

Parametrização para o Fluxo de Potência Continuado: Diferentes Métodos de Previsão e Correção via Injeção de Corrente

C. C. de Oliveira*, A. Bonini Neto**, D. A. Alves***, C. R. Minussi****

* Instituto Federal do Amapá – IFAP – Centro de Referência Pedra Branca do Amapari, Macapá (e-mail: cout_cris@yahoo.com.br).

** Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Engenharia, Tupã (e-mail: alfredo.bonni@unesp.br).

*** DEE, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira (e-mail: dilson.alves@unesp.br)

**** DEE, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira (e-mail: carlos.minussi@unesp.br)

Abstract: The continuation power flow (CPF) is the most used static voltage stability analysis method, and consists of four steps: prediction, step size control, parameterization and correction, among which parameterization is a key factor to ensure the success of calculating the continuation power flow. In this work, CPF via current injection expressed in polar coordinates and other different configurations are presented for the complete tracing of the P-V curve without problems relating to the singularity of the Jacobian matrix. From the results, all methods are compared with each other and also with the power injection method commonly used for tracing the P-V curve, showing their efficiency.

Resumo: O fluxo de potência continuado (FPC) é o método de análise estática de estabilidade de tensão mais utilizado. Consiste em quatro etapas: previsão, controle do tamanho do passo, parametrização e correção, dentre as quais a parametrização é um fator chave para garantir o sucesso do cálculo do fluxo de potência continuado. Neste trabalho é apresentado FPC via injeção de correntes expressas em coordenadas polares e outras formulações diferentes para o traçado completo da curva P-V sem problemas relacionados à singularidade da matriz Jacobiana. Dos resultados, todos os métodos são comparados entre si e também com o método via injeção de potência comumente utilizado para o traçado da curva P-V, mostrando a eficiência dos mesmos.

Keywords: P-V curve; Continuation method; Maximum loading point; Polar coordinates; Newton's method.

Palavras-chave: Curva P-V; Método da continuação; Ponto de máximo carregamento; Coordenadas polares; Método de Newton.

1. INTRODUÇÃO

O grande número de trabalhos relacionados ao desenvolvimento do fluxo de potência publicados nas últimas décadas demonstra sua importância para o planejamento e análise de operação de sistemas elétricos de potência (Ajarapu, 2010), (Kamel et al. 2013), (Gómez-Expósito et al. 2015), (Kamel et al. 2016), (Oliveira et al. 2017), (Bonini Neto et al. 2018) e (Karimi et al. 2019). A convergência rápida é uma das características desejadas para aplicação em análise de contingência e determinação da margem de carregamento, que demandam alto tempo computacional, dado ao grande número de casos a serem processados e analisados nesses estudos, principalmente para operação em tempo real (Matarucco et al. 2014), (Yuan e Li, 2015) e (Wu et al. 2017).

Um levantamento sobre técnicas numéricas para cálculo de fluxo de potência é apresentado em Stott (1974). Diversas formulações têm sido empregadas para as equações gerais do problema de fluxo de potência. Formulações de equações de fluxo de potência podem ser expressas em coordenadas polares

ou retangulares, ou uma combinação de ambas (El-Hawary, 1995). É um fato bem conhecido que o método de Newton-Raphson (NR) é o mais utilizado nas resoluções. Uma revisão abrangente dos métodos de fluxo de potência como ferramentas para análise estática de contingência e estabilidade de tensão de um sistema de potência pode ser encontrada em Wu et al. (2017) e Karimi et al. (2019). Estes métodos podem ser baseados no balanço de potência ou injeção de corrente e, em alguns casos, em uma combinação de ambos, que são chamados de híbridos (Stott, 1974), (Monticelli, 1983), (El-Hawary, 1995), (Powell, 2004), (Kulworawanichpong, 2010), (Kamel et al. 2013), (Gómez-Expósito et al. 2015), (Kamel et al. 2016), (Oliveira et al. 2017) e (Karimi et al. 2019).

