
ESQUEMAS ALTERNATIVOS PARA O PASSO DE PARAMETRIZAÇÃO DO MÉTODO DA CONTINUAÇÃO BASEADOS EM PARÂMETROS FÍSICOS

D.A. Alves*

L.C.P. da Silva†

C. A. Castro†

V.F. da Costa†

*UNESP - Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Brasil, 56, C.P. 31, 15385-000 Ilha Solteira, Brasil

†UNICAMP - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, C.P. 6101, 13083-970, Campinas, Brasil

ABSTRACT

The conventional load flow method is considered to be inadequate to obtain the maximum loading point (MLP) of power systems, due to the singularity of Jacobian matrix. Continuation methods are efficient tools for solving this kind of problem, since parameterizations techniques can be used to avoid such singularities. In this paper new options for the parameterization step are presented. It is shown that variables with clear physical meaning can be utilized to parameterize the power flow equations. The following variables have been tested: total real and reactive power losses, real and reactive power at the slack bus, reactive power at generator buses, and transmission line real and reactive power losses. The proposed parameterization schemes simplify the implementation of a continuation power flow, and make it easier for power engineers to understand its mathematical definition, since it uses physically meaningful parameters rather than purely mathematical and complex variables. Results obtained with the new parameterization techniques for the IEEE test systems (14, 30, 57 and 118 buses) show that the convergence characteristics of the conventional power flow method are improved

at the MLP vicinity. In addition, it is shown that the proposed parameters can be switched during the tracing of the PV curve in order to efficiently determine all its points with few iterations. Several tests are carried out to compare the performance of the proposed parameterization schemes for the continuation load flow method.

KEYWORDS: Continuation Methods, Voltage Collapse, Load Flow, Multiple Solutions, Maximum Loading Point.

RESUMO

O método de fluxo de carga convencional é considerado inadequado para se obter o ponto de máximo carregamento (PMC) de sistemas de potência, devido à singularidade da matriz Jacobiana neste ponto. Os métodos da continuação são ferramentas eficientes para a solução deste tipo de problema, visto que técnicas de parametrização podem ser utilizadas para evitar a singularidade da matriz Jacobiana. Neste trabalho, novas opções para a etapa de parametrização do método da continuação são apresentadas. Mostra-se que variáveis com claro significado físico podem ser utilizadas na etapa de parametrização. As seguintes variáveis foram testadas: perda total de potência ativa e reativa, potência ativa e reativa na barra de referência, potência reativa das barras

Artigo submetido em 12/12/00

1a. Revisão em 22/11/01

Aceito sob recomendação do Ed. Assoc. Prof. José Luiz R. Pereira

de geração, e as perdas de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão (LT). Além de facilitar a implementação computacional do método de continuação, as técnicas de parametrização apresentadas simplificam a definição matemática e o entendimento do método por parte de engenheiros de potência, visto que os métodos de continuação existentes na literatura sempre utilizam técnicas de parametrização complexas, e de interpretação puramente geométrica. Resultados obtidos com a nova metodologia para os sistemas testes do IEEE (14, 30, 57 e 118 barras) mostram que as características de convergência do método de fluxo de carga convencional são melhoradas na região do PMC. Além disso, durante o traçado das curvas PV, as diversas técnicas de parametrização podem ser comutadas entre si possibilitando o cálculo de todos os pontos da curva com um número reduzido de iterações. Diversos testes são realizados para proporcionar a comparação do desempenho dos esquemas de parametrização propostos.

PALAVRAS-CHAVE: Método da Continuação, Colapso de Tensão, Fluxo de Carga, Múltiplas Soluções, Ponto de Máximo Carregamento.

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos estudos nas áreas de planejamento e operação de sistemas elétricos envolvem cálculos de Fluxo de Carga (FC). Entre esses estão a definição das características nominais e do carregamento dos equipamentos, a identificação dos requisitos de suporte de reativos para a manutenção do perfil de tensão em condições normais e de emergência, e, em particular, a análise estática da estabilidade de tensão. Devido ao crescimento contínuo da demanda associado a restrições econômicas e ambientais para a expansão equivalente das capacidades de geração e transmissão, a estabilidade de tensão tem-se tornado uma questão crítica para a operação dos sistemas de potência, já que o sistema passa a operar cada vez mais próximo de seus limites. As equações do FC são essenciais para a análise estática da estabilidade de tensão, já que representam um limite para a região de operação estável. Quando as equações do FC não apresentam solução para uma dada condição de carregamento, conclui-se que a geração e a rede não são fisicamente capazes de suprir esta demanda, exigindo modificações ou no despacho da geração ou na topologia da rede de transmissão, ou em ambas, para que tal demanda possa ser atendida com segurança. Consequentemente, o conhecimento preciso do quão distante o atual ponto de operação se encontra do limite de estabilidade é crucial para o operador, o qual poderá avaliar, por exemplo, se para um dado distúrbio, tais como a saída de uma linha

de transmissão ou uma variação súbita do carregamento do sistema, existirá um ponto de operação factível e seguro para as novas condições.

A análise estática da estabilidade de tensão em sistemas de potência pode ser realizada através da obtenção do perfil de tensão das barras em função de seu carregamento (curvas PV, QV, e SV). Estas curvas possibilitam a compreensão das condições de operação do sistema para diferentes carregamentos, e têm sido recomendadas pelas empresas do setor elétrico nacional (Força Tarefa, 1999) e internacional (WSCC, 1998), para avaliação das margens de estabilidade de tensão. Entre outras aplicações, estes perfis são usados para determinar os limites de transferência de potência entre áreas de um sistema, ajustar margens, observar o comportamento das tensões das barras do sistema em análise, e comparar estratégias de planejamento. Procedimentos automáticos, utilizando método de Newton-Raphson (MNR), vem sendo desenvolvidos para se efetuar estas análises a partir das curvas PV. A solução do FC dependerá das características comuns aos processos de solução de equações algébricas não-lineares, tais como da existência da solução, das múltiplas soluções existentes, do método utilizado na resolução, da existência de singularidades, da estimativa inicial, etc.

Um dos principais objetivos do estudo da estabilidade de tensão em regime permanente é a obtenção do ponto de máximo carregamento (PMC) do sistema. A obtenção do PMC é importante tanto para o cálculo de margens de estabilidade quanto para a realização da análise modal, uma vez que é neste ponto que ela fornece informações para a determinação de medidas efetivas para o reforço do sistema, já que o PMC define a fronteira entre as regiões de operação estável e instável. Problemas de convergência encontrados pelo FC convencional para a obtenção do PMC, é um exemplo claro das dificuldades numéricas relacionadas à singularidade da matriz Jacobiana. Esta instabilidade numérica é observada mesmo com o uso de cálculo com dupla precisão ou de algoritmos anti-divergentes. Isto ocorre porque para sistemas com cargas de potência constante, o aumento gradual de carga conduzirá a uma bifurcação do tipo sela-nó (BSN), que, sob certas condições, corresponde ao PMC. Dessa forma, o PMC está associado com a singularidade da matriz Jacobiana (**J**). Assim sendo, o uso dos métodos convencionais de FC para a obtenção das curvas PV fica restrito à sua parte superior (correspondendo a operação estável). Muito embora o uso de métodos de FC convencional possibilitem o cálculo de pontos de operação muito próximos ao PMC, sempre será necessário ponderar se os problemas de não convergência são devidos a problemas numéricos ou a limitações físicas do sistema.

Em geral, as diferenças não são óbvias.

Cabe observar entretanto, que a singularidade da matriz \mathbf{J} do método de Newton no PMC, devida à redução do *rank* da matriz \mathbf{J} , de n para $n - 1$, não significa que neste ponto (PMC) o sistema não tenha solução. Na realidade ela existe, é única, e bem definida. Portanto, para se obter a solução, é necessário acrescentar a informação perdida com a redução do *rank*. Em geral, isto é feito através do acréscimo de equações parametrizadas (Seydel, 1994). Para carregamentos maiores que o do PMC, no entanto, as equações de FC não têm solução.

Diversos métodos vem sendo propostos para eliminar a singularidade da matriz Jacobiana através da modificação do método de Newton convencional. Na referência (Semlyen *et alii*, 1991) propõe-se a utilização de um parâmetro de carregamento diferente. Escolhe-se aumentar o carregamento através de acréscimos na admitância da carga em todas as barras. Assim, a demanda de potência das cargas é afetada pelas tensões das barras. Esta limitação é superada em (Kataoka, 1992), onde o parâmetro de carregamento depende de uma única tensão de barra (denominada barra piloto). A carga comporta-se como cargas de admitância constante, assegurando assim a eliminação da singularidade de \mathbf{J} no ponto de singularidade ou o seu deslocamento para além do PMC. A convergência do método, no entanto, depende da barra piloto selecionada.

