

Fluxo de Carga versus Fluxo de Carga Continuído Parte III: Fluxo de Carga Desacoplado Rápido

Dilson A. Alves¹ e Rogério R. Matarucco¹

Resumo — Os métodos de fluxo de carga de Newton e Desacoplado Rápido convencionais são considerados inadequados para a obtenção do ponto de máximo carregamento (PMC) de sistemas de potência, devido à problemas de mal-condicionamento das matrizes usadas pelos métodos, neste ponto crítico e na sua vizinhança. Neste ponto a matriz Jacobiana do método de Newton torna-se singular e considera-se que não são mais válidas as hipóteses de desacoplamento $P-V$ e $Q-\theta$ utilizadas para a formulação do método fluxo de carga Desacoplado Rápido. Os métodos da continuação são ferramentas eficientes para se obter o PMC. Nestes, técnicas de parametrização são utilizadas para evitar a singularidade da matriz Jacobiana e assim eliminar o mal-condicionamento das matrizes utilizadas nos métodos desacoplados. Neste trabalho são apresentados e avaliados os métodos de Fluxo de Carga Desacoplado Rápido convencional e propostos, considerando as variações de cargas numa única barra.

Palavras - Chave — Fluxo de carga desacoplado rápido, métodos da continuação, ponto de máximo carregamento.

INTRODUÇÃO

A ampla utilização do método desacoplado rápido tradicional, no que diz respeito ao cálculo de FC, se deve às suas características de velocidade de convergência e pequeno espaço de memória necessário. Em função destas vantagens, há um interesse por parte das empresas na sua utilização nos algoritmos de continuação visando, com isso, a redução do tempo de CPU necessário para o traçado das curvas PV. A não utilização dos métodos desacoplados se deve ao fato de se acreditar que o desacoplamento não possa ser usado próximo ao PMC, e que somente as soluções de alta tensão podem ser obtidas. Os objetivos deste trabalho são os de introduzir os conceitos básicos dos métodos Desacoplados Rápidos propostos para a solução de fluxo de carga (FC) e demonstrar que, uma vez adequadamente equacionados, qualquer um deles pode ser usado para a obtenção do PMC de um sistema de potência. Os métodos estão subdivididos de acordo com as curvas a serem traçadas: PV, QV, e SV. Ao final de cada grupo demonstra-se que os métodos utilizados no traçado das curvas PV e QV podem ser considerados como casos particulares do usado para o traçado da curva SV. As expressões analíticas apresentadas na parte I [1] são usadas para convalidar os resultados obtidos pelos métodos desacoplados rápidos, existente e propostos, considerando as variações de cargas

numa única barra. Conforme concluiu-se na parte II [2], todos os métodos aqui apresentados são casos particulares do método da continuação com preditor secante de ordem zero [3].

OBTENÇÃO DAS CURVAS QV, PV E SV PELO FLUXO DE CARGA DESACOPLADO RÁPIDO

A seguir apresentam-se os métodos Desacoplados Rápidos utilizados para o traçado das curvas QV, PV, e SV, para o caso de variação de potência em apenas uma única barra.

Fluxo de Carga Desacoplado Rápido Convencional

As simplificações introduzidas por Stott e Alsac [4] na matriz Jacobiana do fluxo de carga pelo método de Newton deram origem ao método de FC Desacoplado Rápido (FCDR), descrito por:

$$\begin{aligned} B'\Delta\theta &= \Delta P/V \\ B''\Delta V &= \Delta Q/V \end{aligned} \quad (1)$$

