



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Grupo de Sistemas Elétricos



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Avaliação de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos Através de Curvas P-V

Aluno: Ítalo José Lopes de Almeida

Orientadora: Dra. Núbia Silva Dantas Brito

Campina Grande-PB, Abril de 2009.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Ítalo José Lopes de Almeida

Aluno

Dra. Núbia Silva Dantas Brito

Orientadora

Campina Grande-PB, Abril de 2009.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por está sempre presente em todos os momentos de minha vida.

Aos meus pais José Almeida e Lucileide Lopes, pela confiança, amor, e incentivos constantes para a superação dos obstáculos.

À professora Núbia Brito, pela sempre generosidade com minha pessoa e apoio na aceitação da orientação.

Aos meus amigos Célio, Wilker, Grangeiro, Stennio, Warner, Ferdinando pela valiosa colaboração no decorrer do curso de graduação de Engenharia Elétrica.

Enfim a todos, que de forma direta e indireta que contribuíram na minha formação acadêmica.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Objetivos..... | 1 |
| 1.2 Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência..... | 1 |
| | |
| CAPÍTULO 2..... | 3 |
| ESTABILIDADE DE TENSÃO: ASPECTOS GERAIS..... | 3 |
| 2.1 Definições, Conceitos e Classificações..... | 3 |
| 2.1.1 Estabilidade de Tensão..... | 3 |
| 2.1.2 Estabilidade de Tensão a Grandes Perturbações..... | 4 |
| 2.1.3 Estabilidade de Tensão a Pequenas Perturbações..... | 4 |
| 2.2 Caracterização do Fenômeno..... | 5 |
| 2.3 Métodos de Análise..... | 6 |
| 2.3.1 Análise Dinâmica..... | 6 |
| 2.3.2 Análise Estática..... | 6 |
| | |
| CAPÍTULO 3..... | 7 |
| ESTABILIDADE DE TENSÃO: FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... | 7 |
| 3.1 Colapso de Tensão em um Sistema de Duas Barras..... | 7 |
| 3.1.1 Curvas P-V..... | 8 |
| | |
| CAPÍTULO 4..... | 11 |
| TÉCNICA DE ANÁLISE ESTÁTICA..... | 11 |
| 4.1 Método da Continuação..... | 11 |
| 4.2 Exemplo numérico..... | 16 |
| | |
| CAPÍTULO 5..... | 22 |
| RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NO ANAREDE..... | 22 |
| 5.1 Programa de Fluxo de Potência Continuado..... | 22 |
| 5.2 Resultados das Análises..... | 23 |

| | |
|--|-----------|
| 5.2.1 Sistema IEEE 14 barras..... | 24 |
| 5.2.2 Sistema IEEE 30 barras..... | 26 |
| CAPÍTULO 6..... | 28 |
| CONCLUSÕES..... | 28 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 29 |
| APÊNDICE I..... | 30 |
| DETERMINAÇÃO DA TENSÃO E DA POTÊNCIA ATIVA EM UMA BARRA DE CARGA..... | 30 |
| ANEXO I..... | 33 |
| DADOS DO SISTEMA IEEE 14 BARRAS..... | 33 |
| ANEXO II..... | 34 |
| DADOS DO SISTEMA IEEE 30 BARRAS..... | 34 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 - Sistema elétrico em análise..... | 7 |
| Figura 3.2 - Relação entre o módulo da tensão na carga e a potência ativa para diferentes fatores de potência..... | 9 |
| Figura 4.1 - Metodologia de Predição e Correção..... | 12 |
| Figura 4.2 – Fluxograma do Método da Continuação Aplicado ao Problema de Fluxo de Potência..... | 16 |
| Figura 4.3 - Ponto Extremo da Função $f(x)$ | 17 |
| Figura 4.4 - Processo de Continuação..... | 20 |
| Figura 5.1 – Curva P-V do Sistema IEEE 14 Barras, caso base..... | 24 |
| Figura 5.2 – Curva P-V do Sistema IEEE 14 Barras, considerando Contingências nas linhas 1-5 e 9-14..... | 25 |
| Figura 5.3 – Curva P-V do Sistema IEEE 14 Barras, considerando Contingência no gerador da barra 2..... | 25 |
| Figura 5.4 – Curva P-V do Sistema IEEE 30 Barras, caso base..... | 26 |
| Figura 5.5 – Curva P-V do Sistema IEEE 30 Barras, considerando Contingências nas linhas 2-5, 8-28 e 29-30..... | 26 |
| Figura 5.6 – Curva P-V do Sistema IEEE 30 Barras, considerando Contingência no gerador da barra 2..... | 27 |
| Figura I.1 - Circuito equivalente para o sistema em análise..... | 30 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 5.1 – Resultados das análises do IEEE 30 Barras..... | 27 |
|--|----|

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

Tendo em vista as mudanças institucionais que vem ocorrendo no setor elétrico, com uma diversidade de participantes e diferentes interesses de negócios, o crescimento dos sistemas de potência e a complexidade de operação, faz-se necessário gerenciar uma margem de segurança operativa e quantificar o risco associado.

Desta forma, a estabilidade de tensão é um fenômeno que tem despertado a atenção nos últimos anos, de especialistas e pesquisadores. Neste período, muitos artigos foram publicados e centenas de conferências, seminários e cursos foram organizados, divulgando os resultados de pesquisas e estudos associados ao fenômeno, discutindo as experiências, apresentando e propondo técnicas e ferramentas de análise.

O tema é extremamente importante e atual, pois nos últimos anos, no Brasil e em outros países, ocorreram algumas perturbações que causaram blecautes associados a problemas de estabilidade de tensão, quando foram observados desligamentos em cascata, gerando fenômenos cuja consideração nos estudos é decisiva na análise do desempenho do sistema elétrico.

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho é apresentar algumas metodologias apresentadas na literatura especializada em análise de estabilidade de tensão e mostrar os resultados de estudos realizados com os sistemas do IEEE, utilizando-se o programa computacional ANAREDE, desenvolvido pelo Cepel, que incorporam algumas dessas metodologias.

1.2 Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência

A estabilidade de um sistema elétrico pode ser definida como sendo a capacidade que este sistema tem de se manter em um determinado estado de equilíbrio e de alcançar um novo estado de equilíbrio quando submetido a uma condição de impacto[2], seja uma variação de carga, um curto-circuito em uma linha de transmissão,

um desligamento repentino de elementos do sistema, saída de unidades geradoras, etc. É fácil perceber a complexidade de um estudo abrangente e definitivo do sistema elétrico. Porém, a diferenciação de determinadas características, como os impactos de pequeno ou grande porte, a instabilidade envolvida, as influências dos elementos e o tempo de observação do fenômeno permitem uma divisão do estudo de estabilidade, ainda que não definitiva. Esta divisão apresenta algumas particularidades e, dentro da natureza e da análise a que se propõe, são satisfatórias[1,2,3].

Assim, os estudos da dinâmica dos sistemas de potência podem se dividir em três tipos: estabilidade angular, estabilidade de tensão e estabilidade de frequência. O primeiro está relacionado com a manutenção do sincronismo entre as máquinas; o segundo com os fenômenos não lineares que podem ocorrer na evolução do processo dinâmico e o terceiro se refere à capacidade de um sistema de potência manter a frequência em valores permissíveis, após ser submetido a um desequilíbrio severo de carga e geração, com um mínimo de corte de carga. Nestes estudos são válidas algumas aproximações como desprezar os efeitos transitórios, que são muito rápidos quando comparados com as frequências naturais de oscilação dos rotores das máquinas síncronas, cuja inércia não permite que a frequência do sistema excursionem muito além do seu valor nominal.

Em resumo, a estabilidade em sistemas de potência pode ter diferentes formas e ser influenciada por uma ampla gama de fatores e o desempenho dinâmico por uma diversidade de mecanismos com características e classes de respostas diferentes. Assim, a classificação da estabilidade em categorias facilita a análise dos problemas de estabilidade, na medida que incluem a identificação de fatores essenciais que contribuem para o processo de instabilidade.

CAPÍTULO 2

ESTABILIDADE DE TENSÃO: ASPECTOS GERAIS

Até recentemente, o maior foco de interesse estava concentrado na área de estabilidade angular. No entanto, com o crescimento sempre constante da carga, suprida cada vez mais por parques geradores distantes, através de longas linhas de transmissão, fez com que surgissem problemas ligados à demanda de potência reativa e à estabilidade de tensão. Além disso, muitos fatores que influenciam a estabilidade de tensão não são modelados nos programas convencionais de estabilidade transitória, ou a modelagem existente não é apropriada para a simulação da característica, muitas vezes lenta, da instabilidade de tensão.

2.1 Definições, Conceitos e Classificações

2.1.1 Estabilidade de Tensão

A estabilidade de tensão é definida como a capacidade de um sistema de potência manter níveis aceitáveis de tensão em regime permanente em todas as barras do sistema, em condições normais de operação e após ser submetido a um distúrbio qualquer. A estabilidade de tensão depende da capacidade de manutenção ou restauração do equilíbrio entre a demanda da carga e o seu suprimento pelas fontes do sistema.

A instabilidade de tensão é a ausência de estabilidade de tensão e resulta em um progressivo declínio ou elevação da tensão [1,4]. Um possível desdobramento deste processo é a perda de carga em determinadas áreas ou o desligamento de linhas e outros elementos por atuação de proteções, levando o sistema a desligamentos em cascata.

O termo colapso de tensão é freqüentemente usado na literatura para identificar situações nas quais uma seqüência de eventos, associado à instabilidade de tensão, leva o sistema ao blecaute ou a uma condição anormal de tensão, abaixo dos limites aceitáveis, em uma significativa parte do sistema de potência [1].

O termo segurança de tensão também costuma ser usado e significa a capacidade

do sistema não somente operar de maneira estável como também permanecer nesta condição após uma contingência ou um aumento de carga. O termo significa ainda a existência de uma margem considerável entre um determinado ponto de operação estável e o ponto de colapso de tensão[5].

2.1.2 Estabilidade de Tensão a Grandes Perturbações

A estabilidade de tensão a grandes perturbações está ligada com a capacidade do sistema manter tensões de regime após a ocorrência de um grande distúrbio, como uma falta, perda de geração ou de circuitos. Esta capacidade é determinada pelas características do sistema e da carga, e também pelas interações dos diversos controles (discretos e contínuos) e proteções [1].

A análise da estabilidade de tensão a uma grande perturbação normalmente requer o exame do comportamento dinâmico do sistema em um período de tempo suficiente para a captura das interações e ações de dispositivos como motores, LTCs e limitadores de corrente de campo de geradores. Isto requer uma análise não-linear do sistema em um período de tempo de interesse para o estudo, que pode variar de uns poucos segundos a minutos, e a realização de simulações no domínio do tempo [1].