Muito embora as soluções na parte inferior da curva possam não ter significado prático (uma vez que estas correspondem a pontos de operação instáveis), um par de soluções de FC para uma dada condição de carga (uma estável, solução de alta tensão, e uma instável, solução de baixa tensão) pode fornecer informação importante sobre as condições de estabilidade do sistema. Assim, o conhecimento da geometria do espaço de soluções do FC tem motivado uma intensa pesquisa no meio acadêmico, embora ainda não tenha causado grande interesse no setor de energia elétrica. Isto porque o conhecimento de múltiplas soluções pode conduzir não só a melhores técnicas para a obtenção de múltiplas soluções como também a obtenção de melhores índices de proximidade ao colapso de tensão. Diversos índices usados para avaliar as condições de estabilidade de tensão são baseados nestas soluções (Sekine e Yokoyama, 1981; Overbye e Klump, 1996; Yorino *et alii*, 1997; Chen e Wang, 1997).

Métodos da continuação vem sendo utilizados por longa data na análise de sistemas de equações algébricas não-lineares parametrizadas (Seydel, 1994). Mais recentemente foi proposta a sua utilização para o traçado das curvas de carregamento, obtenção de múltiplas soluções

e do ponto de colapso de tensão de sistemas de potência (Iba *et alii*, 1991, Ajarapu e Christy, 1992, Cañizares *et alii*, 1992; Kundur e Gao, 1994; Chiang *et alii*, 1995; Arya96, Bijwe e Tare, 1997; Chiang *et alii*, 1999). Em função de sua crescente utilização na análise de sistemas elétricos, esses métodos já fazem parte de livros textos (Kundur, 1993; Van Cutsen e Vournas, 1998; PSP98). O método de Newton (Ajarapu e Christy, 1992; Cañizares *et alii*, 1992) e o método desacoplado (Bijwe e Tare, 1997) são utilizados para a solução do problema parametrizado. A reformulação das equações do FC visa a eliminação da singularidade da matriz Jacobiana no PMC e, conseqüentemente, dos problemas numéricos que ocorrem em torno deste.

Este trabalho apresenta esquemas alternativos de parametrização para o método da continuação baseado em pequenas modificações do método convencional de Newton. Para evitar os problemas causados pela singularidade da matriz Jacobiana são usadas equações baseadas nas conhecidas equações de perda total de potência ativa ou reativa, na potência ativa ou reativa da barra de referência (ou oscilante), na potência reativa das barras de geração, ou nas perdas de potência ativa ou reativa das linhas de transmissão (LT). A aplicação deste novos esquemas aos sistemas teste do IEEE (14, 30, 57, e 118 barras) mostram que curvas PV completas, e em particular o PMC, podem ser obtidas com a precisão desejada sem qualquer dificuldade numérica.

2 FC USANDO O MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

A idéia básica do fluxo de carga continuado consiste na obtenção de sucessivas soluções de FC objetivando traçar os perfis de tensão a partir de um caso base, até o PMC. Obtém-se, com isso, não só a margem de carregamento, mas também, informações adicionais a respeito do comportamento das tensões das barras do sistema em análise. Em geral as equações de FC podem ser escritas como

$$\mathbf{G}(\mathbf{V}, \theta, \lambda) = \mathbf{0} \quad (1)$$

onde \mathbf{V} é o vetor das magnitudes de tensões nodais, θ é o vetor dos ângulos de fase nodais, λ é o fator de carregamento e \mathbf{G} é um vetor composto pelas equações dos balanços de potências ativa e reativa nodais. A equação (1) pode ser reescrita como

$$\begin{aligned} \lambda \mathbf{P}^{\text{esp}} - \mathbf{P}(\theta, \mathbf{V}) &= \mathbf{0} \\ \lambda \mathbf{Q}^{\text{esp}} - \mathbf{Q}(\theta, \mathbf{V}) &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (2)$$

onde $\mathbf{P}^{\text{esp}} = \mathbf{P}_{\text{gen}} - \mathbf{P}_{\text{carga}}$ é a diferença entre as potências ativas gerada e consumida para as barras de carga (PQ) e de geração (PV), $\mathbf{Q}^{\text{esp}} = \mathbf{Q}_{\text{gen}} - \mathbf{Q}_{\text{carga}}$ para

as barras PQ , e $\lambda = 1$ corresponde ao carregamento do caso base. Para uma barra k qualquer, $\mathbf{P}(\theta, \mathbf{V})$ e $\mathbf{Q}(\theta, \mathbf{V})$ são dados por:

$$P_k(\theta, V) = G_k V_k^2 - V_k \sum_{l \in \Omega_k} V_l (g_{kl} \cos \theta_{kl} + b_{kl} \sin \theta_{kl}),$$

$$k \in PQ, PV$$

$$Q_k(\theta, V) = -B_k V_k^2 - V_k \sum_{l \in \Omega_k} V_l (g_{kl} \sin \theta_{kl} - b_{kl} \cos \theta_{kl}),$$

$$k \in PQ.$$

onde Ω_k é o conjunto de todas as barras diretamente conectadas à barra k . $(G_k + jB_k)$ é o elemento da diagonal (k, k) da matriz admitância nodal e $(g_{kl} + jb_{kl})$ corresponde à admitância série do ramo que conecta as barras k e l . O sistema de equações (2) pressupõe que o carregamento da rede é proporcional ao do caso base e considera o fator de potência constante. \mathbf{P}^{esp} e \mathbf{Q}^{esp} podem ser, respectivamente, definidos como sendo iguais a $(\mathbf{K}_p \mathbf{S} \cos \varphi)^{\text{esp}}$ e $(\mathbf{K}_q \mathbf{S} \sin \varphi)^{\text{esp}}$. Assim, é possível realizar uma variação de carregamento individual, isto é, para cada barra do sistema, considerando para cada uma, um crescimento de carga com fatores de potência diferentes aos do caso base. Tradicionalmente, entretanto, assume-se que o aumento de carga de uma determinada área é feito com fator de potência constante e proporcional ao carregamento do caso base com modelo de carga de potência constante, visto que este fornece a condição operacional mais segura para o sistema (WSCC, 1998).

Tradicionalmente, obtêm-se soluções sucessivas de (2) pelo método de Newton convencional através da variação de λ . Neste caso λ é tratado como variável independente no processo iterativo de Newton. Entretanto, nos métodos da continuação, λ é considerado como variável dependente. Nesse caso, o sistema de equações (2), cuja dimensão é $n = 2n_{PQ} + n_{PV}$, onde n_{PQ} e n_{PV} correspondem ao número de barras PQ e PV , respectivamente, passa a ter $n + 1$ incógnitas. A diferença entre os métodos da continuação está na forma de tratar esta nova variável e em como contornar a singularidade de \mathbf{J} . Para a obtenção de curvas PV, a adição de equações parametrizadas é um procedimento padrão (Seydel, 1994). A parametrização fornece uma forma de identificar cada solução ao longo da trajetória a ser obtida. Entre os diversos métodos de fluxo de carga continuados descritos na literatura, o mais amplamente utilizado consiste de quatro elementos básicos: um passo preditor, um procedimento de parametrização, um controle de passo, e um passo corretor.

2.1 Passo Preditor e Parametrização

Uma vez que a solução da equação (1) para o caso base tenha sido encontrada ($\mathbf{V}_0, \theta_0, \lambda_0 = 1$) pelo método convencional de FC, um método da continuação pode ser usado para calcular soluções adicionais até que o PMC seja alcançado. Primeiro, um passo preditor é executado para encontrar uma estimativa para a próxima solução. Entre as diversas técnicas de previsão diferentes encontradas na literatura a do preditor secante (Chiang *et alii*, 1995) e a do preditor tangente (Ajjarapu e Christy, 1992) são os mais populares (ver figura 1).

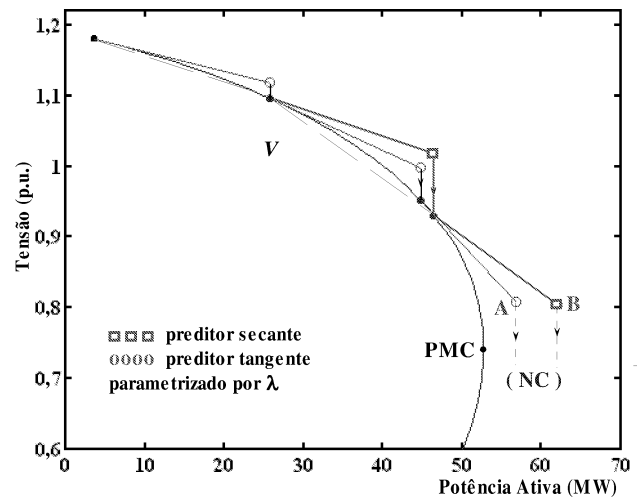


Figura 1: Comparação entre os métodos da continuação com preditores tangente e secante, λ como parâmetro.

