1992.

[17] FAUR, Z. T., CAÑIZARES, C. A., "Effects of FACTS Devices on Systems Loadability", **North American Power Symposium**, June 1995.

[18] CAMPANHOLO FILHO, B., ARAÚJO, J. M., GERALDES FILHO, W. et al., "Modelagem de cargas em estudos e análise de sistemas sujeitos a instabilidade de tensão". In: **Anais do XII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica,** Recife, 1993.

[19] TAYLOR, C. W., "Maybe I Can't Define Stability, but I Know It When I See It", **IEEE/PES – panel on Stability Terms and Definitions**, New York, 1997.

[20] EPRI Report TR-102004-V3RI, **Extended Transient-Midterm Stability Program (ETMSP)**, Final Report, 1994.

[21] VAN CUTSEM, T., JACQUEMART, Y., MARQUET, J. N., PRUVOT, P., "A Comprehensive Analysis of Mid-Term Voltage Stability", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.10, pp. 1173-1182, 1985.

[22] VAN CUTSEM, T., VOURNAS, C. D., "Voltage Stability Analysis in Transient and Mid-Term Time Scales", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 11, n.1, pp. 146-154, February 1992.

[23] MEDINA, W. J. C., FALCÃO, D. M., TARANTO, G. N., "A Fast Time Domain Simulation Method for Voltage Stability Assessment", **VI Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning,** Salvador, Maio 1998.

[24] SOUZA, A. C. Z., **New techniques to efficiently determine proximity to static voltage collapse**, PhD thesis, University of Waterloo, Waterloo, 1995.

[25] GAO, B., MORISON, G. K., KUNDUR, P., "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. PWRS-7, n.4, pp. 1529-1542, 1992.

[26] CAÑIZARES, C. A., ALVARADO, F. L., "Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.8, n.1, pp. 1-8, 1993.

[27] SOUZA, A. C. Z., CAÑIZARES, C. A., QUINTANA, V. H., "Critical Bus and Point of Collapse Determination Using Tangent Vectors", **28th North American Power Symposium**, pp. 329-333, Cambridge, 1996.

[28] SOUZA, A. C. Z., CAÑIZARES, C. A., QUINTANA, V. H., "New Techniques to Speed Up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.12, n.3, pp. 1380-1387, 1997.

[29] SOUZA, A. C. Z., "Tangent Vector Applied to Voltage Collapse and Loss Sensitivity Studies", **Electric Power Systems Research**, n.47, pp. 65-70, 1998.

[30] GCOI - Grupo Coordenador para Operação Interligada, **Análise das perturbações dos dias 24 e 25/04/97 no sistema interligado S/SE/CO,** Relatório SCO/SCEL-01/97, 1997.

[31] JARDIM, J. L. A., SILVA NETO, C. A., SOUZA, A. C. Z., ALVES da SILVA, A. P., FALCÃO, D. M., BORGES, C. L. T., TARANTO, G. N., "A New On-Line Dynamic Security Assessment System", **VI Simposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning**, Salvador, 1998.

[32] SOUZA, A. C. Z., **Estabilidade de Tensão**, Apostila de Curso, FUPAI, Itajubá, 1997.

[33] SOUZA, A. C. Z., JARDIM, J. L. A., SILVA NETO, C. A., ALVES da SILVA, A. P., TORRES, G. L., FERREIRA, C., FERREIRA, L. C. A., "A New Contingency Analysis Approach for Voltage Collapse Assessment," submetido a **Electric Power Systems Research**, 1998.

[34] SAUER, P. W., PAI, M. A., "Power system steady-state stability and the load-flow Jacobian", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.5, n.4, pp. 1374-1381, 1990.

[35] FERREIRA, L. C. A., **Medidas Operativas para Evitar Colapso de Tensão no Sistema Interligado Sul/Sudeste**, Nota Técnica DANS.O.003.97, Furnas Centrais Elétricas, 1997.

[36] GRANVILLE, S., "Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.9, n.1, pp. 136-142, February, 1994.

[37] GRANVILLE, S., MELLO, J. C. O., MELO, A. C. G., "Application of Interior Point Methods to Power Flow Unsolvability", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.11, n.2, , pp. 1096-1103, May 1996.

[38] GRANVILLE, S., LATORRE, M. L., OLIVEIRA, M. L. G., PEREIRA, L. A. C., **Programa de Fluxo de Potência Ótimo - FLUPOT, Manual de Usuário - V.4.2 - 01/99**, Cepel, 1999.

[39] 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", **XII Congresso Brasileiro de Automática,** Uberlândia, 1998.