2.1.3 Estabilidade de Tensão a Pequenas Perturbações

A estabilidade de tensão a pequenas perturbações se refere à capacidade do sistema em manter tensões de regime após uma pequena perturbação, tipo uma pequena variação de carga. Esta forma de estabilidade é influenciada pelas características da carga, controles contínuos e controles discretos em um dado instante de tempo. Este conceito é útil para determinar, num instante qualquer, como a tensão irá responder a uma pequena mudança no sistema, como, por exemplo, a transição entre períodos de carga. Para pequenos distúrbios, as equações do sistema podem ser linearizadas e permitem obter valiosas informações de sensibilidade na identificação de fatores que influenciam a estabilidade de tensão [1].

Na literatura, a maior parte dos artigos que estudam a estabilidade de tensão a pequenas perturbações utilizam técnicas de análise estática.

2.2 Caracterização do Fenômeno

Os problemas de estabilidade de tensão estão associados a sistemas elétricos que operam próximo a capacidade máxima de transmissão e em condições limites, tais como: linhas de transmissão com carregamentos elevados, fontes locais de potência reativa insuficientes e transmissão de potência através de grandes distâncias, caracterizando situações onde o aspecto principal é a fragilidade e a incapacidade desse sistema de atender a demanda de potência reativa.

Além do cenário descrito anteriormente, a instabilidade de tensão se manifesta também em sistemas que estejam eventualmente operando em condições de carga pesada, com elementos desligados por motivos operativos ou manutenção, com unidades geradoras próximas aos centros de carga indisponíveis e elementos de compensação reativa fora de operação.

Tomando uma ou mais das condições anteriores como parte do estado operativo inicial do sistema, a instabilidade de tensão começa a se processar quando da ocorrência de um ou mais dos seguintes eventos:

- a) Elevação abrupta da carga (crescimento MW/min acentuado e anormal);
- b) Defeito em um elemento importante do sistema;
- c) Desligamento de elemento importante do sistema, por atuação correta ou não da proteção;
- d) Falha em dispositivos de proteção e controle;
- e) Erros de operação.

Fatos como estes provocam sobrecargas em elementos, ocasionando elevação das perdas (principalmente de potência reativa) e conseqüente redução no perfil de tensões do sistema. A redução das tensões nos centros de consumo e em áreas adjacentes pode provocar um decréscimo na carga total do sistema (cargas variáveis com a tensão), ou mesmo desligamento de algumas cargas, possibilitando assim a operação em um novo ponto de equilíbrio com tensões mais baixas.

2.3 Métodos de Análise

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

2.3.1 Análise Dinâmica

A análise dinâmica usa técnicas não-lineares de simulação no domínio do tempo ou frequência, proporcionando uma reprodução real da dinâmica da instabilidade de tensão. É importante para estudos envolvendo coordenação de controles e proteções, bem como análises de situações específicas de colapso de tensão.

As vantagens da análise dinâmica residem na possibilidade de captura e cronologia dos eventos e na reprodução fiel da dinâmica da instabilidade de tensão. No entanto, as desvantagens dessa análise residem na necessidade de aquisição de uma quantidade considerável de dados, de longos tempos de simulação e o não fornecimento direto de informações a respeito da margem de estabilidade e áreas críticas.

2.3.2 Análise Estática

Embora a estabilidade de tensão seja um fenômeno dinâmico, diversas ferramentas estáticas têm sido utilizadas para análise devido à complexidade, ao tempo computacional necessário para simulações de grandes sistemas de potência e ao fato das dinâmicas envolvidas muitas vezes serem lentas. As referências [6,7] mostram que a análise do problema por abordagens estáticas ou dinâmicas leva a resultados semelhantes.

A análise estática é baseada em equações de fluxo de potência, não envolvendo, portanto, equações diferenciais. Essa forma de análise é importante para proporcionar respostas a respeito da “distância” de um ponto de operação à instabilidade e sobre a identificação da origem do problema, de forma a serem definidas medidas corretivas e/ou preventivas. Adicionalmente, em uma análise de estabilidade de tensão, freqüentemente é necessário avaliar uma ampla faixa de condições do sistema, tornando atraente uma análise de regime permanente, cujo custo computacional é menor.

CAPÍTULO 3

ESTABILIDADE DE TENSÃO: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O Capítulo 2 apresentou conceitos, definições e classificações para a estabilidade de tensão. Foi visto também, que este fenômeno vem sendo estudado sob o ponto de vista estático e dinâmico, sendo a escolha dependente do tipo de análise a ser realizada e da caracterização do fenômeno.

Assim, a partir de um sistema elétrico bastante simples, este capítulo tem por objetivo mostrar alguns conceitos básicos relacionados com a estabilidade de tensão, na forma estática. As soluções analíticas, derivadas desse sistema simples, permitirão traçar as curvas P-V e extrair importantes relações e propriedades usadas na identificação da barra crítica e do ponto de colapso de tensão por algumas das técnicas de análise linear.

3.1 Colapso de Tensão em um Sistema de Duas Barras

Com a finalidade de conceituar o problema da estabilidade de tensão, será analisado inicialmente o comportamento estático de um sistema elétrico simples de duas barras.

Tal sistema é composto de um gerador com suposta capacidade infinita de geração, uma carga efetiva $P + jQ$ e uma linha de transmissão sem limite térmico, conforme apresentado na Figura 3.1.

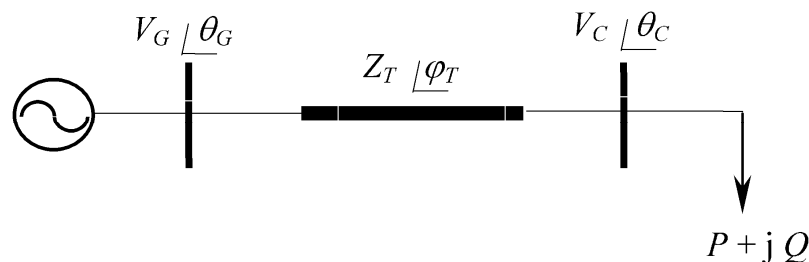


Figura 3.1 - Sistema elétrico em análise

3.1.1 Curvas P-V

Esta seção tem por objetivo obter uma solução analítica para o circuito apresentado na Figura 3.1 e então traçar as curvas P-V, que ilustrarão a relação entre o módulo da tensão e a carga ativa para a barra receptora, considerando-se diferentes fatores de potência, e a partir das quais algumas características importantes poderão ser evidenciadas.

Considerou-se o gerador como uma barra infinita cuja tensão terminal, em pu, foi admitida igual a $1,00 \angle 0^\circ$.

A linha de transmissão foi representada como uma linha curta, de impedância igual a $6,02 + j 15,68 \%$.

No Apêndice I apresenta-se o equacionamento do circuito, o qual foi utilizado para se obter as curvas apresentadas na Figura 3.2, relacionando o módulo da tensão na barra de carga com a potência ativa consumida nessa barra, para cargas com fatores de potência 0.8, indutivo e capacitivo, e fator de potência unitário.

A partir da Figura 3.2, pode-se observar que para cada fator de potência existem dois valores de tensão para um mesmo valor de potência na carga, exceto em um ponto onde um único valor de tensão está relacionado à carga, ponto esse que representa a máxima potência fornecida, apesar da fonte ter sido considerada infinita. Esse ponto corresponde ao limite de estabilidade de tensão, também citado muitas vezes na literatura como ponto de bifurcação ou ponto de singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de carga [8].

A existência de duas soluções de tensão para uma mesma potência pode ser explicada pela também existência de dois valores de corrente para uma mesma potência, ou seja, para pontos de operação correspondentes à parte superior da curva, tem-se tensões maiores e correntes menores que para pontos correspondentes à região inferior da curva, onde com tensões menores é necessária uma intensidade maior de corrente para produzir uma certa potência.

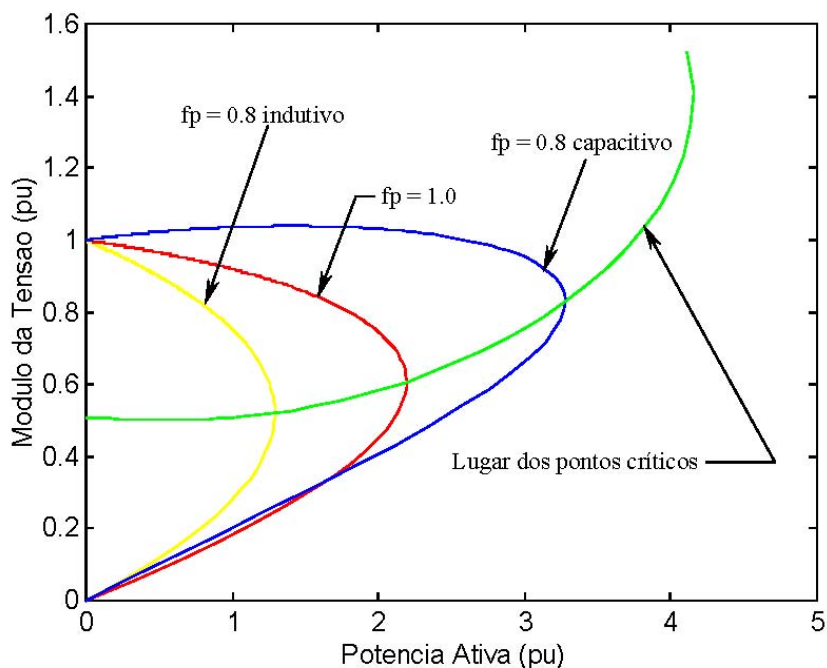


Figura 3.2 - Relação entre o módulo da tensão na carga e a potência ativa para diferentes fatores de potência

Também é interessante observar que a tensão vai apresentando quedas cada vez maiores para uma mesma variação de carga, à medida que essa carga vai se aproximando de seu valor máximo. Além disso, a distância entre as duas soluções de tensão para uma mesma potência vai diminuindo à medida que a carga aumenta, até se ter uma única solução no ponto de máxima potência.

Nota-se igualmente que, à medida que o fator de potência torna-se menos indutivo, a máxima potência de atendimento aumenta. Entretanto, compensações excessivas podem levar a uma falsa segurança operativa, haja vista que, apesar do aumento na potência suprida, o limite de estabilidade de tensão pode ocorrer para uma tensão próxima, ou dentro, da faixa normal de operação. Verifica-se, assim, que o módulo da tensão isoladamente não é um bom indicador da proximidade do limite de estabilidade de tensão [9].