No preditor tangente, a estimativa da próxima solução pode ser encontrada dando um passo, de tamanho apropriadamente escolhido, na direção do vetor tangente à curva PV. Já o preditor da secante, como mostrado na figura 1, usa as soluções atual e anterior, para estimar a próxima. A técnica do preditor pelo vetor tangente é usualmente mais precisa do que a da secante. O cálculo do vetor tangente é obtido tomando a diferencial de (1), e que posto na forma matricial fornece:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & -\mathbf{G}_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ d\mathbf{V} \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} & -\mathbf{G}_\lambda \end{bmatrix} \mathbf{t} = [\mathbf{0}], \quad (3)$$

em que $\mathbf{G}_\theta = [\partial \mathbf{P} / \partial \theta \quad \partial \mathbf{Q} / \partial \theta]^T$, $\mathbf{G}_V = [\partial \mathbf{P} / \partial \mathbf{V} \quad \partial \mathbf{Q} / \partial \mathbf{V}]^T$ e $\mathbf{G}_\lambda = [\mathbf{P}^{\text{esp}} \quad \mathbf{Q}^{\text{esp}}]^T$. \mathbf{G}_θ e \mathbf{G}_V compõem a matriz \mathbf{J} do FC convencional. Acresce-se a \mathbf{J} uma coluna $(-\mathbf{G}_\lambda)$ correspondente à nova variável λ . O vetor \mathbf{t} é chamado de vetor tangente. Uma vez que o número de incógnitas é maior do que o número de equações, uma variável do

vetor \mathbf{t} deve ser especificada com um valor diferente de zero. Esta variável é denominada de parâmetro da continuação. Uma nova equação ($\mathbf{e}_k \cdot \mathbf{t} = t_k = \pm 1$) é acrescida ao sistema de equações (3), que passa a ter a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & -\mathbf{G}_\lambda \\ & \mathbf{e}_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\theta}{d\lambda} \\ \frac{dV}{d\lambda} \\ \end{bmatrix} = \mathbf{J}_a \mathbf{t} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

onde \mathbf{e}_k é um vetor linha com todos os elementos nulos exceto o k -ésimo, que é igual a 1. A escolha do índice k é feita de forma que o vetor \mathbf{t} tenha uma norma não nula e garanta que a matriz Jacobiana aumentada (\mathbf{J}_a) seja não singular no PMC. A escolha do sinal + ou - dependerá de como a variável escolhida como parâmetro estará variando, positivo se ela estiver aumentando de valor, e negativo se estiver diminuindo. Uma vez obtido o vetor \mathbf{t} , a estimativa para a próxima solução será dada por:

$$\begin{bmatrix} \theta^e \\ \mathbf{V}^e \\ \lambda^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^j \\ \mathbf{V}^j \\ \lambda^j \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} \frac{d\theta}{d\lambda} \\ \frac{dV}{d\lambda} \\ \end{bmatrix}, \quad (5)$$

onde o sobrescrito "e" indica estimativa, isto é, o vetor tangente é usado para obter uma estimativa para θ , \mathbf{V} , e λ a partir da solução atual j . σ é um escalar que define o tamanho do passo predictor. O tamanho do passo deve ser tal que a solução prevista esteja dentro do raio de convergência do passo corretor.

Para eliminar a singularidade da matriz \mathbf{J} acrescenta-se, por meio de uma equação, a informação perdida com a redução do *rank* de \mathbf{J} no PMC. Resolve-se esse problema através de uma técnica conhecida por parametrização local (Ajjarapu e Christy, 1992; Seydel, 1994), que consiste na troca de parâmetro próximo ao PMC. No método do vetor tangente a variável escolhida é aquela que apresentar a maior variação, sendo que λ passa a ser, a partir daí, tratado como variável dependente, enquanto que a variável escolhida passa a ser o novo parâmetro p , isto é, do conjunto de $n + 1$ variáveis, o novo parâmetro p será dado por:

$$p \leftarrow \max \{ |t_1|, |t_2|, \dots, |t_{n+1}| \} \quad (6)$$

enquanto que no método baseado no predictor secante, p é escolhido como sendo a componente que apresentar a máxima variação relativa (Seydel, 1994):

$$p \leftarrow \max \left\{ \frac{|\theta^{j+1} - \theta^j|}{|\theta^{j+1}|}, \frac{|V^{j+1} - V^j|}{|V^{j+1}|}, \frac{|\lambda^{j+1} - \lambda^j|}{|\lambda^{j+1}|} \right\} \quad (7)$$

onde j refere-se ao ponto atual da curva. A experiência com o método do vetor tangente utilizando a equação

(6) tem demonstrado que ao aproximar-se de PMC, p muda de λ para a tensão que apresenta a maior variação, retornando novamente para λ após alguns pontos. O uso deste método para a escolha automática de p não tem apresentado dificuldades mesmo para sistemas altamente compensados (Cañizares, 1993).

Chiang *et alii* (1995), usando o predictor secante, propuseram uma parametrização onde o comprimento de arco (s) é o parâmetro. Nesta técnica, a seguinte equação é adicionada a equação (1):

$$\left(\frac{d\theta}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dV}{ds}\right)^2 + \left(\frac{d\lambda}{ds}\right)^2 = 1, \quad (8)$$

A equação (8) assegura que o parâmetro s seja o comprimento do arco sobre a curva de solução. Juntamente com a equação (3), formam um conjunto $n + 1$ equações a $n + 1$ incógnitas. A estimativa para a próxima solução é obtida da equação (5), onde σ representará o passo do comprimento de arco s . A equação (3) é não linear e o sistema formado por esta equação e a (8) exige um método especial para ser resolvido, o qual pode consumir muito tempo computacional. Maiores detalhes pode ser encontrado em (Chiang *et alii*, 1995). A opção sugerida pelos autores é o uso do predictor secante logo após a obtenção de dois pontos da curva. De acordo com os autores esta técnica de parametrização é mais robusta, possibilitando que sejam dados maiores passos do que a técnica utilizando parametrização local. Entretanto, nas análises de sistemas de potência deseja-se obter a maior quantidade de informações úteis quanto possível, durante o traçado da curva PV. A técnica utilizando o comprimento de arco tem um significado geométrico ao invés de físico, por conseguinte há freqüentemente um maior interesse em outras técnicas de preditores tangente (Long e Ajjarapu, 1996).

De acordo com Arya e Verma (1996), a curva PV completa pode ser obtida considerando a magnitude da tensão como parâmetro, sendo λ considerado como variável dependente.

Ajjarapu e Christy (1992) mostraram que os ângulos da tensão também podem ser escolhidos como parâmetro. Conforme ilustra a figura 2, na curva PV a tensão está continuamente decrescendo à medida que o carregamento se aproxima do PMC. Assim, a tensão de uma determinada barra poderia ser prefixada e a respectiva solução determinada.

Alves *et alii* (Alves, 2000) demonstram que outras parametrizações podem ser utilizadas para eliminar a singularidade da matriz \mathbf{J} no PMC. Acrescenta-se ao sistema

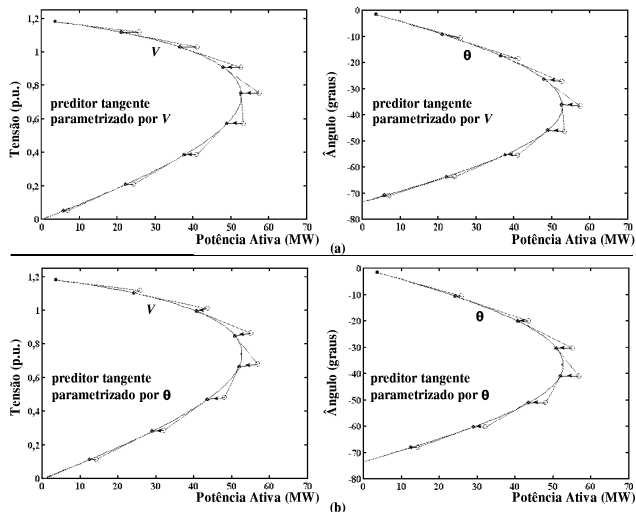


Figura 2: Métodos da continuação com preditor tangente: (a) V como parâmetro, (b) θ como parâmetro

de equações (1) a seguinte equação:

$$W(\mathbf{V}, \theta, \lambda, \mu) = \mu W^0 - F(\mathbf{V}, \theta, \lambda) = 0 \quad (9)$$

onde F pode corresponder à perda total de potência ativa ou reativa, à potência ativa ou reativa na barra de referência, à potência reativa das barras de geração, ou à perda de potência ativa ou reativa numa LT. W^0 é o respectivo valor da função no caso base. Um novo parâmetro μ é adicionado ao problema. Como uma equação é adicionada, λ pode ser tratado como uma variável dependente e μ é considerado como um parâmetro. Para $\mu = 1$, a solução convergida deverá resultar em $\lambda = 1$. Em (9) pode-se especificar o valor desejado para a função, e a sua solução fornecerá o ponto de operação, incluindo o fator de carregamento para o qual os valores especificados ocorrem. As funções W propostas dependem de todas as variáveis de estado (V , θ) e do fator de carregamento λ . Dependendo da função W escolhida, a matriz Jacobiana modificada também pode tornar-se singular. Entretanto, isto acontece após o PMC ter sido alcançado.

