

UNIFEI - UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

POLÍTICA DE CONTROLE DE TENSÃO COM A
UTILIZAÇÃO DA CURVA QV

LUÍS CARLOS DA SILVA PEREIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Itajubá – MG.
2007

POLÍTICA DE CONTROLE DE TENSÃO COM A UTILIZAÇÃO DA CURVA QV

**Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da UNIFEI
como requisito parcial para obtenção
do título de mestre em Engenharia Elétrica.**

Área de Concentração:
Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Zamboni de Souza.

**Itajubá – MG
2007**

POLÍTICA DE CONTROLE DE TENSÃO COM A UTILIZAÇÃO DA CURVA QV

Luís Carlos da Silva Pereira

Aprovada por:

Prof. Doutor Julio César Stacchini de Souza

Prof. Doutor Benedito Isaías de Lima Lopes

Prof. Doutor Antônio Carlos Zambroni de Souza (Orientador)

“Um momento de felicidade vale mais do que mil anos de celebridade.”
Voltaire

Dedicatória

*À minha querida filha Júlia,
que nos momentos que me encontro
distante, em função do trabalho, está sempre
presente em pensamento renovando as minhas forças.*

Agradecimentos

A Deus acima de tudo, que me proporcionou desenvolver este trabalho com saúde e paz, dirigindo os meus passos em todos os instantes.

Em especial, ao amigo e Prof. Dr. Antônio Carlos Zambroni de Souza, pela dedicação, inspiração de luta e participação constante no desenvolvimento deste trabalho, oferecendo-me sempre tão pronta atenção e paciência.

Aos meus pais, Eloiza Júlia e Lorival e aos meus avós, Dalva e José Augusto, pelo apoio, amor, carinho e incentivo.

A minha esposa Márcia pela tolerância, paciência e incentivo, que permaneçamos unidos em nossa caminhada pela vida.

A minha querida irmã Valéria por ser parte tão importante da minha vida.

Aos amigos de mestrado, Alexandre, Carlos, Davi, Fernando e Leandro que me ajudaram na luta do dia a dia com imensa boa vontade.

Aos amigos Alex, Paulo César e Renato por permanecerem fiéis mesmo nos momentos de dificuldades

RESUMO

Problemas de estabilidade de tensão têm recebido enfoque especial nos últimos anos. Muitos trabalhos publicados têm mostrado a importância do estudo e diversas ocorrências ao redor do mundo mostram que o problema pode ter sérias conseqüências. Como os sistemas de potência têm operado sob diversas condições severas, a capacidade de manter um sistema estável sob o ponto de vista de tensão tem-se tornado objeto de interesse de pesquisadores, e medidas eficazes para melhorar o controle de potência reativa e tensão devem ser tomadas; se ações efetivas de controle não são implementadas, por exemplo, sucessivos aumentos de carga podem levar um sistema à instabilidade e possivelmente ao colapso.

Neste contexto, a análise de pontos operativos do sistema deve conter o diagnóstico quanto sua estabilidade, margem de carga e determinação de ações de controle. Por se tratar de um campo muito vasto de estudo, este trabalho se concentra nos efeitos de compensação de potência reativa no cálculo de margem de carga. Para isso, algumas ferramentas de comprovada eficiência são empregadas.

Portanto, uma associação entre as informações obtidas pelo método da continuação e pela curva QV é desenvolvida. Para este fim, programas já conhecidos e desenvolvidos na literatura são empregados. O objetivo é extrair informações relevantes e discutir seus efeitos em sistemas elétricos de potência. Para este fim, quatro sistemas testes (IEEE-14, IEEE-30, IEEE-57 e IEEE-118 barras) serão estudados.

Numa primeira etapa, as barras críticas, as barras para compensação de perda ativa e as barras sujeitas ao monopólio de potência reativa são identificadas; numa segunda etapa a margem de carga é calculada através do método da continuação. Finalmente, a curva QV é levantada para o caso base, para um ponto de operação próximo ao colapso com e sem compensação de potência reativa.

Os resultados obtidos mostram que a metodologia proposta pode ser útil na determinação de uma política de compensação de potência reativa visando evitar problemas de colapso de tensão.

ABSTRACT

Voltage stability problems have been a focus of special attention in the last years. Many papers have shown the importance of the study and many occurrences around the world show it may have serious consequences. Since power systems have been working under severe operating conditions, the ability of keeping a power system stable under the voltage collapse point of view has become a point of concern and effective measures to improve the reactive power and voltage control must be taken. If there measures are not taken, successive load increase may drive a system to instability.

In this scenario, analyzing the operating points of interest must include the diagnosis regarding its stability, as well as the load margin calculation and control actions determination. Because this is a vast area of study, this work focuses on the effects of reactive power in the load margin. For this sake, some methodological tools already shown as effective are employed.

Therefore, an association between the pieces of information obtained from the continuation method and QV curve is developed. This is obtained by using some programs already available in the literature. The objective is to extract and discuss some relevant aspects about the study. For this sake, four test systems (IEEE-14, IEEE-30, IEEE-57 and IEEE-118 buses) are used.

In a first stage, critical buses, buses candidate for reactive power compensation with the meaning of reducing losses and buses subject to reactive power monopoly are identified; in a second stage the load margin is calculated by the continuation method. Finally, the QV curve is executed for the base case and for an operating point close to the voltage collapse point, with and without reactive power compensation.

The results obtained show that the proposed methodology may be useful to determine a reactive power compensation strategy aiming to avoid voltage collapse problems.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	12
1.1 Problema do Controle de Tensão.....	12
1.2 Cálculo do Fluxo de Carga em Redes de Transmissão.....	13
1.3 Perdas Elétricas.....	13
1.4 Colapso de Tensão.....	14
1.5 Mercado de Potência Reativa.....	18
1.6 Método da Curva QV.....	19
1.7 Motivação.....	19
1.8 Organização da Dissertação.....	20
CAPÍTULO 2.....	21
2.1 Introdução.....	21
2.2 Fluxo de Potência.....	21
2.3 Problema de Colapso de Tensão em Sistemas de Potência.....	23
2.3.1 Histórico de Ocorrências.....	24
2.3.2 Ocorrências no Brasil.....	25
2.4 O Método da Continuação.....	27
2.4.1 Síntese do Método da Continuação.....	30
2.5 Conclusões Parciais Sobre Colapso de Tensão.....	31
2.6 Sensibilidade de Perdas Baseada no Vetor Tangente.....	32
2.7 Mercado de Potência Reativa.....	33
2.8 Método da Curva QV.....	36
2.8.1 Análise de Estabilidade de Tensão pela Curva QV.....	36
2.8.2 Características da Curva QV.....	37
2.8.3 Construção da Curva QV.....	37
2.8.4 Vantagens da Curva QV.....	38
2.8.5 Desvantagens da Curva QV.....	39
2.9 Conclusão.....	40
CAPÍTULO 3.....	41
3.1 Introdução.....	41
3.2 Metodologia.....	41
3.3 IEEE-14 Barras.....	42
3.4 IEEE-30 Barras.....	49
3.5 IEEE-57 Barras.....	55
3.6 IEEE-118 Barras.....	60
CAPÍTULO 4.....	66
4.1 Conclusão.....	66
4.2 Trabalhos Futuros.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
APÊNDICE.....	73

LISTA DE FIGURAS

2.1 Processo do Método da Continuação	31
2.2 Curva QV	38
3.1 Sistema Teste IEEE-14 Barras	42
3.2 Curva PV do Sistema IEEE-14	43
3.3 Curva QV da Barra Crítica 14 no Caso Base.....	44
3.4 Curva QV da Barra Crítica 13 no Caso Base.....	44
3.5 Curva QV da Barra de Mercado 4 no Caso Base.....	45
3.6 Curva QV da Barra de Mercado 5 no Caso Base.....	45
3.7 Curva QV da Barra Crítica 14 no Ponto de Colapso.....	46
3.8 Curva QV da Barra Crítica 13 no Ponto de Colapso.....	46
3.9 Curva QV da Barra Crítica 14 com Compensação no Ponto de Colapso.....	47
3.10 Curva QV da Barra de Mercado 4 no Ponto de Colapso.....	48
3.11 Curva QV da Barra de Mercado 5 no Ponto de Colapso.....	48
3.12 Sistema Teste IEEE-30 Barras	49
3.13 Curva PV do Sistema IEEE-30	50
3.14 Curva QV da Barra Crítica 30 no Caso Base.....	51
3.15 Curva QV da Barra Crítica 29 no Caso Base.....	51
3.16 Curva QV da Barra de Mercado 2 no Caso Base.....	52
3.17 Curva QV da Barra de Mercado 3 no Caso Base.....	52
3.18 Curva QV da Barra Crítica 30 no Ponto de Colapso.....	53
3.19 Curva QV da Barra Crítica 29 no Ponto de Colapso.....	53
3.20 Curva QV da Barra Crítica 30 com Compensação no Ponto de Colapso.....	54
3.21 Curva QV da Barra de Mercado 3 no Ponto de Colapso.....	55
3.22 Sistema Teste IEEE-57 Barras	55
3.23 Curva PV do Sistema IEEE-57	56
3.24 Curva QV da Barra Crítica 31 no Caso Base.....	57
3.25 Curva QV da Barra Crítica 33 no Caso Base.....	57
3.26 Curva QV da Barra de Mercado 4 no Caso Base.....	58
3.27 Curva QV da Barra de Mercado 5 no Caso Base.....	58
3.28 Curva QV da Barra Crítica 31 no Ponto de Colapso.....	59
3.29 Curva QV da Barra Crítica 33 no Ponto de Colapso.....	59
3.30 Curva QV da Barra Crítica 31 com Compensação no Ponto de Colapso.....	60
3.31 Sistema Teste IEEE-118 Barras	61
3.32 Curva PV do Sistema IEEE-118	62
3.33 Curva QV da Barra Crítica 117 no Caso Base.....	62
3.34 Curva QV da Barra Crítica 2 no Caso Base.....	63
3.35 Curva QV da Barra de Mercado 3 no Caso Base.....	63
3.36 Curva QV da Barra Crítica 117 no Ponto de Colapso.....	64
3.37 Curva QV da Barra Crítica 2 no Ponto de Colapso.....	64
3.38 Curva QV da Barra Crítica 117 com Compensação no Ponto de Colapso.....	65

LISTA DE TABELAS

<u>3.1</u> Resultados dos testes indicando as barras para instalação de capacitores no sistema IEEE-14	43
3.2 Resultados dos testes indicando as barras para instalação de capacitores no sistema IEEE-30	50
3.3 Resultados dos testes indicando as barras para instalação de capacitores no sistema IEEE-57	56
3.4 Resultados dos testes indicando as barras para instalação de capacitores no sistema IEEE-118.....	61

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA DO CONTROLE DE TENSÃO

Este trabalho trata do problema de controle de tensão em sistemas de transmissão. Este problema é particularmente importante por envolver alguns aspectos operacionais que têm implicações técnicas e comerciais. Desta forma, a parte comercial desempenha um papel vital, já que as perdas representam um elevado custo de operação que é, em geral, inserido na tarifa de energia elétrica.

Estudos devotados à partilha da tarifa de perdas são bastante conhecidos na literatura, muito embora as mudanças no mercado de energia elétrica acabem por incentivar engenheiros e pesquisadores a estudar e propor novas formas de abordar o problema. Não apenas a parte relativa a perdas, mas todos os serviços ancilares associados ao controle de tensão estão experimentando novas propostas e implicações sob este novo cenário.

Neste trabalho, todavia, a parte técnica associada ao controle de tensão é revista. Assim, alguns problemas de relevância para o controle de tensão são abordados. Desta forma, alguns tópicos serão discutidos; o modelo de sistema abordado faz uso do fluxo de carga, um modelo estático de sistema, portanto, baseado no método iterativo de Newton-Raphson. Por esta razão, a seção seguinte mostra de forma resumida a questão do cálculo de fluxo de carga em sistemas de potência. A partir desta revisão, os conceitos de perdas elétricas, colapso de tensão e mercado de potência reativa são apresentados e brevemente discutidos. A partir desses conceitos, a motivação do trabalho é apresentada.

Pretendeu-se, dessa forma, um embasamento teórico no Capítulo 2, quando os itens acima descritos são detalhados; além de se apresentar o método da continuação e a

construção da curva QV, ferramentas fundamentais neste trabalho. Após esta apresentação, pode-se trabalhar com alguns sistemas teste já estudados na literatura, de forma a validar a proposta do trabalho de dissertação. A proposta consiste em associar as informações obtidas pela curva QV com aquelas obtidas pelo método da continuação. Os resultados obtidos mostram que este é um caminho interessante a seguir, sendo que muitas outras opções de abordagem podem ser desdobradas a partir desta primeira proposta.

1.2 CÁLCULO DO FLUXO DE CARGA EM REDES DE TRANSMISSÃO

O cálculo de fluxo de carga em sistemas de transmissão é realizado, em geral, utilizando o Método de Newton, e resultados satisfatórios são obtidos. Outras alternativas, como o método de Gauss-Seidel, e mais recentemente, o método não iterativo, podem também ser empregados. No entanto, o método de Newton-Raphson, devido a sua robustez e sedimentação é o mais empregado. Embora o esforço computacional associado com o método seja baixo, sua apresentação pode ser acelerada se o método desacoplado for empregado. Tal método é baseado na fraca interação entre as derivadas parciais de potência ativa em relação ao nível de tensão e as derivadas parciais da potência reativa em relação ao ângulo de fase. Isto é uma consequência das características das linhas de transmissão, desde que a relação X/R (reatância/resistência) seja alta [1].

1.3 PERDAS ELÉTRICAS

O interesse em minimizar as perdas surge a partir de motivos técnicos e econômicos. Os elevados custos envolvidos na construção de sistemas elétricos de potência, incluindo novas usinas de geração, linhas de transmissão e redes de distribuição, com impacto direto na tarifa praticada pelas concessionárias, determinam cada vez mais que os diferentes segmentos da indústria de energia elétrica utilizem a energia disponível da maneira mais eficiente possível.

As perdas são motivo de preocupações constantes, tanto para as concessionárias de distribuição quanto para as agências reguladoras, que além das preocupações com a qualidade e manutenção do patrimônio da concessão, devem se preocupar com a redução das tarifas, sendo que uma parcela das perdas poderá ser repassada aos consumidores.

As perdas podem ser classificadas em perdas técnicas (próprias da rede e inerentes ao processo de transmissão, transformação, distribuição e medição) ou comerciais (decorrentes de erros, fraudes, etc.).

A avaliação das perdas técnicas num sistema de distribuição torna-se por sua vez fundamentalmente complicada pela grande quantidade de elementos que constituem o sistema, pela grande quantidade de dados necessários e pelo caráter aleatório do comportamento das cargas e em seu contínuo processo de expansão.

Uma questão crucial, portanto, na operação de sistemas de potência refere-se a redução de perdas elétricas. No aspecto econômico devido aos custos desnecessários de operação associados às perdas, e no plano técnico devido à folga no sistema de transmissão advinda de sua redução. Uma técnica para identificar os pontos do sistema mais sensíveis à compensação de potência reativa visando à redução de perdas elétricas é uma proposta deste trabalho. Uma associação entre o problema de perdas elétricas e o problema de estabilidade de tensão é também explorado. Por esta razão, o estudo de estabilidade de tensão é também apresentado, como mostrado a seguir. Todavia, somente aspectos relevantes do problema serão abordados.

1.4 COLAPSO DE TENSÃO

Vários sistemas elétricos de potência ao redor do mundo têm experimentado o problema do colapso de tensão. A discussão sobre a natureza do problema tem mostrado que um sistema pode atingir o ponto de colapso com pequenas perturbações. Essa característica e outras considerações permitem a utilização do modelo de fluxo de carga para estudar o comportamento dinâmico do sistema.

O colapso de tensão acontece tipicamente em sistemas de potência que estão fortemente carregados e sujeito a faltas e com baixa reserva de potência reativa. O colapso de tensão é um processo de instabilidade do sistema que envolve muitos componentes do sistema, e muito freqüentemente envolve o sistema de potência inteiro, embora normalmente tenha um envolvimento relativamente maior em uma área particular.

Embora muitas outras variáveis estejam envolvidas, a natureza física do colapso de tensão pode ser analisada examinando a produção, a transmissão e o consumo de potência reativa do sistema. O colapso de tensão está associado com a demanda de potência reativa das cargas, que não é conhecida devido às limitações na produção e transmissão de potência reativa pelo sistema elétrico. Limitações na produção de potência reativa incluem a geração e a reserva reativa para as ações de controle e na baixa potência reativa fornecida pelos compensadores em nível baixo de tensão.

As limitações iniciais na transmissão de potência reativa se devem às altas perdas em linhas fortemente carregadas, às saídas de linhas de transmissão, aos aumentos de carga do sistema e às próprias mudanças na composição da carga ao longo de um período de tempo [2].

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, têm importância fundamental para a otimização das ações de controle.

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”. Estas barras têm suma importância, pois sua identificação prévia fornece importantes informações a respeito de ações de controle para se evitar a ocorrência de colapso de tensão.

A margem de carga indica o quão longe o sistema está da instabilidade. A partir dela, o operador pode tomar decisões sobre como e quando fazer manobras no sistema.

Dentre as principais técnicas abordadas na literatura sobre colapso de tensão, pode-se citar:

- Matrizes de sensibilidade - A sensibilidade das variáveis de estado do sistema é obtida através do Jacobiano do fluxo de carga para um ponto de operação conhecido. Esta análise permite determinar as barras cujas variáveis de estado variam com maior intensidade em relação a uma variação de carga [4,5,6].

- Teoria da Bifurcação – O estudo do comportamento da solução de um sistema de equações não lineares pode ser obtido através da teoria da bifurcação [7]. De todos os tipos de bifurcação, as bifurcações do tipo sela-nó e de 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 pode ser encontrada. Isso porque a bifurcação de Hopf é caracterizada pela existência de um par de autovalores puramente imaginários, não identificáveis através de um conjunto de equações algébricas.