Na formulação do balanço de injeção de potência ou corrente expressa em coordenadas retangulares, é necessária uma equação adicional no *mismatch* (ajuste) para cada barra PV, uma vez que sua potência reativa gerada é desconhecida (El-Hawary, 1995). Assim, apesar do esforço em reduzir a carga computacional associada ao cálculo dos termos jacobianos no caso de tensões representadas em coordenadas retangulares, a

formulação em coordenadas polares é preferida, fornecendo um número menor de equações, uma vez que as equações do *mismatch* de potência reativa relacionadas às barras PV não são consideradas (desde que sua potência reativa gerada esteja dentro de seus limites máximos e mínimos) (Stott, 1974). Além disso, na formulação do balanço de injeção de corrente, o valor da potência reativa gerada afeta tanto a parte real quanto a imaginária do *mismatch* de corrente, uma vez que aparece explicitamente em ambas as equações. Portanto, a representação adequada das barras PV tem sido a principal preocupação nas formulações de injeção mais atuais. Em Kulworawanichpong (2010), é apresentado uma formulação do balanço de injeção de corrente expressa em coordenadas polares usando o método de Newton Raphson. Seu desempenho é comparado ao de uma injeção de potência padrão em coordenadas polares. Durante o processo de iteração a aplicação dos limites das barras PV é considerada por um esquema de ajuste alternado, ou seja, durante o processo iterativo a potência reativa gerada é mantida inalterada, sendo recalculada antes da próxima iteração. O uso dos *mismatches* de injeção de corrente com *mismatch* reativo ΔQ como variável dependente, juntamente com uma equação de restrição de magnitude de tensão, ambas escritas em coordenadas retangulares, são propostas em Da Costa et al. (1999), Da Costa et al. (2001) e Garcia et al. (2004). Um método de fluxo de potência híbrido com barras PV representadas por equações do *mismatch* de potência ativa usando o desvio angular como variável e barras PQ representadas por equações de injeção de corrente escritas em coordenadas retangulares são apresentadas em Dommel et al. (1970), Stott (1974) e Kamel et al. (2013). Na formulação de fluxo de potência de injeção de corrente modificada proposta em Oliveira et al. (2017), a potência reativa gerada é uma função das variáveis de estado, das magnitudes das tensões nodais e dos ângulos de fase. Os resultados mostraram uma melhora na convergência do processo iterativo como consequência de um cálculo mais preciso dos elementos Jacobianos, uma vez que levam em conta a influência da variação da potência reativa gerada na obtenção dos vetores de correção ($\Delta\theta$ e $\Delta|\mathbf{V}|$).

Esse trabalho, tem por objetivo propor métodos de previsão e correção para o fluxo de potência continuado (FPC) via injeção de corrente expressas em coordenadas polares. Além disso, comparar os resultados de cada método e também comparar com o método via injeção de potência comumente utilizado.

2. FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO: FORMULAÇÃO VIA INJEÇÃO DE CORRENTE

Para a formulação do FPC utilizando equações de injeção de corrente, com as tensões nodais expressas em termos de coordenadas polares, o sistema elétrico de potência é representado por:

$$\Delta\mathbf{F}(\theta, |\mathbf{V}|, \lambda) = 0 \quad (1)$$

em que $\Delta\mathbf{F}$ é o vetor das equações dos *mismatches* de corrente complexa; θ é o vetor dos ângulos de fase nodais; $|\mathbf{V}|$ é o vetor das magnitudes das tensões nodais e λ é o fator de carregamento.

Para aplicar as técnicas de parametrização local, as equações dos *mismatches* de corrente do fluxo de potência (FP) devem ser reformuladas para incluir o parâmetro de carregamento λ . Assim, as novas equações são dadas por:

$$\begin{aligned} \Delta G_k(\theta, |\mathbf{V}|, \lambda) &= \left| \frac{S_{spk}}{V_k} \right| \cos(-\varphi_k + \theta_k) - \sum_{i=1}^n |Y_{ki} V_i| \cos(\phi_{ki} + \theta_i) = 0 \\ \Delta H_k(\theta, |\mathbf{V}|, \lambda) &= \left| \frac{S_{spk}}{V_k} \right| \sin(-\varphi_k + \theta_k) - \sum_{i=1}^n |Y_{ki} V_i| \sin(\phi_{ki} + \theta_i) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

sendo, $\Delta G_k(\theta, |\mathbf{V}|, \lambda)$ a parte real do *mismatch* de corrente na barra k , $\Delta H_k(\theta, |\mathbf{V}|, \lambda)$ a parte imaginária do *mismatch* de corrente na barra k e $S_{spk} = \lambda(P_{gerk} - P_{cgk}) + j(Q_{gerk} - \lambda Q_{cgk})$.

Após determinar a solução $(\theta_0, |\mathbf{V}|_0, \lambda_0 = 1)$ de (1) para o caso base, por meio do método FP utilizando as equações de injeção de corrente, é necessário executar um passo preditor para encontrar uma estimativa para a próxima solução $(\theta_n, |\mathbf{V}|_n, \lambda_n)$ e um passo corretor para corrigir a solução estimada. Nas próximas subseções apresentam-se os passos de predição e correção para os métodos: fluxo de potência continuado por injeção de corrente (**FPCIC**); fluxo de potência continuado por injeção de corrente modificado (**FPCICM**); fluxo de potência continuado via injeção de corrente com Q como variável (**FPCICQ**); fluxo de potência continuado via injeção de corrente híbrido (**FPCICH**).