A versão proposta em [4] é atualmente conhecida como versão XB. Outras versões foram implementadas e testadas por Van Amerongen [5], sendo uma delas a versão BX. A diferença básica entre as versões está nos elementos das matrizes B' e B'' . As matrizes são constantes e de dimensões diferentes em virtude da exclusão das barras do tipo PV da matriz B'' . Monticelli *et al.* [6] apresentaram uma justificativa analítica e unificada, que possibilitou uma melhor compreensão do bom desempenho dos métodos desacoplados rápidos (BX e XB), a qual era até então desconhecida. Em [6] mostra-se que os algoritmos das versões BX e XB podem ser deduzidos a partir da equação do método de Newton (equação (34), parte I [1]), considerando-se $V = 1$ p.u. e $\theta = 0$ grau, e assumindo que o sistema seja constituído por ramos com a mesma razão r/x ou seja radial. Mesmo quando o sistema não apresenta uma destas características, os algoritmos BX e XB continuam a ser uma boa aproximação para fins práticos. No geral, a versão BX apresenta melhor desempenho que a XB, em virtude das aproximações extras (desconsideração dos efeitos das barras PVs e dos elementos *shunts* na matriz de sensibilidade $P-\theta$) necessárias para a obtenção da última.

O FCDR foi utilizado para o traçado da mesma curva PV da Figura 1 parte II [2], utilizando o mesmo sistema da Figura 1 parte I [1], e o mesmo procedimento usado no caso do método de Newton [2]. Os resultados mostram que, embora seja possível obter os mesmos pontos, o número de

¹ Dilson Amancio Alves e Rogério R. Matarucco, UNESP—Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Elétrica, Campus de Ilha Solteira, C.P. 31, 15385-000, Ilha Solteira SP, Brasil, +55 18 3743 1163, dalves@dee.feis.unesp.br

meias iterações necessárias é muito alto, em torno de 100, enquanto que para o método de Newton tem-se 10 iterações [2]. Interrompendo o processo de cálculo com um número menor de iterações a potência máxima alcançada será proporcionalmente menor. Por exemplo, para 15 meia iterações o valor máximo de P_{g2} foi de 94,15 MW pelo FCDR usando a versão XB, enquanto que pelo método de Newton P_{g2} foi de 95,15 MW para 3 iterações [2].

Fluxo de Carga Desacoplado Rápido Modificado

Os métodos FCDR modificados (FCDRM) foram obtidos a partir dos respectivos métodos de Newton modificados usando o mesmo procedimento mostrado em [6]. O sistema considerado para a obtenção dos FCDRM pode ser visto na Figura 1 a seguir.

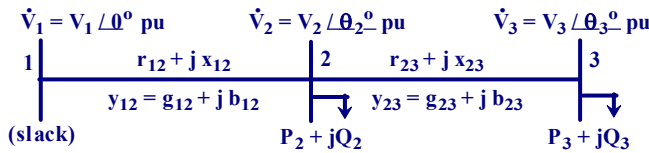


FIGURA 1
SISTEMA DE TRÊS BARRAS

Os valores numéricos adotados para os componentes deste sistema foram os seguintes: $V_1 = 1,19/0^\circ$ p.u., $z_{12} = (1/3) \times (0,3 + j 1,0)$ p.u., $z_{23} = (2/3) \times (0,3 + j 1,0)$ p.u., e $P_2 + jQ_2 = 0 + j 0$. Estes valores, bem como a tolerância de 10^{-5} p.u. adotada para a convergência dos mismatches e o esquema de iteração padrão, são usados em todos os exemplos que se seguem para os métodos desacoplados, excetuando os casos para os quais for especificado de forma diferente. Entende-se por esquema de iteração padrão aquele que, após a convergência de um dos subproblemas, iterações sucessivas podem ser realizadas no outro subproblema, até que ambos atinjam a convergência ou, o que pode ocorrer, o subproblema convergido diverja [4].