- Método da Continuação - Através de sucessivas variações paramétricas (carga e geração nas barras) o método identifica o ponto de sela-nó e traça o diagrama de bifurcação (curva PV) [7,8].

- Método Direto - Acha o ponto de sela-nó através do Método de Newton-Raphson modificado. 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, garante a não trivialidade da solução (autovetor não nulo).

- Otimização - A matriz Jacobiana é reduzida às equações de potência reativa em função do nível de tensão. Na proposição do problema, o incremento de carga é a função objetivo, cargas não otimizadas são restrições de igualdade e limites de geração de potência reativa são as restrições de desigualdade. É assumido que a carga tenha um fator de potência constante durante o processo de carregamento do sistema [9,10].

- Valores Singulares e Autovalores - Consiste em, para cada ponto de operação, calcular os menores valores singulares e autovalor da matriz Jacobiana [11,12]. Na medida em que se aumenta o carregamento do sistema o menor valor singular e o menor autovalor diminuem até se tornarem nulos, quando o ponto de sela-nó é identificado [13,14].

- Determinante Reduzido - Baseia-se na redução da matriz Jacobiana à dimensão das equações de potência ativa e reativa de cada barra de carga (PQ) em relação ao seu ângulo de fase e o módulo da tensão. Esta matriz de dimensão 2x2 é calculada para todas as barras de carga do sistema [15]. 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.

- Técnicas da função de Energia - Funções de energia foram inicialmente empregadas em sistemas de potência para estudos de estabilidade transitória. 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 de maneira estável, a energia máxima que esse pode vir a ter durante o tempo de distúrbio deve ser igual a um nível de energia associado a uma condição pós-falta [16].

- Técnica da partição de redes - Diversos artigos na literatura mostram que o 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. Uma vez obtido o subsistema de interesse, aplica-se qualquer uma das técnicas previamente discutidas [17-19].
- Método do Vetor Tangente - Baseia-se no comportamento do maior componente do vetor tangente em função do crescimento de carga. O cálculo deste vetor é facilmente incorporado em qualquer programa de fluxo de carga convencional [20-22].

Como dito anteriormente, este trabalho trata a questão de colapso de tensão através do cálculo da margem de carga e da identificação da barra crítica. Para estes fins, serão mostrados adiante o método da continuação e o cálculo do vetor tangente, uma vez que estão diretamente relacionados com o trabalho proposto.

1.5 MERCADO DE POTÊNCIA REATIVA

A geração de potência reativa deve ser administrada a fim de se obter um bom perfil de tensão e adequada segurança do sistema. O problema se torna complicado quando contingências são consideradas, sendo que reservas de potência reativa são provavelmente exigidas por razões de segurança. Uma estratégia para estimar o grau de mercado de potência reativa, que leva em consideração as mudanças das características de operação do sistema, é obrigatória para um sistema de potência competitivo e economicamente eficiente [23].

O índice de concentração do mercado de potência reativa indica o quanto o mercado de potência é ou não concentrado. O objetivo é determinar uma região do sistema onde fontes adicionais de injeção de potência reativa podem ser exigidas. Se na tal região, então, esperava-se que o mercado de potência reativa exista; caso contrário, a potência reativa não é concentrada e o mercado de potência reativa não existe.

O índice que será usado neste trabalho para medir o mercado de potência reativa é o HHI, utilizado para medir monopólios em mercados e particularizado neste trabalho, para o mercado de potência reativa.

1.6 MÉTODO DA CURVA QV

A curva Q-V é um método estático de análise de estabilidade de tensão baseada nas equações do fluxo de carga convencional. Este método tem sido utilizado como ferramenta de planejamento de sistemas elétricos e a sua utilização pode ajudar na solução de diversos problemas relacionados à compensação de potência reativa e colapso de tensão. Isso porque técnicas recentes permitem a redução do custo computacional, pois a convergência dos casos não é mais um problema. Esta técnica é também utilizada na identificação de barras críticas do sistema, bem como o montante de potência reativa que deve ser injetada para a segurança do nível de tensão.

1.7 MOTIVAÇÃO

A motivação deste trabalho é estudar o problema de compensação de potência reativa com o foco na prevenção de problemas de colapso de tensão. Para este fim, três grupos de barras são pesquisados para compensação de potência reativa: barras críticas, candidatas a redução de perdas e sujeitas ao monopólio de potência reativa. Para este fim, quatro sistemas teste (IEEE-14, IEEE-30, IEEE-57 e IEEE-118 barras) são empregados para testar as idéias nos programas computacionais empregados. O foco, portanto, será testar uma metodologia de compensação de potência reativa de forma a propor uma política efetiva de controle de tensão, levando em conta diversos aspectos operativos dos sistemas de transmissão.

1.8 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho visa a relacionar os efeitos da margem de potência reativa obtida com a utilização da curva QV com margem de carga calculada pelo método da continuação.

No Capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica sobre fluxo de potência, o colapso de tensão em sistemas elétricos de potência, o método da continuação, a sensibilidade a perdas, o mercado de potência reativa e o método da curva QV. O Capítulo 3 apresenta a metodologia proposta de análise, os sistemas testes e os resultados obtidos. Finalmente, o Capítulo 4 apresentará as conclusões pertinentes e possíveis desdobramentos deste trabalho.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta as ferramentas teóricas utilizadas para o desenvolvimento do estudo proposto. Utiliza-se o modelo estático de fluxo de carga, suficiente para a análise proposta, dado que as barras indicadas para compensação de potência reativa podem ser identificadas e o método da continuação pode ser implementado.

O Vetor Tangente será utilizado na identificação das barras críticas e no estudo do mercado de potência reativa, podendo fornecer resultados importantes na análise de controle de tensão. Com o método da curva QV estudado para determinação da margem de potência reativa de barras do sistema, inicialmente, fornecendo uma base para o entendimento do problema, uma breve revisão de fluxo de potência é, portanto, apresentada.

2.2 FLUXO DE POTÊNCIA

O cálculo do fluxo de carga em uma rede de energia elétrica consiste na determinação do estado da rede, da distribuição de fluxos e de outras grandezas de interesse. A modelagem do sistema é estática, sendo a rede representada por um conjunto de equações algébricas. Esse tipo de representação é utilizada em casos onde as variações temporais das grandezas são suficientemente lentas, suprimindo assim os efeitos transitórios [1].

Os principais objetivos aliados ao fluxo de potencia podem ser elencados:

- O planejamento e projeto de novos sistemas;
- Reforço no sistema de transmissão;

- Planejamento da operação;
- Análise da estabilidade através das equações estáticas.

O objetivo é a determinação das variáveis de estado (tensão e ângulo) de todas as barras do sistema, permitindo verificar outras variáveis de interesse, tais como:

- Níveis de tensão em cada barra, já que estes não podem violar uma faixa aceitável em torno do valor nominal, 5%.
- Gerações de potências ativas e reativas em todas as máquinas, que não devem exceder os limites físicos destes elementos.
- Fluxos de potências ativas e reativas em todas as linhas de transmissão, que também são limitados pelas características nominais das linhas.

As equações básicas do fluxo de carga foram deduzidas pela aplicação das leis de Kirchhoff, resultando:

$$P_k = V_k \cdot \sum_{m \in k} V_m \cdot (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.1)$$

$$Q_k = V_k \cdot \sum_{m \in k} V_m \cdot (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.2)$$

Para $k=1,2,\dots,NB$; sendo NB o número de barras. Os métodos computacionais para o cálculo do fluxo de carga geralmente são compostos de duas etapas:

- Algoritmo básico, resolução por métodos iterativos de um sistema de equações algébricas, equações 2.1 e 2.2.
- Outra parte do processo de resolução do problema considera a atuação de dispositivos de controle e a representação dos limites de geração de potência, e restrições de operação do sistema.

O cálculo de fluxo de carga em sistemas de potência, como dito acima, pode incorporar diversos controles e limites, de forma a se obter como resultado uma proximidade satisfatória da realidade. Estes limites têm especial influência no estudo de colapso de tensão, que também é abordado neste trabalho. Por esta razão, os estudos de

fluxo de carga apresentados neste trabalho incorporam os limites de geração de potência reativa das unidades geradoras.

. O cálculo de fluxo de carga em sistemas de transmissão (cujas linhas de transmissão apresentam alta relação X/R) é realizado, em geral, utilizando o Método de Newton, que será detalhado no Apêndice A e resultados satisfatórios também são obtidos.

2.3 O PROBLEMA DE COLAPSO DE TENSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

O colapso de tensão é um processo através do qual a instabilidade de tensão leva o sistema a uma queda de tensão em uma parte significativa do sistema ou finalizando com um blecaute [24,25]. O processo de instabilidade de tensão pode ser entendido como um processo contínuo de declínio de tensão (diferente de afundamento de tensão), mesmo quando ações de controle são adotadas e que muitas situações acentuam o processo de instabilidade.

Os problemas de colapso de tensão estão associados a sistemas elétricos que operam em condições limites de operação, como por exemplo: linhas de transmissão com carregamentos elevados, fontes locais de potência reativa insuficientes e transmissão de potência através de grandes distâncias.

O colapso de tensão é um fenômeno local que se espalha pela vizinhança [3, 26]. Neste aspecto, o fenômeno difere do problema de instabilidade de frequência, causado por um desbalanço entre potência gerada e consumida. Neste trabalho, o problema de colapso de tensão é estudado sob o ponto de vista estático, focando na identificação das áreas críticas, da margem de carga e de ações de controle. Lembrando que, o intervalo de tempo entre o distúrbio inicial e o colapso de tensão pode variar desde uma fração de segundo até dezenas de minutos [27].

2.3.1 Histórico de ocorrências

Problemas de colapso de tensão só passaram a ser identificados em sistemas de potência nas últimas décadas. Provavelmente, ocorrências anteriores foram observadas, mas seu diagnóstico era desconhecido dos profissionais da área. Todavia, ocorrências em diversos países e em grande escala chamaram a atenção para o problema. A lista abaixo fornece alguns eventos de colapso de tensão ao redor do mundo

- 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
- Tchecoslováquia, 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

2.3.2 OCORRÊNCIAS NO BRASIL

As ocorrências de instabilidade de tensão no sistema elétrico brasileiro até recentemente era restrita 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 prazos 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 de 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 [28].

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 na estação. A interrupção de cerca de 320 MVar gerados por este síncrono ocasionou ainda mais a queda de tensão, provocando a atuação dos relés de subtensão dos centros de cargas essenciais de Ibiúna; com 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 Embaguaçu (250 MVar).

Após estes desligamentos o sistema operou num quadro de subfrequência e subtensão, com as ações pré-estabelecidas para corte de carga manual em 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 2^{os} 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 colapso de tensão, e rejeição de 1210 MW na Área Rio de Janeiro / Espírito

A operação de um sistema elétrico de potência de forma segura requer estudos de estabilidade dinâmica, confiabilidade, proteção, previsão margem de carga e análise de casos usando o fluxo de potência. Dentro de vários outros problemas, o cálculo da margem de carga é de grande importância.

A margem de carga indica o quão longe o sistema está da instabilidade final. A partir dessa informação, o operador pode tomar decisões de como e quando fazer manobras no sistema. A margem de carga é obtida usualmente através do método da continuação [29], pois tal método é muito utilizado em análise estática de estabilidade de tensão e será mostrado a seguir

2.4 O MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

O método da continuação é um método numérico que é usado para traçar a trajetória de um sistema de potência de um ponto de equilíbrio estável até um ponto de bifurcação [30]. O método da continuação, apesar de mostrar-se eficaz quanto à determinação da proximidade do ponto de colapso e da margem de carga, apresenta um custo computacional elevado [31].

É importante ressaltar que a teoria das bifurcações em sistemas dinâmicos é bastante ampla e merecedora de especial atenção na área de análise de sistemas dinâmicos, incluindo em estudos de sistemas elétricos de potência, por exemplo. Não é o objetivo deste trabalho propor nenhuma contribuição em relação a teoria da bifurcação em sistemas elétricos. A idéia é apenas empregar o método da continuação como ferramenta de detecção de um ponto próximo ao colapso de tensão. Como a teoria da bifurcação associa o ponto de colapso a uma bifurcação do tipo sela-nó, esta característica é mencionada. O modelo empregado para desenvolver o método da continuação é dado pela equação 2.3:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (2.3)$$

Onde x representa a variável de estado e λ é um parâmetro do sistema, usado para levar o sistema de um ponto de equilíbrio a outro. Como as equações de fluxo de potência são suficientes, estas têm sido aplicadas em estudos de colapso de tensão. Em geral, a carga é considerada o parâmetro que leva o sistema de um ponto de equilíbrio a outro.

O método da continuação depende da escolha de um parâmetro de continuação (inicialmente o grau de carregamento λ do sistema). Os pontos de equilíbrio são obtidos através de passos: previsor/corretor; discutidos a seguir.

O passo previsor é usado para indicar uma direção de crescimento da carga e o vetor tangente é usado com este propósito. Sua obtenção é mostrada abaixo, admitindo um ponto de operação conhecido, e a matriz Jacobiana J :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_l \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Onde g representa os geradores e l representa as barras de carga. O problema inverso é dado pela equação 2.5:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_l \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

A carga é incrementada como abaixo:

$$P_i = P_{io} (1 + \Delta\lambda) \quad (2.6)$$

$$Q_i = Q_{io} (1 + \Delta\lambda)$$

Onde P_i e Q_i são as cargas ativas e reativas após a variação do parâmetro λ , e P_{io} e Q_{io} são as cargas ativas e reativas iniciais para o barramento i . A geração da potência ativa é incrementada da mesma forma. Portanto:

$$\Delta P_i = P_{i0} \Delta \lambda \quad (2.7)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i0} \Delta \lambda$$

Substituindo a equação (2.7) em (2.5) :

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta \lambda} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} P_{g0} \\ P_{l0} \\ Q_{l0} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Logo, a expressão acima mostra como as variáveis de estado (tensão e ângulo) variam em função de uma mudança paramétrica. O vetor obtido é chamado de vetor tangente e tem especial importância nos estudos desenvolvidos neste trabalho. Em princípio, sua aplicação refere-se ao passo predictor do método da continuação, e uma vez estabelecida a direção de movimento, deve-se estimar o tamanho do passo. Deseja-se que, na medida em que o sistema se aproxima de um ponto de colapso, os passos se tornem menores, de forma a obter pontos operativos ao longo do processo de instabilidade de tensão. Contrariamente, para pontos de equilíbrio distantes do ponto de colapso, passos maiores são então obtidos pelo método.

Os componentes do vetor tangente representam a sensibilidade do ângulo $\Delta \theta$ e ΔV . Neste caso, o tamanho do passo predictor é dado por $1/\|VT\|$, onde $\| \cdot \|$ significa a norma Euclidiana.

O comportamento do vetor tangente tem sido largamente explorado na literatura. A referência [31] em particular estuda o comportamento do maior componente deste vetor em função de variações paramétricas e seu desempenho na identificação da barra crítica. É mostrado que o maior componente deste vetor tende a fornecer um comportamento quadrático, a não ser que limites de geração de potência reativa sejam considerados. Neste caso, algumas descontinuidades são observadas graficamente, associadas à súbita degradação na condição de estabilidade. Todavia, este índice ainda apresenta um melhor comportamento do que outros estudados na literatura. No entanto, é na prévia identificação da barra crítica que este vetor apresenta sua melhor

contribuição. É mostrado que o vetor é capaz de identificar esta barra com antecedência e por esta razão esta ferramenta é utilizada com este propósito.

Nota-se que o passo previsor fornece a direção e o tamanho do passo, mas não provê o ponto operativo real. Este ponto de operação real é obtido com a ajuda do estágio corretor, que é obtido com a inclusão de uma equação extra. Esta equação vem do fato de os vetores corretores e previsores serem ortogonais. Porém, uma alternativa a este processo pode ser empregada, como mostrado em [26], se o passo previsor é dado como um chute inicial para o fluxo de potência, o processo converge rapidamente para um ponto de operação real.

Através do fluxo de potência continuado (nome dado ao se empregar o método da continuação em sistemas de potência), é possível resolver o ponto de máximo carregamento devido ao colapso de tensão. Os resultados fornecidos pelo método da continuação fazem com que esta técnica seja usada em várias referências.

2.4.1 SÍNTESE DO MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

A Figura 2.1. 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 como o passo previsor um novo ponto $(x^i + \Delta x^i, \lambda^i + \Delta \lambda^i)$. Entretanto, esse ponto não é solução de $f(x, \lambda) = 0$, que será determinado no passo corretor e corresponderá ao ponto (x^{i+1}, λ^{i+1}) :

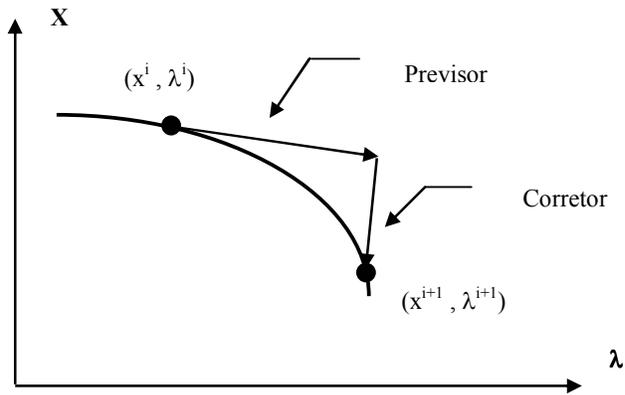


Figura 2.8: Processo do método da continuação

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).

2.5 CONCLUSÕES PARCIAIS SOBRE COLAPSO DE TENSÃO

A partir do emprego do modelo de fluxo de carga, foram apresentadas algumas técnicas para determinação dos grupos de barras de interesse, além de uma breve revisão histórica do problema, incluindo uma seqüência de ocorrências de colapso de tensão ao redor do mundo.

Com base nestas informações e na escolha do modelo de sistema, conclui-se que a análise estática, embora limitada, pode fornecer importantes informações a respeito do processo de colapso de tensão.