2.1 Passo Preditor e Corretor para o método FPCIC

2.1.1 Passo Preditor para o FPCIC

Para o método FPC que utiliza as equações de injeção de corrente (FPCIC), o vetor tangente $[d\theta^t \ d|\mathbf{V}|^t \ d\lambda]^t$ é determinado fazendo o diferencial do sistema (2). O sistema de equações linearizado, de acordo com o Método de NR, na etapa da predição, sendo o parâmetro da continuação o fator de carregamento λ é dado por:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{G}_\lambda \\ \mathbf{H}_\lambda \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ d|\mathbf{V}| \\ d\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{IM} \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

no qual $\mathbf{J}_1 = \frac{\partial \Delta \mathbf{G}(\theta, |\mathbf{V}|, \lambda)}{\partial \theta}$, $\mathbf{J}_2 = \frac{\partial \Delta \mathbf{G}(\theta, |\mathbf{V}|, \lambda)}{\partial |\mathbf{V}|}$, $\mathbf{J}_3 = \frac{\partial \Delta \mathbf{H}(\theta, |\mathbf{V}|, \lambda)}{\partial \theta}$ e $\mathbf{J}_4 = \frac{\partial \Delta \mathbf{H}(\theta, |\mathbf{V}|, \lambda)}{\partial |\mathbf{V}|}$, são submatrizes que compõem a matriz Jacobiana \mathbf{J}_I do FP baseado nas equações de injeção de corrente, conforme (2) e $\mathbf{G}_\lambda = \frac{\partial \Delta \mathbf{G}(\theta, |\mathbf{V}|, \lambda)}{\partial \lambda}$ e $\mathbf{H}_\lambda = \frac{\partial \Delta \mathbf{H}(\theta, |\mathbf{V}|, \lambda)}{\partial \lambda}$. O vetor linha adicionado impõe a variação do parâmetro da continuação, no caso λ .

Após resolver (3), obtém-se o vetor tangente \mathbf{t} , e multiplicando-o pelo tamanho do passo (σ) e somando o resultado com a solução correta atual (v) tem-se a nova solução estimada (e), ou seja:

$$\begin{bmatrix} \theta \\ |\mathbf{V}| \\ \lambda \end{bmatrix}^e = \begin{bmatrix} \theta \\ |\mathbf{V}| \\ \lambda \end{bmatrix}^v + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ d|\mathbf{V}| \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.1.2 Passo Corretor para o FPCIC

Sendo o parâmetro da continuação o fator de carregamento λ , o sistema de equações linearizado de acordo com o método de NR, a ser resolvido na etapa de correção é dado por:

$$-[\mathbf{J}_{IM}] \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{G} \\ \Delta \mathbf{H} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Neste caso, o passo corretor é a execução de um FPCIC a partir do ponto estimado 'e'. Após determinar o vetor das correções atualizam-se os estados para a iteração $j+1$ de acordo com:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ |\mathbf{V}| \\ \lambda \end{bmatrix}^{j+1} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ |\mathbf{V}| \\ \lambda \end{bmatrix}^j + \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (6)$$

e assim, ao final do processo iterativo, a solução correta é obtida a partir da solução estimada.

2.2 Passo Preditor e Corretor para o método FPCICM

2.2.1 Passo Preditor para o FPCICM

Para o método FPCICM, o vetor tangente \mathbf{t} é dado por:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}'_1 & \mathbf{J}'_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{G}_\lambda \\ \mathbf{H}_\lambda \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ d|\mathbf{V}| \\ d\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}'_{IM} \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

no qual \mathbf{J}'_1 , \mathbf{J}'_2 , \mathbf{J}_3 e \mathbf{J}_4 são submatrizes que compõem a matriz Jacobiana modificada \mathbf{J}'_{IM} de injeção de corrente, conforme Oliveira et al. (2017). Após determinar o vetor tangente, o estado (ângulos e magnitudes da tensão nodal) do sistema é atualizado de acordo com (4).