A Figura 3.2 mostra ainda a curva dos pontos críticos (limites de estabilidade de tensão) para cada fator de potência, onde se verifica que existe uma determinada compensação de potência reativa além da qual a potência ativa máxima não aumenta, passando inclusive a diminuir. Esse ponto de máxima potência ativa é o limite de estabilidade estática, e decorre do fato da máxima absorção de potência ativa por uma impedância de carga ocorrer quando essa impedância é igual em módulo e conjugada

em ângulo, em relação à impedância série da linha de transmissão [10]. Isso corresponde, para o exemplo, a uma carga de $4,15 - j 10,82$ pu. Ressalta-se que não houve preocupação, no caso apresentado, com o fato desse ponto ocorrer para um valor de tensão não operativo na prática, mas apenas em caracterizar a situação através de uma fácil visualização, mostrando que o limite de estabilidade estática é um caso particular do limite de estabilidade de tensão.

CAPÍTULO 4

TÉCNICA DE ANÁLISE ESTÁTICA

A partir de um sistema simples de duas barras, o capítulo anterior apresentou a conceituação teórica para a estabilidade de tensão, onde importantes relações envolvendo a matriz Jacobiana foram mostradas. Desta forma, o objetivo deste capítulo é apresentar algumas das técnicas de análise estática encontradas na literatura, que permitem determinar o ponto de colapso de tensão em um sistema elétrico de potência.

O princípio da análise estática considera que a dinâmica do sistema com influência na estabilidade de tensão, varia lentamente. Desta forma, o modelo dinâmico de um sistema de potência, representado por equações diferenciais, pode ser reduzido a um conjunto de equações algébricas associadas a cada ponto de equilíbrio, e o modelo utilizado nos estudos de fluxo de potência pode ser considerado. Este conceito é útil para determinar, num instante qualquer, como a tensão irá responder a uma pequena mudança no sistema, como, por exemplo, às variações de carga.

4.1 Método da Continuação

Os métodos convencionais de solução do problema de fluxo de potência, como por exemplo, os métodos de Newton-Raphson e o Desacoplado Rápido, em sua formulação básica, apresentam dificuldades de convergência quando o sistema aproxima-se do ponto de máxima transferência de potência ou ponto crítico. No caso da análise de estabilidade de tensão, há a necessidade da obtenção de soluções do fluxo de potência muito próximas ao ponto crítico ou mesmo além do ponto crítico.

O Método da Continuação (Continuation Power Flow) descrito em (Ajjarapu and Christy, 1992), (Cañizares and Alvarado, 1993), (Sodré, Almeida e Salgado, 1997), constitui uma solução para o problema descrito anteriormente, pois evita a singularidade da matriz Jacobiana dos métodos de fluxo de potência convencionais, alcançando um ponto de equilíbrio independentemente do nível de carregamento do sistema.

A idéia básica deste método consiste em obter sucessivas soluções do fluxo de potência através de duas etapas básicas: predição e correção (Ajjarapu and Christy,

1992), conforme apresentado na figura 4.1.

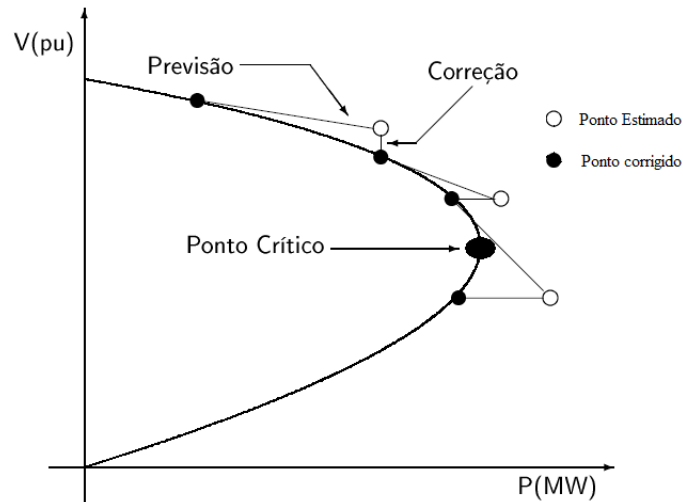


Figura 4.1 - Metodologia de Predição e Correção.

Como resultado da etapa de previsão obtém-se um ponto através do vetor tangente, o qual é, em seguida, usado na segunda etapa, passo corretor, para calcular o novo ponto de equilíbrio. Ao atingir a singularidade da matriz Jacobiana no ponto de bifurcação (*ponto crítico*), uma parametrização local se torna necessária para garantir um bom comportamento numérico dos resultados.

Reformulação das Equações do Fluxo de Potência

A variação da carga ativa e reativa nas barras do sistema é representada pela variação de um único parâmetro λ da seguinte forma:

$$P_{IK} = P_{lk}^0 + \lambda[\gamma_k \cdot S_{base} \cdot \cos \psi_k]$$

$$Q_{IK} = Q_{lk}^0 + \lambda[\gamma_k \cdot S_{base} \cdot \sin \psi_k],$$

sendo,

P_{lk}^0, Q_{lk}^0 - carga ativa e reativa inicial na barra k;

γ_k - fator de variação da carga na barra k;

ψ_k - fator de variação do fator de potência na barra k;

λ - parâmetro de carga;

S_{base} – valor arbitrário de potência aparente (Mvar) utilizado como referência para o escalonamento do parâmetro λ .

Supondo um crescimento uniforme da carga com fator de potência constante, se tem:

$$P_{lk} = P_{lk}^0 (1 + \lambda)$$

e

$$Q_{lk} = Q_{lk}^0 (1 + \lambda).$$

Para acompanhar o crescimento da carga, a geração de potência ativa deve ser ajustada de acordo com a seguinte equação:

$$P_{Gk} = P_{Gk}^0 (1 + \lambda \beta_k)$$

sendo

P_{Gk}^0 - geração ativa inicial na barra k;

β_k - fator de variação da geração na barra k.

As equações de fluxo de carga convencional passam a ser:

$$P_{Gk}^0 (1 + \lambda \beta_k) - P_{lk}^0 + \lambda [\gamma_k \cdot S_{base} \cdot \cos \psi_k] - g_{pk}(\vec{\theta}, \vec{v}) = 0, \quad (4.1)$$

$$Q_{Gk}^0 - Q_{lk}^0 + \lambda [\gamma_k \cdot S_{base} \cdot \sin \psi_k] - g_{qk}(\vec{\theta}, \vec{v}) = 0, \quad (4.2)$$

sendo

$$k \in \{PV, PQ\}$$

$$g_{pk}(\vec{\theta}, \vec{v}) = V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km})$$

$$g_{qk}(\vec{\theta}, \vec{v}) = V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$

As equações (4.1) e (4.2) podem ser expressas da seguinte forma:

$$f(x) = 0, \quad (4.3)$$

sendo

$$\mathbf{x} = [\theta^T \ v^T \ \lambda^T]^T \text{ e } 0 \leq \lambda \leq \lambda_{critico}.$$

Quando $\lambda = 0$, as equações se reduzem às equações de fluxo de potência convencional. E quando $\lambda = \lambda_{critico}$, as equações correspondem à carga crítica.

Etapa de Previsão

A partir da solução do caso base ($\lambda = 0$), uma predição da próxima solução pode ser feita seguindo certo passo na direção do vetor tangente à curva. Esse vetor tangente é obtido derivando-se ambos os lados de (4.3).

$$df(x) = \frac{\partial f(x)}{\partial(\theta)} d\theta + \frac{\partial f(x)}{\partial(v)} dv + \frac{\partial f(x)}{\partial(\lambda)} d\lambda = 0 \quad (4.4)$$

e

$$[F_\theta \ F_v \ F_\lambda] \begin{bmatrix} d\theta \\ dv \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0, \quad (4.5)$$

sendo,

$$F_\theta = \frac{\partial f(x)}{\partial(\theta)}; \quad F_v = \frac{\partial f(x)}{\partial(v)}; \quad F_\lambda = \frac{\partial f(x)}{\partial(\lambda)}.$$

Sabendo-se que o sistema de equações (4.5) tem uma incógnita a mais que o número de equações, é necessário a discriminação de uma das incógnitas como valor especificado para a solução deste sistema. Esta variável é chamada de *parâmetro da continuação*. Logo, se tem as seguintes equações:

$$\begin{bmatrix} F_\theta & F_v & F_\lambda \\ & \vec{e}_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dv \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

sendo

$$\vec{e}_k = [0 \ \dots \ 0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 0].$$

O parâmetro de continuação (\vec{e}_k) deve ser escolhido de modo a possuir a maior taxa de variação próxima da solução em questão. Deste modo, devem-se observar o seguinte:

- Próximo ao case base: grandes variações na carga (λ) implicam em pequenas variações nas componentes de θ e \vec{v} . Logo, λ é escolhido como parâmetro de continuação.
- Próximo ao ponto crítico: pequenas variações na carga (λ) produzem grandes variações em algumas componentes de θ e \vec{v} . Neste caso, deve ser escolhido a

componente de θ ou \vec{v} com maior taxa de variação como parâmetro de continuação.

Após o cálculo do vetor tangente, a previsão da solução é calculada por:

$$\begin{bmatrix} \theta^{p+1} \\ v^{p+1} \\ \lambda^{p+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^p \\ v^p \\ \lambda^p \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ dv \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

onde σ é um escalar que define o tamanho do passo a ser dado na direção do vetor tangente, e p é o passo em que o método se encontra.

Etapa de Correção

Obtida o ponto previsto, se passa para o método de correção da solução aproximada. Logo, o sistema de equações (4.3) é acrescido de uma equação que define o valor da variável escolhida como parâmetro de continuação na etapa de previsão. Neste caso o sistema de equações de fluxo de carga reformuladas é exibido a seguir:

$$\begin{bmatrix} f(\theta, v, \lambda) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = [0], \quad (4.8)$$

sendo k o índice do parâmetro de continuação e η é o valor calculado deste parâmetro na etapa de previsão.

A partir do sistema de equações reformulado (4.8), sua solução pode ser obtida a partir do método de Newton-Raphson (alterado apenas pela adição da equação e uma variável de estado envolvida). Assim se tem o corretor necessário para a modificação da solução obtida na etapa de previsão.