2.6 SENSIBILIDADE DE PERDAS BASEADA NO VETOR TANGENTE

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 do 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 avaliação das perdas elétricas do sistema. Os resultados obtidos na referência [29,31] indicam que em alguns casos as análises de estabilidade de tensão e sensibilidade às perdas elétricas fornecem os mesmos resultados. Em outros casos, entretanto, onde a barra crítica muda de acordo com o carregamento do sistema, as análises produzem resultados diferentes.

O vetor tangente calculado na equação (2.8) é utilizado aqui como uma nova ferramenta para sensibilidade às perdas do sistema. Essa nova abordagem é baseada nas informações advindas do vetor tangente, i.e., com as variáveis de estado variando em função de parâmetros do sistema. A perda total de potência ativa do sistema é dada pela equação 2.9.

$$P_{\text{sistema}} = \sum_{k=1}^{n_l} V_{ik} V_{jk} (G_k (\cos(\delta_{(ij)k}) + \cos(\delta_{(ji)k}))) - G_k (V_{ik}^2 + V_{jk}^2) \quad (2.9)$$

Onde:

- n_l é o número de linhas de transmissão;
- V_{ik} e V_{jk} são os níveis de tensão nos pontos (i) e (j) da linha de transmissão k ;
- G_k é a susceptância da linha k ;
- $\delta_{(ij)k}$ representa o ângulo de fase entre as barras i e j .

Se a equação (2.9) é derivada em relação ao parâmetro do sistema λ , então:

$$\frac{dP_{\text{sistema}}}{d\lambda} = \sum_{k=1}^{n_l} G_k \left(\frac{dV_{ik}}{d\lambda} V_{jk} + \frac{dV_{jk}}{d\lambda} V_{ik} \right) A + V_{ik} V_{jk} \frac{dA}{d\lambda} - 2G_k \left(V_{ik} \frac{dV_{ik}}{d\lambda} + \frac{dV_{jk}}{d\lambda} V_{jk} \right) \quad (2.10)$$

Onde,

$$A = G_k (\cos(\delta_{(ij)k}) + \cos(\delta_{(ji)k})) \quad (2.11)$$

$$\frac{dA}{d\delta} = G_k (2 \operatorname{sen}(\delta_{(ji)k}) (\frac{d\delta_{(i)k}}{d\delta} - \frac{d\delta_{(j)k}}{d\delta})) \quad (2.12)$$

A equação (2.10) mostra como as perdas de potência ativa variam em função dos parâmetros do sistema. Nota-se que todas as derivadas parciais da equação (2.10) consistem em componentes do vetor tangente, conhecidos da equação (2.8). Portanto, computar a equação (2.10) não exige muito esforço computacional.

Assuma na equação (2.8) que o lado direito é ligeiramente perturbado através da instalação de capacitores para uma barra genérica. Um novo vetor tangente pode ser obtido sem a necessidade de cálculo de um novo ponto de operação. Se a equação (2.10) for então calculada, a variação da perda de potência ativa em função do parâmetro λ (instalação do capacitor na barra “1”) é conhecida. Assumindo “1” como todas as barras de carga, uma por uma, o cálculo das equações (2.8) e (2.10) fornece a barra de carga ou as barras, cuja a instalação de capacitores reduz ao máximo as perdas de potência ativa do sistema. Nota-se que neste processo, o programa é executado só para o caso base.

2.7 MERCADO DE POTÊNCIA REATIVA

O mercado de potência reativa vários aspectos do setor elétrico se tornou um ponto de preocupação como mostrado em resultados de recentes esforços para desregulamentar o setor. A geração de potência reativa deve ser administrada para se obter um perfil adequado de tensão e manter a segurança do sistema; e o fornecimento de potência reativa era tradicionalmente considerado como parte integral do despacho de potência ativa.

O índice usado aqui para avaliar o mercado de potência reativa é o índice HHI, proposto em [23].

O HHI (Índice de Herfindahl – Hirschman) é definido como:

$$HHI = \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (2.13)$$

Onde N é o número de participantes do mercado e S_i a porcentagem do mercado de cada participante. Um índice HHI no valor de 10000 é um indicador de que o mercado inteiro está na mão de um único fornecedor. O valor de HHI abaixo de 1800 [23] é geralmente considerado bom, indicando a ausência de mercado de potência reativa.

Enquanto o índice propriamente pode não ser o melhor indicador do mercado de potência, mudanças no índice trazem informações úteis.

A capacidade relativa de um gerador de participar no fornecimento de tensão regulada para cada barra (como medida por S_i) depende da influência do gerador de potência reativa na tensão desejada e na quantidade de potência reativa disponível no gerador. A capacidade incremental de um gerador de influenciar um nível de tensão sob certas condições operativas é definida pela matriz Jacobiana do sistema.

Assuma que se construa, após a obtenção de um ponto de equilíbrio, um Jacobiano J tal que as equações de potência reativa das barras PV sejam consideradas. A capacidade de potência reativa de um gerador individual também afeta sua capacidade para controlar tensão.

Neste caso, o coeficiente S_i leva em consideração a disponibilidade relativa de potência reativa de cada um dos geradores do sistema, e também o impacto que o gerador pode ter em uma tensão específica.

Quando se define o HHI, duas suposições sobre a capacidade de potência reativa do gerador podem ser feitas:

1. A capacidade do gerador é sua faixa total de potência reativa $Q^{faixa} = Q^{max} - Q^{min}$. Em geral, este tipo de consideração é o mais freqüente na literatura.
2. A capacidade do gerador é a diferença entre a capacidade máxima de potencia reativa e sua produção atual, de forma que $Q^{margem} = Q^{max} - Q^{atual}$. Esta consideração, mais realista, foi proposta em [4] e é assumida aqui.

O segundo critério mede a margem disponível de desenvolvimento no mercado sob circunstâncias onde só um gerador (ou um pequeno subconjunto) é capaz de influenciar uma tensão em particular porque todos os outros geradores são incapazes de controlar a tensão desejada; ou os demais não têm capacidade de fazer isto. Segundo essas condições, o mercado de potência não afeta só o desenvolvimento da potência reativa do gerador, mas da potência ativa também.

Se o HHI é definido baseado na avaliação da escala inteira para cada gerador, as mudanças para todas as tensões devido às injeções em m geradores é obtido de:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = (J^{-1} e_i^Q) Q_i^{faixa} \quad (2.14)$$

Onde Q^{faixa} é a faixa de potência reativa para cada gerador, e e_i^Q é um vetor com todos os elementos iguais a zero, exceto na posição correspondente à injeção local i. Depois de avaliar ΔV_i para todos os participantes i em relação aos geradores m, S_i é descrito pela equação 2.15.

$$S_i = 100 * \frac{\Delta V_i}{\sum_{k=1}^{n_s} \Delta V_k} \quad (2.15)$$

Um mercado livre de preocupação tem um HHI de 2000 ou menos, considerando que um monopólio é identificado através de um índice de aproximadamente 10000.

Em vez de usar a faixa inteira de potência reativa, pode-se estimar o índice de potência reativa do mercado, usando somente a margem de potência reativa efetivamente disponível para cada gerador no ponto de equilíbrio considerado. Para isto é necessário substituir Q^{faixa} por Q^{margem} em (2.14). Esta ação resultará num aumento no valor do índice HHI.

Na determinação do mercado de potência reativa é importante considerar todas as fontes de potência reativa, e não somente os geradores. Isto inclui capacitores shunt e reatores nas barras de carga. Componentes shunt desempenham um importante papel no perfil da tensão do sistema.

As teorias discutidas nas seções prévias são importantes para os estudos de estabilidade de tensão, com enfoque especial nas características locais do fenômeno. De posse deste conhecimento, discute-se então a curva QV, que também desempenha um papel importante na análise de estabilidade de tensão.

2.8 MÉTODO DA CURVA QV

2.8.1 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO PELA CURVA QV

Neste trabalho pretende-se, através de sucessivas análises no comportamento da curva QV, estudar os efeitos de alocação de potência reativa para um determinado sistema em diferentes barras, de tal forma a ampliar a margem de carga do próprio sistema elétrico. Será verificado também o impacto de novas alternativas de suprimento as áreas críticas.

A técnica que será utilizada, apesar de relativamente conhecida na literatura terá, aqui um enfoque diferente. Trata-se de determinar a margem de potência reativa de algumas barras do sistema. Assim, para as barras de carga consideradas críticas, obtém-se a curva QV. Pode-se levar em consideração diferentes pontos operativos; para os

casos críticos, determina-se a compensação de potência reativa e reforços necessários para levar o sistema a uma condição estável sob o ponto de vista da tensão.

2.8.2 CARACTERÍSTICAS DA CURVA QV

O método da curva QV surgiu devido a problemas de convergência com fluxo de potência, problemas estes que ainda acontecem em casos de planejamento de sistemas geralmente situados no final do período em análise; onde o sistema apresenta-se bem carregado e com o plano de obras já esgotado. Para se conseguir a convergência do sistema fixava-se a tensão na barra de maior “mismatch” (tolerância imposta ao processo iterativo do fluxo de potência) , e permitia-se que os limites de potência reativa na barra transformando-a em uma barra PV (um gerador síncrono virtual). Desta forma, com o resultado do montante de reativo necessário para convergir o caso, acabava-se determinando o déficit de potência reativa da região com problemas de convergência. Para cada variação de tensão um novo ponto de operação do sistema era obtido e, conseqüentemente, o montante de potência reativa a ser aplicado para garantir aquele perfil de tensão, obtendo-se desta forma a curva QV.

2.8.3 CONSTRUÇÃO DA CURVA QV

Primeiramente elege-se um caso base do fluxo de potência. Através do Vetor Tangente, seleciona-se a barra crítica do sistema. A barra selecionada é alterada para barra do tipo PV (barra de geração) e o limite de potência reativa é aberto, sendo a potência ativa adotada igual a zero. A curva QV é traçada de forma similar à curva PV. Como geralmente a barra crítica é originalmente uma barra de carga (PQ), o ponto de operação do sistema será dado quando a curva cortar o eixo “x” ($MVA_r = \text{zero}$).

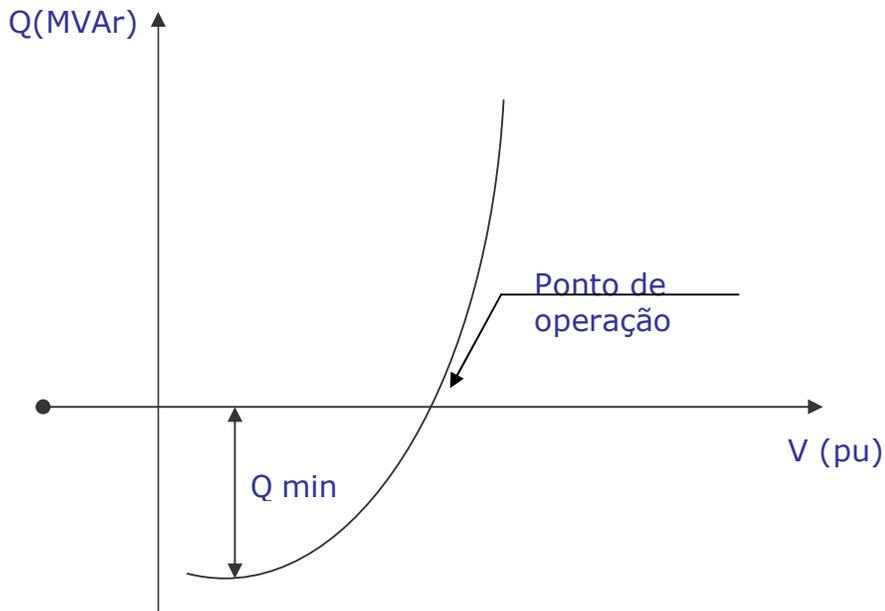


Figura 2.2: Curva QV

2.8.4 VANTAGENS DA CURVA QV

A seguir algumas vantagens do método são enumeradas:

1. A convergência dos casos normalmente não é problemático, mesmo estando a solução no lado instável da curva, ou seja, no lado esquerdo da curva, onde o aumento da potência reativa, representa uma diminuição no nível de tensão.
2. A automação do processo para se traçar a curva é rápida, pois para uma pequena variação de tensão na barra, a convergência aparece após poucas iterações, pois a solução inicial de cada caso é o caso anterior, o que contribui para acelerar o processo iterativo.
3. A necessidade de compensação de potência reativa de cada barra analisada é dada de imediato pelo valor gerado pelo “síncrono virtual”. Com a análise de um grupo de barras, pode-se estimar, a grosso modo, um plano de alocação de potência reativa para o sistema analisado.

4. A inclinação da curva indica o quanto a barra em análise é sensível às alterações no perfil de tensão (característica de instabilidade).
5. As curvas traçadas para diversas barras podem ser sobrepostas, ou seja, colocadas em um único gráfico. No ponto de operação correspondente ao ponto mínimo os geradores do sistema estão operando no limite. Desta forma, este ponto traduz toda a reserva de potência reativa disponível quando atingi-se o colapso; ou seja, a potência reativa no ponto mínimo representa tudo o que o sistema pode oferecer para manter a estabilidade de tensão.
6. A margem de potência reativa da barra é dada pela diferença entre o ponto de operação ($MVAr = \text{zero}$) e o valor de potência reativa referente ao colapso (ponto mínimo da curva). Esta margem pode ser usada como um índice de confiabilidade do sistema.

2.8.4 DESVANTAGENS DA CURVA QV

Existem desvantagens e limitações que devem ser salientadas para que se possa aplicar o método:

1. Trata-se de um artifício envolvendo o limite de uma única barra para uma avaliação de toda uma área a ser afetada. O mesmo já não ocorre no método da curva PV, uma vez que o estresse é provocado nos limites das capacidades das linhas e dos transformadores que servem de caminho natural para a potência circulante no sistema, caracterizando assim uma área afetada.
2. Para o caso de análise de contingências e simulações com vários patamares de carga, necessita-se traçar várias curvas QV.
3. A curva QV indica a capacidade de compensação local para uma dada condição de operação, o que é bem diferente de uma compensação global otimizada.

4. Similarmente a outros métodos que se baseiam no uso de programas de simulação de fluxo de carga, os modelos utilizados para geradores e cargas são modelos simplificados (por exemplo, modelo de potência constante para as barras de carga). Também na modelagem das ações de controle não são considerados os aspectos relativos à sua dependência temporal.
5. Solução sub-ótima é obtida.

2.9 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou de forma geral o problema de colapso de tensão e potência reativa a ser estudado e as ferramentas a serem empregadas. Partiu-se do princípio de que o modelo estático de fluxo de carga é suficiente para a análise proposta.

O método do Vetor Tangente, capaz de prever com baixo esforço computacional e com bastante antecedência o ponto de colapso e as barras críticas do sistema, será empregado para a identificação das barras sujeitas à compensação de potência reativa, dado que seus resultados apresentados na literatura são encorajadores.

O método da continuação, apesar de mostrar-se eficaz quanto à determinação do ponto de colapso e da margem de carga, apresenta um tempo computacional elevado. Todavia, devido a sua robustez e precisão, será empregado neste trabalho para o cálculo da margem de carga.

Para se obter um bom perfil de tensão e uma boa segurança para o sistema sob o ponto de vista de estabilidade de tensão, a geração de potência reativa deve ser administrada. Com o método da Curva QV, um critério de alocação de potência reativa será estabelecido, minimizando as perdas e ampliando a margem de carga do sistema. Todos estes aspectos serão testados e discutidos no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA E RESULTADOS

INTRODUÇÃO

Esta seção apresenta a metodologia e os resultados obtidos com auxílio das ferramentas teóricas apresentadas no Capítulo 2. A seção de metodologia descreve os sistemas elétricos utilizados e os procedimentos adotados para os testes, cujos resultados são discutidos adiante.

METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo é aplicar as ferramentas teóricas apresentadas no Capítulo 2. Desta forma, busca-se confrontar as informações obtidas pelo método da continuação e pela curva QV. Espera-se relacionar os efeitos da margem de potência reativa obtida pela curva QV com a margem de carga calculada pelo método da continuação. Basicamente, os passos adotados são os seguintes:

Para o caso base, calcula-se:

- Barras críticas sob o ponto de vista da estabilidade de tensão;
- Barras candidatas à redução de perdas ativas;
- Barras sujeitas ao monopólio de potência reativa.

Anota-se para as três barras mais influentes de cada grupo os valores de margem de potência reativa obtidos pela curva QV; e calcula-se também, a margem de carga. No entanto, dado que os sistemas utilizados são de pequeno porte, a compensação só será empregada para a barra mais crítica de cada grupo identificado.

Após isto, o sistema é aproximado do ponto de colapso e obtém-se novamente a curva QV para as barras citadas acima. A partir dos resultados obtidos uma análise crítica é desenvolvida; volta-se ao caso base e insere-se, para a barra crítica, uma compensação de potência reativa no valor da margem de carga dada pela curva QV.

Obtém-se uma nova margem de carga pelo método da continuação e a curva QV para estas barras, considerando o mesmo valor de carga imediatamente antes do primeiro ponto de colapso. Novamente os resultados são discutidos.

Os resultados são obtidos através do emprego de sistemas testes do IEEE (14, 30, 57 e 118 barras).

IEEE-14 Barras

O sistema teste IEEE-14 barras apresentado na Figura 3.1 será utilizado neste caso. Neste sistema são quatro as barras PV, nove barras PQ e vinte linhas de transmissão.

