

Obtaining the Maximum Loading Point of Electric Power Systems using the Decoupled Methods of Newton

A. Bonini Neto, E. M. Magalhães, D. A. Alves

Abstract— This paper presents a proposed Newton decoupled method modification (simultaneous resolution algorithm and alternate) with the addition of an equation line passing through of a point in the plane determined by the variables: loading factor and the nodal voltage magnitude of a bus k . The use of this parameterization technique eliminates the singularity of Jacobian matrix and all the consequent problems of ill-conditioning, increasing also the group of voltage variables that can be used as parameter and therefore, obtain the complete tracing of P-V curves and the maximum loading point of electric power systems. Another important factor that will be presented in this paper is the reduction of the CPU time that the decoupled methods provide. A comparison of the simultaneous and alternate resolution schemes will be presented.

Keywords— Continuation method, Decoupled load flow, Parameterization techniques, Maximum loading point, P-V curve.

I. NOMENCLATURA E SIMBOLOGIA

PMC – Ponto de máximo carregamento
 FCC – Fluxo de carga continuado
 P-V – Curva magnitude de tensão versus carregamento
 FC – Fluxo de carga
 MC – Margem de carregamento
 PM – Ponto médio
 MDN – Método Desacoplado de Newton
 MDNM – Método Desacoplado de Newton Modificado
 θ – Vetor dos ângulos de fase nodais
 V – Vetor das magnitudes de tensões nodais
 J – Matriz Jacobiana
 J_m – Matriz Jacobiana modificada
 G – Vetor composto pelas equações de balanço de potência ativa e reativa das barras do sistema
 ΔP – *Mismatches* de potência ativa
 ΔQ – *Mismatches* de potência reativa
 ΔR – *Mismatch* da equação da reta
 P_g^{esp} – Vetor de potência ativa gerada especificada
 Q_g – Vetor de potência reativa gerada
 P_c^{esp} – Vetor de potência ativa consumida especificada
 Q_c^{esp} – Vetor de potência reativa consumida especificada
 P^{esp} – Vetor da diferença entre os vetores de potência ativa gerada e consumida especificadas
 Q^{esp} – Vetor da diferença entre os vetores de potência reativa gerada e o de potência reativa consumida especificada
 L_{eq} – Submatriz da matriz J_m
 PV – Barra de geração
 PQ – Barra de carga

V_{cb} – Magnitude da tensão no caso base
 λ – Fator de carregamento
 α – Parâmetro de continuação que determina a nova equação de reta
 Ω – Conjunto de todas as barras da rede
 g_{kl} – Condutância série do ramo entre as barras k e l
 b_{kl} – Susceptância série do ramo entre as barras k e l

II. INTRODUÇÃO

RECENTEMENTE, vários fatores estão afetando os sistemas de energia elétrica brasileiro, entre eles podemos destacar a crise hídrica que o país vem sofrendo em regiões importantes como Sudeste e Centro-Oeste, fazendo com que os níveis dos reservatórios fiquem abaixo da média, e é nessas regiões em que se concentra o maior número de usinas hidroelétricas do país. Outros fatores como, restrições ambientais, atrasos nas obras (usinas e linhas de transmissão (LT)) e principalmente o aumento da demanda de energia elétrica, estão fazendo com que os sistemas de energia elétrica operem próximos de seus limites operacionais, ou seja, próximos do ponto crítico, ponto de máximo carregamento (PMC) [1] [2].

A Fig. 1 a seguir mostra o cenário dos reservatórios da região sudeste e centro-oeste nos anos de 2013 e 2014. Observa-se uma queda acentuada no nível da água dos reservatórios no decorrer do ano de 2014 e uma diminuição expressiva em relação ao ano de 2013, Fig. 1(a). Foi feita uma média dos principais reservatórios localizados nas principais bacias existentes na região Sudeste e Centro-Oeste (Rios Paranaíba, Grande, Paraná, Paranapanema, entre outras). A variação ficou em torno de 50% entre os anos de 2013 e 2014. Já para todo o território nacional, o nível dos reservatórios variou em torno de 40%, como pode ser visto na Fig. 1(b). Os dados foram obtidos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [3].

Atualmente, setembro de 2015 [3], o nível dos reservatórios por regiões no Brasil se encontra com uma média de 40% de sua capacidade, conforme mostrado na Fig. 2.

Além dos dados do nível dos reservatórios atualmente, dados do ONS consideram como um dos cenários brasileiros, uma taxa média de crescimento anual do Produto Interno Bruto (PIB) de 5% para o quinquênio 2011-2015, o que representa uma taxa anual de crescimento da carga para o mesmo período equivalente também a 5% [1].

A combinação desses fatores pode ser desastrosa, pois tornam os sistemas elétricos de potência vulneráveis, ou seja,

qualquer aumento de carga expõe ao risco de uma situação de instabilidade de tensão. Diante disso, visando assegurar uma condição segura de operação para os sistemas elétricos de potência, surgem vários métodos de análise da estabilidade estática de tensão [4-17]. Esses métodos possibilitam avaliar as condições de operação do sistema elétrico e de sua margem de carregamento segura. Essa análise pode ser realizada por meio da curva P-V (obtenção do perfil de tensão das barras em função de seu carregamento). Estas curvas são de grande importância, pois permitem o entendimento das condições de operação do sistema para diferentes níveis de carregamentos, e têm sido recomendadas pelas empresas do setor elétrico internacional [18] e nacional [19] para a avaliação da estabilidade estática de tensão. A obtenção do PMC dos sistemas elétricos de potência está entre os principais objetivos dos métodos de análise da estabilidade estática de tensão. A importância deste ponto reside no fato de definir a fronteira entre as regiões de operação estável e instável, além disso, neste ponto que se faz a análise modal e são fornecidas informações para reforço do sistema [20-21].

Os métodos mais utilizados para obtenção das curvas P-V são o fluxo de carga convencional (FC), método de Newton e o fluxo de carga continuado (FCC). O primeiro considerado robusto, pois converge quase sempre e com um número reduzido de iterações, mas devido a problemas de singularidade da matriz Jacobiana J no PMC, não obtém com precisão. Por outro lado, o FCC supera os problemas de singularidade no PMC devido à adição de equações parametrizadas que possibilita com isso, a determinação precisa do PMC [6-17]. O modo como este parâmetro é escolhido é que difere os métodos de FCC.

Com base nesse contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar um estudo da utilização de outros métodos de FC para a obtenção completa das curvas P-V. Esses métodos, derivados do FC convencional e presentes na literatura, é o Método Desacoplado de Newton (MDN), cujos algoritmos simultâneo e alternado são aplicados ao FCC com o objetivo de obter o PMC dos sistemas elétricos de potência com uma precisão tão boa quanto se queira. Neste trabalho se propõem o Método Desacoplado de Newton Modificado (MDNM) que utiliza a técnica de parametrização geométrica proposta em [8], na qual se elimina a singularidade da matriz Jacobiana pela adição da equação de uma reta que passa no plano formado pelas variáveis fator de carregamento e magnitude da tensão de uma barra k . O interesse pelo uso dos métodos desacoplados em particular, se deve à necessidade de redução do tempo computacional exigido pelos FCC para o traçado das curvas P-V. Nesse trabalho são feitas comparações entre os desempenhos dos FCC utilizando o método de Newton e o método de Newton desacoplado considerando os algoritmos de resolução simultâneo e alternado. Cabe ressaltar que o desacoplamento altera o processo de convergência, modificando o caminho percorrido entre o ponto inicial e a solução, mas não provoca alterações significativas na solução final do problema original de fluxo de carga [21].