O método da continuação aplicada ao problema de fluxo de potência é descrito segundo o fluxograma a seguir:

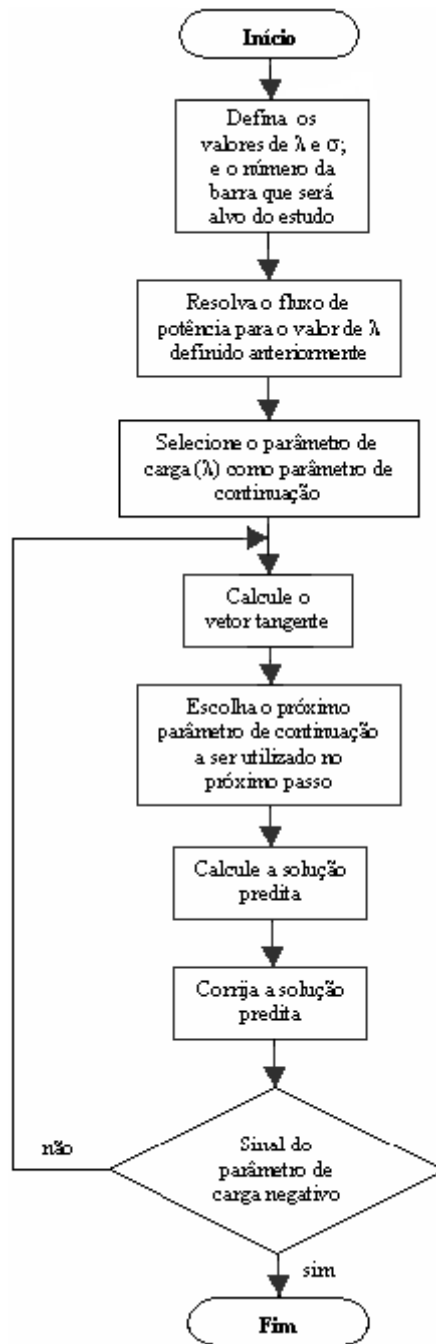


Figura 4.2 – Fluxograma do Método da Continuação Aplicado ao Problema de Fluxo de Potência.

4.2 Exemplo numérico

Para elucidar o Método da Continuação, segue um exemplo numérico onde cada etapa dos cálculos empregados é analisada minuciosamente através da aplicabilidade do método na resolução de uma função de segundo grau, dada por:

$$f(x) = x^2 - 3x$$

Aplicando a derivada primeira na função acima, com a finalidade de encontrar seus pontos extremos, tem-se:

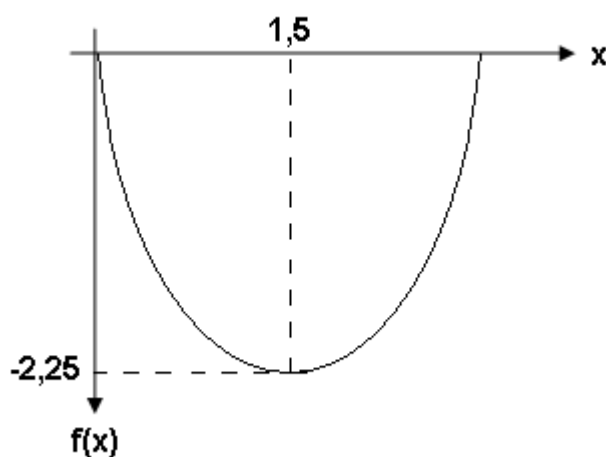


Figura 4.3- Ponto Extremo da Função $f(x)$

Fazendo:

$$x^2 + 3x - f(x) = 0$$

Pode-se introduzir um parâmetro na equação acima a fim de possibilitar a aplicação do método da continuação ao exemplo. Tal parâmetro será o λ , com valor igual a $-f(x)$. Sendo assim, tem-se uma equação em função da variável x e do parâmetro λ da seguinte forma:

$$f(x, \lambda) = x^2 - 3x + \lambda = 0$$

Dessa forma, ao variar qualquer valor do parâmetro λ , o valor da variável x irá variar automaticamente.

De posse da equação, iniciam-se os cálculos referentes ao método da continuação.

Cálculo do Vetor Tangente

Para obter-se uma solução de partida, λ é igualado a zero e resolve-se a função $f(x, \lambda)$, tendo assim $(x_0, \lambda_0) = (3, 0)$.

Com uma solução de partida, realiza-se o cálculo do vetor tangente a essa solução, tomando a primeira derivada da função $f(x, \lambda)$ e igualando a zero:

$$df(x, \lambda) = f_x dx + f_\lambda d\lambda = 0$$

$$df(x, \lambda) = (2x - 3)dx + d\lambda$$

Escolhendo λ como parâmetro de continuação ($k = 2$) e organizando as equações em forma de matriz:

$$\begin{bmatrix} (2x_0 - 3) & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ +1 \end{bmatrix}$$

A variação dada na direção do parâmetro de continuação será aleatória, visto que a sua escolha inicial também foi. A solução do sistema acima, para o ponto inicial de $f(x, \lambda)$ será:

$$\begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ +1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/3 \\ +1 \end{bmatrix}$$

Após o cálculo do vetor tangente, pode-se fazer a escolha do parâmetro de continuação que, nesse caso, poderá apenas ser x ou λ . Pode-se observar através da solução do sistema matricial acima que a maior variação dos componentes do vetor tangente é a de λ , sendo assim escolhido novamente como parâmetro de continuação.

Cálculo da Solução Predita

Nessa etapa é realizado o cálculo para obtenção de um novo ponto que seja solução da função $f(x, \lambda)$, chamado de solução predita. Tal cálculo é realizado através

da seguinte equação:

$$x_1^* = x_0 + \sigma dx$$

$$\lambda_1^* = \lambda_0 + \sigma d\lambda$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} x_1^* \\ \lambda_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix}$$

Com um valor definido de σ igual a 0,5 e com os valores obtidos $dx = -1/3$ e $d\lambda = 1$, tem-se:

$$\begin{bmatrix} x_1^* \\ \lambda_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \end{bmatrix} + 0,5 \cdot \begin{bmatrix} -1/3 \\ 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x_1^* \\ \lambda_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,8333 \\ 0,5 \end{bmatrix}$$

Correção da Solução Preditada

As equações a seguir são utilizadas para possibilitar os cálculos para a correção da solução predita aplicando o método de Newton.

$$g(x) = -J(x) \Delta x \quad \therefore \quad \Delta x = -J^{-1}(x) \cdot g(x)$$

Onde:

$$x = \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix}; \quad g(x) = \begin{bmatrix} f(x, \lambda) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}.$$

Substituindo os valores encontrados nos passos anteriores, tem-se:

$$\begin{bmatrix} f(x_1^*, \lambda_1^*) \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} (2 \cdot x_1^* - 3) & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0,0277 \\ 0 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} 2,6666 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0104 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Uma faixa de convergência é pré-estabelecida, através da equação a seguir:

$$\max\{|\Delta x|, |\Delta \lambda|\} < \varepsilon$$

Para um erro $\varepsilon = 0,0001$, por exemplo, vê-se que ainda não é possível tomar-se os valores de x e de λ como o par de solução final. Dessa forma, a etapa de correção é reiniciada para os valores calculados de x e λ até que alcance um par de soluções onde Δx e $\Delta \lambda$ respeite a faixa de convergência pré-estabelecida.

No momento em que a solução se encontrar dentro da faixa de convergência, a solução corrigida será fixada no ponto $(x_1, \lambda_1) = (2,82287; 0,5)$. De posse desse ponto corrigido, um novo vetor tangente é calculado e o processo seguirá até sua conclusão, onde o ponto de bifurcação identificado será $(1,5; 2,25)$.

A figura 4.4 ilustra o processo da continuação do exemplo em questão.

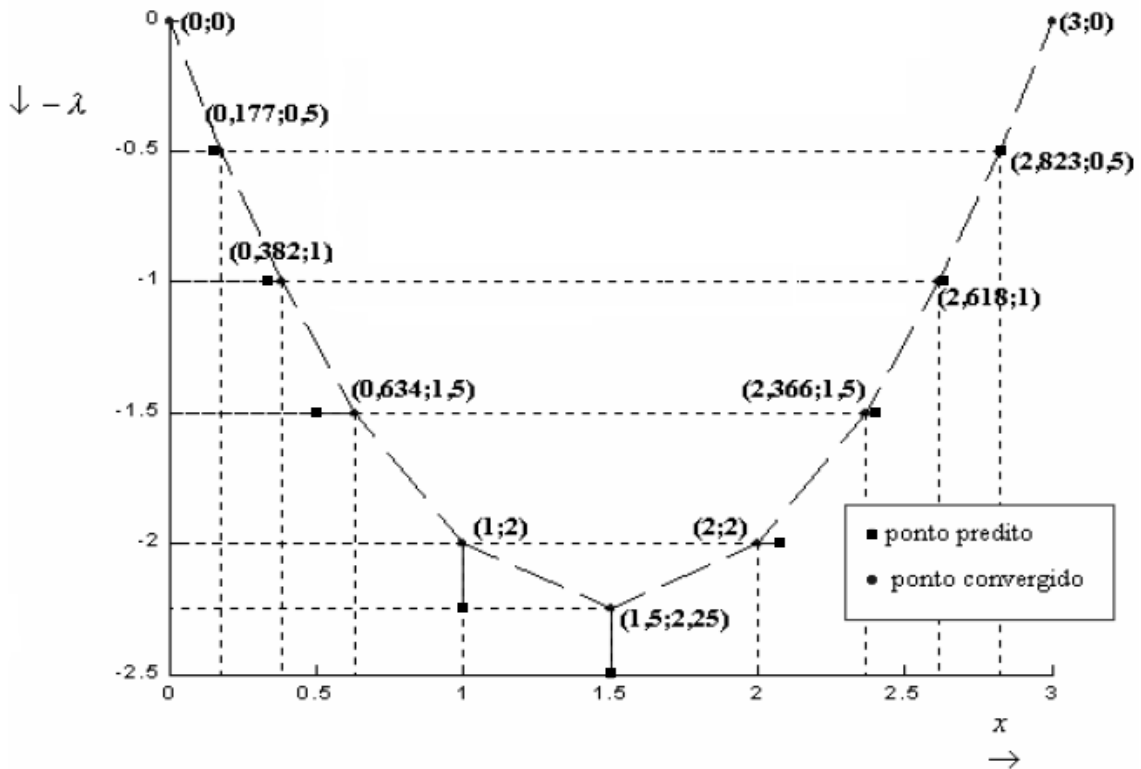


Figura 4.4 - Processo de Continuação

Há de se observar que a partir do ponto $(x_0, \lambda_0) = (2, 2)$, caso o parâmetro de continuação seja mantido como λ , o processo divergirá em qualquer direção que a solução caminhe, devido a singularidade da matriz Jacobiana aumentada no ponto extremo: $\det(J) = 0$. Então, nesse ponto, deve-se fazer uso de uma técnica de parametrização local e escolher x como o novo parâmetro de continuação a prosseguimento do método.