A expansão do sistema (1) acrescido da equação (9) em série de Taylor incluindo somente os termos de primeira ordem, resulta em

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J} & -\mathbf{G}_\lambda \\ \mathbf{F}_x & F_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}_m \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Delta k_W \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde $\mathbf{x} = [\theta \ \mathbf{V}]^T$, \mathbf{F}_x corresponde às derivadas de F em relação a \mathbf{x} e $\Delta k_W = W^0 \Delta \mu$ é um escalar que define a variação em W^0 . Após a solução da equação (10) para o vetor tangente, a estimativa para a próxima solução é

dada por

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}^e \\ \lambda^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \lambda \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$k_W^e = k_W + \sigma \Delta k_W$$

A grande vantagem da parametrização através das funções W é que estas representam variáveis com significado físico claro para engenheiros de potência, ao invés de parâmetros puramente matemáticos. Se não é possível obter o PMC de um sistema aumentando-se diretamente o parâmetro de carregamento λ , devido aos problemas de singularidade de \mathbf{J} , então podemos transformar este parâmetro em uma variável dependente, e simular aumentos de carga através da especificação da perda ativa total, ou de qualquer outra variável de folga no FC convencional. Em resumo, ao invés de especificar o carregamento e obter o estado convergido, especifica-se, por exemplo, as perdas de potência ativa total, e obtém-se o estado convergido, incluindo o nível de carregamento para o qual as perdas de potência especificadas ocorrem.

Por fim, uma outra técnica previsão denominada de previsão trivial é a polinomial modificada de ordem zero (Chiang *et alii*, 1995), a qual usa a solução atual e um incremento fixo no parâmetro (λ , V , θ , ou μ) como uma estimativa para a próxima solução. A principal vantagem dos preditores secantes é que eles são relativamente baratos e não apresentam problemas relacionados à singularidade das matrizes Jacobianas.

2.2 Controle do Passo Preditor σ

A eficiência de um método da continuação durante o traçado da curva PV está intimamente relacionada com a estratégia de controle de passo. No geral, sua escolha é dependente do sistema em estudo. Em situação de carga leve uma variação de carga resultará numa pequena mudança no ponto de operação. Portanto, o tamanho do passo pode ser maior. Por outro lado, uma pequena mudança na carga resultaria em grandes variações do ponto de operação no caso do sistema estar altamente carregado, e nesse caso o passo deveria ser menor. Para se obter um bom desempenho global, o tamanho do passo deveria adaptar-se às condições reais de convergência.

Um método simples de controle de passo é baseado no número de iterações do passo corretor (Seydel, 1994). Se o número de iterações é pequeno, o sistema ainda está sob condições de carga leve ou normal e o tamanho do passo para o próximo ponto de operação pode ser maior. Se o número de iterações é grande, o sistema está estressado e o tamanho do passo para o próximo ponto de operação deve ser menor. Entretanto, este procedi-

mento pode falhar na identificação da proximidade do maior carregamento já que o aumento do número de iterações do passo corretor também pode ser consequência da atuação de diversos limites operacionais de equipamentos.

Uma opção interessante é o uso da tensão (V_k) como parâmetro durante todo o traçado da curva PV, pois isto acarretará em um controle automático do passo de λ (ver figura 2). Isto ocorre porque, em geral, um passo fixo na tensão corresponde a passos grandes na variável λ durante a carga leve e normal, onde a tensão varia pouco, e em passos reduzidos para altos carregamentos. Outro aspecto que deve ser lembrado é que, dependendo da análise que está sendo realizada, por exemplo em caso de contingência, o PMC pode ocorrer para baixos carregamentos (figura 3).

Outro método de controle do tamanho do passo é baseado no vetor tangente normalizado (Zambroni, 1997). O tamanho do passo é definido como:

$$\sigma = \sigma^0 / \|\mathbf{t}\|_2 \quad (12)$$

onde $\|\mathbf{t}\|_2$ é a norma Euclidiana do vetor tangente $[\mathbf{d}\theta \ \mathbf{dV} \ \mathbf{d}\lambda]^T$, e σ^0 é um escalar predefinido. Conforme o sistema torna-se carregado, a magnitude do vetor tangente aumenta e σ diminui. A eficiência do processo depende da boa escolha de σ^0 . Seu valor dependerá do sistema. Entretanto, Cañizares e Alvarado (1993) alcançaram bons resultados para sistemas de vários tamanhos assumindo $\sigma^0 = 1$, juntamente com a redução de passo quando limites são atingidos ou ocorrem problemas de convergência. A equação (12) também pode ser utilizada na técnica de previsão pelo vetor secante, para obter um controle de passo. A obtenção de um valor ótimo para σ^0 está além do escopo deste trabalho.

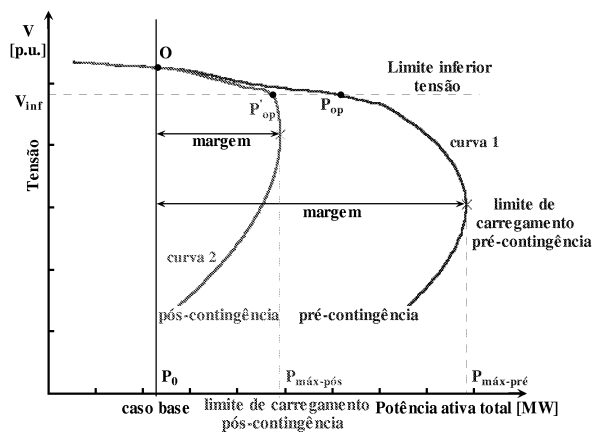


Figura 3: Curvas PV de pré e pós-contingência.

2.3 Passo Corretor

Uma vez feita a previsão, torna-se necessário realizar a correção da solução aproximada para obter-se a solução final. O ponto obtido pelo passo preditor encontra-se próximo da solução correta, assim poucas iterações deverão ser necessárias para que a próxima solução seja obtida dentro da precisão desejada. O método de Newton é o mais usado no passo corretor, embora qualquer outro método numérico possa ser utilizado. Neste passo uma equação do tipo $y - y^e = 0$, onde y e y^e correspondem à variável escolhida como parâmetro de continuação e seu respectivo valor estimado, obtido pelo passo preditor, é acrescentada ao sistema de equações (1). Assim, o sistema de equações da etapa de correção passa a ser:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(\mathbf{V}, \theta, \lambda) &= \mathbf{0} \\ y - y^e &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

o qual é resolvido por um método de Newton modificado devido à inclusão da equação $y - y^e = 0$. Geralmente, em torno do PMC, são necessárias 2 iterações para uma tolerância de 10^{-5} .

Ao incluir-se λ como variável o sistema (1) passa a ter $n + 1$ variáveis para n equações. Assim, pode-se definir qualquer uma das $n + 1$ variáveis como parâmetro. O valor deste parâmetro (θ_k , V_k , ou até mesmo λ) pode ser especificado e, portanto, este pode ser removido do sistema. Com isso, o sistema passa a ser novamente de n equações e n incógnitas. A escolha do parâmetro em função daquele que apresentar a maior variação no vetor tangente elimina a singularidade da matriz Jacobiana. Esta característica de troca de variáveis corresponde à rotação de 90° do diagrama θ_k versus λ , ou V_k versus λ (Seydel, 1994).

As figuras 2(a) e 2(b) mostram o uso das variáveis V e θ como parâmetro, respectivamente. Como pode-se observar na figura, agora é possível traçar a curva completa realizando apenas poucas iterações para cada ponto, isto porque estes parâmetros não apresentam singularidade ao longo da trajetória de soluções, particularmente no PMC. Uma vez ultrapassado o PMC, λ poderá novamente ser utilizado como parâmetro. Para obter o PMC com maior precisão, basta, após ter-se ultrapassado o PMC, retornar ao ponto anterior e reduzir o passo.