Os resultados foram obtidos para os sistemas testes do IEEE e sistemas de grande porte como o sistema Sul-Sudeste Brasileiro de 638 barras e o sistema de 904 barras do Sudoeste Americano.

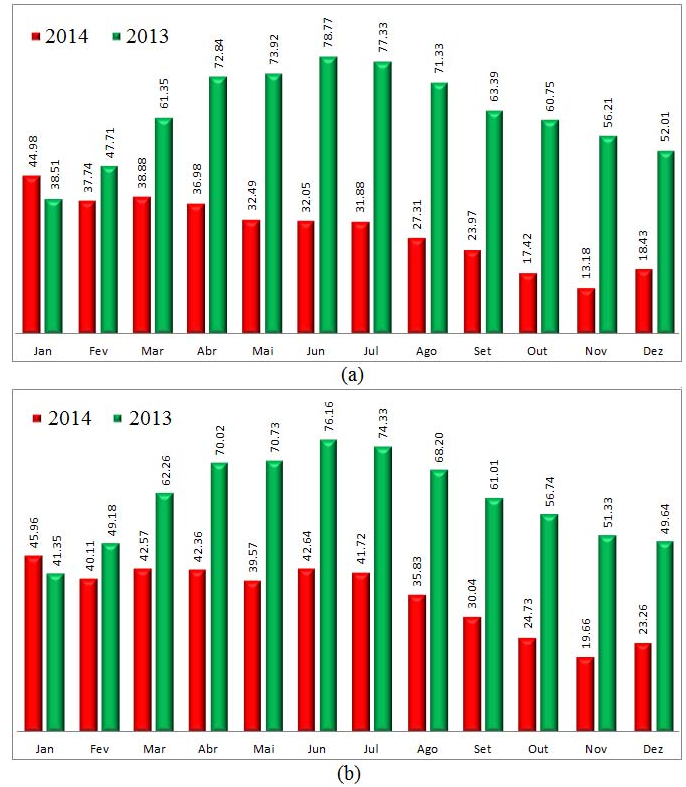


Figura 1. Nível dos reservatórios: (a) região Sudeste e Centro-Oeste no decorrer dos anos de 2013 e 2014, (b) nacional no decorrer dos anos de 2013 e 2014.

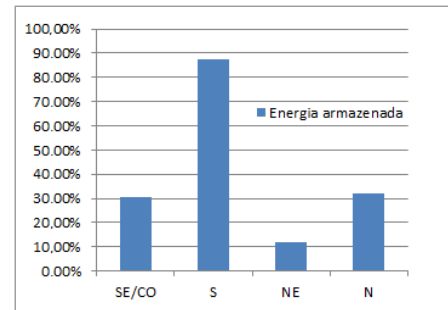


Figura 2. Nível dos reservatórios por regiões do Brasil em setembro de 2015.

III. FLUXO DE CARGA CONTINUADO

Os sistemas elétricos de potência em estudos de estabilidade estática de tensão são representados pelo seguinte conjunto de equações do FC:

$$G(\theta, V, \lambda) = 0, \text{ ou}$$

$$\Delta P(\theta, V, \lambda) = \lambda P^{\text{esp}} - P(\theta, V) = 0 \quad (1)$$

$$\Delta Q(\theta, V, \lambda) = \lambda Q^{\text{esp}} - Q(\theta, V) = 0$$

em que λ é o fator de carregamento, V e θ os vetores das magnitudes das tensões nodais e o ângulo das tensões nodais, $P^{\text{esp}} = P_g^{\text{esp}} - P_c^{\text{esp}}$ o vetor da diferença entre as potências ativas gerada e consumida para as barras de carga (PQ) e de geração (PV), e $Q^{\text{esp}} = Q_g^{\text{esp}} - Q_c^{\text{esp}}$ o vetor da diferença entre as potências reativas gerada e consumida para as barras de carga PQ. ΔP é denominado resíduo (*mismatch*) de potência ativa e

ΔQ o de potência reativa, respectivamente, $P(\theta, V)$ corresponde as equações não lineares de potência ativa e $Q(\theta, V)$ corresponde as de potência reativa para cálculo dos vetores V e θ . Para uma barra k qualquer, $P_k(\theta, V)$ e $Q_k(\theta, V)$ são dados por:

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

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

sendo Ω_k o conjunto de todas as barras diretamente conectadas à barra k , ($Y_{k,k}=G_k+jB_k$) o elemento da diagonal k da matriz admitância nodal (Y), e ($y_{kl}=g_{kl}+jb_{kl}$) a admitância série do ramo que conecta as barras k e l . Depois de definir um padrão de variar a carga e uma estratégia de despacho de geração, utilizando um FC é realizado o traçado da curva P-V por meio de sucessivas soluções de (1). Nesse processo, P^{esp} e Q^{esp} são as incógnitas independentes, enquanto que V e θ , exceto V e θ da barra de referência (*slack*) e V das barras de geração (PV), são as incógnitas dependentes. Como λ foi introduzido como incógnita em (1), o sistema de equações não lineares resultará em n equações e $n+1$ incógnitas. Podendo assim, qualquer uma das $n+1$ incógnitas ser definida como parâmetro da continuação. A forma de identificar cada solução ao longo da curva trajetória de soluções a ser obtida é denominada parametrização. O PMC é obtido, por exemplo, incrementando gradualmente o λ , a partir do ponto inicial caso base ($\lambda=1$) até um valor onde não mais se encontra solução (FC não converge ou diverge). Neste ponto, em geral, um controle de passo é realizado consistindo numa simples diminuição no incremento de λ e uma próxima solução é obtida a partir da última solução encontrada. Após várias repetições desse processo, o último ponto convergido é considerado o PMC. No entanto, conforme comentado, a divergência do Fluxo de Carga é devido à singularidade de J de (1) no PMC e, conseqüentemente, determiná-lo precisamente não é possível. Como visto na introdução desse trabalho, muitos autores propuseram diferentes formas de implementar os conhecidos métodos da continuação para eliminar as dificuldades numéricas relacionadas pela singularidade de J e determinar com precisão o PMC.