2.2.2 Passo Corretor para o FPCICM

O sistema de equações linearizado de acordo com o método de NR, a ser resolvido na etapa de correção, em cada iteração, sendo o parâmetro da continuação o fator de carregamento λ , é dado por:

$$-[\mathbf{J}'_{IM}] \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{G} \\ \Delta \mathbf{H} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Após determinar o vetor das correções atualizam-se os estados para a iteração $j+1$ de acordo com (6)

2.3 Passo Preditor e Corretor para o método FPCICQ

2.3.1 Passo Preditor para o FPCICQ

Para o método FPCICQ, o vetor tangente \mathbf{t} é dado da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 & \mathbf{J}_2'' \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 & \mathbf{J}_4'' \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{G}_\lambda \\ \mathbf{H}_\lambda \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ d|\mathbf{V}| \\ d\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{IM} \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

no qual \mathbf{J}_1 , \mathbf{J}_2 , \mathbf{J}_2'' , \mathbf{J}_3 , \mathbf{J}_4 e \mathbf{J}_4'' são submatrizes que compõem a matriz Jacobiana \mathbf{J}'_{IM} de injeção de corrente, conforme Oliveira et al. (2017). A injeção de potência reativa $Q_{gerk}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ é considerada como uma nova variável (Q_{gerk}). Atualiza-se o estado da rede conforme (4).

2.3.2 Passo Corretor para o FPCICQ

O sistema de equações linearizado de acordo com o método de NR, a ser resolvido na etapa de correção, em cada iteração, sendo o parâmetro da continuação o fator de carregamento λ , é dado por:

$$-[\mathbf{J}_{IM}] \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \\ \Delta \mathbf{Q}_G \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{G} \\ \Delta \mathbf{H} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

A atualização do estado é realizada através de (6). E ao final do processo, a solução correta é atingida a partir da solução estimada.

2.4 Passo Preditor e Corretor para o método FPCICH

2.4.1 Passo Preditor para o FPCICH

Para o método FPCICH, o vetor tangente \mathbf{t} é dado por:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{G}_{pq,\lambda} \\ \Delta \mathbf{P}'_{pv,\lambda} \\ \Delta \mathbf{H}_{pq} \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ d|\mathbf{V}| \\ d\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{HM} \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

no qual \mathbf{J}_1 , \mathbf{J}_2 , \mathbf{J}_3 , e \mathbf{J}_4 são submatrizes que compõem a matriz Jacobiana \mathbf{J}_H e injeção de corrente, conforme Kamel et al. (2013). Atualiza-se o estado da rede conforme (4).

2.4.2 Passo Corretor para o FPCICH

O sistema de equações linearizado de acordo com o método de NR, a ser resolvido na etapa de correção, em cada iteração, sendo o parâmetro da continuação o fator de carregamento λ , é dado por:

$$-\mathbf{J}_{HM} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}_{pq} \\ \Delta \boldsymbol{\theta}_{pv} \\ \Delta |\mathbf{V}|_{pq} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{G}_{pq} \\ \Delta \mathbf{P}'_{pv} \\ \Delta \mathbf{H}_{pq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Após obter-se a solução correta, a atualização do estado é realizada por meio da equação (6).

3. ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS

A matriz Jacobiana das equações do FP é singular no ponto de máximo carregamento (PMC) e, assim, não é possível obter este ponto. Dessa forma, os métodos FPC tornam-se um grande recurso, pois possibilitam a obtenção de toda a curva P-V, incluindo o próprio λ_{max} . Neste item apresentam-se os resultados de desempenho dos cinco métodos, FPC via injeção de potência (FPCIP) (Ajarapu, 2010) e FPC via injeção de corrente (FPCIC, FPCICQ, FPCICM e FPCICH) para o traçado das curvas P-V, e a determinação do PMC e da tensão crítica dos sistemas do IEEE-14, 57, 118 e 300 barras, partindo da condição definida no banco de dados.

Para todos os métodos, adotou-se como critério de convergência, o máximo valor absoluto dos *mismatches*, de acordo com a equação:

$$\mathbf{R} = [\Delta \mathbf{P}, \Delta \mathbf{Q}]^t \quad (|\mathbf{R}|_{\infty} = \max\{|R_i|\}) \quad (13)$$

A tolerância adotada para os *mismatches* foi de 10^{-5} p.u.

A consideração dos limites de potência reativa (Q) nas barras PV's é feito de acordo com o procedimento descrito em Monticelli (1983). A cada iteração, a geração de reativos é comparada com seus respectivos limites e no caso de violação o tipo da barra é alterada para PQ, podendo voltar a ser PV nas iterações subsequentes.

O fator de carregamento é usado para simular incrementos de carga ativa e reativa, considerando 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). Cada aumento de carga é seguido por um aumento de geração equivalente usando λ (Ajarapu, 2010). Considera-se que os métodos não convergem (NC) quando o número de iterações for maior que 20 ou processo iterativo divergir.