[40] WU, Y., DEBS, A. S., MARSTEN, R. E., "A Nonlinear Programming Approach Based on an Interior Point Method for Optimal Power Flows", **IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference**, paper APT 409-17-27, Athens, 1993.

[41] LATORRE, M. L., **Aplicação do Método de Pontos Interiores Primal-Dual Para A Resolução do Problema de Fluxo de Potência Ótimo**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,1995.

[42] JARDIM, J. L. A., SILVA NETO, C. A., FERNANDES, M. A., **Programa de Fluxo de Potência para Sistema de Avaliação Dinâmica – LFLOW, V.1.2 – Manual do Usuário**, Furnas Centrais Elétricas, 1998.

[43] SEYDEL, R., **From Equilibrium to Chaos – Practical Bifurcation and Stability Analysis,** Elsevier Science, North-Holland, 1988.

[44] CAÑIZARES, C. A., **Voltage Collapse and Transient Energy Function Analyses of AC/DC Systems**, PhD thesis, University of Wisconsin-Madison, 1991.

[45] CAÑIZARES, C. A., "Conditions for saddle-node bifurcations in ac/dc power systems with losses", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.36, n.11, pp. 1423-1429, 1989.

[46] MARANNINO, P., BRESESTI, P., DELFANTI, M., GRANELLI, G. P., MONTAGNA, M., "Voltage collapse proximity indicators for very short term security assessment", **Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena III-Voltage Stability and Security**, ECC Inc. , Switzerland, August 1994.

[47] LÖFF, P. A., SMED, T., ANDERSON, G., HILL, D. J., "Fast Calculation of a Voltage Stability Index", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.7, n.1, pp. 54-64, February 1992.

[48] BARQUIN, J., GÓMEZ, T., PAGOLA, F. L., "Estimating the loading limit margin taking into account voltage collapse areas", **IEEE/PES Winter Meeting - Paper 95 WM 183-4 PWRS**, 1990.

[49] CAÑIZARES, C. A., SOUZA, A. C. Z., QUINTANA, V. H., "Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.11, n.3, pp. 1441-1447, August 1996.

[50] PRADA, R. B., SOUZA, A. C. Z., VIEIRA FILHO, X., MASSAUD, A. G., OLIVEIRA, J. C., "Voltage stability: phenomena characterization based on reactive control effects and system critical areas identification", **Proceedings of the third Sepope meeting** , SP-14, Belo Horizonte , 1991.

[51] MANSOUR, Y., "Industry practice in voltage stability analysis of power systems," **Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena III-Voltage Stability and Security**, ECC Inc. , Switzerland, August 1994.

[52] CHIANG, H. D., "Study of the existence of energy functions for power systems with losses", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.36, n.11, pp. 1423-1429, November 1989.

[53] OVERBYE, T., **Application of an energy based security method to voltage instability in electrical power systems**, PhD thesis, University of Wisconsin, Madison, 1991.

[54] OVERBYE, T. J., MARCO, C. L., "Voltage security enhancement using energy based sensitivities", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.6, n.3, pp. 1196-1202, August 1991.

[55] AJJARAPU, V., CHRISTY, C., "The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.7, n.1, pp. 416-423, Feb 1992.

[56] CHIANG, H. D. et al., "CPFLOW: A pratical tool for tracing power system steady-state stacionary behavior due to load and generation variations", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.10, n.2, pp. 623-634, May 1995.

[57] AJJARAPU, V., "Identification of steady state voltage stability in power systems," **Proc. of International Conference on High Technology in the Power Industry**, pp. 244-247, March 1988.

[58] ALVARADO, F. L., JUNG, T. H., "Direct detection of voltage collapse conditions," **Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena - Voltage Stability and Security**, EL-6183, EPRI, pp. 5.23-5.38, January 1989.

[59] SOUZA, A. C. Z., "Determinação da Barra Crítica e do Ponto de Colapso pelo Vetor Tangente," **XI Congresso Brasileiro de Automática**, vol.3, pp. 1393-1998, São Paulo, Setembro 1996.

[60] SOUZA, A. C. Z., CAÑIZARES, C. A., QUITANA, V. H., "New Techniques to Speed up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors", **IEEE/PES Summer Meeting** , Paper PE-219- PWRS-0-11-1996, Berlin, July 1997.

[61] GRANVILLE, S., LATORRE, M. L., PEREIRA, L. A. C., "Fluxo de Potência Ótimo: Modelagem Básica e Aplicações", **XIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE**, 1995.

[62] MONTICELLI, A., **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**, São Paulo, Editora Edgard Blücher,1983.

[63] CARPENTIER, J., "Contribuition á `L`étude du Dispaching Économique", **Bulletin de la Societe Françoice dos Electriciens**, SER-8, vol.3, pp. 432-447, 1962.