IV. MÉTODO DESACOPLADO DE NEWTON MODIFICADO

A técnica de parametrização utilizada no MDNM foi desenvolvida a partir de [8], no qual se acrescenta uma equação de reta ao sistema (1), a qual passa por um ponto “O” escolhido (λ^0, V_k^0) no plano de coordenadas formada pelas variáveis fator de carregamento (λ) e magnitude da tensão nodal (V_k) de uma barra k qualquer:

$$\Delta R(V_k, \lambda, \alpha) = (V_k^1 - V_k^0) - \alpha(\lambda^1 - \lambda^0) = 0 \quad (2)$$

O seguinte sistema de equações não lineares é obtido:

$$\begin{aligned} \Delta P(\theta, V, \lambda) &= \lambda P^{esp} - P(\theta, V) = 0 \\ \Delta Q(\theta, V, \lambda) &= \lambda Q^{esp} - Q(\theta, V) = 0 \\ \Delta R(V_k, \lambda, \alpha) &= (V_k - V_k^0) - \alpha(\lambda - \lambda^0) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

em que α é o coeficiente angular da reta. Com a inclusão da equação (2), λ é tratado como uma incógnita dependente e α pode ser considerada a incógnita independente, ou seja, é escolhida como parâmetro, seu valor é prefixado. Como o número de incógnitas é igual ao de equações tem-se a condição necessária para que a solução seja obtida (desde que não haja singularidade). Nota-se que a prefixação de α corresponde à técnica de previsão trivial ou polinomial modificada de ordem zero [20]. Conforme a Fig. 3 e o apresentado em [8], a partir do ponto inicial O (λ^0, V_k^0) e dos respectivos valores calculados para um caso base P ($\lambda^1=1, V_k^1$) obtém-se o valor inicial de $\alpha^1 = (V_k^1 - V_k^0) / (\lambda^1 - \lambda^0)$.

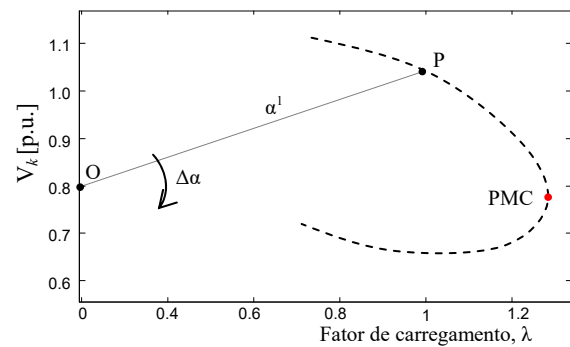


Figura 3. Reta inicial que passa por um ponto O (λ^0, V_k^0) e pelo ponto caso base P (λ^1, V_k^1) no plano λ - V .

Colocando o sistema de equações (3) na forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & -P^{esp} \\ M & L & -Q^{esp} \\ 0 & -e_k & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (4)$$

sendo e_k o vetor com todos os elementos iguais a zero, exceto o da coluna correspondente a barra k cuja a magnitude da tensão é utilizada para compor a reta. $H=\partial P/\partial \theta$, $N=\partial P/\partial V$, $M=\partial Q/\partial \theta$ e $L=\partial Q/\partial V$ são submatrizes que formam a matriz J do FC. Logo, a equação (4) assume a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N' \\ M' & L' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V' \end{bmatrix} \quad (5)$$

em que $\Delta Q' = [\Delta Q^T \Delta R]^T$ e $\Delta V' = [\Delta V^T \Delta \lambda]^T$. O desacoplamento permite utilizar dois algoritmos para resolução, o algoritmo simultâneo e o algoritmo alternado para os subproblemas $P\theta$ (ativo) e QV (reativo). Para este trabalho foi considerado o desacoplamento proposto em [22]. Sendo assim, considerando a equação (5), premultiplicando ΔP por $M'H^{-1}$ e somando o resultado às equações $\Delta Q'$, encontra-se o seguinte sistema de equações na forma desacoplada:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q' - M'H^{-1}\Delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N' \\ 0 & L_{eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V' \end{bmatrix} \quad (6)$$

em que $\mathbf{L}_{eq} = \mathbf{L}' - \mathbf{M}'\mathbf{H}^{-1}\mathbf{N}'$. Nesse caso ao resolver (6) há uma exigência na fatoração das duas matrizes: \mathbf{H} e \mathbf{L}_{eq} . Pode ser observado que (5) e (6) são equivalentes, ou seja, os vetores de solução $\Delta\theta$ e $\Delta\mathbf{V}'$ são iguais para os dois sistemas, a única diferença é que (6) pode ser resolvido de uma forma desacoplada, contudo em três passos [22]. O cálculo dos mismatches $\Delta\mathbf{Q}'$ no ponto $(\mathbf{V}, \theta + \mathbf{H}^{-1}\Delta\mathbf{P})$ é igual ao cálculo de $\Delta\mathbf{Q} - \mathbf{M}'\mathbf{H}^{-1}\Delta\mathbf{P}$ que também é demonstrado em [22]. Garantindo que resolvendo (6) de forma desacoplada leva-se em conta o acoplamento de \mathbf{M}' . Também é demonstrado em [22] que ao decorrer do processo iterativo, as correções dos ângulos das tensões $\Delta\theta_N = -\mathbf{H}^{-1}\mathbf{N}\Delta\mathbf{V}'$ são automaticamente levadas em conta na iteração seguinte.

O MDNM calcula as demais soluções via sucessivos incrementos ($\Delta\alpha$) no valor do parâmetro α . Para $\alpha = \alpha^1 + \Delta\alpha$, a solução de (3) fornece um novo ponto de operação (λ^2, V_k^2) que correspondente à interseção da reta com a curva trajetória de soluções $(\lambda - V_k)$ cujo novo valor de α ($\alpha^1 + \Delta\alpha$) é especificado. Para $\alpha = \alpha^1$, a solução encontrada resultará em $\lambda = 1,0$. As equações a seguir representam o algoritmo simultâneo.

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{P}(\theta^v, \mathbf{V}^v) = \mathbf{H}(\theta^v, \mathbf{V}^v)\Delta\theta^v \\ \Delta\mathbf{Q}'(\theta^v, \mathbf{V}^v, \lambda^v, \alpha^v) = \mathbf{L}_{eq}(\theta^v, \mathbf{V}^v, \lambda^v, \alpha^v)\Delta\mathbf{V}^v \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \theta^{v+1} = \theta^v + \Delta\theta^v \\ \mathbf{V}^{v+1} = \mathbf{V}^v + \Delta\mathbf{V}^v \\ \lambda^{v+1} = \lambda^v + \Delta\lambda^v \end{cases} \quad (8)$$

Para o algoritmo alternado, o sistema de equações é colocado nas seguintes formas:

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{P}(\theta^v, \mathbf{V}^t) = \mathbf{H}(\theta^v, \mathbf{V}^t)\Delta\theta^v \\ \theta^{v+1} = \theta^v + \Delta\theta^v \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{Q}'(\theta^{v+1}, \mathbf{V}^t, \lambda^t, \alpha^t) = \mathbf{L}_{eq}(\theta^{v+1}, \mathbf{V}^t, \lambda^t, \alpha^t)\Delta\mathbf{V}^t \\ \mathbf{V}^{t+1} = \mathbf{V}^t + \Delta\mathbf{V}^t \\ \lambda^{t+1} = \lambda^t + \Delta\lambda^t \end{cases} \quad (10)$$

Deste modo, a cada meia iteração, os vetores das incógnitas θ e \mathbf{V} são atualizados. Assim, a resolução de (9) correspondente à meia-iteração ativa, a qual é responsável por atualizar os ângulos de fase das tensões, e da mesma forma, a resolução de (10) corresponde à meia iteração reativa, a qual por sua vez é responsável pela atualização das magnitudes das tensões nodais. Logo, as velocidades de convergência para os subproblemas P θ e QV podem ser distintas [21].

4.1. Procedimento Geral adotado para o MDNM via fluxograma

A Fig. 4 apresenta o fluxograma do procedimento geral adotado para o traçado completo da curva P-V. Já nas Fig. 5 e 6 são apresentados os fluxogramas dos algoritmos simultâneo e alternado como parte do procedimento geral adotado para o traçado completo da curva P-V de sistemas elétricos de potência.