Observa-se que para os sistemas de 14, 30, 57 e 118 barras, utilizou-se o fator de carregamento $\lambda = 1$, uma vez que o caso base encontrava-se mais distante do PMC da curva P-V. Por outro lado, para obter um número razoável de pontos, e com isso comparar o desempenho dos métodos num trecho maior no decorrer do traçado da curva P-V, para o sistema de 300 barras, foi considerado fator de carregamento igual a 0,6 p.u. O *software* utilizado para obtenção dos resultados foi o Matlab® (Mathworks, 2021)

3.1 Desempenho dos métodos para o traçado da curva P-V e obtenção do PMC considerando os mesmos pontos previstos

Para todos os métodos foi utilizado o mesmo preditor tangente, de forma a garantir que os métodos obtivessem os mesmos pontos previstos na curva P-V durante a etapa da previsão. O tamanho do passo σ^0 escolhido para realizar o controle de passo foi de 0,1.

A Fig. 1(a) apresenta, a partir do caso base, para o sistema IEEE-14 barras, os pontos obtidos pelos passos preditor e corretor durante o traçado da curva P-V. Nas Figs. 1(b) e (c) têm-se as correspondentes magnitudes da tensão da barra crítica e número de iterações obtidas pelos respectivos métodos. As figuras confirmam que todos os pontos, previstos e corrigidos, são os mesmos para os cinco métodos.

As Figs. 2(a), 3(a), 4(a) e 5(a) apresentam, respectivamente, as correspondentes magnitudes da tensão da barra crítica dos sistemas IEEE-30, 57, 118 e 300 barras. Nas Figs. 2(b), 3(b), 4(b) e 5(b) têm-se o número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.

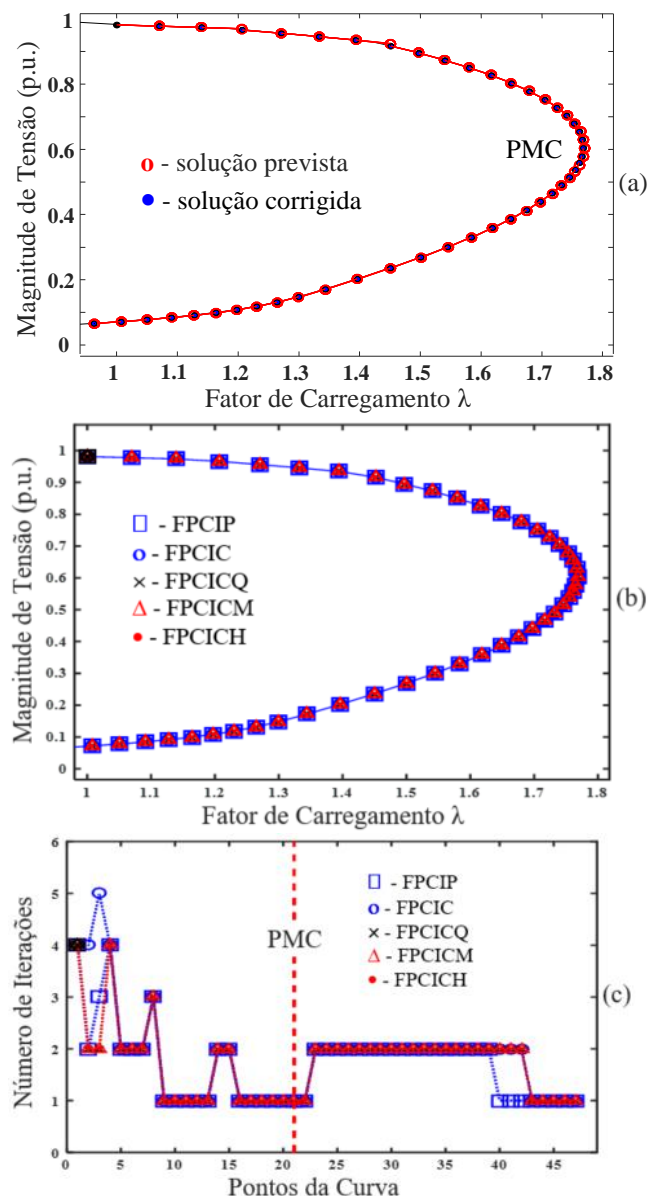


Fig. 1 Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-14, (a) curva P-V da barra crítica 14, (b) pontos da curva P-V, (c) número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.