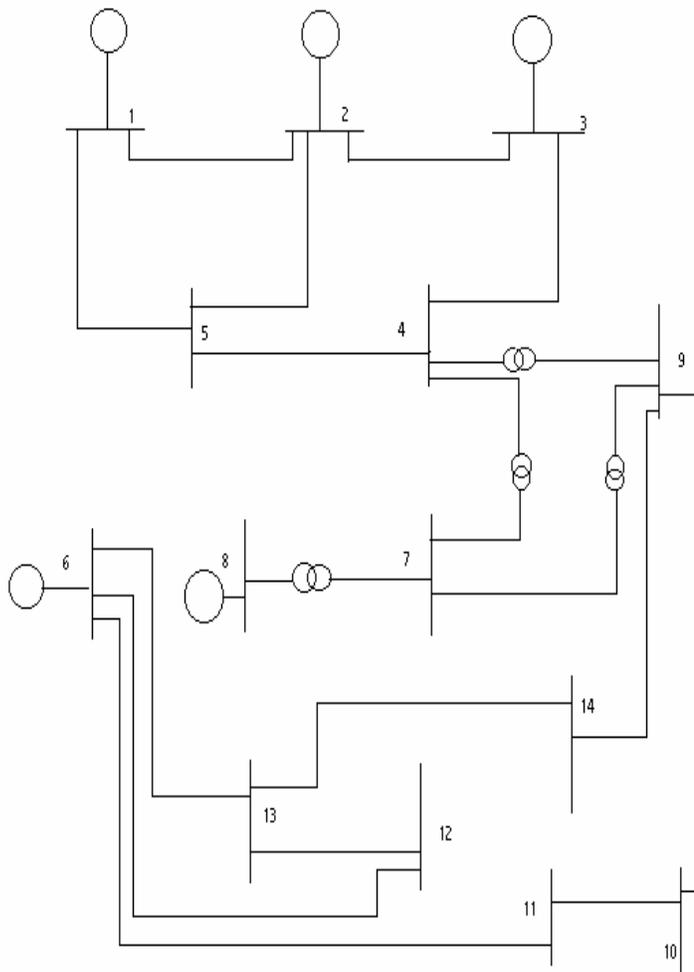


Figura 3.1: Sistema teste IEEE-14 barras.

Para este sistema, considerando o caso base, os seguintes grupos são identificados, conforme mostrado na Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Resultados dos testes indicando as barras para instalação de capacitores no Sistema IEEE-14

IEEE-14	BARRAS
Barras críticas pelo Vetor Tangente	14
	13
	12
Barras para compensação de perda ativa	14
	13
	12
Mercado de potência reativa	4
	5
	7

Nota-se neste sistema teste, que as duas barras mais críticas, também se apresentam como as duas mais indicadas para compensação de perda ativa.

Seguindo a metodologia proposta, calculou-se a margem de carga através do método da continuação. A margem obtida é em torno de 1,82 pu, com a curva PV dada pela Figura 3.2.

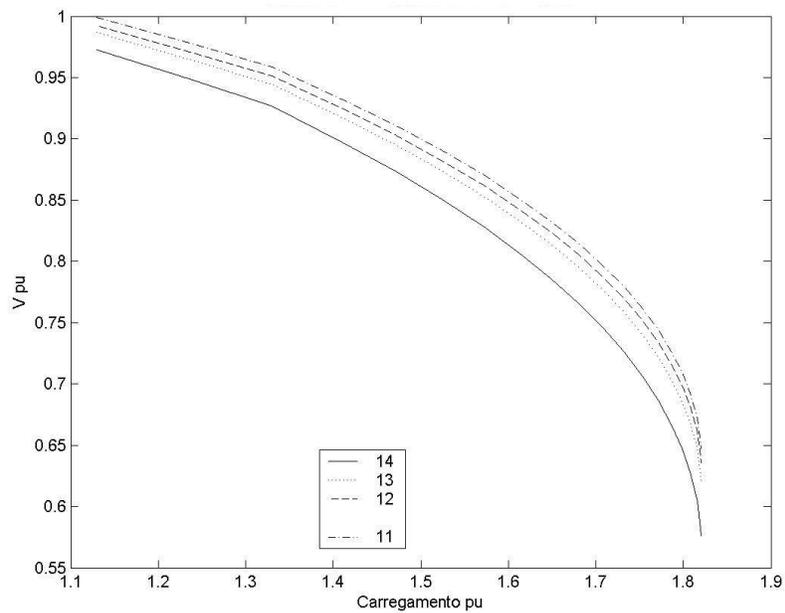


Figura 3.2: Curva PV do sistema IEEE-14.

Para as Barras críticas 13 e 14, a curva QV é obtida para o caso base, gerando as Figuras 3.3 e 3.4.

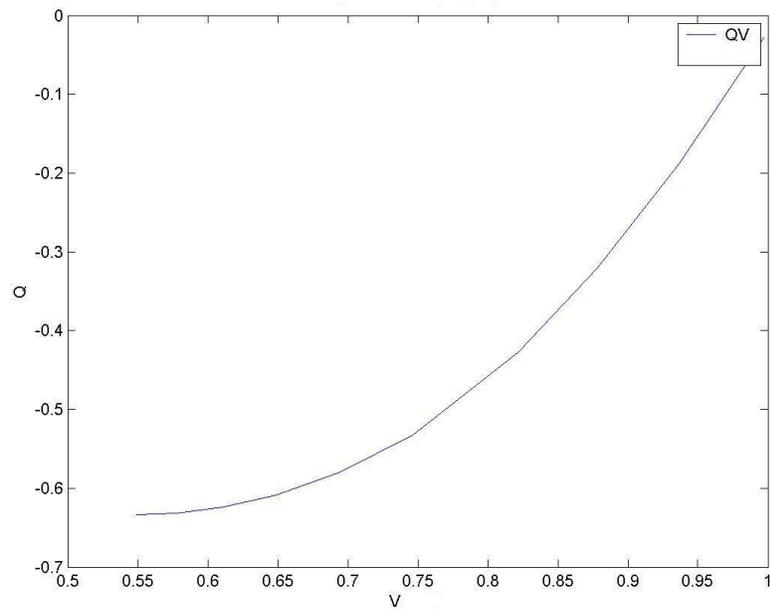


Figura 3.3: Curva QV da Barra Crítica 14 para o caso base.

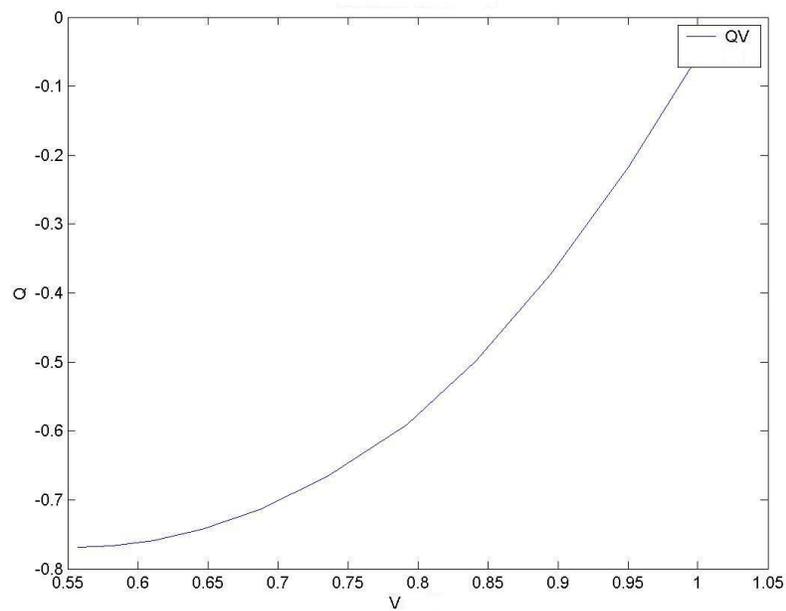


Figura 3.4: Curva QV da Barra Crítica 13 para o caso base.

Nota-se que existe uma margem associada a estas barras, de forma que o sistema para o caso base encontra-se na região normal (ou estável) de operação. O mesmo teste

é feito para as Barras 4 e 5, indicadas como as mais vulneráveis sob o ponto de vista do monopólio de potência reativa. Os resultados são apresentados nas Figuras 3.5 e 3.6.

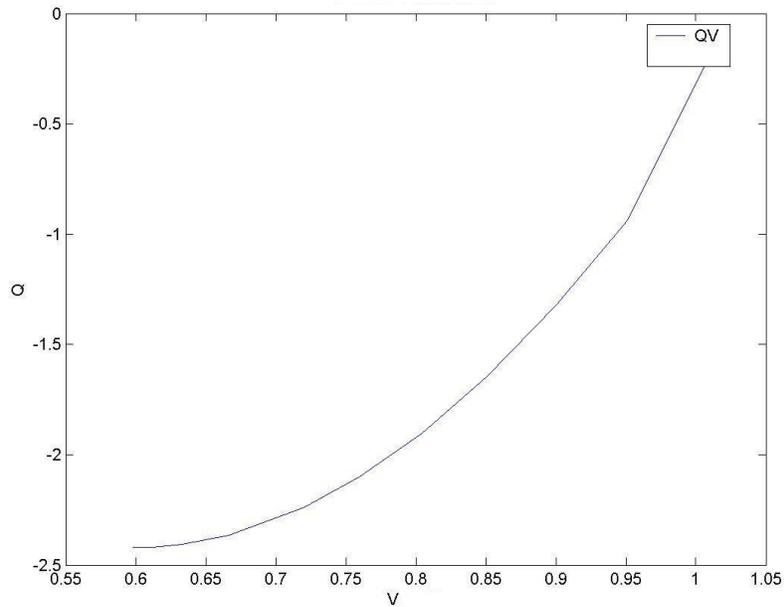


Figura 3.5: Curva QV da Barra 4, Mercado de Potência Reativa (caso base).

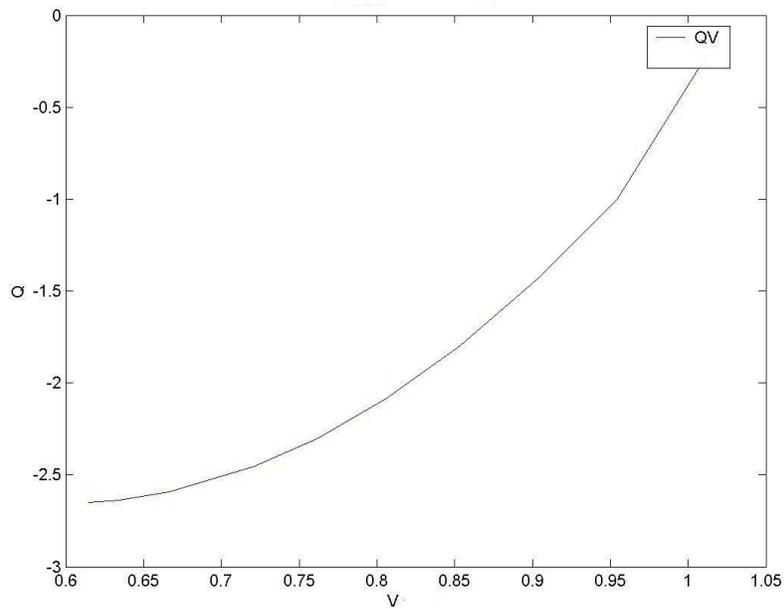


Figura 3.6: Curva QV da Barra 5, Mercado de Potência Reativa (caso base).

Nota-se que a margem associada a estas duas barras é maior do que aquela obtida para as barras críticas, o que está em acordo com a teoria de estabilidade de

tensão. O próximo passo é levar o sistema a um ponto operativo próximo ao ponto de colapso de tensão. Para este sistema, empregou-se um aumento de carga de 1,81 pu. As curvas QV para as barras críticas são mostradas nas Figuras 3.7 e 3.8, respectivamente.

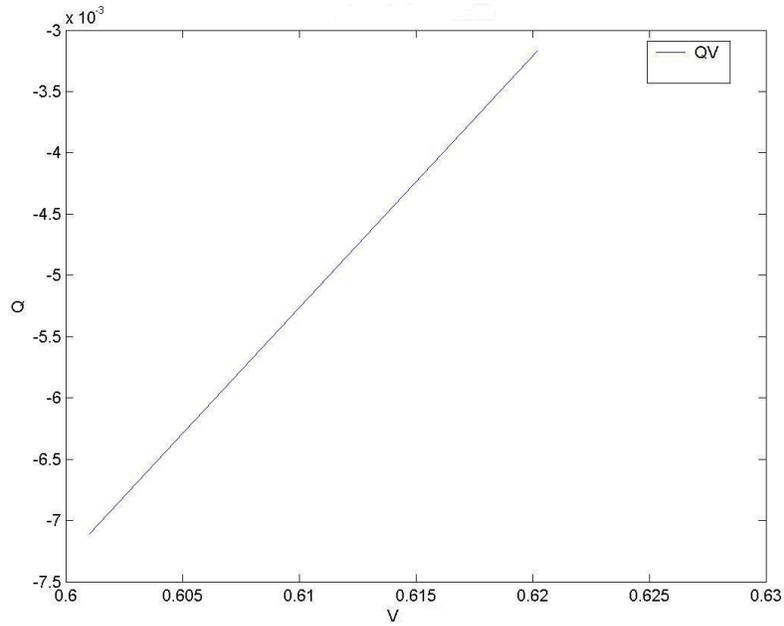


Figura 3.7: Curva QV da Barra Crítica 14, próximo ao ponto de colapso.

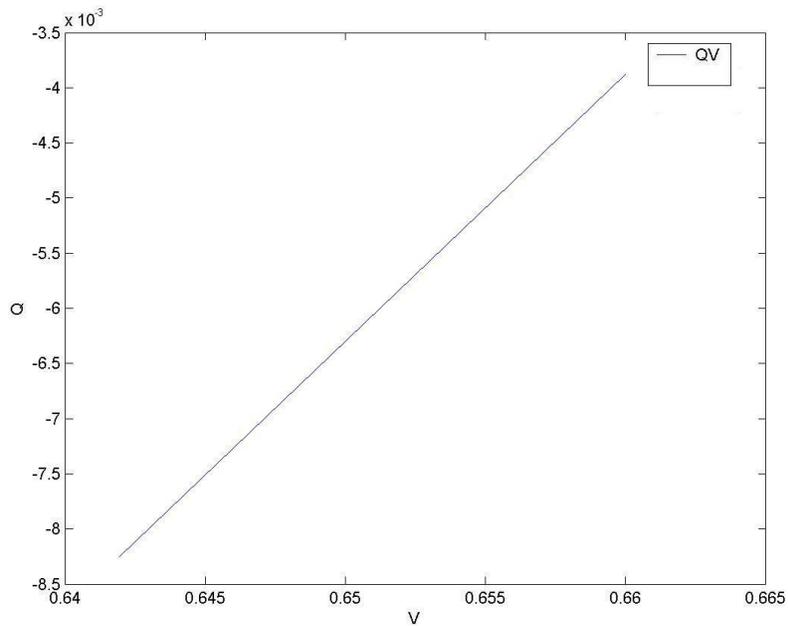


Figura 3.8: Curva QV da Barra Crítica 13, próximo ao ponto de colapso

O resultado obtido é bastante interessante, pois mostra que a margem de potência reativa para um ponto próximo ao colapso se anula. Essa importante associação entre folga de potência reativa dada pela curva QV e a margem de carga ainda não foram exploradas na literatura. A partir desse resultado, no caso base, aplica-se uma compensação de potência reativa na barra crítica de valor igual ao obtido pela curva QV (0,63 pu), mostrado na Figura 3.3. O cálculo da margem de carga, obtido pelo programa computacional utilizado neste trabalho, forneceu um valor de 1,83 pu, melhorando a condição de estabilidade de tensão. Para o valor de carga 1,81 pu, previamente adotado para traçar a curva QV, calculou-se novamente considerando a compensação nesta barra, obtendo a Figura 3.9. Nota-se nesta figura que a margem de carga reativa, anteriormente zerada, é agora igual a 0,034 pu; associando, permitindo confrontar o resultado obtido pela curva QV com o resultado obtido pela margem de carga.

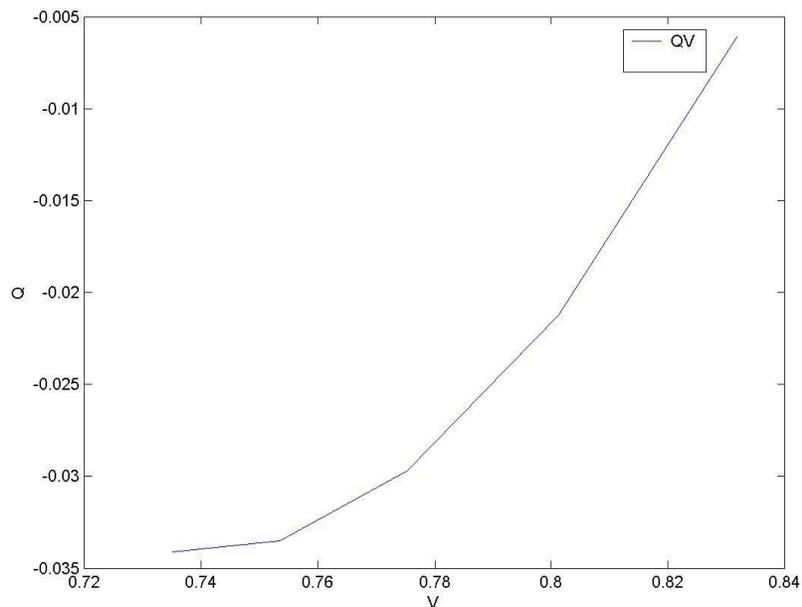


Figura 3.9: Curva QV da Barra Crítica 14 com compensação

As curvas QV para as barras para o mercado de potência reativa em um ponto operativo próximo ao ponto de colapso de tensão são mostradas nas Figuras 3.10 e 3.11. Comparando ao caso base, a margem de carga reduziu drasticamente.