Uma outra técnica usada para contornar a singularidade de \mathbf{J} sem a necessidade de parametrização foi utilizada primeiramente por Iba *et alii* (1991) e posteriormente, associada a um controle de passo, aplicada com sucesso em vários sistemas em (Cañizares *et alii*, 1992). A técnica consiste em definir um vetor perpendicular ao vetor tangente ao ponto $(\theta^j, \mathbf{V}^j, \lambda^j)$ da curva, e que passe pelos pontos previsto subsequente $(\theta^e, \mathbf{V}^e, \lambda^e)$ e um outro

que se encontra sobre a curva da trajetória de soluções $(\theta, \mathbf{V}, \lambda)$ (Seydel, 1994); a equação a ser acrescentada ao sistema (1), no passo corretor, será dada pelo produto escalar:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta^j \\ \Delta\mathbf{V}^j \\ \Delta\lambda^j \end{bmatrix}^T \bullet \begin{bmatrix} \theta - \theta^j - \Delta\theta^j \\ \mathbf{V} - \mathbf{V}^j - \Delta\mathbf{V}^j \\ \lambda - \lambda^j - \Delta\lambda^j \end{bmatrix} = 0 \quad (14)$$

onde $(\Delta\theta^j, \Delta\mathbf{V}^j, \Delta\lambda^j)^T = (\theta^e - \theta^j, \mathbf{V}^e - \mathbf{V}^j, \lambda^e - \lambda^j)$. Partindo da solução fornecida pelo passo preditor, o sistema resultante da expansão em série de Taylor do sistema (1), acrescido da equação acima, converge para o ponto $(\theta, \mathbf{V}, \lambda)$. Esta técnica exige um bom controle de passo nas proximidades do PMC. Observa-se também neste caso, uma técnica de parametrização com característica geométrica ao invés de física.

No caso do método proposto por Chiang *et alii* (1995), no passo corretor a equação:

$$(\lambda - \lambda(s^j))^2 + \sum_{i=1}^n \left((\theta_i - \theta_i(s^j))^2 + (V_i - V_i(s^j))^2 \right) - (s - s^j)^2 = 0 \quad (15)$$

é adicionada ao sistema (1), onde $(\theta_i(s_j), V_i(s_j), \lambda(s_j))$ é a solução previamente calculada. Nesta metodologia a singularidade é removida tanto no passo preditor, utilizando a equação (8), quanto no corretor, com o uso da equação (15). O sistema resultante, composto pelo sistema (1) e pela equação (15), é resolvido considerando a estimativa obtida pelo passo preditor.

Nos esquemas propostos neste trabalho, o ponto correto é calculado a partir da estimativa $(\mathbf{x}^e, \lambda^e, k_W^e)$, resolvendo o sistema

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(\mathbf{V}, \theta, \lambda) &= \mathbf{0} \\ W(\mathbf{V}, \theta, \lambda) &= k_W^e - F(\mathbf{V}, \theta, \lambda) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

cujas matrizes Jacobiana tem a mesma estrutura daquela usada para obtenção do vetor tangente na equação (10).

3 RESULTADOS

Para todos os testes realizados, a tolerância adotada para os desbalanços de potência e os valores de σ^0 e Δk_W são iguais a 10^{-5} p.u., 0,5 e 1, respectivamente. O primeiro ponto de cada curva é obtido com o método de FC convencional. Os limites superior e inferior adotados para os *taps* de transformadores foram 1,05 e 0,95. O ajuste de *tap* nos transformadores OLTC (transformadores com comutação de *tap* sob carga) consiste da inclusão da posição do *tap* como variável dependente, ao passo

que a magnitude da tensão das barras controladas são consideradas variáveis independentes (Peterson e Meyer, 1971). Os limites de Q nas barras PV é o mesmo utilizado no método convencional de FC. Em cada iteração a geração de reativos de todas as barras PV são comparadas com seus respectivos limites. No caso de violação, a barra PV é alterada para tipo PQ. Estas barras podem voltar a ser PV nas iterações futuras. As violações de limite de *tap* também são verificadas. Observa-se que nas análises de colapso de tensão, um modelo que considere precisamente os limites de campo e de corrente de armadura da máquina síncrona deveria ser considerado. Contudo, neste trabalho o modelo proposto em (Cañizares, 1995) e adotado em (Zamboni *et alii*, 1997) é usado por simplicidade, isto é, as reatâncias internas dos geradores são desprezíveis e a tensão terminal é assumida como sendo constante.

As cargas são modeladas como de potência constante e o parâmetro λ é usado para simular incrementos de carga ativa e reativa, considerando fator de potência constante. Cada aumento de carga é seguido por um aumento de geração equivalente usando λ . O objetivo dos testes é comparar os métodos propostos com o propósito de explicitar suas características, considerando a influência dos limites de potência reativa (Q) e de *tap* dos transformadores.

3.1 Desempenho dos novos parâmetros

A figura 4 mostra os resultados para o sistema IEEE-118 utilizando os seguintes parâmetros: a perda de potência ativa numa LT (k_{PLT}), a perda total de potência ativa (k_{Pa}) ou reativa (k_{Qrea}), a potência ativa (k_{Psb}) ou reativa (k_{Qsb}) na barra de referência, e a potência reativa das barras PV (k_{Qpv}). O objetivo deste teste é o de comparar o desempenho (número de iterações) dos métodos. Para isso, calcula-se os mesmos pontos da curva PV utilizando cada um dos métodos, de forma a garantir os mesmos possam ser corretamente comparados. Observa-se que cada ponto da curva PV corresponde a uma solução do problema de fluxo de carga para um valor especificado de λ . Os pontos foram obtidos através da parametrização pela tensão da barra 52 (V_{52}) com passo de 0,01 p.u usando a técnica de previsão trivial. (Chiang *et alii*, 1995, Alves *et alii*, 1999). Uma vez obtidos todos os estados, os respectivos valores de cada parâmetro são calculados e a seguir usados como pontos estimados por seus respectivos métodos, ou seja, usando a técnica de previsão trivial. Dessa forma garante-se que estes valores levarão o sistema de um mesmo estado inicial para o mesmo estado final.

De acordo com os resultados obtidos, todas as versões

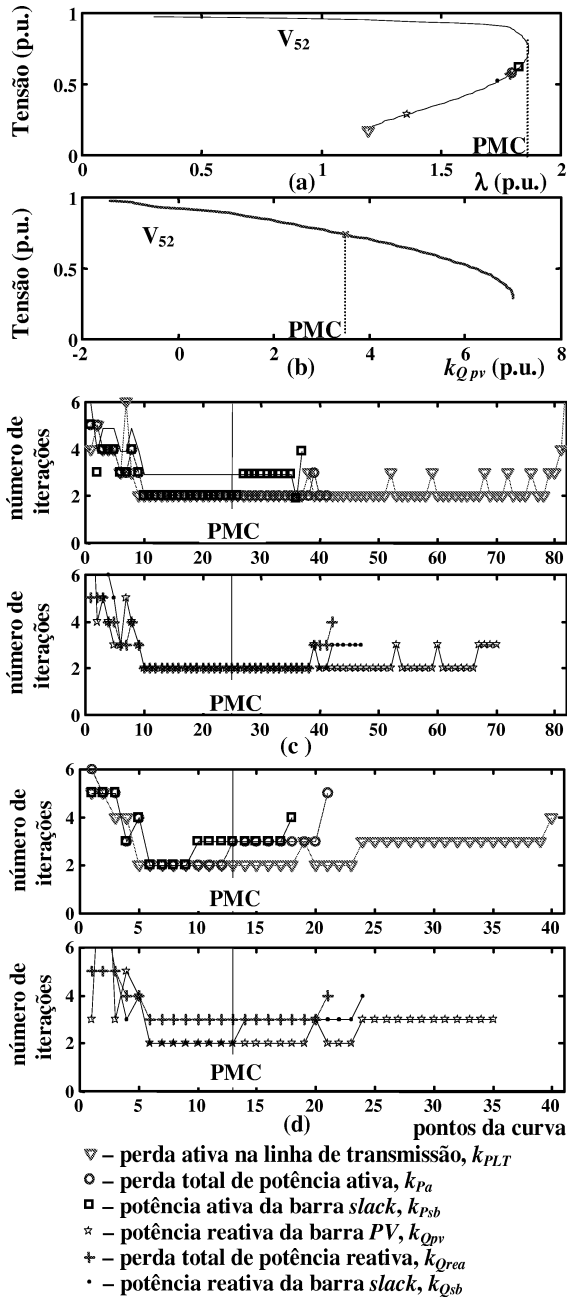


Figura 4: Número de iterações para os novos esquemas de parametrização. (a) magnitude de tensão, (b) magnitude de tensão em função de k_{Qpv} (barra 116), (c) com passo simples. (d) com passo duplicado.

apresentaram praticamente o mesmo desempenho. Na vizinhança do PMC o método convencional apresenta dificuldades numéricas, enquanto que os métodos propostos não só obtiveram êxito em encontrar a solução, mas também permitem a obtenção de pontos além do

Tabela 1: Ponto de singularidade para vários parâmetros.