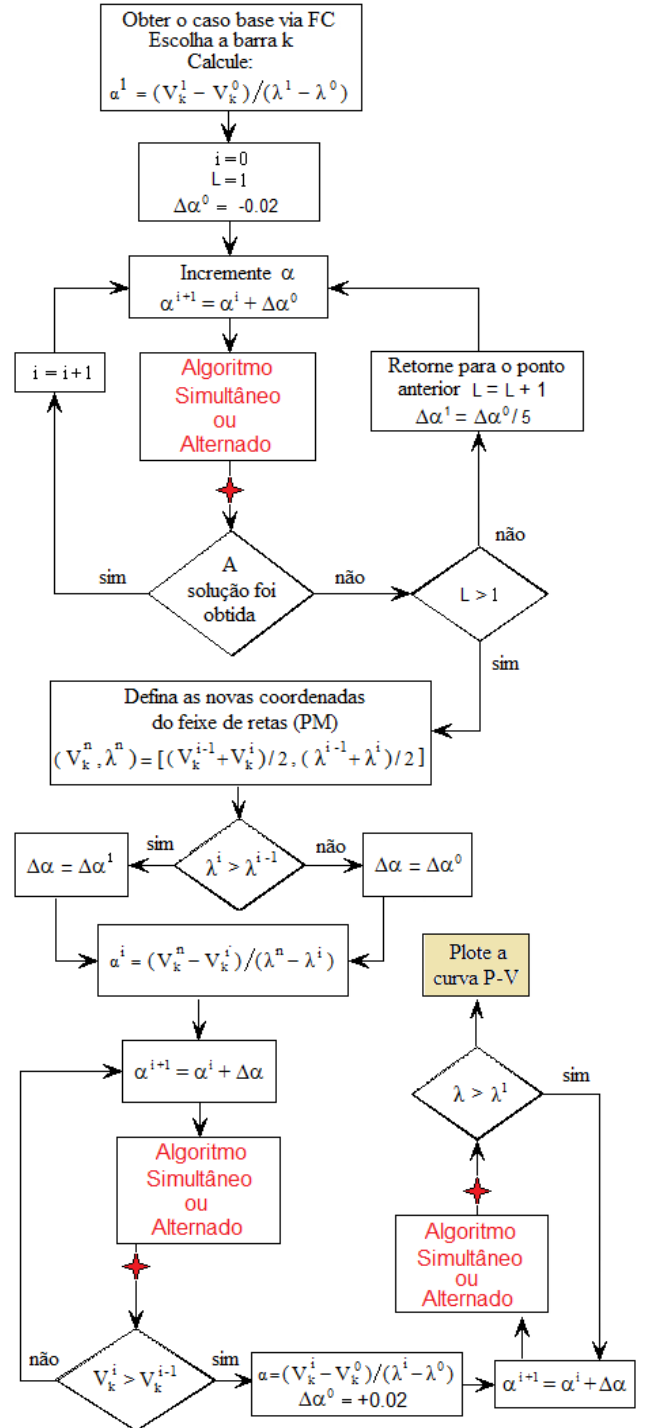


Figura 4. Procedimento geral para o traçado da curva P-V via Fluxograma.

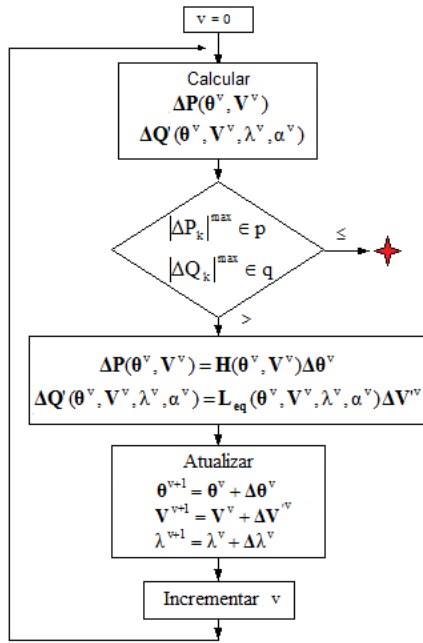


Figura 5. Fluxograma do algoritmo simultâneo do MDNM.

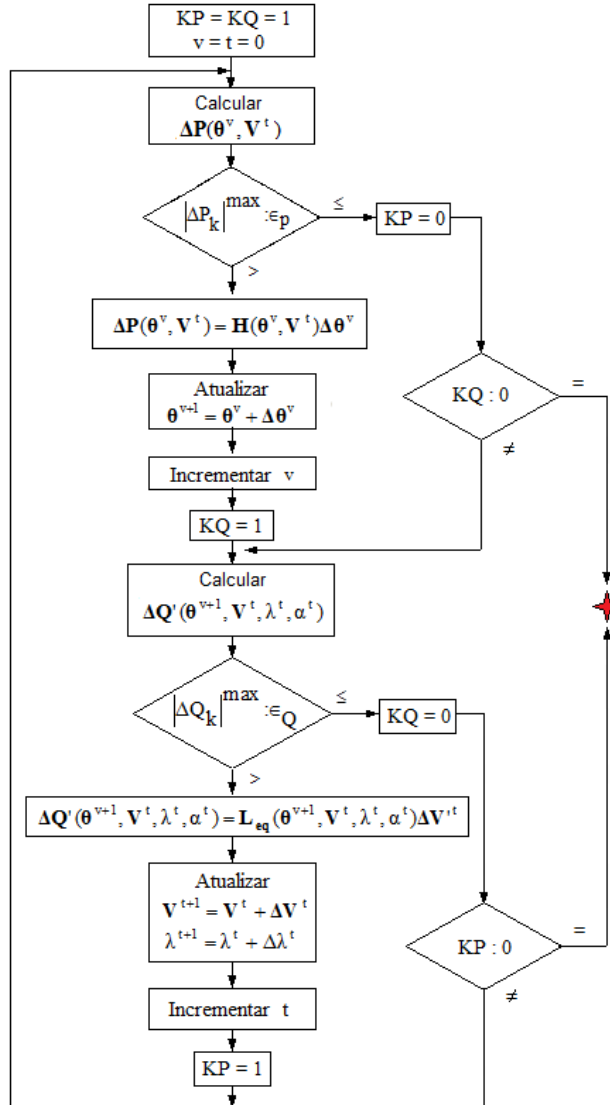


Figura 6. Fluxograma do algoritmo alternado do MDNM.

V. RESULTADOS

Para todos os testes realizados, a tolerância adotada para o *mismatch* total de potência foi de 10^{-4} p.u. A consideração dos limites de potência reativa (Q) nas barras PVs é feito da mesma forma que no método convencional de FC. O valor adotado para o passo inicial ($\Delta\alpha$) é 0.02.

5.1. Desempenho do MDNM para sistemas do IEEE

A Fig. 7 mostra resultados para o sistema do IEEE-14, o ponto $V_0=0.0$ e $\lambda_0=0.0$ foi escolhido como centro do feixe de retas. Na Fig. 7(a) apresenta-se a curva P-V da barra crítica (14), obtida via algoritmo simultâneo. O valor do fator de carregamento (λ) no PMC é de 1.719 p.u., sendo assim, têm-se uma margem de 0.719 em relação à do caso base ($\lambda=1$). Na Fig. 7(b) é são apresentados os números de iterações necessários para o traçado da curva P-V utilizando o algoritmo simultâneo e o alternado.