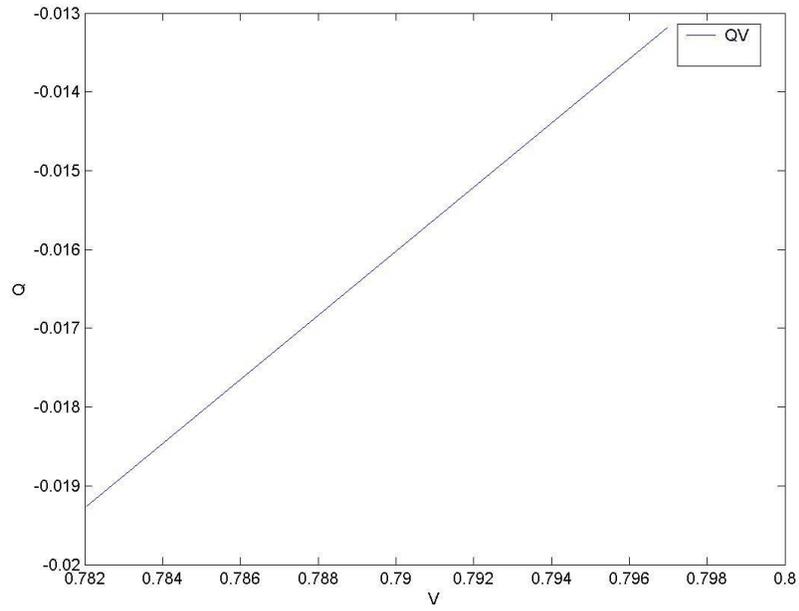


Figura 3.10: Curva QV da Barra 4, Mercado de Potência Reativa (ponto de colapso).

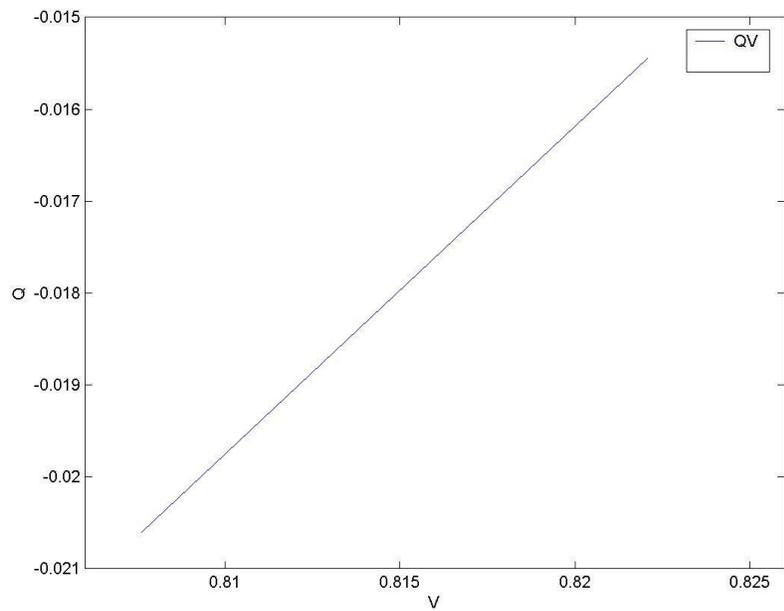


Figura 3.11: Curva QV da Barra 5, Mercado de Potência Reativa (ponto de colapso).

IEEE-30 Barras

Este sistema é apresentado na Figura 3.12, contendo cinco barras de geração, vinte e quatro barras de carga e quarenta e uma linhas de transmissão.

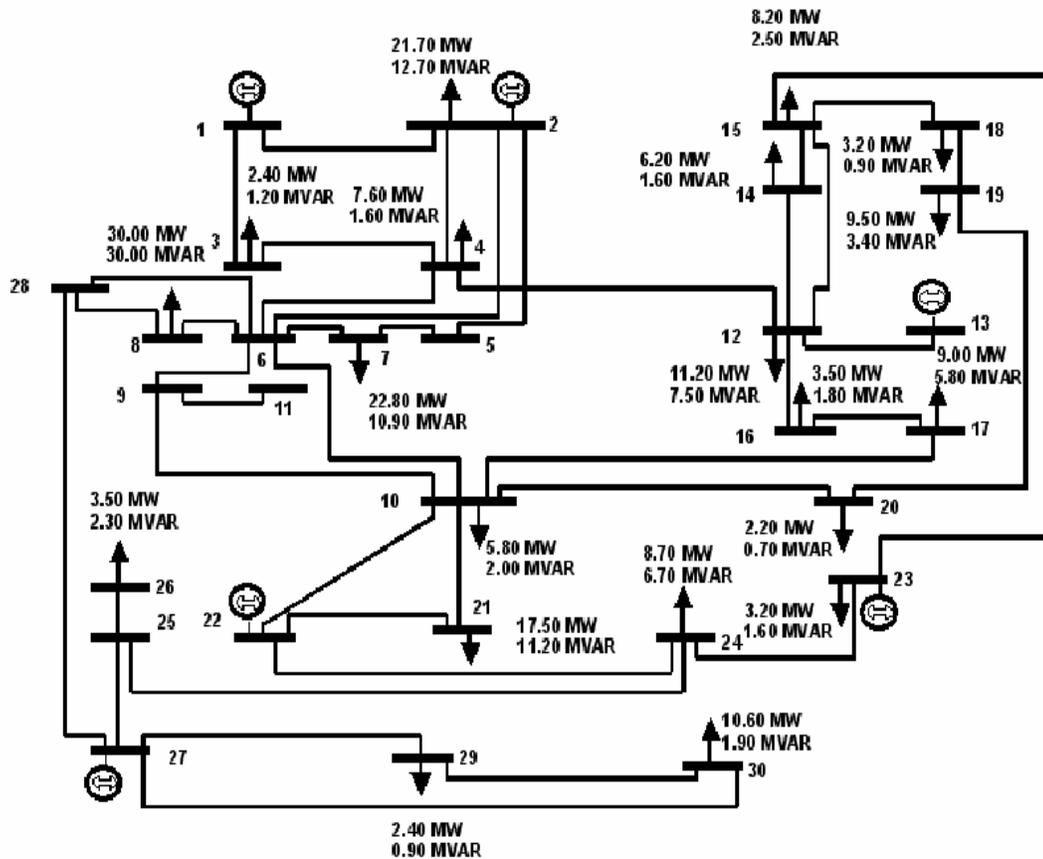


Figura 3.12: Sistema teste IEEE-30 barras.

Para o caso base, os seguintes grupos são identificados, conforme mostrado na Tabela 3.2

Tabela 3.2: Resultados dos testes indicando as barras para instalação de capacitores no Sistema IEEE-30.

IEEE-30	BARRAS
Barras críticas pelo Vetor Tangente	30
	29
	26
Barras para compensação de perda ativa	30
	29
	2
Mercado de potência reativa	2
	3
	4

Nota-se, também neste sistema teste, que as duas barras mais críticas, também se apresentam como as duas mais indicadas para compensação de perda ativa.

Seguindo a metodologia já proposta, calculou-se a margem de carga através do método da continuação. A margem obtida foi de 1,508 pu, com a curva PV dada pela Figura 3.13.

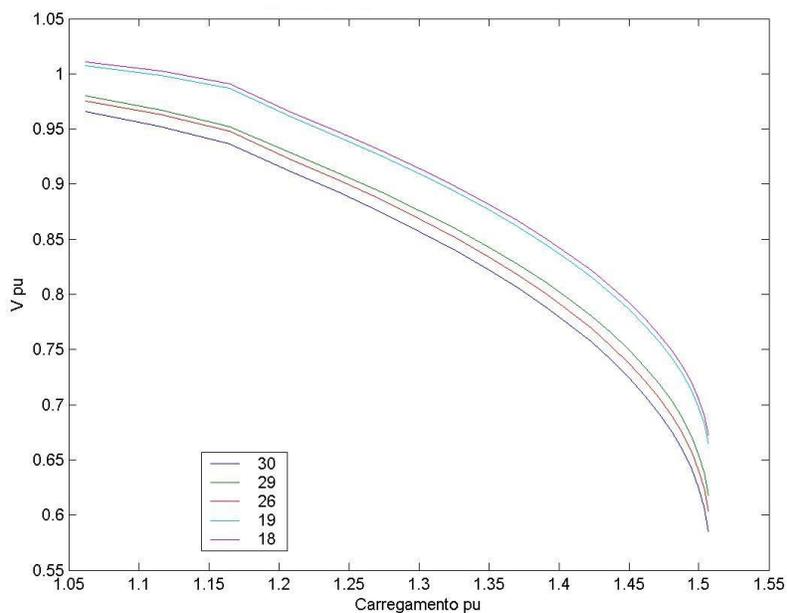


Figura 3.13: Curva PV do sistema IEEE-30

Para as Barras críticas 30 e 29, a curva QV é obtida para o caso base, obtendo as Figuras 3.14 e 3.15.

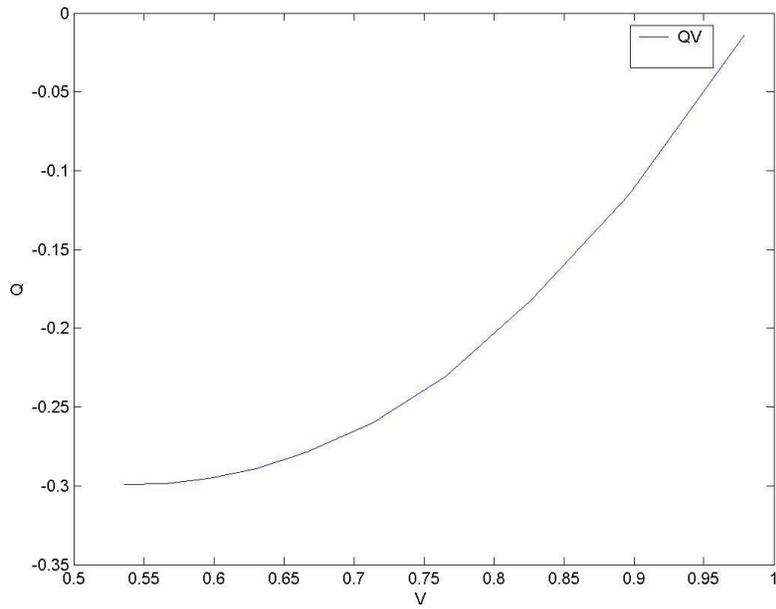


Figura 3.14: Curva QV da Barra 30 para o caso base

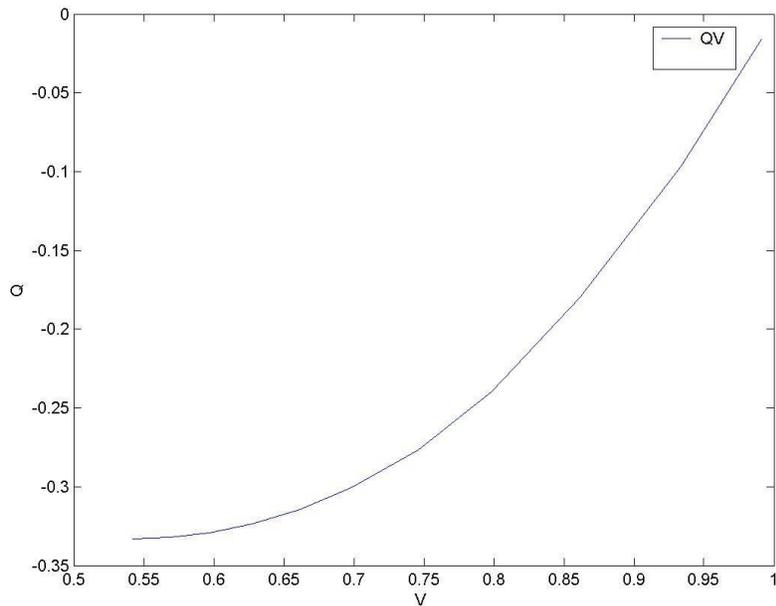


Figura 3.15: Curva QV da Barra 29 para o caso base.

Observando as Figuras 3.14 e 3.15 percebe-se que existe uma margem associada a estas barras, de forma que o sistema encontra-se na região normal de operação, ou seja, no lado direito da curva. O mesmo teste é feito para as Barras 2 e 3, indicadas como as mais sujeitas ao monopólio de potência reativa. Os resultados são apresentados nas Figuras 3.16 e 3.17.

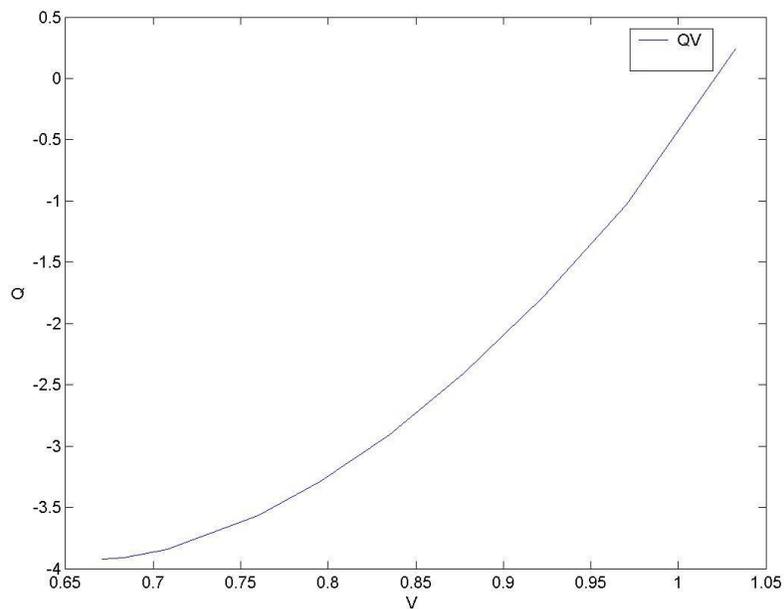


Figura 3.16: Curva QV da Barra 2, Mercado de Potência Reativa (caso base).

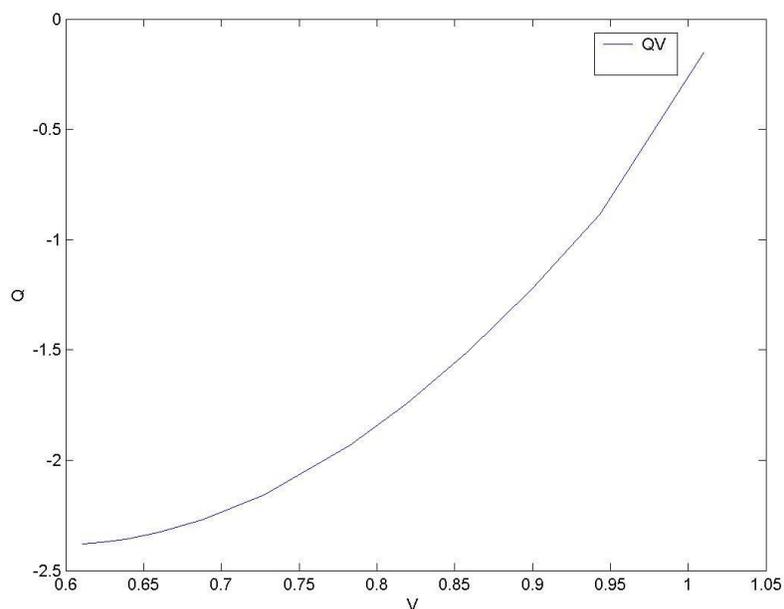


Figura 3.17: Curva QV da Barra 3, Mercado de Potência Reativa (caso base).

Concluiu-se que a margem associada a estas duas barras é maior do que aquelas obtidas para as barras críticas. O próximo passo é levar o sistema a um ponto operativo próximo ao ponto de colapso de tensão. Para este teste, empregou-se um aumento de carga de 1,49 pu. As curvas QV para as barras críticas são mostradas nas Figuras 3.18 e 3.19, respectivamente

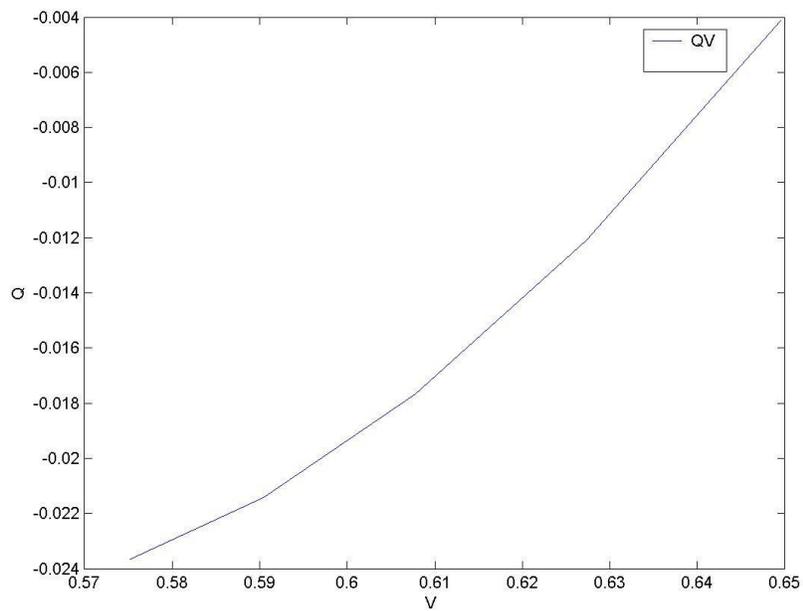


Figura 3.18: Curva QV da Barra Crítica 30 próximo ao ponto de colapso.

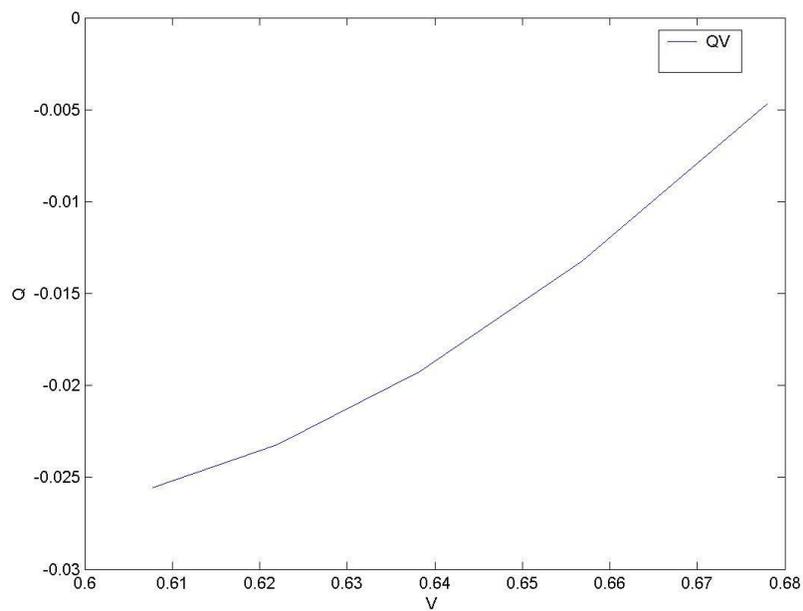


Figura 3.19: Curva QV da Barra Crítica 29 próximo ao ponto de colapso.