Parâmetro	Valor máximo	λ	V_{52} (p.u.)
λ	1,8664	1,8664	0,74
k_{Psb}	13,6113	1,8331	0,63
k_{Pa}	6,8395	1,7968	0,58
k_{Qrea}	27,0775	1,7880	0,57
k_{Qsb}	5,5116	1,7372	0,52
k_{Qpv}	7,0096	1,3589	0,29
k_{PLT}	0,0128	1,1965	0,17

PMC (isto é, pontos da parte inferior da curva PV) com um número baixo de iterações.

A figura 4(a) e a tabela 1 mostram como a singularidade do problema do FC, modificado pela inclusão das funções parametrizadas, é deslocada para além do PMC (para a parte inferior da curva PV). Com esta metodologia, não é necessário uma redução significativa no tamanho do passo como pode ser confirmado pela figura 4(d), onde o mesmo problema é resolvido com um passo duas vezes maior, e o número de iterações para a obtenção de cada ponto permanece baixo. É importante ressaltar que as técnicas de parametrização propostas resultam em um desempenho de convergência excelente na vizinhança do PMC em virtude da diminuição do nível de não-linearidade das equações do FC obtida com o uso dos novos parâmetros. Como pode se observar da figura 4(b), onde mostra-se como exemplo, a tensão da barra 52 (V_{52}) em função do parâmetro de potência reativa da barra PV 116 (k_{Qpv}), na região do PMC o sistema de equações modificado apresenta comportamento quase linear, o que justifica a convergência do método de Newton com poucas iterações. Em outras palavras, pode-se dizer que enquanto o método de FC convencional tem problemas de convergência devido ao alto grau de não linearidade do sistema na região do PMC, os métodos parametrizados propostos neste trabalho obtêm o PMC com facilidade devido a eliminação, ou diminuição, dessas não linearidades na região do PMC.

3.2 Preditor tangente

A figura 5 apresenta o efeito da escolha do parâmetro no método da continuação com preditor tangente. O sistema IEEE 118 barras é utilizado neste teste. Nas figuras de 5(a) a 5(f) são apresentados os respectivos parâmetros e a tensão na barra crítica (V_{52}), como função de λ . Podem ser vistos também, os pontos previstos, diferentes para cada parâmetro adotado, juntamente com o número de iterações gastas pelo passo corretor.

Para cada curva, o ponto inicial é fornecido por um FC convencional. Partindo deste ponto, a estimativa para o próximo ponto é obtida pelo preditor tangente e pelo controle de passo, de acordo com as equações (10) e (12), respectivamente. A correção da estimativa é calculada por (16). Este procedimento é repetido até a vizinhança do ponto onde a matriz Jacobiana modificada, correspondente ao parâmetro em uso, torna-se singular, ponto B nas figuras. Portanto para o traçado completo da curva PV, poderá ser necessário uma mudança no parâmetro. O ponto B está além do PMC, o qual, portanto, poderá ser determinado sem qualquer dificuldade numérica. Esta é uma vantagem do uso dos novos parâmetros ao invés do λ . A singularidade da matriz Jacobiana convencional é evitada, conforme pode ser visto nas figuras 5(a) a 5(f), onde λ e V_{52} são plotados como função do parâmetro. No caso de λ ser usado como parâmetro, a singularidade (que corresponde a PMC) ocorre para $\lambda=1,8664$, enquanto esta ocorrerá para outros valores de λ (ponto B) quando é usado qualquer um dos novos parâmetros.

Visto que a matriz Jacobiana modificada está próxima da singularidade na vizinhança do ponto B, o ponto previsto subsequente poderá ser infactível, ainda que perto do ponto de solução correto. Portanto, é necessária a troca de parâmetro para que o traçado da curva possa ser completado.

Observa-se também, a redução do número de iterações gastas pelo passo corretor, para todos os parâmetros, nas proximidades do PMC. Isto ocorre em virtude do método de controle do tamanho do passo, baseado no vetor tangente normalizado (Zambroni *et alii*, 1997).

Um outro aspecto a ser observado é que o valor obtido para o PMC depende da função W e do passo σ^0 adotado, ver a tabela 2. Se valores mais precisos forem exigidos, deve-se retornar para o ponto anterior ao PMC e reduzir o passo.

Tabela 2: Valores do PMC para diferentes parâmetros

Parâmetro	Valor do parâmetro	PMC	V_{52} (p.u.)
k_{Qpv116}	3,5684	1,8663	0,735
k_{Qpv40}	2,3396	1,8658	0,726
k_{Pa}	6,1324	1,8631	0,774
k_{Psb}	12,9865	1,8610	0,784
k_{Qrea}	22,9678	1,8645	0,766
k_{PLT}	0,0130	1,8657	0,725

Potência reativa de barra PV

O uso da potência reativa de uma barra PV como parâmetro é uma opção muito atrativa. Isto porque qual-

quer programa de FC já inclui a equação das barras PV e assim, não seria necessária nenhuma alteração no programa de FC convencional. Não haveria nenhum problema relacionado com perda de esparsidade, apenas a substituição de uma coluna correspondendo à nova variável λ . Portanto, basta especificar o valor de Q, através do parâmetro k_{Qpv} , de uma barra PV que esteja com folga de reativos. Entretanto, dos sistemas considerados, apenas o de 118 barras possibilitou o uso deste parâmetro para a obtenção do PMC. Observa-se que as duas barras PV (40 e 116) para as quais as respectivas potências reativas foram usadas como parâmetro da continuação, figuras 5(a) e 5(b), apresentam limites mínimos e máximos bem distintos, $-3 \leq Q \leq 3$ e $10 \leq Q \leq 10$ p.u., respectivamente. Também, outras barras PV com limites iguais aos da barra 116 atingiram seus limites antes ou coincidentemente com o PMC. Isto mostra que as equações de potência reativa gerada pelas barras PV com a maior faixa de variação dos limites, nem sempre são as mais apropriadas para a obtenção do PMC. A princípio a equação de qualquer barra PV que apresente folga de reativos pode ser usada. No entanto, à medida que o sistema se aproxima do PMC várias barras vão alcançando seus respectivos limites de potência reativa. Portanto, é necessário monitorar as barras PV e escolher uma que esteja dentro de seus limites.

A princípio, o aumento do número de iterações entre os diferentes pontos, pode ser usado como critério para mudança de parâmetro, no caso, de k_{Qpv} . Entretanto, este critério deve ser cuidadosamente avaliado em virtude de situações como a do primeiro ponto previsto da figura 5(a). Devido às características da curvatura da função em uso, um número de iterações (8) aparentemente alto pode ser necessário para o passo corretor, e que nesse caso, ocorre em consequência do grande passo no próprio parâmetro k_{Qpv} , e não em consequência da proximidade da singularidade da matriz Jacobiana modificada. Observando a figura 5(b) onde foi usado a potência da barra 40 como parâmetro, vê-se que para atingir aproximadamente o mesmo ponto, para o mesmo σ^0 , são necessárias 18 iterações. A opção mais coerente seria observar que há a necessidade de troca do parâmetro quando o número de iterações aumenta (Alves *et alii*, 1999).

Potência ativa da barra de referência e perda total de potência ativa

O uso das perdas de potência ativa totais, figura 5(c), ou potência ativa da barra de referência, figura 5(d), como parâmetro, não apresenta nenhuma dificuldade numérica para os sistemas testados (IEEE 14, 30, 57 e 118), uma vez que a singularidade da matriz Jacobiana mo-