Uma consequência direta da utilização da parametrização, em especial a local, é que, entre o ponto predito e o ponto convergido, o valor da variável x não sofre alteração. À medida que a curva é traçada, as soluções serão sempre únicas enquanto não houver singularidade da matriz Jacobiana.

Para o caso das equações de fluxo de potência, x é um vetor que contém as tensões de barras (V 's) e seus respectivos ângulos (θ 's). Logo, ao se aproximar do ponto de bifurcação a parametrização é realizada escolhendo uma dessas duas variáveis de estado do sistema de potência como parâmetro de continuação.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NO ANAREDE

5.1 Programa de Fluxo de Potência Continuado

O Programa de Fluxo de Potência Continuado, que está contido na Anarede, processa sequencialmente vários casos de fluxo de potência, aumentando a carga de um conjunto de barras de acordo com uma direção especificada. Este programa é utilizado para a determinação das margens de estabilidade de tensão e para análise da variação do perfil de tensão ao crescimento da demanda do sistema. Curvas P-V podem ser obtidas para diferentes cenários de crescimento de carga e geração.

As grandezas a serem monitoradas, durante o incremento automático de carga, são os níveis de tensão em barramentos e a potência ativa e reativa das máquinas síncronas, se for especificado. Para cada incremento de carga, o balanço de potência do sistema é restabelecido entre os geradores de acordo com os respectivos fatores de participação e limites de potência ativa.

O algoritmo utilizado neste programa representa uma automatização do procedimento, comumente utilizado pelos engenheiros, de aplicar sucessivos incrementos de carga (*load level*) de forma a visualizar a trajetória do sistema ou facilitar a convergência do programa de fluxo de potência.

O programa possui uma lógica que se, para um determinado patamar de carga, o programa de fluxo de potência não convergir ou divergir, o último caso convergido é restabelecido (correspondendo a um nível de carga menor) e um novo incremento de carga, menor que utilizado até então, é aplicado.

O Programa possui quatro critérios de parada:

- Quando o número máximo de problemas de fluxo potência resolvido é atingido, aqui utilizaremos 30.
- Quando o máximo incremento de carga é atingido, aqui não tem limite.
- Quando o incremento de carga a ser aplicado em uma barra do sistema é menor que o especificado que é de 0,05%.

- Quando o programa de fluxo de potência deixar de encontrar solução, consecutivamente, mais do que o especificado 5.

Durante a execução do programa, alguns arquivos são automaticamente criados, como por exemplo: o arquivo *PV.PLT*, que contém os pontos P-V das barras monitoradas, e que as curvas podem ser visualizadas graficamente através do programa Plot CEPEL, distribuído com o Programa Anarede.

Sendo assim os dados básicos para a execução do Programa de Fluxo de Potência Continuado são a direção do incremento de carga, e as barras que tem a tensão permanentemente monitorada durante o processo de incremento de carga.

5.2 Resultados das Análises

Nesse trabalho, considerou-se o aumento de carga com passo inicial 10% distribuído em todas as barras PQ, mantendo-se o fator de potência constante, e também a aplicação de algumas contingências nos sistemas estudados. O método utilizado para a solução das equações é o método de Newton, que está embutido no Anarede.

Por contingência entende-se a saída de equipamentos tais como geradores, linhas de transmissão, transformadores, etc. Tem por objetivo simular os seus comportamentos operativos em face às essas possíveis falhas e assim possibilitar estudos preventivos de operação.

De posse do ponto de operação e as contingências que serão aplicadas, é feita a análise e avaliação do ponto de operação gerado. Aplicadas as contingências ao ponto de operação é avaliado o máximo carregamento do sistema quanto ao atendimento dos requisitos específicos com as contingências aplicadas ao cenário que o ponto de operação descreve.

Caso exista apenas uma contingência em que o máximo carregamento fique abaixo do limite especificado, que é de 5%, o ponto de operação é classificado como inseguro. Sendo assim todas as contingências aplicadas têm que requerer um máximo carregamento acima desses 5% para que o ponto de operação seja classificado como seguro quanto à estabilidade de tensão.

Os sistemas elétricos utilizados para a obtenção das curvas P-V foram o IEEE 14 barras e o IEEE 30 barras. Os dados correspondentes aos sistemas estudados

encontram-se nos anexos I e II.

5.2.1 Sistema IEEE 14 barras

De início foram obtidas todas as curvas P-V para o caso base, como mostra a figura 5.1.

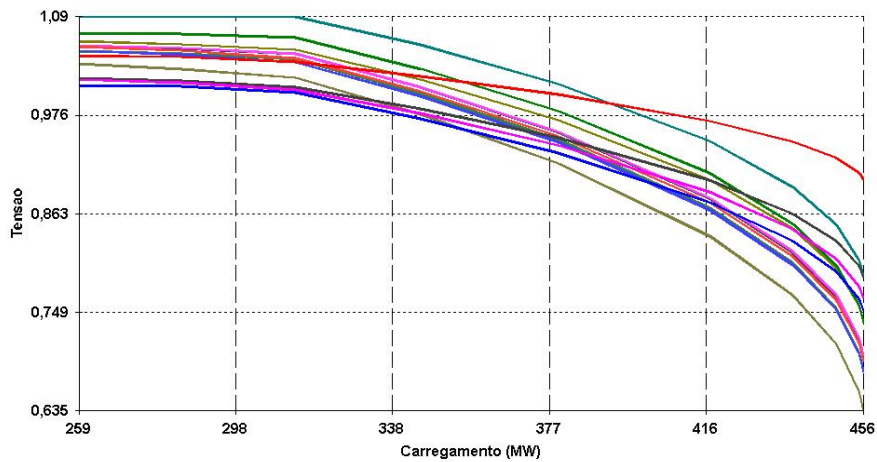


Figura 5.1 – Curva P-V do Sistema IEEE 14 Barras, caso base.

Note que o método de fluxo de carga fornece apenas a solução de alta da curva P-V, mas que isto já é suficiente para se determinar a margem de tensão do sistema, bem como a barra crítica.

A barra crítica pode ser identificada pelo seu perfil de tensão. Nesse caso, a barra 14 por apresentar a menor tensão, corresponde à barra crítica do sistema. O valor da margem de estabilidade de tensão foi calculado como sendo 197 MW, ou aproximadamente 76,1%.

Na figura 5.2 mostra curvas P-V que levaram em consideração contingências nas linhas 1-5 e 9-14.

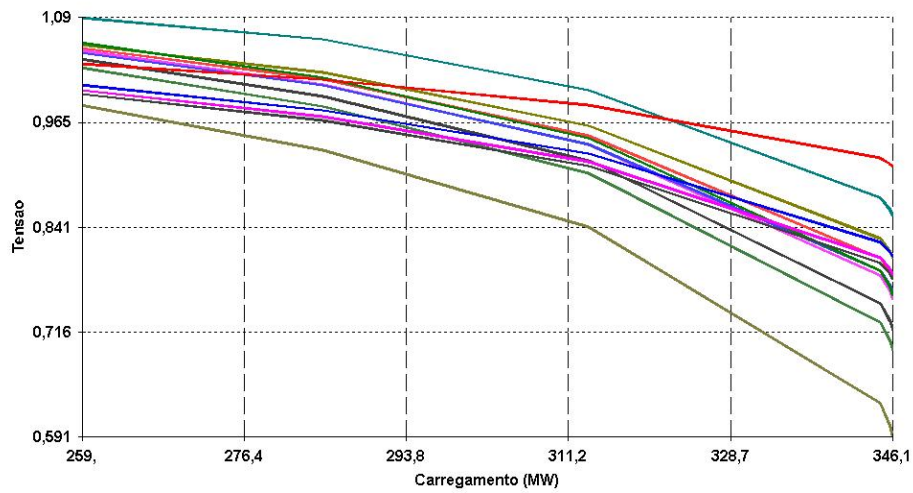


Figura 5.2 – Curva P-V do Sistema IEEE 14 Barras, considerando Contingências nas linhas 1-5 e 9-14.

Analisando a figura 5.2, percebe-se uma redução significativa na margem de estabilidade de tensão, conduzindo-a 87,1 MW. Note que apesar da redução de mais 100 MW, a margem ainda mantém valores elevados (cerca de 33,63%), em função do sistema possuir uma folga na capacidade de transmissão, ser muito grande.

Ainda considerando contingências, com a exclusão do gerador da barra 2, obtém as curvas P-V da figura 5.3.

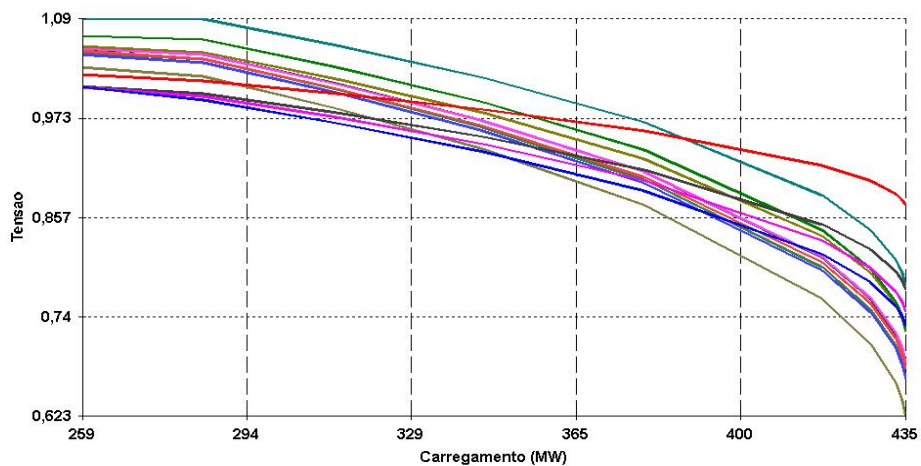


Figura 5.3 – Curva P-V do Sistema IEEE 14 Barras, considerando Contingência no gerador da barra 2.

A margem de estabilidade de tensão da figura 5.3 é de 176 MW, ou 67,95%. Mais uma vez percebe-se que seria encontrado um ponto de operação estável, mesmo que fosse perdido um gerador importante para o sistema.

5.2.2 Sistema IEEE 30 barras

Nesse tópico iremos colocar só as figuras com as Curvas P-V e seus respectivos casos e no final uma tabela mostrando a margem de estabilidade de cada um.