Da inspeção gráfica, observa-se que a margem de potência reativa para o ponto próximo ao colapso reduziu drasticamente. Logo, aplicando-se ao caso base uma compensação de potência reativa na barra crítica de igual valor ao obtido pela curva QV

(0,3 pu), mostrado na Figura 3.14. O cálculo da margem de carga, obtido pelo programa computacional utilizado neste trabalho, forneceu um valor de 1,56 pu, melhorando a margem de estabilidade da tensão. Para o valor de carga 1,49 pu, previamente adotado para traçar a Curva QV, calculou-se novamente considerando a compensação nesta barra, obtendo-se a Figura 3.20. Nota-se nesta figura que a margem de carga reativa, anteriormente zerada, aumentou para 0,123 pu.

A Figura 3.21 apresenta a curva QV para a Barra 3, Mercado de Potência Reativa para um ponto operativo próximo ao ponto de colapso de tensão. Para a outra barra de mercado o programa não traçou a curva QV, indicando que nesta condição operativa, o sistema encontrava-se na região instável de operação, o que é uma condição de parada do programa.

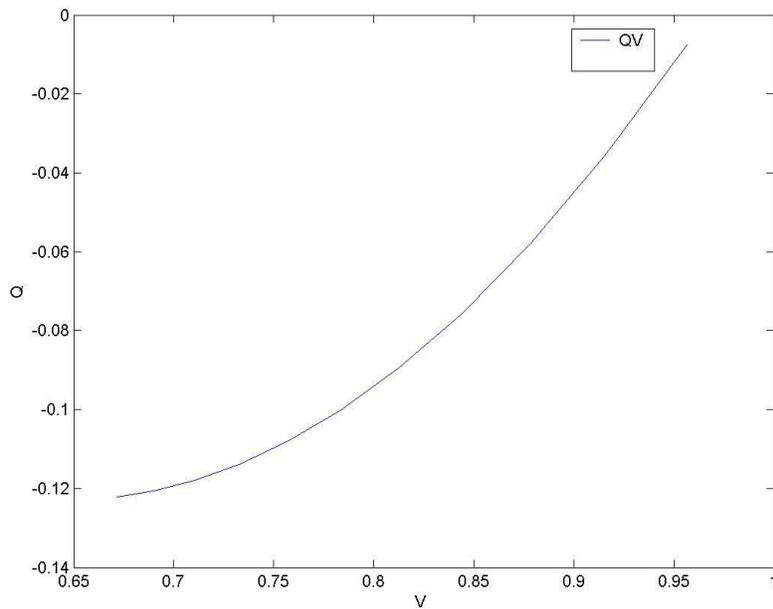


Figura 3.20: Curva QV da Barra Crítica 30 com compensação no ponto de colapso.

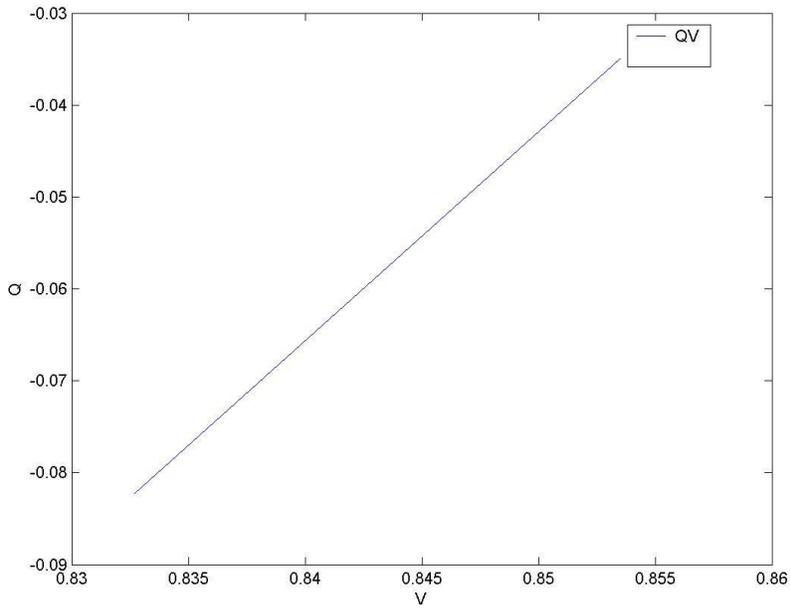


Figura 3.21: Curva QV da Barra 3, Mercado de Potência Reativa (ponto de colapso).

IEEE-57 Barras

Este sistema contém seis barras de geração, cinquenta barras de carga e oitenta linhas de transmissão. Seu diagrama unifilar é apresentada na Figura 3.22.

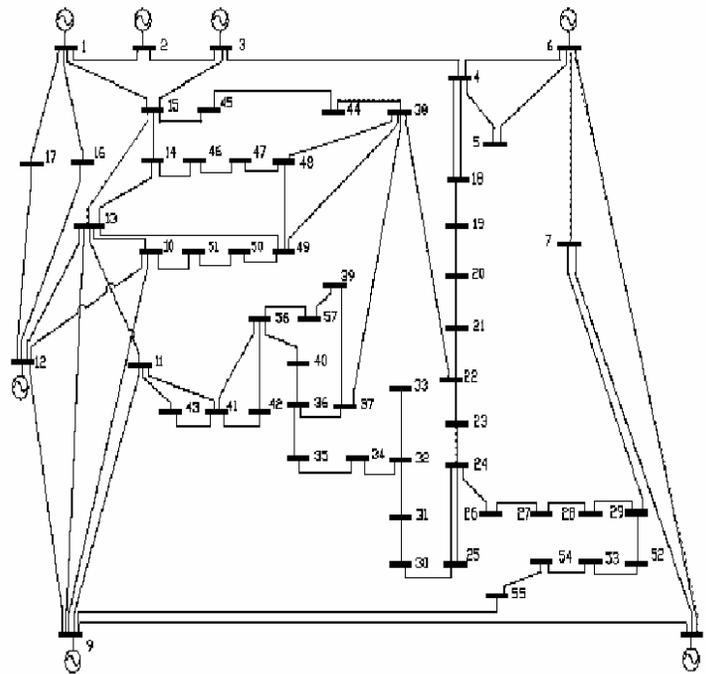


Figura 3.22: Sistema teste IEEE-57 barras

A exemplo do que foi executado para os outros sistemas, procurou-se analisar a condição operativa do sistema para o caso base e a partir do caso base, foram obtidos os dados da Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Resultados dos testes indicando as barras para instalação de capacitores no Sistema IEEE-57.

IEEE-57	BARRAS
Barras críticas pelo Vetor Tangente	31
	33
	32
Barras para compensação de perda ativa	31
	33
	32
Mercado de potência reativa	4
	5
	7

Nota-se, também neste sistema teste, que as duas barras mais críticas, também se apresentam como as duas mais indicadas para compensação de perda ativa.

Seguindo a metodologia apresentada anteriormente, a margem de carga obtida foi de 1,6 pu, com a curva PV dada pela figura 3.23.

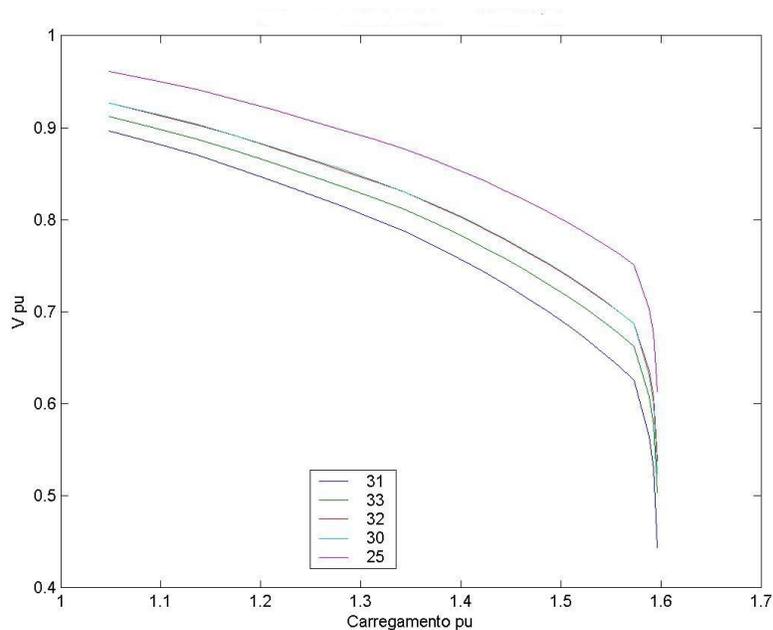


Figura 3.23: Curva PV do sistema IEEE-57.

Para as Barras Críticas 31 e 33, a curva QV é obtida para o caso base, Figuras 3.24 e 3.25.

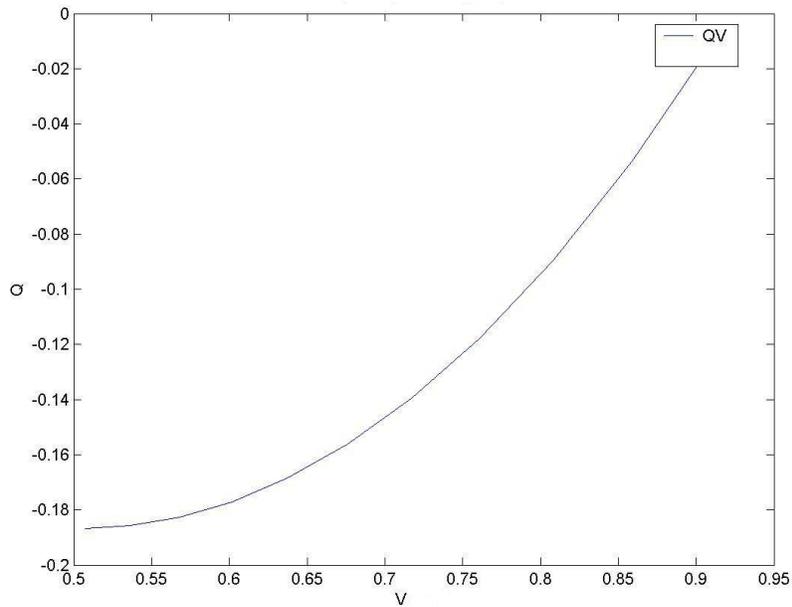


Figura 3.24: Curva QV da Barra Crítica 31 para o caso base.

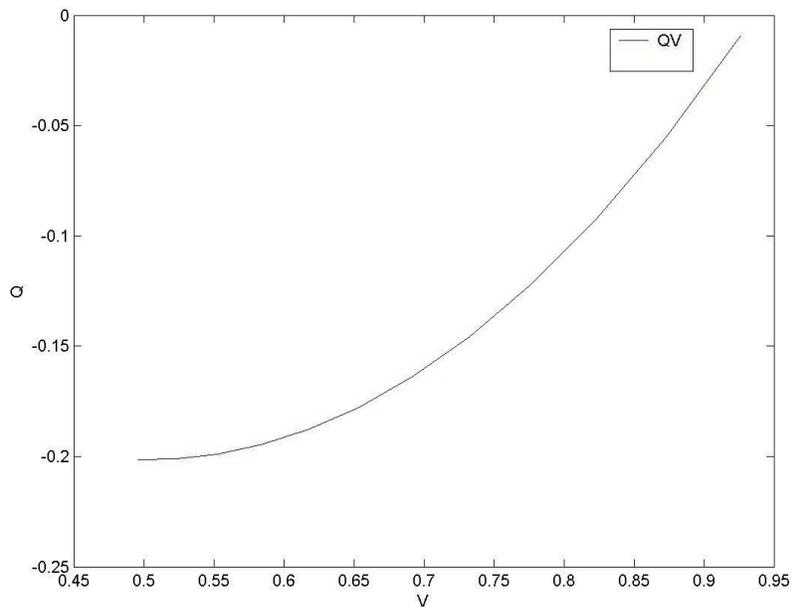


Figura 3.25: Curva QV da Barra Crítica 33 no caso base.

Da inspeção gráfica, constatou-se que existe uma margem associada a estas barras, portanto, o sistema encontra-se na região estável de operação, ou seja, novamente no lado direito da curva QV. O mesmo teste foi feito para as Barras 4 e 5,

indicadas como as mais vulneráveis sob o ponto de vista do monopólio de mercado de potência reativa. Os resultados são apresentados nas Figuras 3.26 e 3.27.

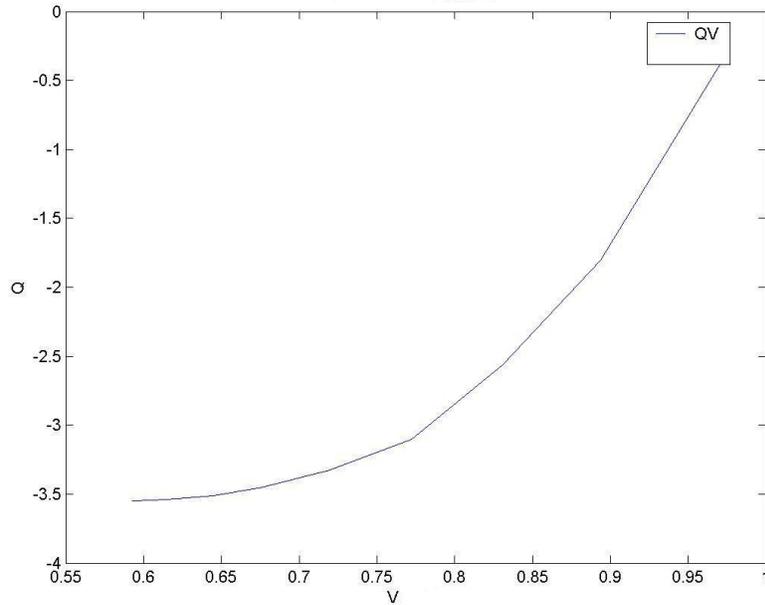


Figura 3.26: Curva QV da Barra 4, Mercado de Potência Reativa (caso base).

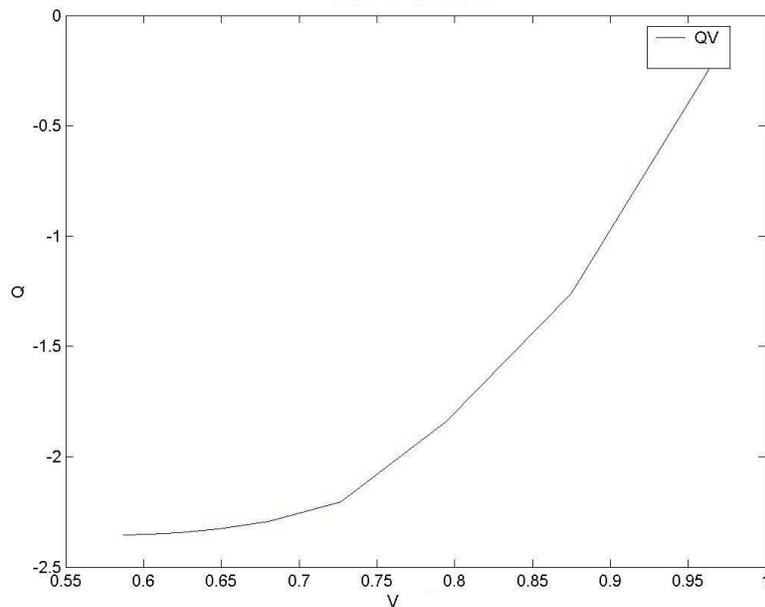


Figura 3.27: Curva QV da Barra 5, Mercado de Potência Reativa (caso base).

Comparando os resultados obtidos para as Barras 4 e 5, nota-se que os resultados para estas barras foram mais satisfatórios do que aqueles obtidos para as barras críticas. O próximo teste é aproximar um ponto operativo do sistema de um ponto de colapso de

tensão. Neste caso, empregou-se um aumento de carga de 1,58 pu. As curvas QV para as barras críticas são mostradas nas Figuras 3.28 e 3.29, respectivamente.

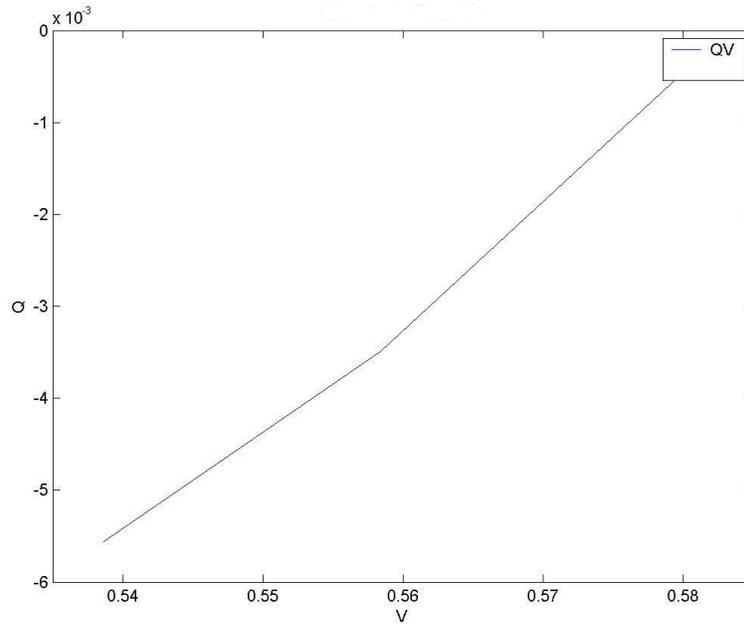


Figura 3.28: Curva QV da Barra Crítica 31 próximo ao ponto de colapso.