Observe que próximo a região do PMC o número de iterações aumenta sensivelmente utilizando o algoritmo simultâneo. Por outro lado, o mesmo não ocorre para o algoritmo alternado, cujo número de meias iterações permanece baixo durante todo o traçado da curva P-V. A razão principal desse baixo número de iterações se relaciona com a utilização dos valores recém calculados na subiteração Pθ anterior, na subiteração QV seguinte, ou seja, a utilização de θ^{v+1} no cálculo de V^v , e na utilização de V^{v+1} no cálculo de θ^v .

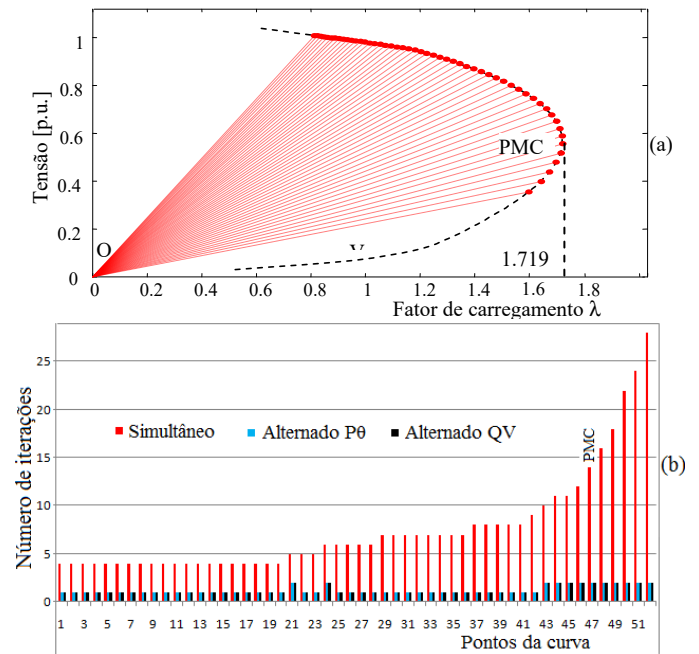


Figura 7. Desempenho do MDNM para o sistema IEEE-14: (a) curva P-V da barra crítica (14), (b) número de iterações do algoritmo simultâneo e alternado (iterações Pθ e QV).

A Fig. 8 apresenta para o sistema IEEE-30 a respectiva curva P-V da barra PV (barra de geração 11), cuja magnitude de tensão permanece constante ao longo de um trecho da

curva P-V. Observa-se que também neste caso, o respectivo PMC é obtido com êxito pelo MDNM, com um número reduzido de iterações, Fig. 8(c). Na Fig. 8(b), os pontos da curva P-V da barra crítica V_{30} foram obtidos armazenando-se os valores correspondentes ao traçar a curva λ - V_{11} .

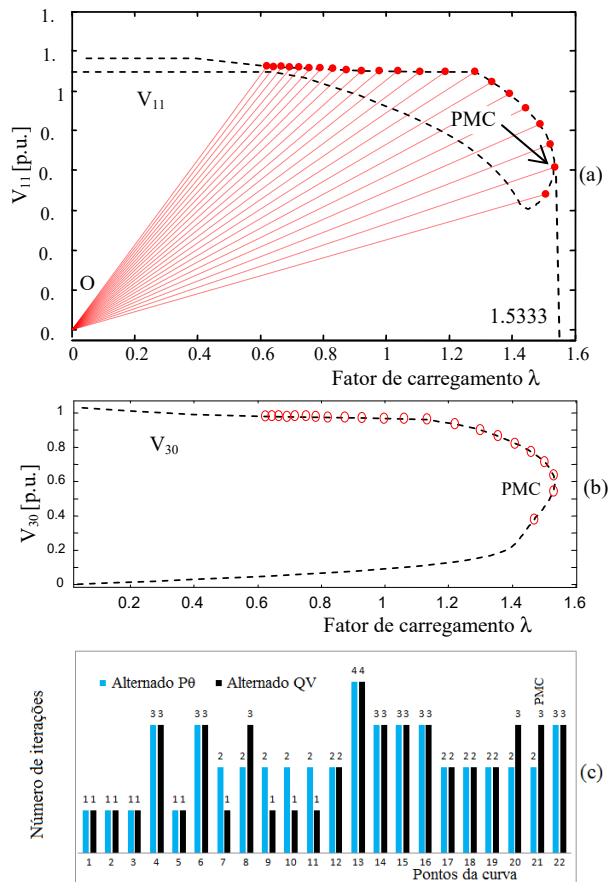


Figura 8. Desempenho do MDNM, algoritmo alternado para o sistema IEEE-30: (a) curva P-V da barra 11, (b) curva P-V da barra crítica obtida armazenando-se os valores ao traçar a curva da barra 11, (c) número de iterações P0 e número de iterações QV.

A Fig. 9 apresenta resultados para o sistema do IEEE-300 com o centro do feixe de retas no ponto $V_0=0.4$ e $\lambda_0=0.0$. Na Fig. 8(a) a curva P-V da barra crítica V_{526} é apresentada e foi obtida com o uso do algoritmo simultâneo. O valor no PMC de λ foi de 1.0552 p.u., tem-se assim uma margem de carregamento de 0.055 p.u., com relação ao ponto de operação caso base ($\lambda=1$). Os números de iterações para a obtenção da curva P-V utilizando o algoritmo simultâneo e o alternado são apresentados na Fig. 9(b).

Já na Fig. 9(c) foi escolhida uma barra de geração V_{7057} para avaliação do desempenho do MDNM. As coordenadas do centro de feixe de retas, o ponto "O" foi de $V_0=0.6$ e $\lambda_0=0.0$, mostrando que para qualquer valor entre uma faixa de 0.0 e o valor no caso base (0.0 à V_{cb}) para magnitude da tensão, o MDNM não apresentou problemas na obtenção da curva P-V e do PMC de qualquer um dos sistemas estudados. Observa-se que toda margem de carregamento foi obtida, inclusive um ponto após o PMC que pertence à parte de baixo da curva P-V. O número de meias iterações permanece baixo conforme a Fig. 9(d).