Curvas QV e PV

Para se obter as curvas QV e PV segue-se o mesmo procedimento apresentado em [2]. No caso da curva QV, com a especificação da tensão V_k eliminam-se a linha e a coluna k da matriz B'' , procedimento similar ao utilizado para as barras PV. Para cada tensão especificada V_k executa-se um programa de FCDRM e obtém-se a potência reativa Q_k necessária para se manter o nível preestabelecido de tensão. Da mesma forma, para se obter a curva PV pode-se especificar o ângulo da tensão da barra k . A barra é redefinida como sendo do tipo $Q\theta$. Com isso, θ_k deixa de ser uma variável dependente e, conseqüentemente, pode-se eliminar as respectivas linha e coluna k da matriz B' . Para cada valor especificado de θ_k obtém-se a respectiva potência ativa P_k . Nestes dois casos, excetuando a eliminação da linha ou da coluna k em função do parâmetro (V_k ou θ_k) do método considerado, não há alterações nas leis de formação das

matrizes B' e B'' , e ambas as versões BX e XB podem ser utilizadas em suas formas convencionais.

Entretanto, a obtenção das curvas QV e PV por meio da especificação de θ_k e V_k , respectivamente, conduzem a leis de formação para as matrizes B' e B'' um pouco diferentes das da convencional. A seguir é apresentado o desenvolvimento da versão XB para a obtenção da curva QV com θ como parâmetro, e BX para a obtenção da curva PV com V como parâmetro. A equação correspondente de Newton para o sistema da Figura 1, considerando $V_2 = V_3 = 1$ p.u. e $\theta_2 = \theta_3 = 0$, torna-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(b_{12} + b_{23}) & b_{23} & (g_{12} + g_{23}) & -g_{23} \\ b_{23} & -b_{23} & -g_{23} & g_{23} \\ -(g_{12} + g_{23}) & g_{23} & -(b_{12} + b_{23}) & b_{23} \\ g_{23} & -g_{23} & b_{23} & -b_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Versão XB para a Obtenção da Curva QV

Para a obtenção das matrizes B' e B'' da versão XB, para o caso da curva QV, utilizando θ_3 como variável independente, o sistema (2) deverá ser posto na seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(b_{12} + b_{23}) & b_{23} & (g_{12} + g_{23}) & -g_{23} \\ g_{23} & -g_{23} & b_{23} & -b_{23} \\ -(g_{12} + g_{23}) & g_{23} & -(b_{12} + b_{23}) & b_{23} \\ b_{23} & -b_{23} & -g_{23} & g_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

o qual após a eliminação da linha e coluna correspondente a θ_3 conduz a:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(b_{12} + b_{23}) & (g_{12} + g_{23}) & -g_{23} \\ -(g_{12} + g_{23}) & -(b_{12} + b_{23}) & b_{23} \\ b_{23} & -g_{23} & g_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix},$$

$$= \begin{bmatrix} H_\theta & N_\theta \\ M_\theta & L_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

e que corresponde ao sistema da equação (3.35) para $V_2 = V_3 = 1$ p.u. e $\theta_2 = \theta_3 = 0$. Usando o mesmo procedimento de [6], obtém-se a matriz Heq :

$$Heq_\theta = H_\theta - N_\theta \times L_\theta^{-1} \times M_\theta, \quad (5)$$

a qual após a substituição e devidas manipulações conduz a:

$$Heq_\theta = \left[\frac{1}{x_{12}} + \frac{1}{x_{23}} + g_{23} \left(\frac{g_{23}}{b_{23}} - \frac{g_{12}}{b_{12}} \right) + b_{23} \left(\frac{g_{12}}{b_{12}} \frac{b_{23}}{g_{23}} - 1 \right) \right]. \quad (6)$$

Para sistemas com topologia radial e relação r/x idênticas tem-se:

$$Heq_\theta = [1/x_{12} + 1/x_{23}]. \quad (7)$$

Observa-se que a matriz $Heq_\theta = B'$ da versão XB do método convencional, e, conseqüentemente, a mesma lei de formação. Observa-se que neste caso, a matriz B' não apresentará a linha e a coluna da variável (θ_3) que foi escolhida como parâmetro. Já a matriz B'' terá a lei de formação diferente da correspondente do método convencional apenas na linha correspondente a V_3 , cujos

elementos não diagonais correspondentes a b_{3i} devem ser substituídos pelos respectivos $-g_{3i}$, enquanto que o elemento da diagonal $B_{33} = \Sigma(-b_{3i})$ deverá ser substituído por $G_{33} = \Sigma(g_{3i})$. Uma outra observação importante é que agora, no cálculo de V_3 , é usado o *mismatch* de P_3 e não o de Q_3 .