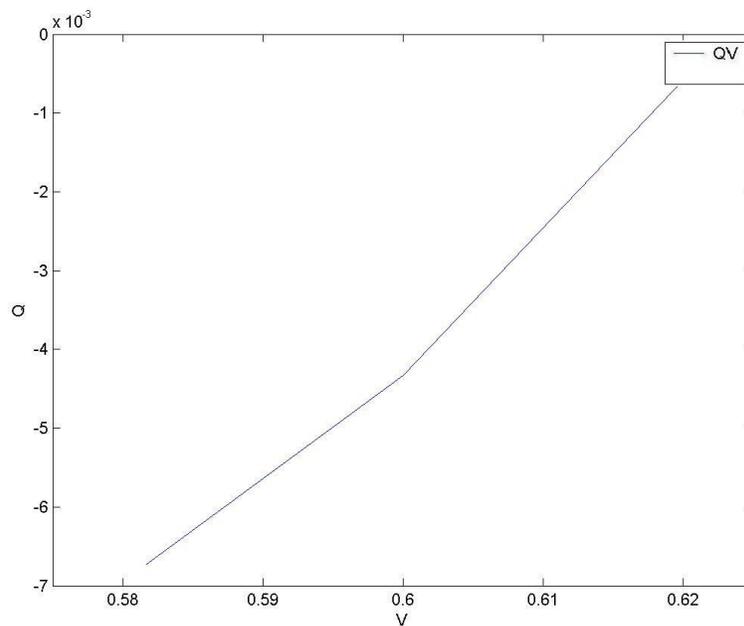


Figura 3.29: Curva QV da Barra Crítica 33 próximo ao ponto de colapso.

Observando as figuras, percebe-se que a margem de potência reativa para o ponto próximo ao colapso de tensão praticamente se anulou. Assim, aplicou-se para o caso uma compensação de potência reativa na barra crítica de igual valor ao obtido pela

curva QV (0,18 pu). O cálculo da margem de carga fornece agora um valor de 1,64 pu, melhorando a estabilidade de tensão. Para o valor de carga de 1,58 pu, previamente adotado para traçar a Curva QV, calculou-se novamente considerando a compensação nesta barra, gerando a figura 3.30. Nota-se nesta figura que a margem de carga reativa, anteriormente zerada, é agora igual a 0,053 pu.

Para as Barras de Mercado de Potência Reativa 4 e 5, o programa não traçou as curvas QV, indicando nestas condições, que o sistema encontra-se em uma região de instabilidade, o que é uma condição de parada do programa.

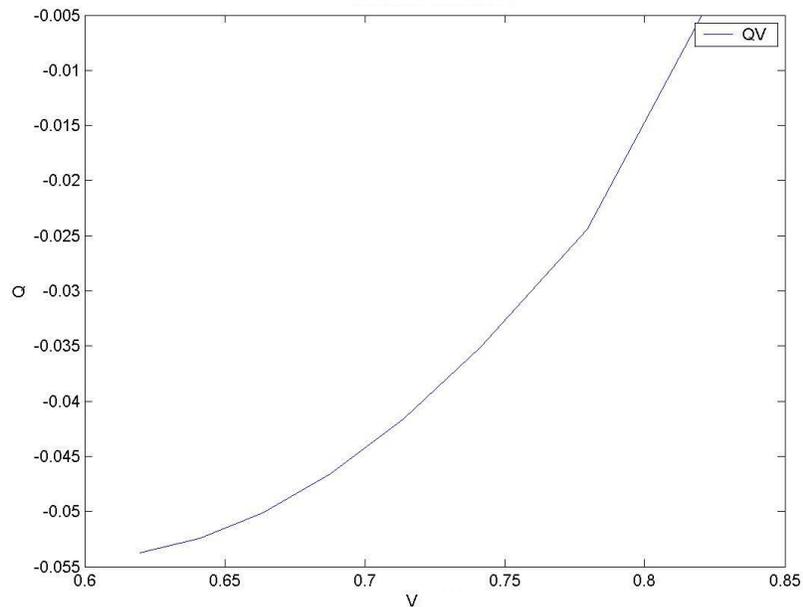


Figura 3.30: Curva QV da Barra Crítica 31 com compensação próximo ao ponto de colapso.

IEEE-118

O diagrama unifilar deste sistema é dado pela Figura 3.31. Este sistema contém cinquenta e três barras de geração, cinquenta e três barras de carga e 186 linhas de transmissão.

Para este sistema, considerando o caso base, os seguintes grupos são identificados, conforme mostrado na Tabela 3.4:

Tabela 3.4: Resultados dos testes indicando as barras para instalação de capacitores no sistema IEEE-118.

IEEE-118	BARRAS
Barras críticas pelo Vetor Tangente	117
	2
	3
Barras para compensação de perda ativa	117
	2
	3
Mercado de potência reativa	2
	3
	5

Nota-se, também neste sistema teste, que as duas barras mais críticas, também se apresentam como as duas mais indicadas para compensação de perda ativa.

Observa-se que as Barras 2 e 3, já identificadas pelo vetor tangente como as mais críticas, também se apresentam como barras sujeitas ao monopólio de potência reativa.

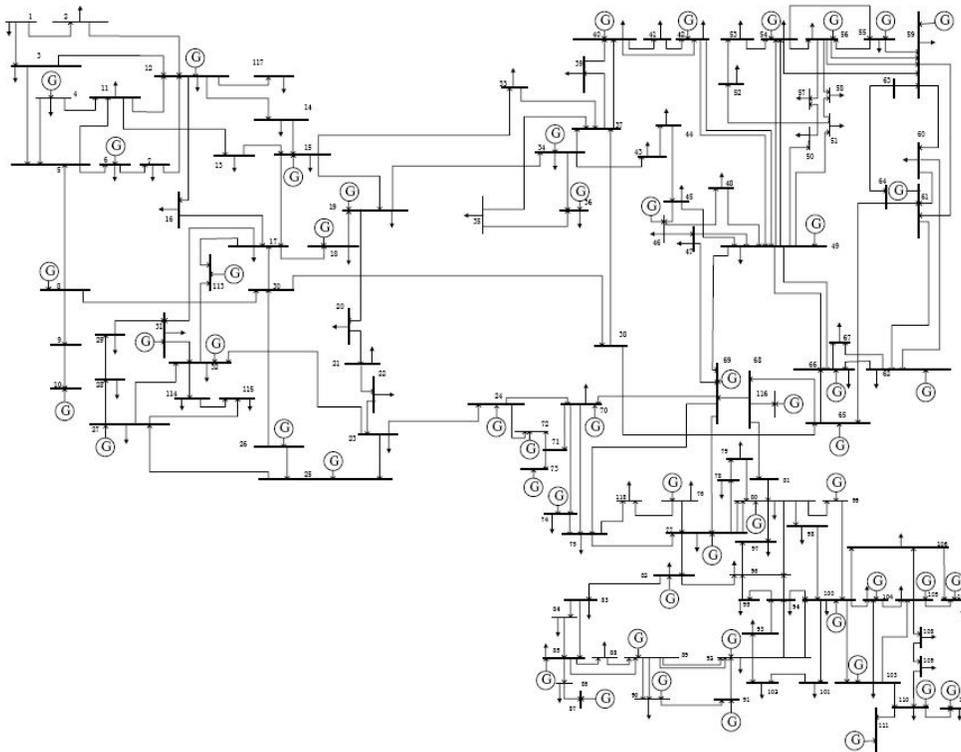


Figura 3.31: Sistema teste IEEE-118 barras.

Repetindo a metodologia já utilizada, a margem de carga obtida através do método da continuação foi de 1,739 pu, com a Curva PV apresentada na Figura 3.32.

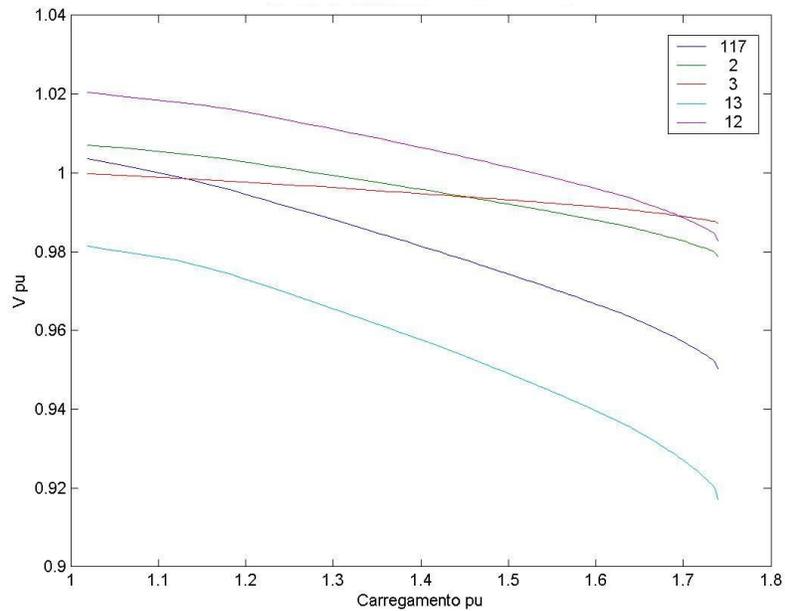


Figura 3.32: Curva PV do sistema IEEE-118.

O próximo passo foi a obtenção da curva QV, para o caso base, para as Barras Críticas 117 e 2, Figuras 3.33 e 3.34.

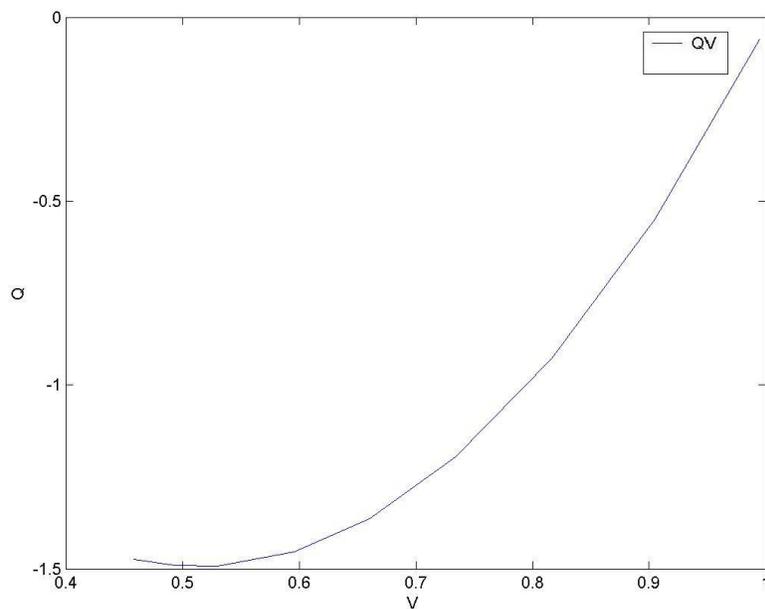


Figura 3.33: Curva QV da Barra Crítica 117 para o caso base.

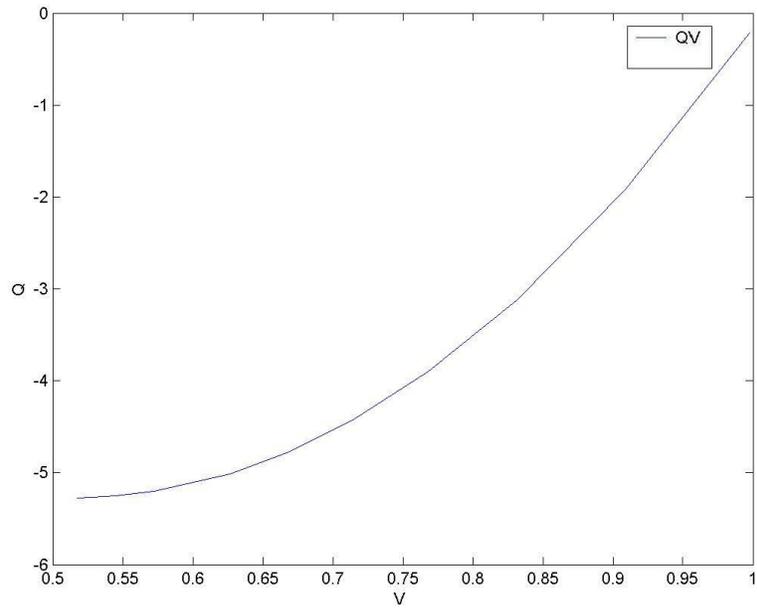


Figura 3.34: Curva QV da Barra Crítica 2 para o caso base.

É fácil observar que existe uma margem associada a estas barras, de forma que o sistema encontra-se na região estável de operação. O mesmo teste é feito para a Barra 3, indicada como uma das mais vulneráveis sob o ponto de vista do monopólio de potência reativa. O resultado é apresentado na Figura 3.35.

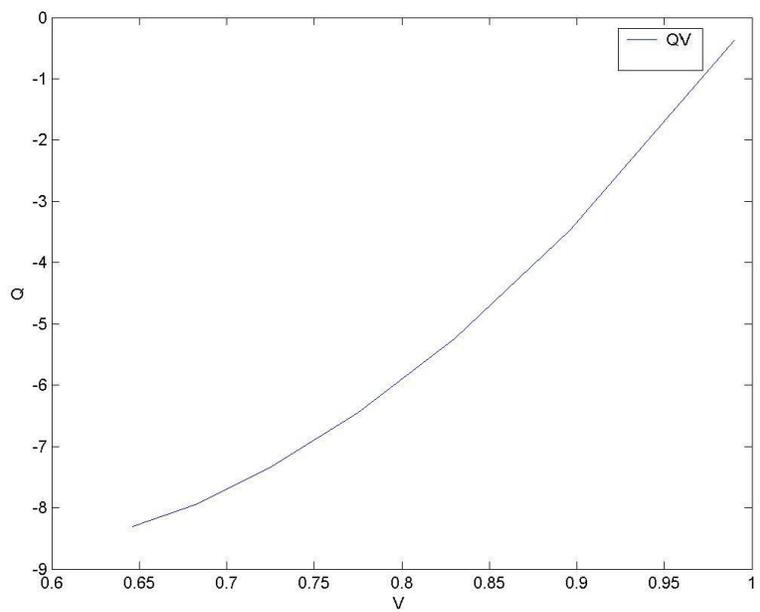


Figura 3.35: Curva QV da Barra 3, Mercado de Potência Reativa (caso base).

O resultado esperado é confirmado através da figura anterior, ou seja, a margem associada a esta barra é maior do que aquelas obtidas para as barras críticas. O próximo passo é levar o sistema a um ponto operativo próximo ao colapso de tensão. Para este sistema, empregou-se um aumento de carga de 1,72 pu. As curvas QV para as barras críticas são mostradas nas Figuras 3.36 e 3.37, respectivamente.

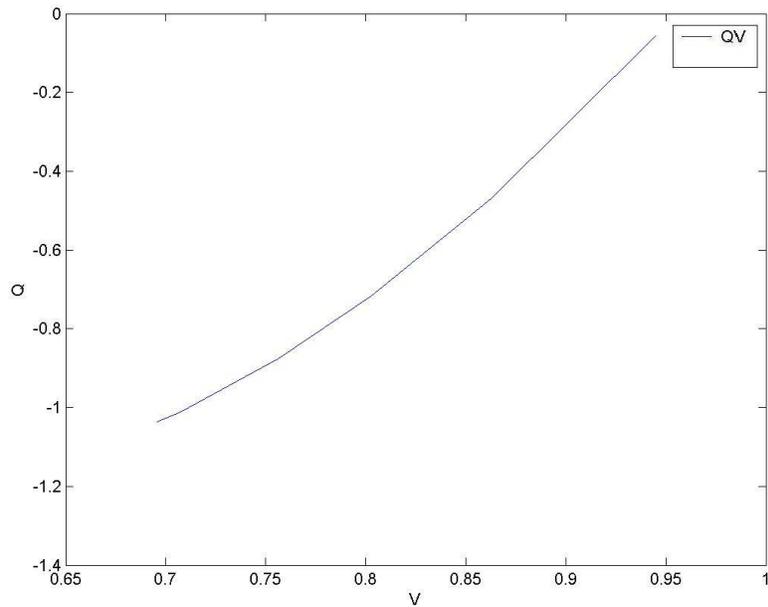


Figura 3.36: Curva QV da Barra Crítica 117 no ponto de colapso.

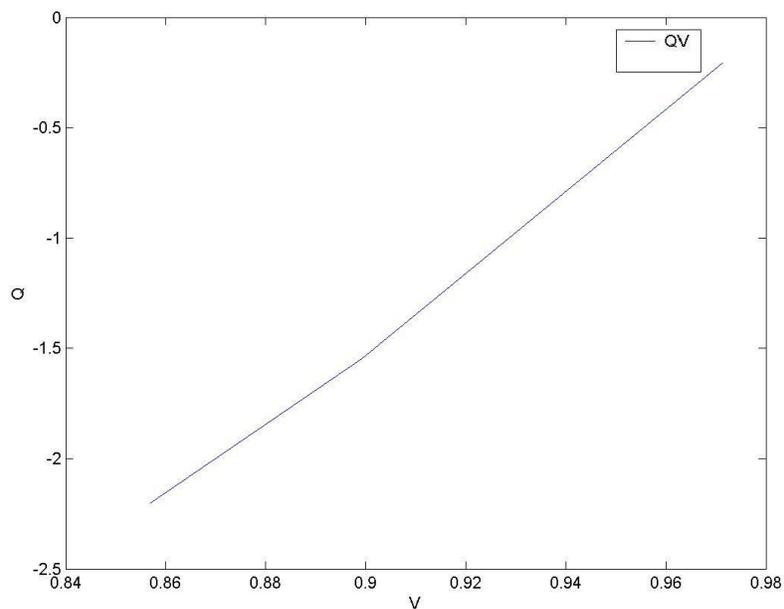


Figura 3.37: Curva QV da Barra Crítica 2 no ponto de colapso.