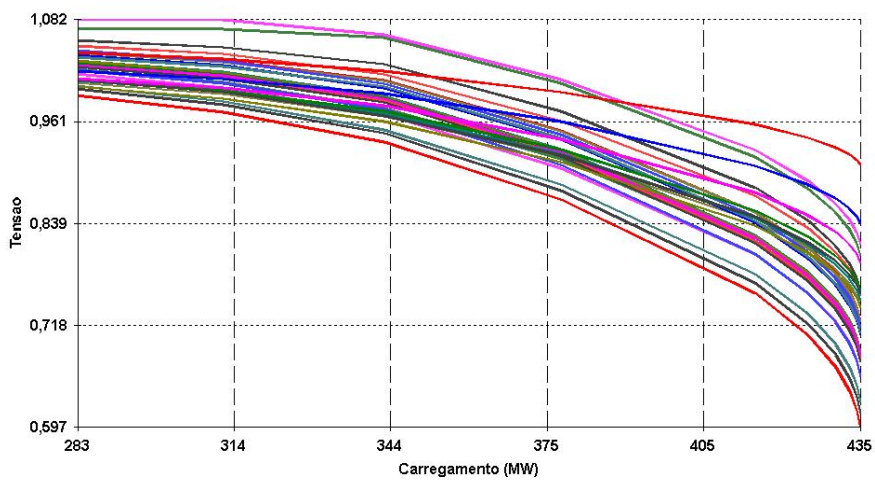


Figura 5.4 – Curva P-V do Sistema IEEE 30 Barras, caso base.

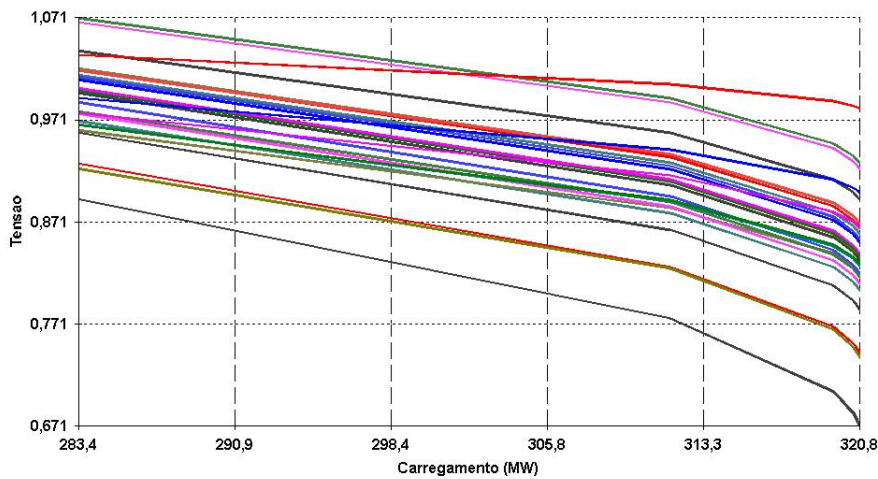


Figura 5.5 – Curva P-V do Sistema IEEE 30 Barras, considerando Contingências nas linhas 2-5, 8-28 e 29-30.

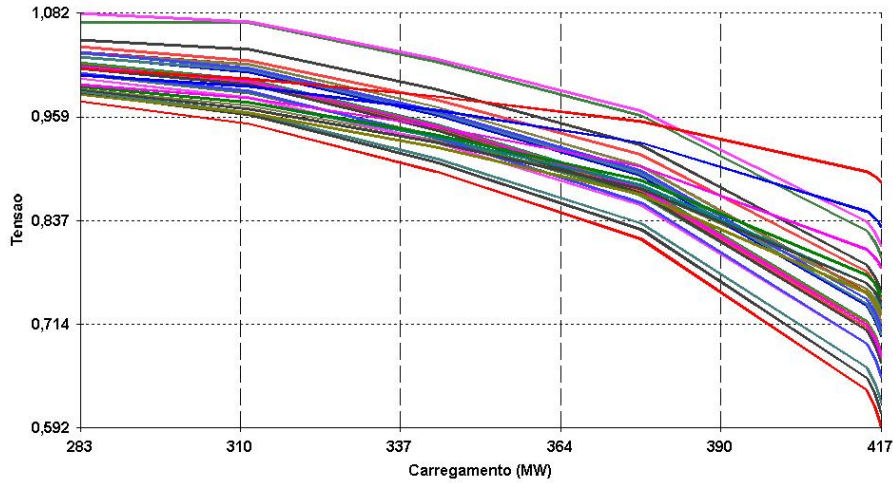


Figura 5.6 – Curva P-V do Sistema IEEE 30 Barras, considerando Contingência no gerador da barra 2.

Tabela 5.1 – Resultados das análises do IEEE 30 Barras

| Figura | P_{op} (MW) | $P_{máx}$ (MW) | Margem de estabilidade (MW) | Porcentagem (%) |
|---------------|---------------|----------------|------------------------------------|------------------------|
| 5.4 | 283 | 435 | 152 | 53,71 |
| 5.5 | 283,4 | 320,8 | 37,4 | 13,20 |
| 5.6 | 283 | 417 | 134 | 47,35 |

Como podemos observar pela tabela 5.1 que as porcentagens das margens de estabilidade ficaram acima de 5%, pois o sistema possui uma folga na capacidade de transmissão muito grande e com isso os pontos obtidos são considerados seguros.

A barra crítica do caso base da figura 5.4 é a barra 30 (em vermelho) com uma tensão de 0,597 pu, que é a menor de tensão do sistema.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Os sistemas para a análise das curvas P-V foram o IEEE 14 Barras e IEEE 30 Barras. Nesses sistemas foi explorado o aumento de carga distribuído em todas as barras PQ, mantendo-se o fator de potência constante, e também a aplicação de algumas contingências como, retiradas de linhas e gerador nos sistemas estudados, para a obtenção das curvas.

A classificação de cada ponto de operação em seguro ou inseguro foi feita observando se o sistema atendeu ao carregamento máximo exigido para todas as contingências aplicadas. A exigência foi de 5% acima do carregamento máximo para ser considerado seguro. Se pelo menos uma contingência aplicada a cada ponto de operação o levasse a operar abaixo da exigência imposta, tal ponto foi considerado inseguro.

A barra crítica foi obtida pelo relatório de monitoração tensão das curvas P-V, que é a barra que possui menor tensão devida alguma modificação no sistema.

Desta forma o estudo de estabilidade de tensão através de curvas P-V ainda é uma ferramenta de grande importância para a obtenção do grau de segurança em que um sistema está operando.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KUNDUR, P. et al., Definition and Classification of Power System Stability, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 19, No. 2, pp. 1387-1401, May 2004.
- [2] KUNDUR, P., Morison, G. K., A Review Of Definitions And Classification Of Stability Problems In Today'S Power Systems, IEEE Pes Meeting, New York, Feb., 1997.
- [3] KUNDUR, P., Power System Stability And Control, Palo Alto, California, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [4] KUNDUR, P., General Introduction and Basic Concepts of Voltage Stability Analysis, IEEE PES Summer Meeting, IEEE Special Tutorial Course: Voltage Stability, San Diego, California, USA, 1998.
- [5] TAYLOR, C. W., Power System Voltage Stability. Palo Alto, California, USA: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [6] SAUER, P. W., PAI, M. A. Power system steady-state stability and the load-flow Jacobian. IEEE Transactions on Power Systems, v.5, n.4, p.1374-1383, nov. 1990.
- [7] MORISON, G. K., GAO, B., KUNDUR, P. Voltage stability analysis using static and dynamic approaches. IEEE Transactions on Power Systems, v.8, n.3, p.1159-1171, aug. 1993.
- [8] SOUZA, A. C. Z., New techniques to efficiently determine proximity to static voltage collapse, PhD thesis, University of Waterloo, Waterloo, 1995.
- [9] CLARK, H. K., New challenge: Voltage Stability. IEEE Power Engineering Review, apr. 1990.
- [10] PRADA, R. B., PESSANHA, J. E. O. Um programa computacional para análise e ilustração do fenômeno de estabilidade de tensão. Anais do XII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Recife, 1993.
- [11] Sodré, E., (2006). “Avaliação da Estabilidade de Tensão através das Técnicas de Inteligência Artificial”, Tese de Doutorado – UFCG, Campina Grande – PB, Abril de 2006.
- [12] Manual do usuário do Programa de Análise de Redes (ANAREDE) do Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL.

APÊNDICE I

DETERMINAÇÃO DA TENSÃO E DA POTÊNCIA ATIVA EM UMA BARRA DE CARGA

O circuito equivalente de uma fonte infinita alimentando uma carga variável $P + jQ$ através de uma linha de transmissão pode ser ilustrado conforme a Figura I.1.

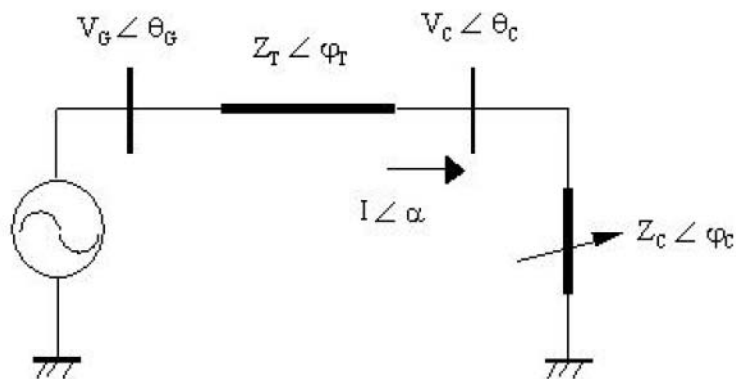


Figura I.1 - Circuito equivalente para o sistema em análise.