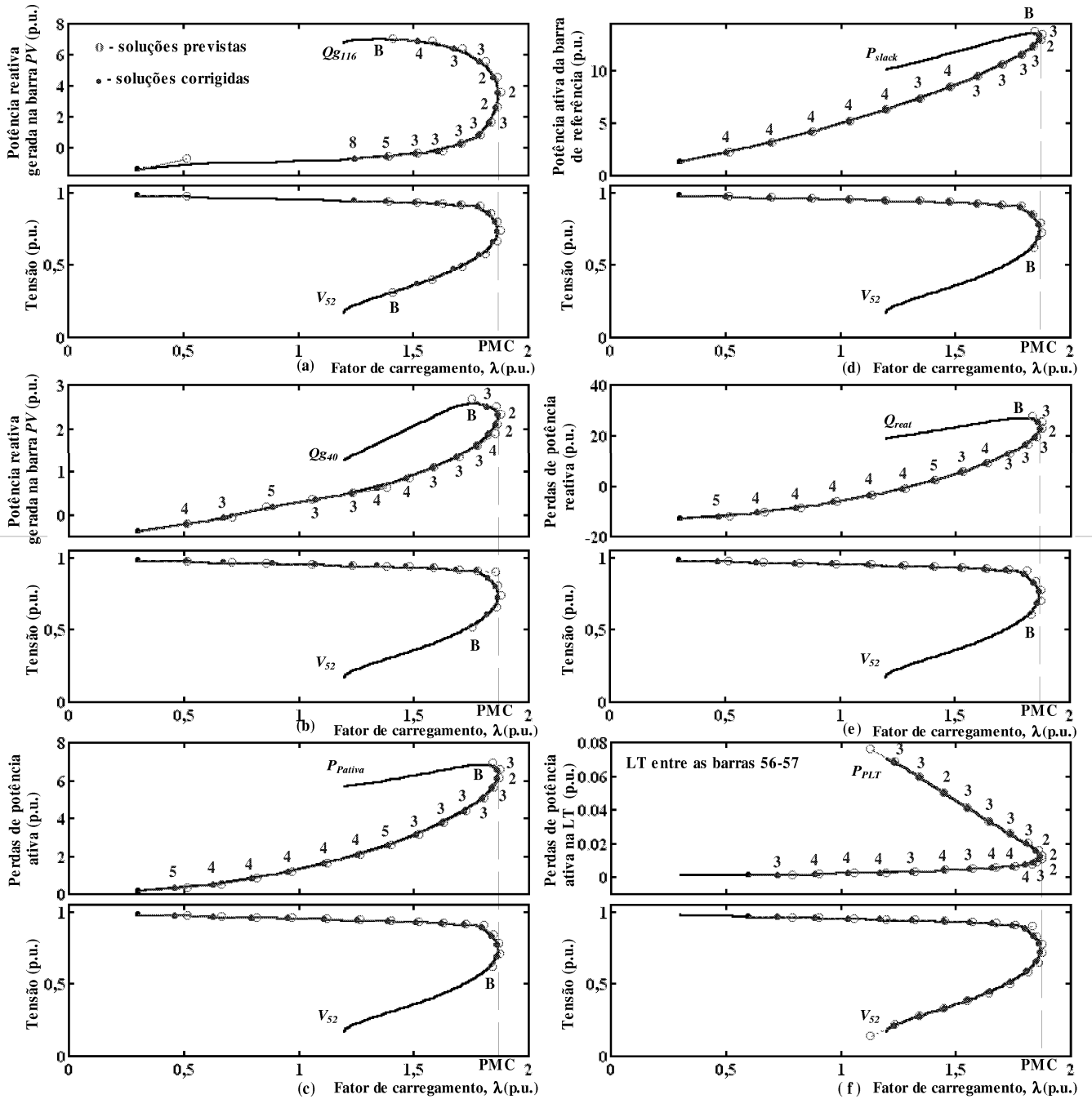


Figura 5: Métodos da continuação para várias funções W , aplicado ao IEEE-118: (a) potência reativa na barra PV (barra 116), (b) potência reativa na barra PV (barra 40), (c) perdas total de potência ativa, (d) potência ativa da barra de referência, (e) perdas total de potência reativa, (f) perdas de potência ativa na LT.

dificada (\mathbf{J}_m) ocorre além do PMC, ponto B nas respectivas figuras. No caso do IEEE57 em particular, o PMC e o ponto de singularidade da matriz \mathbf{J}_m dos novos parâmetros são muito próximos, mas ainda assim este último ocorre após o PMC. Essa proximidade somente implica na necessidade de se efetuar um bom controle de passo. Portanto, a grande vantagem do uso destes parâmetros é que não há a necessidade de troca de parâmetro até pouco depois do PMC. Além disso, no caso da potência ativa da barra de referência, não seria necessária nenhuma alteração no programa de FC convencional, nem problemas relacionados com a perda de esparsidade, apenas a inclusão de uma coluna correspondendo à nova variável λ .

Potência reativa da barra de referência e perda total de potência reativa

Estas duas funções, perdas reativa total, figura 5(e), ou potência reativa da barra de referência como parâmetro, apresentam um fraco desempenho em carga leve ($\lambda \cong 0$). Isto ocorre porque nesta região a matriz \mathbf{J}_m também pode apresentar uma singularidade, além da que ocorre após o PMC. Entretanto, observa-se que nesta região é mais natural o uso de λ como parâmetro. Por outro lado, na região de maior interesse, isto é, em torno do PMC, nenhuma dificuldade numérica é observada para os sistemas testados (IEEE 14, 30, 57 e 118). Portanto, também no uso destes parâmetros a grande vantagem é que não há a necessidade de troca de parâmetro até pouco depois do PMC. Observa-se que o uso da potência reativa da barra de referência como parâmetro apresenta as mesmas vantagens mencionadas para o parâmetro potência ativa da barra de referência.

Potências ativa e reativa nas LT e escolha do parâmetro de continuação

Usando as perdas de potência ativa (e ou reativa) de uma determinada LT, a matriz Jacobiana modificada pode tornar-se singular depois ou até mesmo antes do PMC, ver figura 5(f) próximo a $\lambda = 0,5$. Como não se conhece a priori qual deve ser a LT escolhida, há a necessidade de um critério para se realizar a troca de parâmetro. A escolha do novo parâmetro é baseada na seguinte idéia.

Com o crescente aumento do carregamento dos sistemas, também aumentam as perdas reativas nas linhas de transmissão. Nestes sistemas, mesmo aqueles que operam com tensões muito próximas de 1 p.u., as pequenas variações nas magnitudes das tensões pouco afetarão os suportes de reativos dos elementos shunts, inclusive os de linha. Por outro lado, as pequenas variações na diferença de tensão entre os extremos de uma linha de

transmissão, associadas às grandes diferenças angulares, podem causar alterações substanciais nas perdas série de potência reativa. A progressiva exaustão das reservas de reativos, provenientes das barras PV, na tentativa de manter-se um perfil adequado de tensão, tem como consequência a perda de controle da tensão por parte dos geradores. Isto resultará numa queda contínua da tensão que, por sua vez, causará um sensível aumento da diferença angular entre os extremos da linha de transmissão, a fim de manter a transmissão de potência ativa. O aumento da diferença angular, somado à queda de tensão e conseqüente redução compulsória do suporte de reativos por parte dos bancos de capacitores, causará um novo aumento nas perdas reativas das linhas de transmissão, bem como na taxa de perdas com relação à queda de tensão. Nestas condições a escolha de parâmetro, isto é, a escolha da LT, pode ser baseada ou na taxa de perdas da LT, ou na LT que pertence à vizinhança da barra que apresenta a menor tensão.

A abordagem usada neste trabalho para a escolha do parâmetro de continuação é baseada na LT que pertence à vizinhança da barra com a maior taxa de variação da tensão, e que apresenta a maior taxa de aumento de perdas.

Como pode ser visto na figura 5(f), a curva PV completa pode ser obtida usando as perdas ativas de potência ativa (k_{PLT}) como parâmetro (variável independente) e o fator de carregamento λ como uma variável dependente. Porém, conforme já comentado, é muito difícil, ou até mesmo impossível, identificar qual equação de perda é mais apropriada para ser adicionada ao sistema (1) para se obter todos os pontos da curva PV. Isto é devido ao fato de que a curvatura da trajetória de soluções não é conhecida a priori. Não obstante, a escolha automática do parâmetro de continuação proposta torna possível obter a curva PV completa sem qualquer problema numérico.

3.3 Preditor tangente versus preditor secante

A figura 6 ilustra os desempenhos (número de iterações gastas pelo passo corretor, ao lado de cada ponto) do preditor tangente, figuras 6(a) e (b), e da secante, figuras 6(c) e (d), usando dois parâmetros propostos, as perdas de potência ativa e reativa das LT, para o sistema IEEE-118. Pode-se observar que os dois procedimentos apresentam o mesmo desempenho para praticamente todos os pontos de curva.

3.4 Desempenho para o flat start

A tabela 3 mostra o desempenho do método convencional e o modificado de Newton usando o *flat start*. Conforme comentado, as demais funções (perdas de potência ativa e reativa) necessitam de um ponto inicial convergido (p. ex. o caso base). O desbalanço total de potência é definido como a soma dos valores absolutos dos desbalanços de potência ativa e reativa. Uma tolerância de 10^{-6} p.u. foi usada para os cálculos. Muito embora as parametrizações resultem em uma convergência mais rápida, a evolução dos respectivos desbalanços de potência indicam a possibilidade de mal-condicionamento. Nestes casos poderiam ser realizadas medidas adicionais para melhorar o desempenho, tais como o uso de otimização de passo (Braz *et alii*, 2000) no cálculo do FC. Estas medidas estão sendo investigadas.

Tabela 3: Resultados com inicialização *flat start*

Número de iterações	Desbalanço total de potência	
	Convencional	Potência ativa na barra de referência
1	172,9978	120,8770
2	40,6724	140,8328
3	20,9035	51,8376
4	6,0167	8,8267
5	1,0259	7,5009
6	0,1321	6,8333
7	0,0357	5,0438
8	0,0022	0,0937
9	0,0005	0,0001
10	0,0001	Convergiu
11	Convergiu	-

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta novos esquemas de parametrização que permitem o traçado completo das curvas PV baseado em simples modificações do método convencional de Newton. Mostra-se que as modificações propostas não só preservam as características do método em si, mas também as melhoram. Adicionalmente, mostra-se que os métodos propostos e o convencional podem ser alternados durante o traçado da curva PV com o intuito de determinar-se eficientemente todos os pontos da curva com um número mínimo de iterações.