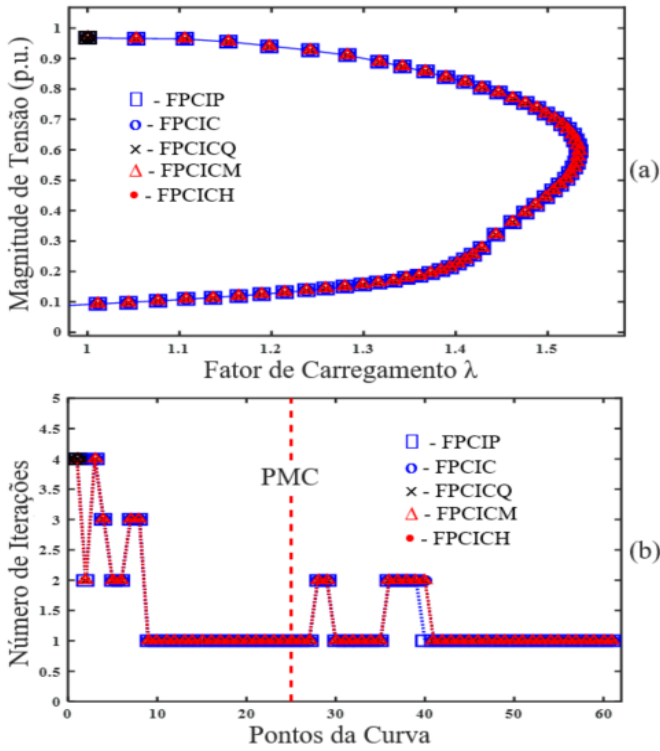


Fig. 2 Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-30, (a) pontos da curva P-V da barra 30, (c) número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.

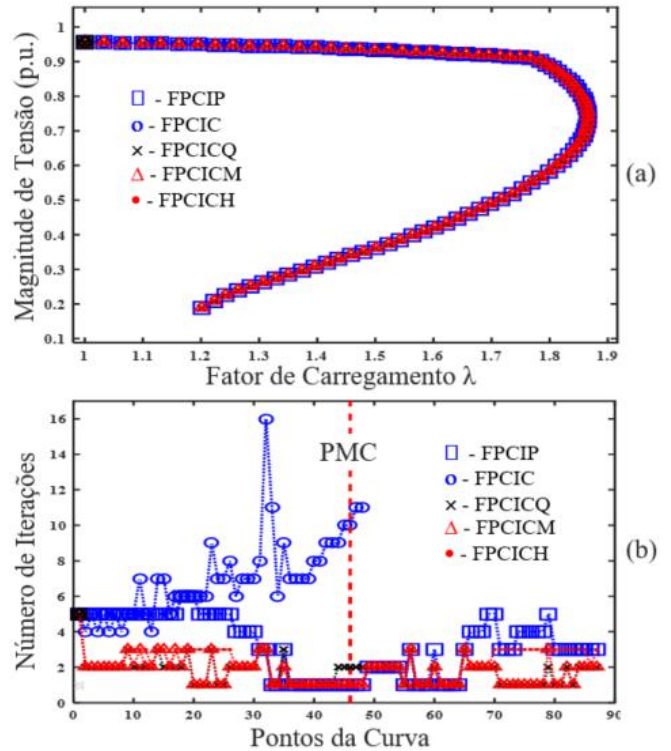


Fig. 4 Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-118, (a) pontos da curva P-V da barra 52, (c) número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.

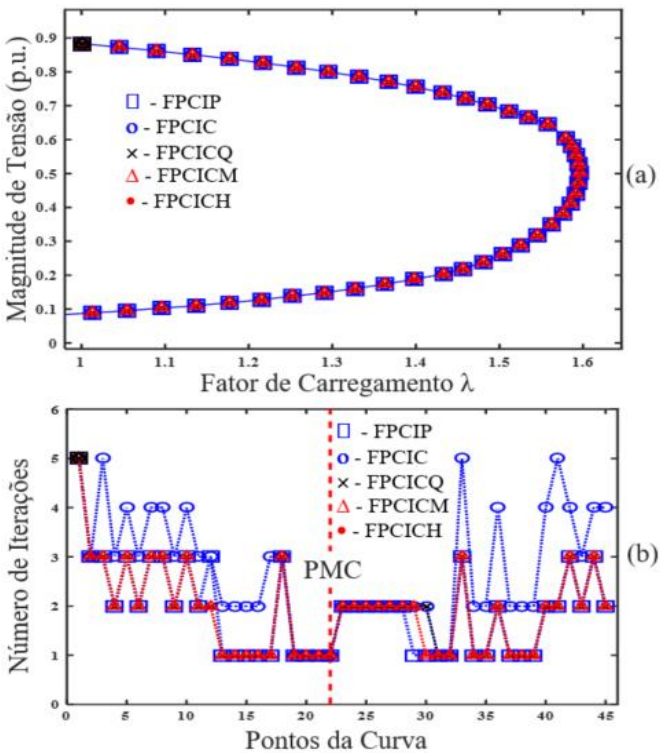


Fig. 3 Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-57, (a) pontos da curva P-V da barra 31, (c) número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.