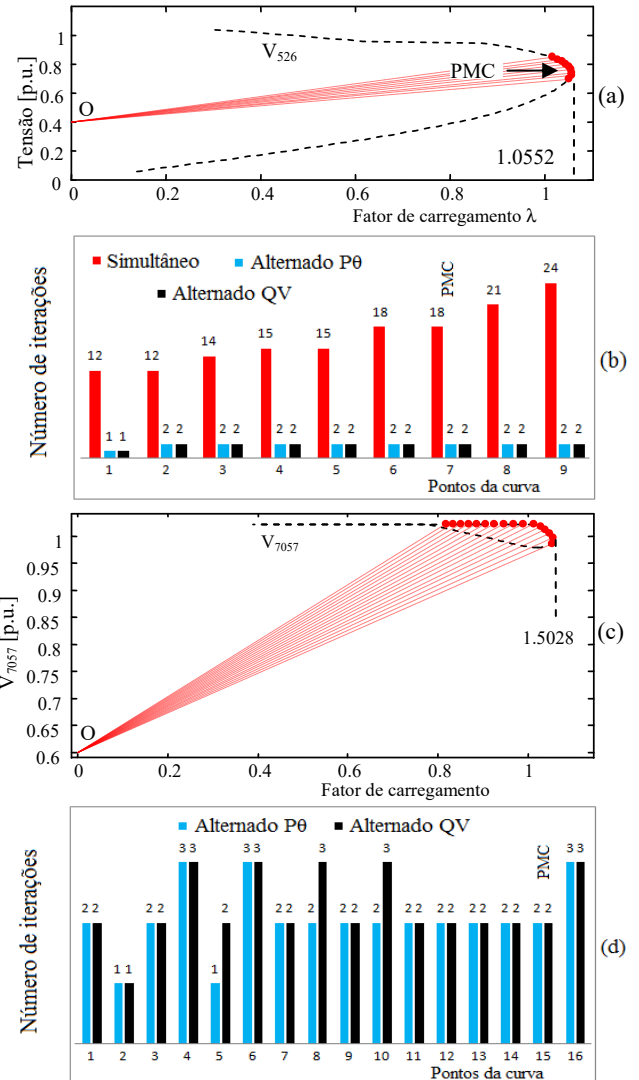


Figura 9. Desempenho do MDNM para o sistema IEEE-300: (a) curva P-V da barra crítica (526), (b) número de iterações do algoritmo simultâneo e número de iterações P0 e QV do algoritmo alternado, (c) curva P-V da barra de geração (7057), (d) número de iterações do algoritmo simultâneo e alternado correspondente a barra 7057.

As tabelas I e II mostram o desempenho do MDNM para os sistemas do IEEE de 30, 57, 118 e 300 barras com diferentes coordenadas do centro de feixe de retas. Na tabela 1 foi utilizado o feixe de reta com centro em $V_0=0.0$ e $\lambda_0=0.0$ e na tabela 2 em $V_0=0.4$ e $\lambda_0=0.0$. Os números de iterações totais utilizadas para obtenção da margem de carregamento são significativamente maiores para o algoritmo simultâneo do que para o alternado. Nota-se também que o valor do PMC obtido praticamente não se afeta com a mudança no centro do feixe de retas. Por outro lado, com a mudança do centro de feixe de retas, há uma ligeira interferência no desempenho de ambos os algoritmos de resolução (simultâneo e alternado) em termos de número de iterações, ou seja, ocorre uma pequena diminuição do número iterações totais.

Já a tabela III, apresenta o desempenho do MDNM considerando as coordenadas do centro do feixe de retas em $V_0=0.4$ e $\lambda_0=0.0$ e agora com passo de 0.04. Deseja-se nesse caso avaliar o desempenho do método proposto em relação à

variação do tamanho do passo, neste caso, passo duplicado. Observa-se uma sensível redução no número total de iterações para ambos os algoritmos, no entanto, tanto desempenho, quanto a precisão do cálculo do PMC não foram sensivelmente prejudicados.

TABELA I. DESEMPENHO DO MDNM CONSIDERANDO O PONTO “O” EM ($\lambda=0.0$, $V_0=0.0$).

Sistemas IEEE	Simultâneo		Alternado		
	Iterações	PMC	Iterações		PMC
			P0	QV	
14	219	1.7193	38	38	1.7192
30	215	1.5337	44	39	1.5354
57	237	1.7248	48	46	1.7287
118	222	1.8665	64	69	1.8664
300	112	1.0486	13	13	1.0551

TABELA II. DESEMPENHO DO MDNM CONSIDERANDO O PONTO “O” EM ($\lambda=0.0$, $V_0=0.4$).

Sistemas IEEE	Simultâneo		Alternado		
	Iterações	PMC	Iterações		PMC
			P0	QV	
14	204	1.7196	31	34	1.7200
30	198	1.5334	34	39	1.5355
57	247	1.7241	38	34	1.7284
118	145	1.8661	50	52	1.8661
300	104	1.0550	13	13	1.0552

TABELA III. DESEMPENHO DO MDNM CONSIDERANDO O CENTRO DO FEIXE DE RETAS EM ($\lambda=0.0$, $V_0=0.4$) E PASSO $\Delta\alpha=0.04$.

Sistemas IEEE	Simultâneo		Alternado		
	Iterações	PMC	Iterações		PMC
			P0	QV	
14	117	1.7202	21	24	1.7198
30	116	1.5338	25	28	1.5341
57	140	1.7243	24	25	1.7255
118	80	1.8644	26	27	1.8644
300	76	1.0542	11	11	1.0542

5.2. Influência de atualizar as matrizes H e L_{eq} do MDNM

O principal objetivo deste tópico é avaliar a influência da atualização das matrizes H e L_{eq} no desempenho do MDNM, considerando os algoritmos de resolução simultâneo e alternado. Dois procedimentos são considerados. No primeiro, as matrizes H e L_{eq} são atualizadas a cada iteração e no segundo procedimento, somente quando for necessário, ou seja, quando ocorrer alguma mudança significativa nas características do sistema (mudança do tipo das barras PQ para PV, devido atuações dos limites). Nas duas situações foi considerado o centro do feixe de retas em ($\lambda=0.0$, $V_0=0.4$) e passo quadruplicado $\Delta\alpha=0.04$.

Para os dois procedimentos, os tempos de CPU requeridos ao utilizar os algoritmos de resolução e o número total de iterações (NTI) necessário para o traçado da curva P-V são mostrados nas tabelas 4 e 5. O tempo de CPU considerado é o tempo total gasto para que o MDNM obtenha o PMC a partir do caso base. Os valores dos respectivos tempos foram

normalizados considerando o primeiro procedimento e se encontram na segunda coluna das tabelas. Para o segundo procedimento também é apresentado o número total de iterações (NTIA) que a matriz foi atualizada.

Observa-se que em ambos os procedimentos há uma vantagem do algoritmo desacoplado alternado em relação ao simultâneo, já que para alcançar o PMC os tempos de CPU (TCPU) são bem menores. Com base nesses dados, também se pode afirmar que ao fazer uso do segundo procedimento, o algoritmo alternado é mais eficiente. Resultados alcançados apenas com uma simples modificação de procedimento e que consiste na atualização da matriz somente se o sistema sofrer mudança significativa, e não a cada iteração.

TABELA IV. DESEMPENHO DO MDNM CONSIDERANDO A ATUALIZAÇÃO DAS MATRIZES H E L_{eq} A CADA ITERAÇÃO.

Sistemas IEEE	Simultâneo		Alternado			Redução de tempo de CPU (RCPU) (%)
	TCPU (p.u.)	NTI	TCPU (p.u.)	NTI		
				P0	QV	
57	1.000	140	0.2214	26	25	77.8
118	1.000	80	0.4142	26	28	58.5
300	1.000	76	0.1779	12	12	82.2

TABELA V. DESEMPENHO DO MDNM CONSIDERANDO A ATUALIZAÇÃO DAS MATRIZES H E L_{eq} SOMENTE QUANDO NECESSÁRIO.