Onde:

$$Z_T \angle \varphi_T = Z_T \cos(\varphi_T) + j Z_T \sin(\varphi_T) \quad (I.1)$$

$$Z_C \angle \varphi_C = Z_C \cos(\varphi_C) + j Z_C \sin(\varphi_C) \quad (I.2)$$

Fazendo-se:

$$Z \angle \varphi = Z_T \angle \varphi_T + Z_C \angle \varphi_C \quad (I.3)$$

$$Z \angle \varphi = [Z_T \cos(\varphi_T) + Z_C \cos(\varphi_C)] + j [Z_T \sin(\varphi_T) + Z_C \sin(\varphi_C)] \quad (I.4)$$

Então:

$$Z = \sqrt{Z_T^2 + 2 \cdot Z_T \cdot Z_C \cdot \cos(\varphi_T - \varphi_C) + Z_C^2} \quad (I.5)$$

Assim sendo, a expressão para o módulo da corrente é dada por:

$$I = \frac{V_G}{Z} \quad (I.6)$$

Então:

$$I = \frac{V_G}{\sqrt{Z_T^2 + 2 \cdot Z_T \cdot Z_C \cdot \cos(\varphi_T - \varphi_C) + Z_C^2}} \quad (I.7)$$

Como:

$$V_C = I \cdot Z_C \quad (I.8)$$

O módulo da tensão na barra de carga será dado por:

$$V_C = \frac{V_G \cdot Z_C}{\sqrt{Z_T^2 + 2 \cdot Z_T \cdot Z_C \cdot \cos(\varphi_T - \varphi_C) + Z_C^2}} \quad (I.9)$$

E para a potência ativa da carga tem-se:

$$P = V_C \cdot I \cdot \cos(\varphi_C) \quad (I.10)$$

Então:

$$P = \frac{V_G^2 \cdot Z_C \cdot \cos(\varphi_C)}{Z_T^2 + 2 \cdot Z_T \cdot Z_C \cdot \cos(\varphi_T - \varphi_C) + Z_C^2} \quad (I.11)$$

Variando-se Z_C de infinito à zero, ou seja, variando a carga de circuito aberto a curto-circuito, pode-se obter os diversos valores de tensão e potência ativa na carga para um fator de potência (φ_C) constante. Repetindo-se o processo para outros valores de φ_C pode-se obter uma curva P-V para cada fator de potência da carga.

Como o carregamento máximo ocorre quando o módulo da impedância da carga é igual ao módulo da impedância da linha de transmissão, ao fazer $Z_C = Z_T$ nas equações I.9 e I.11, são obtidas as seguintes expressões para o módulo da tensão crítica na barra de carga e a correspondente carga ativa máxima, para cada fator de potência:

$$V_{\text{CRIT}}(\varphi_C) = \frac{V_G}{2 \cdot \cos \frac{\varphi_T - \varphi_C}{2}} \quad (\text{I.12})$$

$$P_{\text{MAX}}(\varphi_C) = \frac{V_G^2 \cdot \cos(\varphi_C)}{2 \cdot Z_T \cdot [1 + \cos(\varphi_L - \varphi_C)]} \quad (\text{I.13})$$

Variando-se o fator de potência obtém-se o lugar geométrico dos pontos críticos.

ANEXO I

DADOS DO SISTEMA IEEE 14 BARRAS

Apresenta-se a seguir os dados correspondentes ao sistema IEEE 14 barras no formato de uso no ANAREDE.

```

IEEE141.pwf 27/4/2009 14:09
1 TITU
2 IEEE 14 Bus Test Case - Winter 1962
3 DBAR
4 (Num)OETGb( nome )Gl( V) ( A) ( Pg) ( Qg) ( Qn) ( Qm) (Bc ) ( Pl) ( Ql) ( Sh)Are(Vf)
5 1 2 Barra-01--HV 1060 0.0232.4-16.9 1 1
6 2 1 Barra-02--HV 1045-4.9 40.0 42.4-40.0 50.0 2 21.7 12.7 1
7 3 1 Barra-03--HV 1010-12. 0.0 23.4 0.0 40.0 3 94.2 19.0 1
8 4 0 Barra-04--HV 1019-10. 47.8 -3.9 1
9 5 0 Barra-05--HV 1020-8.7 7.6 1.6 1
10 6 1 Barra-06--LV 1070-14. 0.0 12.2 -6.0 24.0 6 11.2 7.5 1
11 7 0 Barra-07--ZV 1062-13. 1
12 8 1 Barra-08--TV 1090-13. 0.0 17.4 -6.0 24.0 8 1
13 9 0 Barra-09--LV 1056-14. 29.5 16.6 19.0 1
14 10 0 Barra-10--LV 1051-15. 9.0 5.8 1
15 11 0 Barra-11--LV 1057-14. 3.5 1.8 1
16 12 0 Barra-12--LV 1055-15. 6.1 1.6 1
17 13 0 Barra-13--LV 1050-15. 13.5 5.8 1
18 14 0 Barra-14--LV 1036-16. 14.9 5.0 1
19 99999
20 DLIN
21 (De )d O d(Pa )NcBP ( R% ) ( X% ) (Mvar) (Tap) (Tmn) (Tmx) (Phs) (Bc ) (Cn) (Ce)Ns
22 1 2 1 1.938 5.917 5.28
23 1 5 1 5.40322.304 4.92
24 2 3 1 4.69919.797 4.38
25 2 4 1 5.81117.632 3.40
26 2 5 1 5.69517.388 3.46
27 3 4 1 6.70117.103 1.28
28 4 5 1 1.335 4.211
29 4 7 1 0.00020.912 0.978
30 4 9 1 0.00055.618 0.969
31 5 6 1 0.00025.202 0.932
32 6 11 1 9.49819.890
33 6 12 1 12.29125.581
34 6 13 1 6.61513.027
35 7 8 1 0.00017.615
36 7 9 1 0.00011.001
37 9 10 1 3.181 8.450
38 9 14 1 12.71127.038
39 10 11 1 8.20519.207
40 12 13 1 22.09219.988
41 13 14 1 17.09334.802
42 99999
43 FIM
44

```


ANEXO II

DADOS DO SISTEMA IEEE 30 BARRAS

IEEE30.PWF

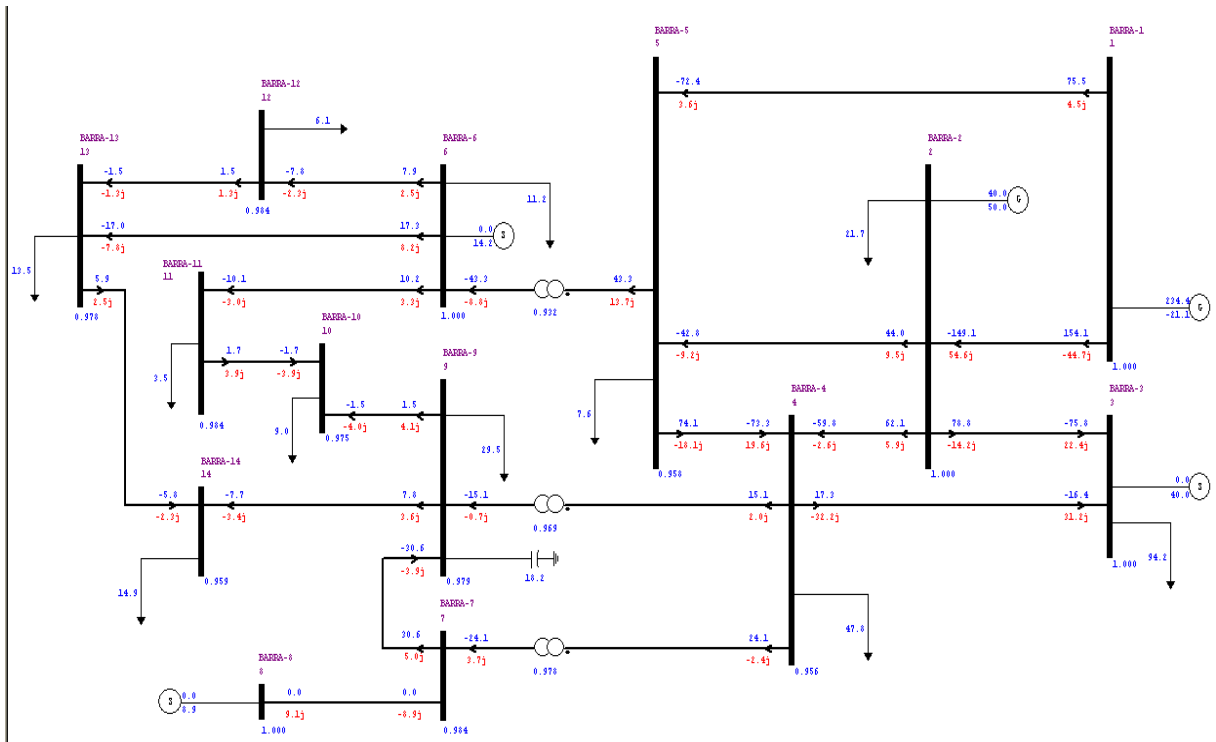
27/4/2009 14:10

```

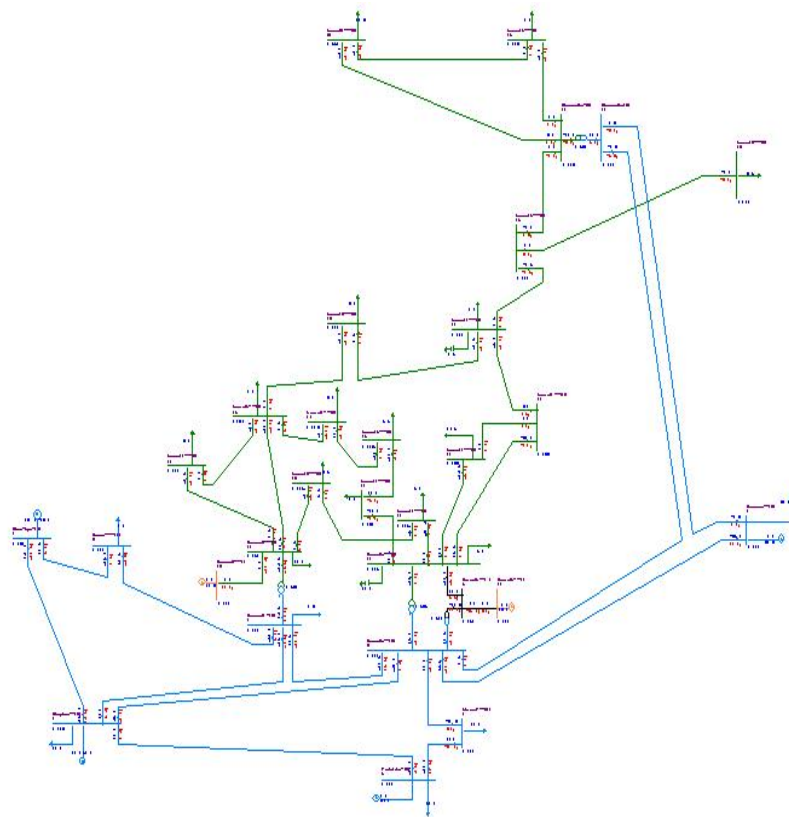
1 TITU
2 IEEE 30 Bus Test Case - Winter 1961
3 DBAR
4 (Num)OETGb( nome )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)( Bc )( Pl)( Ql)( Sh)Are(Vf)
5 1 L2 AGlen-Lyn-132 1060 0.260.2-16.1-999999999 11000
6 2 L1 AClaytor---132 1043 -5. 40. 50. -40. 50. 21.7 12.7 11000
7 3 L AKumis----132 1021 -7. 2.4 1.2 11000
8 4 L AHancock -132 1012 -9. 7.6 1.6 11000
9 5 L1 AFieldale-132 1010-14. 0. 37. -40. 40. 94.2 19. 11000
10 6 L ARoanoke---132 1010-11. 11000
11 7 L ABlaine---132 1002-13. 22.8 10.9 11000
12 8 L1 AReusens--132 1010-12. 0. 37.3 -10. 40. 30. 30. 11000
13 9 L ZRoanoke--1.0 1051-14. 11000
14 10 L TRoanoke---33 1045-15. 5.8 2. 19. 11000
15 11 L1 SRoanoke---11 1082-14. 0. 16.2 -6. 24. 11000
16 12 L THancock---33 1057-15. 11.2 7.5 11000
17 13 L1 SHancock---11 1071-15. 0. 10.6 -6. 24. 11000
18 14 L TBarral4---33 1042-16. 6.2 1.6 11000
19 15 L TBarral5---33 1038-16. 8.2 2.5 11000
20 16 L TBarral6---33 1045-15. 3.5 1.8 11000
21 17 L TBarral7---33 1040-16. 9. 5.8 11000
22 18 L TBarral8---33 1028-16. 3.2 .9 11000
23 19 L TBarral9---33 1026-17. 9.5 3.4 11000
24 20 L TBarra20---33 1030-16. 2.2 .7 11000
25 21 L TBarra21---33 1033-16. 17.5 11.2 11000
26 22 L TBarra22---33 1033-16. 11000
27 23 L TBarra23---33 1027-16. 3.2 1.6 11000
28 24 L TBarra24---33 1021-16. 8.7 6.7 4.3 11000
29 25 L TBarra25---33 1017-16. 11000
30 26 L TBarra26---33 1000-16. 3.5 2.3 11000
31 27 L TClverdle-33 1023-15. 11000
32 28 L AClverdle132 1007-11. 11000
33 29 L TBarra29---33 1003-17. 2.4 .9 11000
34 30 L TBarra30---33 992-17. 10.6 1.9 11000
35 99999
36 DLIN
37 (De) d O d(Pa) NcEP ( R8 ) ( X8 ) (Mvar) (Tap) (Tmn) (Tmx) (Phs) (Bc ) (Cn) (Ce)Ns
38 1 2 1 1.92 5.75 5.28
39 1 3 1 4.52 16.52 4.08
40 2 4 1 5.7 17.37 3.68
41 2 5 1 4.72 19.83 4.18
42 2 6 1 5.81 17.63 3.74
43 3 4 1 1.32 3.79 .84
44 4 6 1 1.19 4.14 .9
45 4 12 1 25.6 .932
46 5 7 1 4.6 11.6 2.04
47 6 7 1 2.67 8.2 1.7
48 6 8 1 1.2 4.2 .9
49 6 9 1 20.8 .978
50 6 10 1 55.6 .969
51 6 28 1 1.69 5.99 1.3
52 8 28 1 6.36 20. 4.28
53 9 10 1 11.
54 9 11 1 20.8
55 10 17 1 3.24 8.45
56 10 20 1 9.36 20.9
57 10 21 1 3.48 7.49
58 10 22 1 7.27 14.99
59 12 13 1 14.
60 12 14 1 12.31 25.59
61 12 15 1 6.62 13.04
62 12 16 1 9.45 19.87
63 14 15 1 22.1 19.97
64 15 18 1 10.73 21.85
65 15 23 1 10. 20.2
66 16 17 1 5.24 19.23
67 18 19 1 6.39 12.92
68 19 20 1 3.4 6.8
69 21 22 1 1.16 2.36
70 22 24 1 11.5 17.9
71 23 24 1 13.2 27.