Comparações entre as características destas novas técnicas mostram que é possível a determinação do PMC com a precisão desejada, sem qualquer dificuldade numérica. Isto torna-se possível em virtude da remoção da singularidade da matriz Jacobiana no PMC. A remoção da singularidade é obtida através do acréscimo de uma

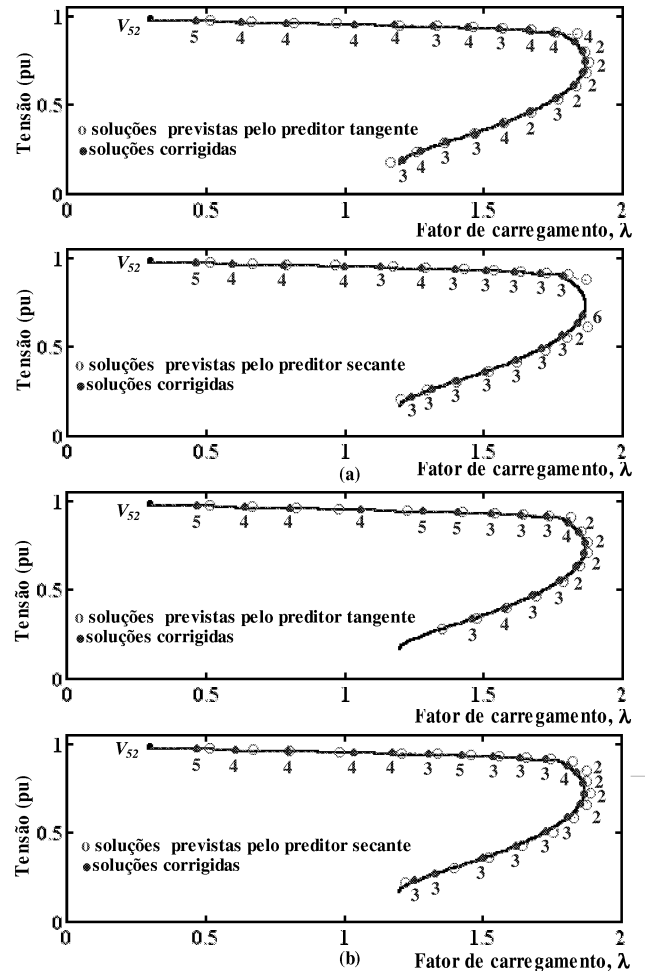


Figura 6: Desempenho dos preditores tangente e secante para o método da continuação parametrizado pelas perdas nas LT, para o sistema IEEE-118: (a) perdas de potência ativa das LT, (b) perdas de potência reativa das LT.

das seguintes equações: perdas de potência ativa (ou reativa) do sistema ou em uma linha de transmissão, potência ativa (ou reativa) da barra de referência, e potência reativa gerada por uma barra PV. O uso destas equações tem como vantagem a introdução de parâmetros com fácil interpretação física. Os resultados alcançados mostram que todos os métodos apresentam um excelente desempenho na vizinhança do PMC. Para o caso da parametrização pelas perdas de potência ativa e reativa na LT, apresenta-se uma metodologia para a escolha automática da LT durante o traçado, objetivando a determinação eficiente de todos os pontos da curva PV com poucas iterações.

REFERÊNCIAS

- Força Tarefa "Colapso de Tensão" (1999). Critérios e Metodologias Estabelecidos no âmbito da Força - Tarefa "Colapso de Tensão" do GTAD / SCEL / GCOI para Estudos de Estabilidade de Tensão nos Sistemas Interligados Norte/Nordeste, Sul/Sudeste e Norte/Sul Brasileiros, XV SNPTEE, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- WSCC-Reactive Power Reserve Work Group (RRWG) (1998). Final Report, Voltage Stability Criteria, Undervoltage Load Shedding Strategy, and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology, May, 154p.
- Seydel, R. (1994). From Equilibrium to Chaos: Practical Bifurcation and Stability Analysis, 2^a ed., Springer - Verlag, New York, 407p.
- Semlyen, A.; B. Gao e W. Janischewskyj (1991). Calculation of extreme loading condition of a power system for the assessment of voltage stability, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 6, no. 1, February, pp. 307-315.
- Y. Kataoka (1992). An approach for the regularization of a power flow solution around the maximum loading point, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, no. 3, August, pp. 1068-1077.
- Sekine Y. e A. Yokoyama (1981). Multisolutions for load flow problem of power system and their physical stability. Proc. of the 7th Power System Computation Conference, Lausanne, France, (Julho), pp. 819-826.
- Overbye T. J. e R. P. Klump (1996). Effective calculation of power systems low-voltage solutions. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no 1, pp. 75-82.
- Yorino N., S. Harada, e H. Cheng (1997). A method to approximate a closest loadability limit using multiple load flow solutions. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no 1, February, pp. 424-429.
- Chen J. F. e W.M. Wang (1997). Stability Limit and Uniqueness of Voltage Solutions for Radial Power Networks, Electric Machine and Power Systems, Vol. 25, pp. 247-261.
- Iba K.; H. Suzuki; M. Egawa e T. Watanabe (1991). Calculation of Critical Loading Condition with Nose Curve Using Homotopy Continuation Method, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, N^o 2, May, pp. 585-593.
- Ajjarapu, V. e C. Christy (1992). The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, N^o 1, February, pp. 416-423.
- Cañizares, C. A.; F. L. Alvarado; C. L. DeMarco; I. Dobson e W. F. Long (1992). Point of Collapse Methods Applied to AC/DC Power Systems, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, N^o 2, May, pp. 673-683.
- Cañizares, C. A.; F. L. Alvarado (1993). Point of Collapse Methods for Large AC/DC Power Systems, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, N^o 1, February, pp. 1-8.
- Kundur P. e B. Gao (1994). Practical Consideration in Voltage Stability Assessment, IV SEPOPE, IP14, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Chiang, H. D.; A. Flueck; K. S. Shah e N. Balu (1995). CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady State Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, N^o 2, May, pp. 623-634.
- Long B. e V. Ajjarapu, (1996). A Critical Review of the Applications of Homotopy and Continuation Methods to Power System Analysis, Proceedings of the 28th North American Power Symposium, M.I.T., November, pp. 8-15.
- Arya, L. D. e H. K. Verma (1996). A Method for Tracing PV Curve for Voltage Stability Analysis with Voltage Dependent Loads, Electric Machines and Power Systems, Vol. 24, pp.583-596.
- Bijwe, P. R. e R. S. Tare (1997). An Efficient Continuation Power Flow Method for Voltage Stability Analysis, Electric Machines and Power Systems, Vol. 25, pp.927-938.
- Chiang, H. D.; H. Li; H. Yoshida; Y. Fukuyama e Y. Nakanishi (1999). The generation of ZIP-V Curves for Tracing Power System Steady State Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations, Proc. IEEE PES Summer Meeting, Edmonton, Alberta - Canada, July, pp. 647-651.
- Kundur, P. (1993). Power System Stability and Control, McGraw - Hill, New York, 1176p.
- Van Cutsem, T. e C. Vournas (1998). Voltage Stability of Electric Power System, Kluwer Academic Publishers, Boston, 376p.
- N.M. Peterson e W.S. Meyer (1971), Automatic Adjustment of Transformer and Phase-Shifter Taps in the Newton Power Flow, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-90, N^o 1, February, pp. 103-108.

- Cañizares, C. A. (1995). Conditions for a Saddle-Node Bifurcations in AC/DC Power Systems, *Electric Power & Energy Systems*, Vol.17, N° 1, pp. 61-68.
- Zambroni de Souza, A. C.; C. A. Cañizares e V. H. Quintana (1997). New Techniques to Speed Up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, N° 3, August, pp. 1380-1387.
- Alves, D. A.; L. C. P. da Silva; C. A. Castro e V. F. da Costa (2000). Continuation Load Flow Method Parameterized by Power Losses, *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2000*, Singapore, January.
- Alves, D. A.; L. C. P. da Silva; C. A. Castro e V. F. da Costa (1999). Modified Newton and Fast Decoupled Load Flows for Tracing the Power Systems Bifurcations Diagrams, *Proceedings of the IEEE Power Tech'99*, paper BPT99-139-16, Budapest, Hungary, August.
- Braz, L. M. C.; C. A. Castro e C. A. F. Murari (2000). A critical evaluation of step size optimization based load flow methods, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 15, N° 1, pp. 202-207.