[64] DOMMEL, H. W., TINNEY, W. F., "Optimal Power Flow Solutions", **IEEE Transactions on PAS**, vol.87, pp. 1876-1886, 1968.

[65] GILL, P. E., MURRAY, W., WRIGHT, M. H., **Practical Optimization**, London, Academic Press, 1981.

[66] CARPENTIER, J., "Differencial Injections Method: A General Method for Segure and Optimal Load Flows", **Proc PICA**, pp 255-262, 1973.

[67] JIANZHONG, Z., NAE-HEON, K., LASDON, L., "An Improved Succesive Linear Programming Algorithm", **Management Science**, vol.31, n.10, 1985.

[68] ALSAÇ, O., BRIGHT, J., PRAIS, M., STOTT, B., "Further Developments in LP-Based Optimal Power Flow", **IEEE Transactions on PAS**, vol.5, 1990.

[69] BURCHETT, R. C., HAPP, H. H., WIRGAU, K. A., "Large Scale Optimal Power Flow", **IEEE Transactions on PAS**, vol.101, pp. 3722-3732, 1982.

[70] BURCHETT, R. C., HAPP, H. H., VIERATH, D. R., "Quadratically Convergent Optimal Power Flow", **IEEE Transactions on PAS**, vol.103, n.11, pp. 3267-3276, 1984.

[71] SUN, D. I., ASHLEY, B. T., BREWER, B. J., HUGHES, B. A., TINNEY, W.F., "Optimal Power Flow by Newton Approach", **IEEE Transactions on PAS**, vol.103, n.10, 1984.

[72] PEREIRA, L. A. C., **Implementação de um Programa de Fluxo de Potência Ótimo Utilizando Programação Quadrática Sequencial**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

[73] LUSTING, I. J., MARSTEN, R. E., SHANNO, D. F., "Interior Point Methods for Linear Programming: Computational State of the Art", Feature Article in **ORSA Journal on Computing**, vol.6, n.1, Winter 1994.

[74] KARMAKAR, N., "A New Polynomial Time Algorithm for Linear Programming", **Combinatorica**, 4, 1984.

[75] GONZAGA, C. C., "Path Following Methods for Linear Programming", **SIAM Review**, 34, 1992.

[76] WRIGHT, M. H., **Interior Methods for Constrained Optimization**, Acta Numerica 1992, A. Iserles, (ed.), Cambridge University Press, New York, NY.

[77] MELIOPOULOS, A. P. S., XIA, F., "Optimal Power Flow Application to Composite Power System Reliability Analysis", **IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference**, Athens, 1993.

[78] VARGAS, L. S., QUINTANA, V. H., VANNELLI, A., "A Tutorial Description of an Interior Point Method and Its Application to Security-Constrained Economic Dispatch", **IEEE Summer Meeting**, paper 92 SM 416-8 PWRS, Seattle, 1992.

[79] GRANVILLE, S., MELLO, J. C. O., MELO, A. C. G., "Application of Interior Point Method to Power Flow Unsolvability", **IEEE/PES Summer Meeting**, paper No. 95 SM 599-1 PWRS, Portland, June 1995.

[80] MELO, A. C. G., MELLO, J. C. O., GRANVILLE, S., "The Effects of Voltage Collapse Problems in the Reliability Evaluation Of Composite System", **IEEE/PES Winter Meeting**, paper No. 96 WM 316-0 PWRS, Baltimore, February 1996.

[81] LATORRE, M. L., OLIVEIRA, M. L. G., SOTO, J. O., GRANVILLE, S., "Voltage Collapse and the Optimal Power Flow Problem in Power Systems", **Bulk Power Systems Dynamics and Control – IV Restructuring**, Santorini, Agosto 1998.

[82] STOTT, B., ALSAÇ, O., MONTICELLI, A., "Security Analysis and Optimization", **Proceedings of the IEEE**, vol.75, n.12, 1987.

[83] MONTICELLI, A., PEREIRA, M. V. F., GRANVILLE, S., "Security-Constrained Optimal Power Flow with Post-Contingency Corrective Rescheduling", **IEEE Transactions on Power System**, vol.2, n.1, 1987.

[84] GEOFFRION, H. M., "Generalized Benders Decomposition", **JOTA**, vol.10, 1972.

[85] GRANVILLE, S., LIMA, M. C. A., "Application of Decomposition Techniques to Var Planning: Methodological & Computational Aspects", **IEEE/PES**, n.94, 1994.

[86] MELO, A. C. G., et al., "Reliability Evaluation of Large Scale Composite Power Systems", **III Simposio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica**, 1992.