```

| | | | | | | |
|----|----------|----|---|-------|-------|------|
| 72 | 24 | 25 | 1 | 18.85 | 32.92 | |
| 73 | 25 | 26 | 1 | 25.44 | 38. | |
| 74 | 25 | 27 | 1 | 10.93 | 20.87 | |
| 75 | 27 | 29 | 1 | 21.98 | 41.53 | |
| 76 | 27 | 30 | 1 | 32.02 | 60.27 | |
| 77 | 28 | 27 | 1 | | 39.6 | .968 |
| 78 | 29 | 30 | 1 | 23.99 | 45.33 | |
| 79 | 99999 | | | | | |
| 80 | DGBT | | | | | |
| 81 | (G (kV) | | | | | |
| 82 | A 132. | | | | | |
| 83 | T 33. | | | | | |
| 84 | S 11. | | | | | |
| 85 | Z 1. | | | | | |
| 86 | 99999 | | | | | |
| 87 | FIM | | | | | |
| 88 | | | | | | |



Sistema IEEE 14 Barras



Sistema IEEE 30 Barras

IEEE 14 Bus Test Case - Winter 1962
 MONITORACAO DE TENSÃO

| NUM. | BARRA NOME | ARE | TENSÃO MIN | TENSÃO MOD. | TENSÃO MAX | VIOLACAO (PU) | SHUNT (Mvar) | SEVERIDADE |
|------|--------------|-----|------------|-------------|------------|---------------|--------------|------------|
| 8 | Barra-08--TV | 1 | 0.800 | 0.792 | 1.200 | -0.008 | | * |
| 5 | Barra-05--HV | 1 | 0.800 | 0.791 | 1.200 | -0.009 | | * |
| 4 | Barra-04--HV | 1 | 0.800 | 0.766 | 1.200 | -0.034 | | **** |
| 3 | Barra-03--HV | 1 | 0.800 | 0.752 | 1.200 | -0.048 | | ***** |
| 7 | Barra-07--ZV | 1 | 0.800 | 0.739 | 1.200 | -0.061 | | ***** |
| 6 | Barra-06--LV | 1 | 0.800 | 0.739 | 1.200 | -0.061 | | ***** |
| 11 | Barra-11--LV | 1 | 0.800 | 0.700 | 1.200 | -0.100 | | ***** |
| 12 | Barra-12--LV | 1 | 0.800 | 0.697 | 1.200 | -0.103 | | ***** |
| 9 | Barra-09--LV | 1 | 0.800 | 0.694 | 1.200 | -0.106 | 19.00 | ***** |
| 13 | Barra-13--LV | 1 | 0.800 | 0.682 | 1.200 | -0.118 | | ***** |
| 10 | Barra-10--LV | 1 | 0.800 | 0.681 | 1.200 | -0.119 | | ***** |
| 14 | Barra-14--LV | 1 | 0.800 | 0.636 | 1.200 | -0.164 | | *****+ |

----- IND SEVER. 980.3 -----

IEEE 30 Bus Test Case - Winter 1961
 MONITORACAO DE TENSÃO

| NUM. | BARRA NOME | ARE | TENSÃO MIN | TENSÃO MOD. | TENSÃO MAX | VIOLACAO (PU) | SHUNT (Mvar) | SEVERIDADE |
|------|---------------|-----|------------|-------------|------------|---------------|--------------|------------|
| 4 | Hancock -132 | 1 | 0.800 | 0.794 | 1.200 | -0.006 | | * |
| 6 | Roanoke--132 | 1 | 0.800 | 0.761 | 1.200 | -0.039 | | **** |
| 12 | Hancock---33 | 1 | 0.800 | 0.760 | 1.200 | -0.040 | | ***** |
| 5 | Fieldale-132 | 1 | 0.800 | 0.756 | 1.200 | -0.044 | | ***** |
| 9 | Roanoke--1.0 | 1 | 0.800 | 0.754 | 1.200 | -0.046 | | ***** |
| 8 | Reusens--132 | 1 | 0.800 | 0.749 | 1.200 | -0.051 | | ***** |
| 28 | Cloverdle132 | 1 | 0.800 | 0.741 | 1.200 | -0.059 | | ***** |
| 7 | Blaine---132 | 1 | 0.800 | 0.740 | 1.200 | -0.060 | | ***** |
| 16 | Barral6---33 | 1 | 0.800 | 0.724 | 1.200 | -0.076 | | ***** |
| 14 | Barral4---33 | 1 | 0.800 | 0.723 | 1.200 | -0.077 | | ***** |
| 10 | Roanoke---33 | 1 | 0.800 | 0.717 | 1.200 | -0.083 | 19.00 | ***** |
| 15 | Barral5---33 | 1 | 0.800 | 0.710 | 1.200 | -0.090 | | ***** |
| 17 | Barral7---33 | 1 | 0.800 | 0.708 | 1.200 | -0.092 | | ***** |
| 22 | Barral22---33 | 1 | 0.800 | 0.688 | 1.200 | -0.112 | | ***** |

IEEE 30 Bus Test Case - Winter 1961
 MONITORACAO DE TENSÃO

| NUM. | BARRA NOME | ARE | TENSÃO MIN | TENSÃO MOD. | TENSÃO MAX | VIOLACAO (PU) | SHUNT (Mvar) | SEVERIDADE |
|------|--------------|-----|------------|-------------|------------|---------------|--------------|------------|
| 21 | Barra21---33 | 1 | 0.800 | 0.687 | 1.200 | -0.113 | | ***** |
| 20 | Barra20---33 | 1 | 0.800 | 0.684 | 1.200 | -0.116 | | ***** |
| 18 | Barral8---33 | 1 | 0.800 | 0.683 | 1.200 | -0.117 | | ***** |
| 27 | Cloverdle-33 | 1 | 0.800 | 0.681 | 1.200 | -0.119 | | ***** |
| 23 | Barra23---33 | 1 | 0.800 | 0.679 | 1.200 | -0.121 | | ***** |
| 19 | Barral9---33 | 1 | 0.800 | 0.675 | 1.200 | -0.125 | | ***** |
| 25 | Barra25---33 | 1 | 0.800 | 0.659 | 1.200 | -0.141 | | *****+ |
| 24 | Barra24---33 | 1 | 0.800 | 0.658 | 1.200 | -0.142 | 4.30 | *****+ |
| 29 | Barra29---33 | 1 | 0.800 | 0.628 | 1.200 | -0.172 | | *****+ |
| 26 | Barra26---33 | 1 | 0.800 | 0.614 | 1.200 | -0.186 | | *****+ |
| 30 | Barra30---33 | 1 | 0.800 | 0.597 | 1.200 | -0.203 | | *****+ |

----- IND SEVER. 2949.6 -----