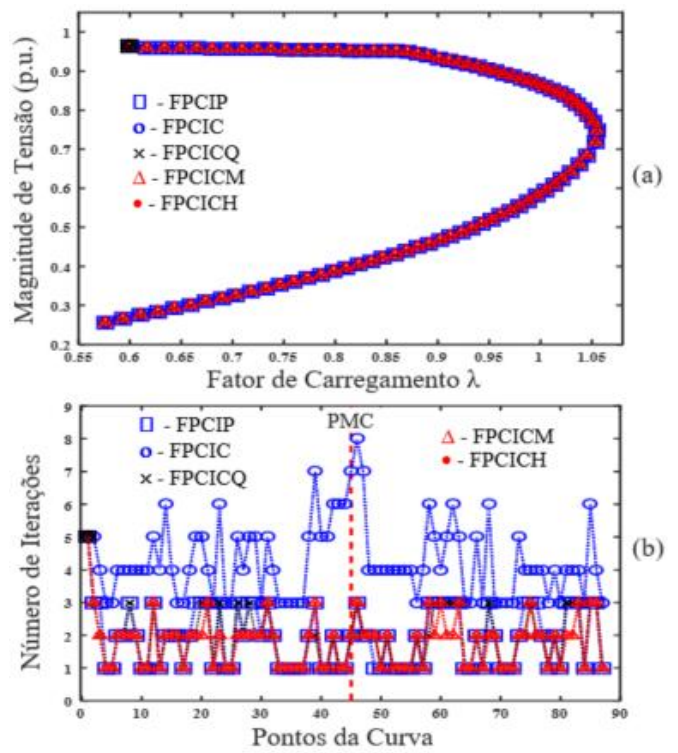


Fig. 5 Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-300, (a) pontos da curva P-V da barra 526, (c) número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.

De forma geral, observa-se que todos os métodos convergiram para todos os sistemas. Entretanto, o método FPCIC não conseguiu realizar o traçado completo da curva P-V para o sistema IEEE-118, embora tenha conseguido obter o PMC, como mostra a Fig. 4(b).

Na Tabela 1 são comparados os número máximo de iterações (NTI) para o traçado completo da curva P-V, os NTI para atingir o ponto de máximo de carregamento (NTIPMC) da curva P-V e os respectivos valores obtidos para o PMC e a magnitude de tensão da barra crítica (V_{crit}) de cada um dos sistemas analisados.

Aferindo os dados da Tabela 1, nota-se que para os sistemas IEEE-14, -30 e -57 barras, os NTI são muito próximos, exceto para o método FPCIC que no caso do sistema IEEE-57, apresentou um maior número de iterações em relação aos demais métodos. No caso do sistema IEEE-118, o método FPCIC não foi capaz de traçar toda a curva P-V, enquanto que as demais metodologias apresentaram resultados mais próximos, sendo o FPCICM e o FPCICQ os métodos com melhor desempenho em comparação com os demais. Observa-se que o FPCICH apresenta um desempenho melhor que o FPCIP tanto para o IEEE-118 quanto para o -300 barras, e que o FPCICQ no caso do IEEE-300. Também, como se verá na tabela seguinte, mais próximo do desempenho dos FPCICM e o FPCICQ

Dos resultados vê-se que o FPCIC apresentou o pior desempenho para o NTIPMC. Com relação aos demais métodos, estes praticamente apresentam o mesmo número de iterações, para a obtenção do PMC, para os sistemas IEEE-14, 30 e 57 barras, diferindo apenas para o IEEE-118. Observa-se um melhor desempenho do FPCICH quando comparado ao do FPCIP, e uma melhora quando comparado ao dos FPCICM e o FPCICQ.