Sistemas IEEE	Simultâneo			Alternado				RCPU (%)	
	TCPU (p.u.)	NTI	NTIA	TCPU (p.u.)	NTI		NTIA		
					P0	QV	P0	QV	
57	1.000	136	17	0.5206	22	22	11	11	47.9
118	1.000	76	26	0.6299	30	32	13	13	37.0
300	1.000	73	30	0.2065	13	13	5	5	79.3

5.3. Desempenho do MDNM para sistemas reais de grande porte

As Figs. 10 e 11 apresentam resultados para sistemas reais de grande porte, no caso uma configuração de 638 barras do sistema Sul-Sudeste Brasileiro e o sistema de 904 barras localizado no Sudoeste Americano.

A obtenção das curvas P-V pelo MDNM utilizando o plano formado pelas variáveis fator de carregamento e magnitude de tensão da barra crítica não foi apresentado aqui por ser considerado simples, uma vez que as curvas P-V das barras críticas apresentam uma curvatura quadrática facilitando a sua obtenção. Portanto a idéia aqui foi utilizar a tensão de barras que apresentam curvaturas mais agudas que permitam utilizar todo o procedimento apresentado pelo fluxograma da Fig. 4. A Fig. 10(a) apresenta resultados do MDNM para a barra PV (V_{403} em função do carregamento λ) e o parâmetro utilizado foi o coeficiente angular (α) da reta. A Fig. 10(b) mostra a região do PMC ampliada e pode-se notar que o PMC foi obtido sem problemas numéricos, possibilitando assim obter também pontos pertencentes a parte de baixo (instável) da curva P-V. A Fig. 10(c) foi obtida armazenando-se os valores dos respectivos pontos da barra crítica P-V₁₅₀ durante o

processo de obtenção dos pontos da curva λ - V_{403} . O número de meias iterações utilizadas para geração da curva P-V por meio do algoritmo alternado é mostrado na Fig. 10(d).

Resultados similares são apresentados na Fig. 11 para o sistema de 904 barras. O α é utilizado como parâmetro na obtenção da curva λ - V_{43} (Fig. 11(a)), durante a qual armazenam-se os valores dos respectivos pontos correspondentes à curva P-V da barra crítica 138 (Fig. 11(c)). A região do PMC é ampliada na Fig. 11(b), de onde se pode verificar a coincidência dos “noses” quando do uso do fator de carregamento λ ou da magnitude de tensão (V_{46}) como parâmetro. Ao utilizar o parâmetro α , nota-se que esta coincidência de singularidade não se torna um problema para MDNM, visto que com a mudança do centro do feixe de retas para o ponto médio (PM) a singularidade da matriz Jacobiana, e portanto o problema de mal-condicionamento, é removida. O número de meias iterações para a obtenção da curva P-V completa utilizando o algoritmo alternado pode ser visto na Fig. 11(d).

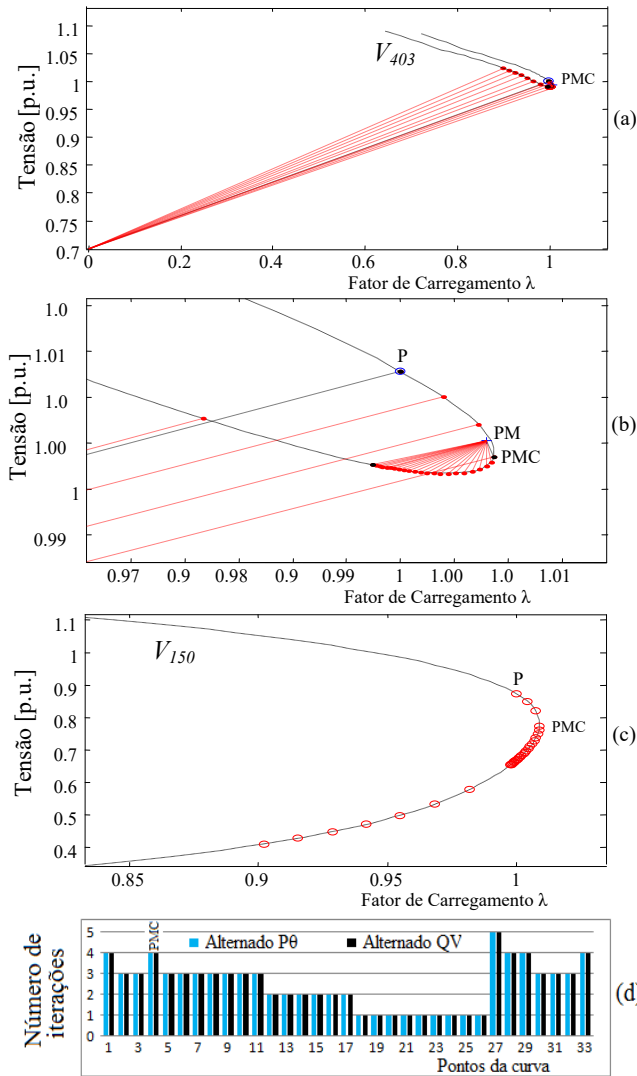


Figura 10. Desempenho do MDNM para uma configuração de 638 barras do sistema Sul-Sudeste Brasileiro: (a) curva λ - V_{403} , (b) detalhe da região entorno do PMC, (c) curva P-V da barra crítica, (d) número de iterações.

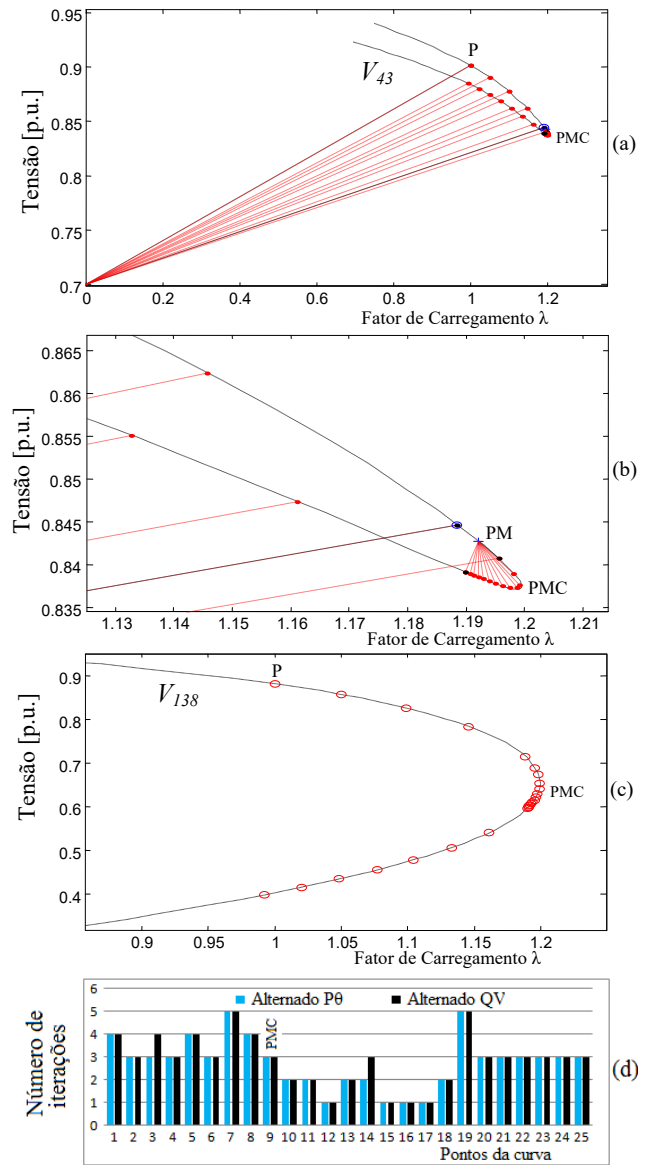


Figura 11. Desempenho do MDNM para o sistema Sudoeste Americano de 904 barras: (a) curva λ - V_{43} , (b) detalhe da região entorno do PMC, (c) curva P-V da barra crítica, (d) número de iterações do algoritmo alternado correspondente à barra 43.