A margem de potência reativa para o ponto próximo ao colapso reduziu consideravelmente. Logo, aplicou-se ao caso base, uma compensação de potência reativa na barra crítica de igual valor ao obtido pela curva QV (1,492 pu). O cálculo da margem de carga fornece agora um valor de 1,73 pu, melhorando a estabilidade de tensão. Para o valor de carga 1,72 pu, previamente adotado para traçar a Curva QV, calculou-se considerando agora a compensação nesta barra, gerando a figura 3.38.

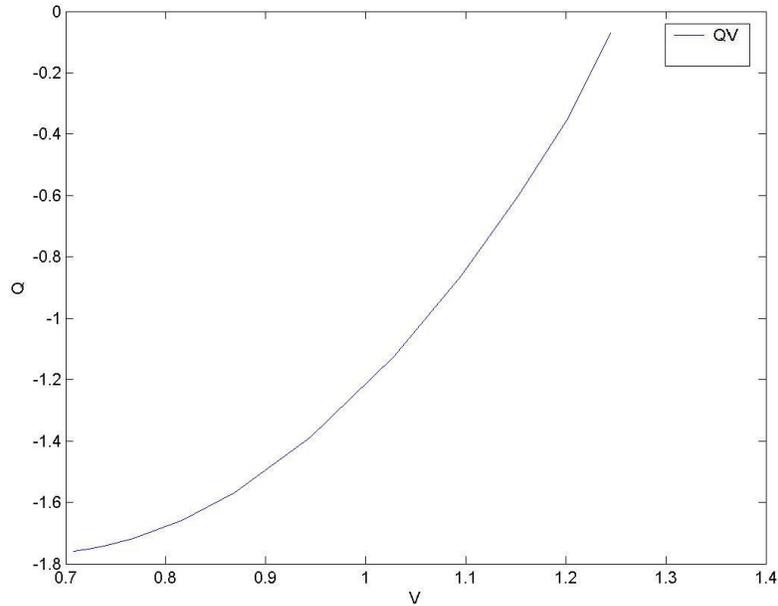


Figura 3.38: Curva QV da Barra Crítica 117 com compensação.

Observa-se na figura anterior que a margem de carga aumentou consideravelmente após a compensação.

Não foi possível traçar a curva QV para a Barra 3, mercado de potência reativa em um ponto operativo próximo ao colapso de tensão, pois, nesta condição o sistema tornou-se instável, o que é uma condição de parada do programa.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES

Este trabalho abordou o problema de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência. Para desenvolver os estudos propostos, empregou-se uma série de ferramentas já disponíveis na literatura.

O método da continuação foi usado com o propósito de calcular a margem de carga do sistema, que determina o quanto de carga o sistema pode suportar enquanto operando de maneira estável.

O vetor tangente foi empregado para identificar as barras críticas do sistema, que são aquelas mais sensíveis a variações de carga na proximidade do colapso. Identificar estas barras previamente desempenha um importante papel neste tipo de estudo.

O vetor tangente foi também usado na determinação das barras mais sensíveis a variação de perdas elétricas. Esta análise é bastante importante, visto que problemas de colapso de tensão podem ocorrer para pontos operativos associados a altas perdas elétricas.

Por último, determinou-se um conjunto de barras mais influentes na análise do monopólio de potência reativa. Usualmente empregada em economia e mercado de potência ativa, esta metodologia pode fornecer resultados importantes de análise de controle de tensão.

De posse destas ferramentas, determinou-se a condição operativa de vários sistemas testes do IEEE. A partir destes quadros, empregou-se a curva QV para medir a reserva de potência reativa de cada barra, que também é um indicador de robustez do ponto de equilíbrio. Esta curva foi traçada para as barras definidas no texto em dois pontos operativos; caso base e ponto imediatamente anterior ao colapso.

Verificou-se que as barras críticas apresentam uma reserva “quase nula” nas proximidades do colapso, validando a curva QV neste tipo de análise. Como consequência, compensou-se nestas barras o montante de margem de potência reativa obtida no caso base, e uma margem de carga maior foi, então, determinada.

Os resultados obtidos mostram que a associação dos resultados obtidos pela curva QV e método da continuação podem se tornar uma importante ferramenta de auxílio à tomada de decisões. Deve se notar, no entanto, que este tipo de estudo requer

algum cuidado, visto que as ferramentas tendem, em princípio, a tratar o problema de formas distintas. Isto porque o método da continuação considera uma variação paramétrica que pode representar uma variação global de carga, enquanto que a curva QV considera variação em uma carga, mantendo o resto do sistema em repouso. Esta característica tem sido motivo de críticas de alguns pesquisadores. No entanto, os resultados obtidos neste trabalho mostram que a conciliação destas ferramentas pode produzir bons frutos acadêmicos e ganhos para a indústria.

A associação entre as duas ferramentas permite determinar as barras sujeitas à compensação através do vetor tangente para um ponto de operação conhecido. Este ponto de operação tem uma margem de carga associada, calculada com auxílio do método da continuação. Após este cálculo, a curva QV pode ser desenhada e margem de carga de potência reativa calculada. Esta margem pode ser um indicador da reserva de potência reativa e do montante de compensação sugerida. Nova margem de carga pode ser calculada após esta compensação, caracterizando um casamento no emprego das técnicas analisadas.

É importante salientar que a escolha do modelo de fluxo de carga para o sistema analisado não traz prejuízo à análise, uma vez que os pontos operativos considerados não contemplam a saída de linhas de transmissão ou geradores, atendo-se a condições operativas em regime permanente.

TRABALHOS FUTUROS

Para uma etapa futura, estudos com auxílio da curva QV podem ser estendidos a partir da confrontação mostrada neste trabalho: entre a reserva de potência reativa (curva QV) e margem de carga (curva PV). Neste aspecto, podem-se propor:

- Análise de contingências: neste caso, a idéia é avaliar as saídas mais severas de linhas e geradores através de duas abordagens:

- Para cada contingência, calcula-se a curva QV para as situações pré e pós-falta das barras terminais da linha de transmissão analisada. As que apresentarem maior variação serão consideradas críticas;
- Para cada contingência, calcula-se a curva QV das barras críticas para as condições pré e pós-falta. As que apresentarem maior variação serão as barras críticas. Nota-se que esta abordagem requer uma atenção especial, pois as barras críticas podem mudar em função de variações topológicas do sistema.

- Monitoramento de reserva de potência reativa. Neste caso, a idéia é, em cada ponto operativo da curva PV, obter as barras críticas a serem monitoradas, através da utilização da curva QV. Assim, pode-se monitorar a condição operativa do sistema em função da reserva de potência reativa do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MONTICELLI, ALCIR JOSÉ, “**Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica,**” Editora Edgard Biucher Ltda, 1983.
- [2] B. ISAÍAS L. LOPES, “**Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência no Horizonte de Curto e Longo Prazos,**” Tese de Doutorado, UNIFEI, Minas Gerais, 2004.
- [3] KUNDUR, P., “**Power system stability and control,**” Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.
- [4] R. A. Schlueter, I. Hu and M. W. Chang, “**Methods for determining proximity to voltage collapse**”, IEEE/PES Winter Meeting – Paper 90 WM 096-8 PWRs, 1990.
- [5] M. Begovic, ^a Phadke, “**Control of voltage stability using sensitivity analysis,**” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, may 1994, pp. 946-956.
- [6] R. Seydel, “**From Equilibrium to Chaos - Practical Bifurcation and Stability Analysis,**” Elsevier Science, North-Holland, 1988.
- [7] V. Ajjarapu, “**Identification of steady state voltage stability in power systems,**” Proc. of International Conference on High Technology in the Power Industry, March 1988, pp. 244-247.
- [8] F. L. Alvarado and T. H. Jung, “**Direct detection of voltage collapse conditions,**” Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena - Voltage Stability and Security, EL-6183, EPRI, January 1989, pp. 5.23-5.38.
- [9] S. Granville, J. C. O. Mello and A. C. G. Mello, “**Application of interior point Methods to power flow unsolvability,**” IEEE/PES Summer Meeting – Paper SM 599-1 PWRs, July 1995, Portland, Oregon.

- [10] G. D. Irisarri, X. Wang, T. Jong and S. Mokhtari , **”Maximum loadability of systems using interior point non-linear optimization method,”** IEEE Transaction on Power Systems, vol. 12, no. 1, February 1997, pp. 162-172.
- [11] P. A. Löff, T. Smed, G. Anderson and D. J. Hill, **“ Fast Calculation of a voltage stability index,”** IEEE Trans. Power Systems, vol. 7, no. 1, February 1992, pp. 54-64.
- [12] Julián Barquin, Tomás Gómez and F. Luiz Pagola, **“ Estimating the loading limit margin taking into account voltage collapse areas,”** IEEE/PES Winter Meeting - Paper 95 WM 183-4 PWRS, 1990, jan 29 - feb 2 1995.
- [13] P. Marannino, P. Bresesti, M. Delfanti, G.P. Granelli and M. Montagna, **“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.
- [14] C. A. Canizares, A. C. Zambroni de Souza and V. H. Quintana, **”Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse,”** IEEE Transactions on Power Systems, vol.11, No. 3, August 1996, pp. 1441-1447.
- [15] W. Xu, Y. Mansour, **“Voltage stability using generic load models,”** IEEE/PES Winter Meeting, Columbus, OH, jan31 - feb 5, 1993.
- [16] T. J. Overbye and C. L. de Marco, **”Voltage security enhancement using energy based sensitivities,”** IEEE Trans. Power Systems, vol. 6, no. 3, August 1991, pp. 1196-1202.
- [17] R. P. Klump and T. Overbye ,**”Assessment of transmission system loadability,”** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 1, February 1997, pp. 416-423.
- [18] Anderson Neves Cortez, **“Proposta de critério e procedimentos para avaliação de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência,”** 2001, dissertação de mestrado, UFMG.

- [19] A. C. Zambroni de Souza and V. H. Quintana, **“A new technique of network partitioning for voltage collapse margin calculations,”** IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 141, November 1994, pp. 630-636.
- [20] A. C. Zambroni de Souza, C. A. Cañizares, V. H. Quintana, **“Critical Bus and Point of Collapse Determination Using Tangent Vectors,”** 28 th North American Power Symposium, Cambridge, USA, November 10-12 1996, pp.329-333.
- [21] A. C. Zambroni de Souza ,C. A . Cañizares and V. H. Quintana, **”New Techniques to Sped up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors,”** IEEE/PES Summer Meeting - Paper PE-219- PWRS-0-11-1996, Berlin, July 23 – 27, 1997.
- [22] A. C. Zambroni de Souza, **“Determinação da Barra Crítica e do Ponto de Colapso Pelo Vetor Tangente,”** XI CBA, São Paulo, Setembro de 1996, vol. 3, pags 1393-1998.
- [23] A. C. Zambroni de Souza, F. Alvarado, M. Glavic, **“The Effect of Loading on Reactive Market Power,”** Proceedings of the IEEE International Conference, January 2001, Hawaii.
- [24] Interim Report, **“U.S.-Canada Power System Outage Task Causes of the August 14th Blackout in the United States,”** November 2003.
- [25] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, **“Definition and Classification of Power System Stability,”** IEEE Transactions on Power Systems.
- [26] SOUZA, A. C. Z., BRITO, N. H. M. N. **“Ações de controle para prevenção de colapso de tensão: efeitos e restrições,”** Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática. São Paulo, 1996.
- [27] TAYLOR, C. W. **“Power System Voltage Stability”**. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.

[28] 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.

[29]. A. C. Zambroni de Souza, “**Tangent Vector Applied to Voltage Collapse and Loss Sensitivity Studies,**” Electric Power Systems Research, n.47, pp. 65-70, 1998.

[30] A. Venkataranama, C. Collin, “**The Continuation Power Flow: A Tool for Steady-State Voltage Stability Analysis,**” IEEE PICA Conf. Proc., Baltimore, MD, May 1991, pp. 304-311.

[31] A. C. Zambroni de Souza., “**Estabilidade de Tensão,**” Apostila do Curso, FUPAI, Itajubá, 1997.

A MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

O método de Newton-Raphson, também conhecido como Método das Tangentes, consiste em resolver numericamente um sistema de equações não lineares. A grande vantagem deste método em relação aos outros é a rápida convergência. No entanto, a estimativa inicial é de grande importância.

Considere uma função unidimensional expressa pela equação (A.1), deseja-se determinar o(s) valor(es) que anulam a função:

$$g(x)=0 \quad (\text{A.1})$$

em que $g(x)$ e x são escalares. O objetivo é calcular os valores de x para os quais a função se anula. Em termos geométricos, como mostra a Figura A.1, a solução da equação (A.1) corresponde ao ponto em que a curva corta o eixo x .

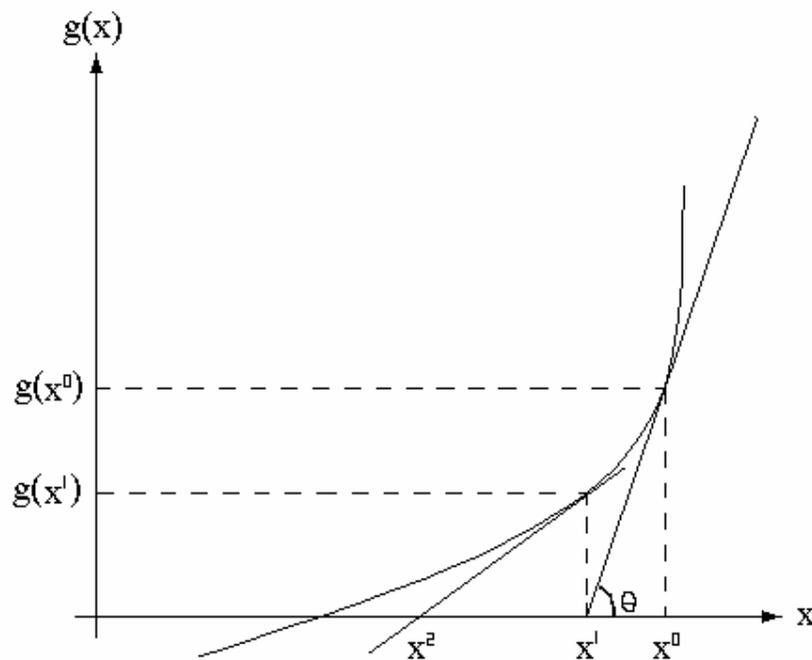


Figura A.1 – Método de Newton-Raphson

A Figura A.1 fornece informações importantes. Os pontos x_0 , x_1 e $g(x_0)$ são os vértices de um triângulo retângulo. Pode-se, portanto, a partir de x_0 , obter x_1 como descrito a seguir.

O método consiste em linearizar o problema originalmente não linear em cada ponto da curva, até que o ponto em que a solução $g(x)=0$ seja encontrada. Portanto, dois passos são fundamentais no processo:

- Escolha do ponto inicial.
- Linearização da curva em cada ponto.

Em relação a este último ponto, a Figura A.1 fornece informações importantes. Note que os pontos x_0 , x_1 e $g(x_0)$ são os vértices de um triângulo retângulo. Pode-se, portanto, a partir de x_0 , obter x_1 da seguinte forma:

$$tg(\theta) = g(x_0)/(x_0 - x_1) \quad (A.2)$$

$$x_1 = x_0 - tg(\theta)^{-1} g(x_0) \quad (A.3)$$

onde $tg(\theta)$ representa a tangente do ângulo θ , como mostrado na figura, A.1. Assim, pode-se checar se $g(x_1)$ é igual a zero, o que tornaria x_1 a solução do problema, encerrando o processo iterativo. Caso contrário, o processo deve-se repetir até que a solução seja encontrada. Portanto, para o caso unidimensional, o entendimento do método de Newton é bastante simples, e é inteiramente resumido na Figura A.1. Esta simplicidade não é comprometida quando o sistema a ser tratado tem dimensões maiores (e é sempre o caso dos sistemas elétricos de potência). Neste caso, é importante explicitar a linearização a partir de uma formulação matemática através da expansão obtida por série de Taylor:

$$g(x_0 + \Delta x) = g(x_0) + g'(x_0) * \Delta x + TAO \quad (A.4)$$

Na expressão acima, $g(x_0)$ representa o valor da função no ponto x_0 e $g'(x_0)$ representa a derivada no mesmo ponto. Finalmente, Δx representa uma variação de x ao redor de x_0 , enquanto TAO representa os termos de ordem mais alta (desprezados). Para o caso unidimensional, $g'(x_0)$ representa a reta tangente à curva em cada ponto.

Na expressão acima, todos os termos são conhecidos, com exceção de Δx , determinado como:

$$\Delta x = g^{-1}(g(x_0 + \Delta x) - g(x_0)) \quad (\text{A.5})$$

E x_1 é obtido através de;

$$x_1 = x_0 + \Delta x \quad (\text{A.6})$$

Portanto, o processo acima representa exatamente a metodologia empregada anteriormente com o auxílio do triângulo retângulo, Figura A.1. Assim, o procedimento do método de Newton-Raphson pode ser resumido como segue:

- i) Verificar se a função $g(x_0)$ se anula para o ponto x_0 . Este ponto é aleatoriamente escolhido para dar partida no processo.
- ii) Caso $g(x_0)$ não seja igual a zero, linearize $g(x)$ através da resolução da Série de Taylor, mostrada na equação (A.4).
- iii) Calcule Δx e atualize o valor de x .
- iv) Para o novo valor de x , calcule $g(x)$. Se for igual a zero, o processo convergiu. Caso contrário, volte ao passo ii e repita todo os itens seguintes.

Para sistemas maiores, a equação (A.7) apresenta a linearização das equações, já desprezando os termos de ordem mais alta.

$$g_i(x_0 + \Delta x) = g_i(x_0) + \frac{\partial g_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial g_i}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial g_i}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (\text{A.7})$$