Versão BX para a Obtenção da Curva PV

Para obter as matrizes B' e B'' da versão BX, usada no traçado da curva PV, considerando V_3 como variável independente, parte-se da mesma matriz do sistema (3). Entretanto, a linha e coluna eliminadas são as correspondentes a V_3 , ou seja, a última linha e a última coluna. O sistema matricial resultante será:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(b_{12} + b_{23}) & b_{23} & (g_{12} + g_{23}) \\ g_{23} & -g_{23} & b_{23} \\ -(g_{12} + g_{23}) & g_{23} & -(b_{12} + b_{23}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$= \begin{bmatrix} H_V & N_V \\ M_V & L_V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix}$$

e que corresponde ao sistema (2) da parte II [2] para $V_2 = V_3 = 1$ p.u. e $\theta_2 = \theta_3 = 0$. Conforme [6], a matriz Leq_V é dada por:

$$Leq_V = L_V - M_V \times H_V^{-1} \times N_V, \quad (9)$$

e que após as substituições e manipulações algébricas produzem exatamente a mesma expressão da obtida para a matriz Heq_θ em (6). Com as mesmas considerações feitas para a (6), pode-se obter:

$$Leq_V = [1/x_{12} + 1/x_{23}], \quad (10)$$

ou seja, para se obter a matriz $Leq_V = B''$ da versão BX do método convencional, a qual, consequentemente, apresenta a mesma lei de formação, diferindo apenas na sua dimensão devido à eliminação da linha e coluna da variável (V_3) escolhida como parâmetro. A matriz B' , por outro lado, terá a lei de formação diferente da correspondente do método convencional apenas na linha correspondente a θ_3 cujos elementos não diagonais correspondentes a b_{3i} são substituídos pelos respectivos g_{3i} , enquanto que o elemento da diagonal $B_{33} = \Sigma(-b_{3i})$ é substituído por $G_{33} = \Sigma(g_{3i})$. Aqui também deve se observar que é usado o *mismatch* de Q_3 , e não o de P_3 , no cálculo de θ_3 .

Versões XB e BX para a Obtenção das Curvas PV e QV

Uma forma mais geral de se obter a lei de formação das matrizes B' e B'' para todas as possíveis versões (XB e BX), seria considerar a matriz completa representada por (2), obter as matrizes Heq e Leq , e, em seguida, obter as versões a serem usadas na obtenção dos valores máximos de P e Q . Procedendo dessa forma para o sistema da Figura 1, no caso da versão XB obtém-se:

$$Heq = \begin{bmatrix} (1/x_{12} + 1/x_{23}) & -1/x_{23} \\ 1/r_{23} & -1/r_{23} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

e para a versão BX:

$$Leq = \begin{bmatrix} (1/x_{12} + 1/x_{23}) & -1/x_{23} \\ -1/r_{23} & 1/r_{23} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

No caso mais geral de uma barra k qualquer, considerando o uso de θ_k para a obtenção da curva QV, pode-se obter as matrizes das respectivas versões XB e BX como segue:

- Versão XB: para se obter B' , elimina-se a respectiva linha e coluna correspondente a θ_k na matriz Heq , como p. ex., no caso de (11), da qual se obtém a (7) após a eliminação da linha e da coluna 3. Portanto, a sua lei de formação será a mesma da matriz B' da versão XB do método convencional, exceto, conforme já mencionado, pela eliminação da linha e coluna correspondente a θ_k . Por outro lado, a lei de formação da matriz B'' é diferente da correspondente do método convencional apenas na linha correspondente a V_k , cujos elementos não diagonais correspondentes a b_{ki} são substituídos pelos respectivos $-g_{ki}$, enquanto que o elemento da diagonal $B_{kk} = \Sigma(-b_{ki})$ é substituído por $G_{kk} = \Sigma(g_{ki})$. Outra observação importante é que agora é usado o *mismatch* de P_k , e não o de Q_k , no cálculo de V_k .
- Versão BX: a matriz B' tem a mesma lei de formação da matriz B' (que é a mesma da matriz H) da versão BX do método convencional, exceto pela eliminação da respectiva linha e coluna correspondente a θ_k . A lei de formação da matriz B'' é igual à da matriz Leq , similar à (12), ou seja, a mesma lei de formação da matriz B'' da versão BX do método convencional, excetuando a linha correspondente a V_k , cujos elementos não diagonais correspondentes a $-1/x_{ki}$ são substituídos pelos respectivos $-1/r_{ki}$, enquanto que o elemento da diagonal $B_{kk} = \Sigma(1/x_{ki})$ é substituído por $\Sigma(1/r_{ki})$. Também, neste caso, é usado o *mismatch* de P_k , e não o de Q_k , no cálculo de V_k .

Já no caso de se considerar o uso de V_k para a obtenção da curva PV, pode-se obter as matrizes das respectivas versões XB e BX como segue:

- Versão XB: para se obter B'' , elimina-se a respectiva linha e coluna correspondente a V_k na matriz L , obtendo-se com isso, a mesma lei de formação da matriz B'' da versão XB do método convencional, exceto pela eliminação da linha e coluna referida anteriormente. A lei de formação da matriz B' é igual à da matriz Heq (similar à (11)), ou seja, apresenta a mesma lei de formação da matriz B' da versão XB do método convencional, excetuando a linha correspondente a θ_k , cujos elementos não diagonais correspondentes a $-1/x_{ki}$ serão substituídos pelos respectivos $1/r_{ki}$, enquanto que o elemento da diagonal que é igual a $\Sigma(1/x_{ki})$ é substituído por $\Sigma(-1/r_{ki})$. Outra observação importante é

que agora é usado o *mismatch* de Q_k , e não o de P_k , no cálculo de θ_k .

- Versão BX: para se obter B'' , elimina-se a respectiva linha e coluna correspondente a V_k na matriz Leq , similar ao procedimento que se faz para obter a (10) a partir de (12). Portanto, a sua lei de formação é a mesma da matriz B'' da versão BX do método convencional, a menos das referidas linha e coluna eliminadas. A matriz B' tem a lei de formação diferente da correspondente do método convencional apenas na linha correspondente a θ_k cujos elementos não diagonais correspondentes a b_{ki} são substituídos pelos respectivos g_{ki} , enquanto que o elemento da diagonal $B_{kk} = \Sigma(-b_{ki})$ é substituído por $G_{kk} = \Sigma(-g_{ki})$. Aqui também observa-se que agora é usado o *mismatch* de Q_k , e não o de P_k , no cálculo de θ_k .

FCDRM para a Obtenção das Curvas SV

Da mesma forma que foi feito para o método de Newton [2], pode-se obter um algoritmo mais geral para o FCDR, sendo que os anteriores passam a ser uma particularidade. Assim sendo, para o sistema de três barras da Figura 1 p. ex., no caso de usar-se a tensão da barra 3 (V_3) como parâmetro a equação ficaria:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(b_{12} + b_{23}) & b_{23} & (g_{12} + g_{23}) & 0 \\ b_{23} & -b_{23} & -g_{23} & -K_p S_3 \cos \varphi \\ -(g_{12} + g_{23}) & g_{23} & -(b_{12} + b_{23}) & 0 \\ g_{23} & -g_{23} & b_{23} & -K_q S_3 \sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (13)$$