VI. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma versão para o método de Newton desacoplado modificado usando uma técnica de parametrização geométrica. Esta técnica de parametrização permite o traçado das curvas P-V e obtenção do PMC de qualquer sistema estudado sem troca de parâmetro. Na técnica proposta é adicionada uma equação da reta situada no plano formado pelas variáveis fator de carregamento (λ) e magnitude da tensão nodal (V_k) de uma barra k qualquer, incluindo aquelas barras cuja magnitude da tensão apresenta uma inversão na sua tendência de variação simultaneamente com o fator de carregamento (coincidência da singularidade de ambas as matrizes Jacobianas no PMC). A influência dos esquemas de resolução simultâneo e alternado no desempenho do método também foi apresentada.

Tratando-se de tempo de CPU, utilizando o primeiro

procedimento de atualizar a matriz Jacobiana a cada iteração, a redução de tempo de CPU por meio do algoritmo alternado em relação ao simultâneo foi em média de 72.8%. Já com relação ao uso dos procedimentos de atualização das matrizes, o segundo procedimento (a atualização somente quando o sistema sofrer uma mudança significativa) associado ao esquema alternado mostrou-se ser a alternativa mais viável, visto que os tempos de CPU sofrem uma considerável redução, cerca de 55%. As modificações proporcionaram uma melhora do desempenho do método de Newton desacoplado convencional, tornando o método mais robusto e eficiente no traçado completo de curvas P-V de sistemas de potência em geral, incluindo sistemas reais de grande porte tais como as configurações de 638 barras do sistema Sul-Sudeste Brasileiro e do sistema de 904 barras localizado no Sudoeste Americano.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a Capes pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Plano Anual da Operação Energética* – PEN 2011: relatório executivo. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <www.ons.com.br>. Acesso em: 29 de setembro de 2014.
- [2] M. Abbott, "Electricity reform and gains from the reallocation of resources," *The Electricity Journal*, Atlanta, vol. 20, pp. 72-78, 2007.
- [3] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em: <http://www.ons.com.br/historico/percentual_volume_util.aspx>. Acesso em: 14 de outubro de 2015.
- [4] Mansour Y. Suggested Techniques for Voltage Stability Analysis, IEEE Power Engineering Subcommittee Report 93TH0620-5- PWR, 1993.
- [5] T. Van Cutsem, C. Vournas. *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Power Electronics and Power Systems International Series in Engineering and Computer Science, Springer, 2007
- [6] M. Crow. *Computational Methods for Electric Power Systems*. CRC Press, 2009.
- [7] V. Ajjarapu. *Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control*. Power Electronics and Power Systems Series, Springer, 2010.
- [8] A. Bonini Neto, D. A. Alves. Técnica de Parametrização Geométrica para o Fluxo de Carga Continuado Baseado nas Variáveis Tensão Nodal e Fator de Carregamento. SBA. Sociedade Brasileira de Automática, v.19, p.350 - 366. 2008.
- [9] V. Ajjarapu and C.Christy. The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis. *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 7, n. 1, February, pp. 416-423, 1992.
- [10] H. D. Chiang, A. J. Flueck, K. S. Shah, and N. Balu. "CPFLOW: A practical tool for tracing power systems steady-state stationary behavior due to load and generation variations", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 10, pp. 623-634. 1995.
- [11] D. A. Alves, L. C. P. da Silva, C. A. Castro, V. F. da Costa. Continuation load flow method parameterized by power losses. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. 2000 2:1123-1128.
- [12] E Garbelini, D. A. Alves, A. Bonini Neto, E. Righeto, L. C. P. da Silva, C. A. Castro. An efficient geometric parameterization technique for the continuation power flow. *Electric Power Systems Research*, vol. 77, pp. 71-82, 2007.
- [13] E. M. Magalhães, A. Bonini Neto, D. A. Alves. A parameterization technique for the continuation power flow developed from the analysis of power flow curves. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, pp. 1-24, 2012.
- [14] A. Bonini Neto, D. A. Alves. Improved geometric parameterization techniques for continuation power flow. *IET Generation, Transmission & Distribution*; vol. 4, pp. 1349-1359. 2010.
- [15] P. Xu, X. Wang, V. Ajjarapu. Continuation power flow with adaptive stepsize control via convergence monitor. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 6(7), pp. 673-679. 2012.
- [16] P. Zhu, G. Taylor, M. Irving. Performance analysis of a novel Q-limit guided continuation power flow method, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 3(12), pp. 1042-1051. 2009.
- [17] A. Bonini Neto, D. A. Alves. Técnicas de Parametrização Global para o Fluxo de Carga Continuado. *Controle & Automação* (Impresso), v. 21, p. 323-337, 2010.
- [18] WSCC, Final Report, Voltage Stability Criteria, Undervoltage Load Shedding Strategy, and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology, Reactive Power Reserve Work Group (RRWG), p. 154, 1998.
- [19] FTCT-Força Tarefa Colapso de Tensão. 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, GAT-10, Foz do Iguaçu, PR, 1999.
- [20] R. Seydel, "From Equilibrium to Chaos: Practical Bifurcation and Stability Analysis", 2th. ed., Springer-Verlag: New York, 1994.
- [21] A. J. Monticelli. Fluxo de Carga em redes de Energia Elétrica, São Paulo. Editora Blücher Ltda, 1983.
- [22] A. J. Monticelli, O. R. Saavedra. Fast Decoupled Load Flow: Hypothesis, Derivations, and Testing, *IEEE Transactions on Power systems*. v. 5, No. 4, November, 1990.



A. Bonini Neto, received his B.S. degree in Mathematics from UNIFADRA, Brazil, in 2002, his M.S. degree in Electrical Engineering from UNESP in 2006 and Ph.D. degree in Electrical Engineering from UNESP in 2011. His research interest is in the areas of mathematic and parameterization techniques applied to continuation power flow. He is with São Paulo state university - UNESP since 2014, where he is currently an assistant professor.



E. M. Magalhães, received his B.S. degree in Mathematics from UFMS, Brazil, her M.S. degree in Electrical Engineering from UNESP in 2011 and Ph.D. degree in Electrical Engineering from UNESP in 2015. Her research interest is in the areas of mathematic and parameterization techniques applied to continuation power flow.



D. A. Alves, received his B.S. degree from USP, Brazil, in 1980, and his M.S. and Ph.D. degrees from UNICAMP in 1988 and 2000, respectively. His present research interest is on static voltage stability analysis. He is with UNESP since 1991, where he is currently an assistant professor.