Procedendo como nos casos anteriores pode-se obter a matriz Leq , a qual terá a seguinte forma:

$$Leq = \begin{bmatrix} (1/x_{12} + 1/x_{23}) & -K_p S_3 \cos \varphi (g_{12}/b_{12} - g_{23}/b_{23}) \\ -\frac{1}{x_{23}} & -K_q S_3 \sin \varphi + (g_{23}/b_{23}) K_p S_3 \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (14)$$

a qual, nos casos em que a rede do sistema apresentar a relação r/x idêntica para todos as linhas, se reduz a:

$$Leq = \begin{bmatrix} (1/x_{12} + 1/x_{23}) & 0 \\ -1/x_{23} & -K_q S_3 \sin \varphi + (G_{33}/B_{33}) K_p S_3 \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (15)$$

onde os termos G_{33} e B_{33} correspondem aos elementos diagonais da matriz H e N calculadas na condição $V_2 = V_3 = 1$ p.u. e $\theta_2 = \theta_3 = 0$, vide a matriz de (2). Portanto, as aproximações consideradas são as mesmas feitas para um sistema não radial conforme em [6]. O algoritmo da versão BX é o mesmo do apresentado em [6], exceto que a na formação da matriz B'' as diferenciais correspondentes à variável V_3 , e que agora é um uma variável independente (especificada), são substituídas pelas diferenciais com relação à nova variável λ , ou seja, todos os elementos da coluna 3 são nulos a menos do elemento diagonal L_{22} que é igual a $[-K_q S_3 \sin \varphi + (G_{33}/B_{33}) K_p S_3 \cos \varphi]$.

No caso de usar o ângulo da tensão da barra 3 (θ_3) como parâmetro a equação resulta:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(b_{12} + b_{23}) & 0 & (g_{12} + g_{23}) & -g_{23} \\ b_{23} & -K_p S_3 \cos \varphi & -g_{23} & g_{23} \\ -(g_{12} + g_{23}) & 0 & -(b_{12} + b_{23}) & b_{23} \\ g_{23} & -K_q S_3 \sin \varphi & b_{23} & -b_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \lambda \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Analogamente, como no caso anterior pode-se obter a matriz Heq :

$$Heq = \begin{bmatrix} (1/x_{12} + 1/x_{23}) & -K_q S_3 \sin \varphi ((g_{12}/b_{12}) - (g_{23}/b_{23})) \\ -1/x_{23} & -K_p S_3 \cos \varphi - (g_{23}/b_{23}) K_q S_3 \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (17)$$

a qual, nos casos em que a rede do sistema apresentar a relação r/x idêntica para todos as linhas, se reduz a:

$$Heq = \begin{bmatrix} (1/x_{12} + 1/x_{23}) & 0 \\ -1/x_{23} & -K_p S_3 \cos \varphi - (G_{33}/B_{33}) K_q S_3 \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (18)$$

onde os termos G_{33} e B_{33} correspondem aos elementos diagonais da matriz H e N calculadas na condição $V_2 = V_3 = 1$ p.u. e $\theta_2 = \theta_3 = 0$, vide a matriz da equação (2). O algoritmo da versão XB é o mesmo do apresentado em [6], exceto que a formação da matriz B' deve levar em conta a nova variável λ , ao invés de θ_3 , e com isso, a correspondente coluna tem todos os seus elementos iguais a zero excetuando o elemento diagonal H_{22} que é igual a $[-K_p S_3 \cos \varphi - (G_{33}/B_{33}) K_q S_3 \sin \varphi]$. Observe que da mesma forma que no caso do método de Newton [2], as curvas PV ($f_p = 1$, isto é, $K_p = 1$ e $K_q = 0$, Figura 2(a) [2]) e QV ($f_p = 0$, isto é, $K_p = 0$ e $K_q = 1$, Figura 2(b) [2]) passam a ser casos particulares da metodologia empregada para traçar a curva SV.

As Figuras 2 e 3 a seguir apresenta as curvas SV obtidas pelos métodos FCDR propostos considerando variações de potência aparente na barra 3, para vários f_p , isto é, várias relações entre K_p e K_q . Também são apresentados os números de iterações gatos para cada um dos casos. As curvas foram obtidas através de incrementos sucessivos de potência aparente na barra 3. Também, encontram-se ilustrados nas figuras os casos particulares das Figuras 2(a) e 2(b) apresentadas em [2].

A análise das expressões analíticas permitem o perfeito entendimento das dificuldades de convergência apresentadas pelos métodos numéricos. A extrapolação dos métodos de Newton e desacoplado rápido, para variações de carga por todo o sistema, é feita a partir da parametrização por λ , usado na obtenção das curvas SV. Considera-se que a carga varia não em apenas uma única barra, mas por todo o sistema, e que a variação de potência ativa das cargas é assumida não somente pela barra *slack*, mas por todas as barras de geração disponíveis. O conjunto das equações do FC, em sua forma mais geral, apresentará a seguinte forma:

$$G(V, \theta, \lambda) = 0, \quad (19)$$

a qual pode ser rescrita como:

$$\begin{aligned} \lambda P^{esp} - P(V, \theta) &= 0 \quad \text{para barras } PQ \text{ e } PV \\ \lambda Q^{esp} - Q(V, \theta) &= 0 \quad \text{para barras } PQ, \end{aligned} \quad (20)$$

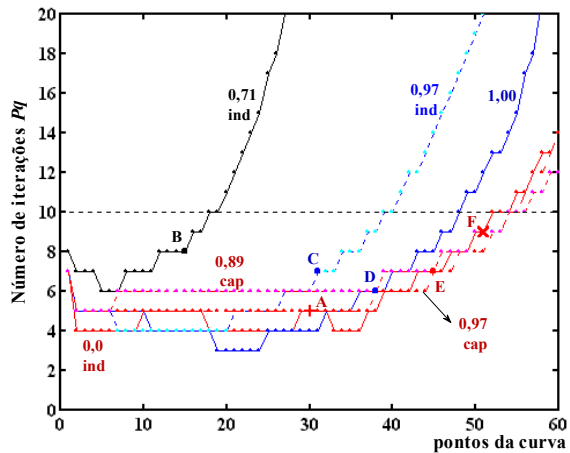
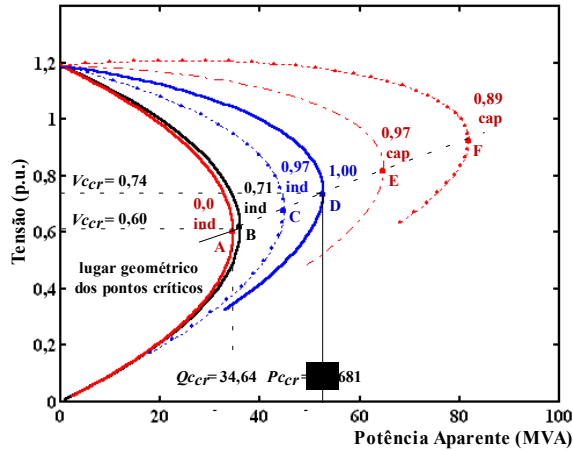


FIGURA 2

CURVAS SV PARA O SISTEMA DE TRÊS BARRAS DA FIGURA 1, UTILIZANDO V_3 COMO PARÂMETRO.

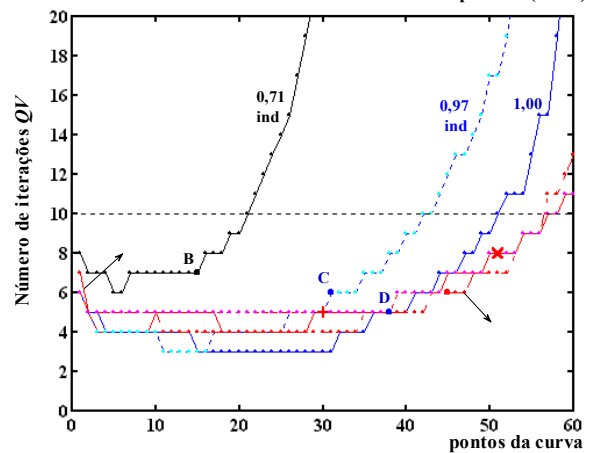
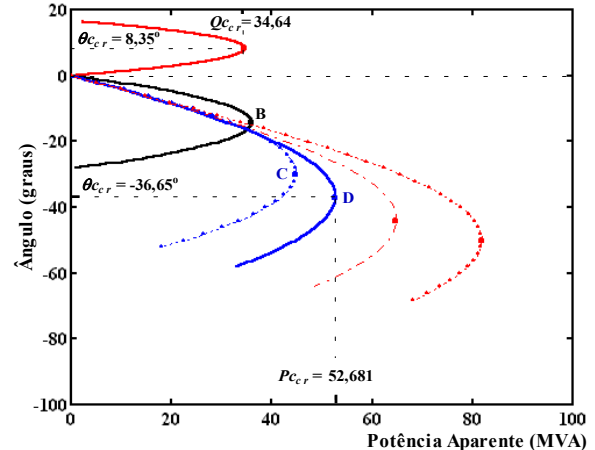


FIGURA 3

CURVAS SV PARA O SISTEMA DE TRÊS BARRAS DA FIGURA 1, UTILIZANDO θ_3 COMO PARÂMETRO.

onde $P^{esp} = P_g^{esp} - P_c^{esp}$ é a diferença entre as potências ativas gerada e consumida nas barras de carga (PQ) e de geração (PV), $Q^{esp} = Q_g^{esp} - Q_c^{esp}$ para as barras PQ, e $\lambda = 1$ corresponde ao carregamento do caso base. Na resolução de (20) usa-se ou o método de Newton ou o desacoplado rápido, de forma similar ao usado para as curvas SV.

CONCLUSÕES

Neste trabalho são apresentados e avaliados os métodos de Fluxo de Carga Desacoplado Rápido convencional e propostos, considerando as variações de cargas numa única barra. Estes métodos permitem o traçado completo das curvas PV através de simples modificações dos métodos convencionais de Newton [2] e FCDR [4]. Além disso, mantém suas vantagens características. Dos resultados pode-se concluir que ambas as versões, BX e XB, do FCDR modificado são adequadas para o traçado completo da curva PV. Além disso, essas versões modificadas do FCDR também permitem obter soluções na parte inferior da curva PV, contradizendo a noção de que as versões desacopladas sempre fornecem as soluções da parte superior da curva PV.

Como conclusão geral comprova-se que todas as metodologias propostas para a solução de um sistema simples de 2 barras, conduzem à mesma curva de solução.

REFERÊNCIAS

- [1] Alves, D. A. e Matarucco, R. R., "Fluxo de Carga versus Fluxo de Carga Continuado Parte I: Métodos Analíticos", Proc. of 3rd International Conference on Engineering and Computer Education, 2003, SP, Brasil.
- [2] Alves, D. A. e Matarucco, R. R., "Fluxo de Carga versus Fluxo de Carga Continuado Parte II: Métodos de Newton", Proc. of 3rd International Conference on Engineering and Computer Education, 2003, SP, Brasil.
- [3] Seydel, R., "From Equilibrium to Chaos: Practical Bifurcation and Stability Analysis", 2nd ed., Springer-Verlag, New York, 1994
- [4] Stott B. e Alsac O., "Fast Decoupled Load Flow", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 93, 1974, pp. 859-869.
- [5] Van Amerongen, R. A. M., "A General-Purpose Version of the Fast Decoupled Load Flow", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 4, N° 2, 1989, pp. 760-770
- [6] Monticelli A., Garcia, A., e Saavedra, O. R., "Fast Decoupled Load Flow : Hypothesis, Derivations and Testing", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 5, N° 4, Novembro, 1990, pp. 1425-1431.