Tabela 1. Desempenho dos métodos considerando o mesmo preditor tangente

Sistemas	14	30	57	118	300
FPCIP NTIPMC/NTI	37/80	40/82	46/86	171/282	88/171
FPCIC NTIPMC/NTI	41/87	42/85	62/123	316/338**	195/371
FPCICQ NTIPMC/NTI	36/82	40/83	45/87	87/152	84/165
FPCICM NTIPMC/NTI	36/82	40/83	45/86	86/150	80/156
FPCICH NTIPMC/NTI	36/82	40/83	45/86	100/191	80/156
PMC	1,7680	1,5335	1,5960	1,8664	1,0544
V_{crit} (p.u.)	0,6042	0,5951	0,5020	0,7443	0,7487

**Não traça a curva toda

Na Tabela 2 apresenta-se o NTI gastos para o traçado de toda curva P-V, o NTIPMC e os respectivos valores obtidos para o PMC e a magnitude de tensão da barra crítica (V_{crit}) de cada um dos sistemas. Em geral, os valores do PMC e da magnitude da tensão da barra crítica apresentam pequenas diferenças a partir da terceira casa decimal em virtude das pequenas

diferenças entre os pontos previstos pelos respectivos preditores e assim, apresentou-se os valores obtidos pelo FPCIP apenas.

Em linhas gerais, é possível verificar que, novamente todos os métodos obtiveram sucesso no traçado da curva P-V e na obtenção do PMC para todos os sistemas analisados, a exceção do método FPCIC, que não conseguiu atingir o PMC para o sistema de 118 barras.

Tabela 2. Desempenho dos métodos considerando os respectivos preditores tangente

Sistemas	14	30	57	118	300
FPCIP NTIPMC/NTI	37/80	40/82	46/86	91/158	88/171
FPCIC NTIPMC/NTI	46/96	46/89	68/124	121*/121**	266/435
FPCICQ NTIPMC/NTI	43/88	41/83	58/97	109/177	83/154
FPCICM NTIPMC/NTI	35/80	41/83	45/86	86/150	80/156
FPCICH NTIPMC/NTI	36/82	40/83	45/86	97/183	80/156
PMC	1,7680	1,5335	1,5960	1,8664	1,0544
V_{crit} (p.u.)	0,6042	0,5951	0,5020	0,7443	0,7487

*Não obtém o PMC **Não traça a curva toda

Dos resultados apresentados na Tabela 2 constata-se, no geral, um desempenho um pouco melhor para as formulações via injeção de corrente, FPCICM, que considera a potência reativa gerada como função das variáveis de estado quando da formação da matriz Jacobiana, e FPCICH, que utiliza a equação do *mismatch* de potência ativa normalizado no caso das barras PV's. Assim, com relação ao método de FPCIC, os resultados também confirmam que o cálculo dos elementos que compõem as submatrizes J_1 e J_2 da matriz Jacobiana considerando a dependência da potência reativa gerada nas barras PV's com as variáveis de estado (FPCICM), ou o uso da equação do *mismatch* de potência ativa normalizado no caso das barras PV's (FPCICH), leva a uma melhora significativa de desempenho. No entanto, observa-se o maior número de operações quando do uso do método FPCICM quando comparado ao FPCICH. Observa-se também a melhora do desempenho alcançado quando do uso no método continuado por injeção de corrente, da injeção de potência reativa da barra PV como uma nova variável. Entretanto, quando comparado aos demais este apresenta como desvantagem o acréscimo do número de equações e, portanto, da dimensão da matriz Jacobiana, proporcionalmente ao número de barras PV's.

6. CONCLUSÕES

Em relação aos métodos de fluxo de potência continuado, os resultados confirmam que as versões fluxo de potência via injeção de corrente, exceto a FPCIC, apresentam praticamente o mesmo desempenho, sendo ligeiramente melhores que a versão via injeção de potência (FPCIP). A versão que considera a dependência da potência reativa gerada das barras PV's com as variáveis de estado (FPCICM), e a denominada por fluxo de potência continuado via injeção de corrente

híbrido (FPCICH), que faz uso da equação de balanço de injeção de corrente para barras PQ e da equação de balanço de injeção de potência ativa para as barras PV's, apresentam o mesmo número de equações que a versão de injeção de potência. Por outro lado, o método continuado por injeção de corrente que considera a injeção de potência reativa da barra PV (FPCICQ) como uma nova variável, quando comparado aos demais apresenta como desvantagem o acréscimo do número de equações e, portanto, da dimensão da matriz Jacobiana, proporcionalmente ao número de barras PV's.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) – processo 2018/12353-9, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – processo 408630/2018-3 e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Ajjarapu, V. (2010). Computational techniques for voltage stability assessment and control. Power electronics and power systems series, New York: Springer.
- Bonini Neto, A.; Magalhães, E. M.; Alves, D. A. Geometric Parameterization Technique for Continuation Power Flow Based on Quadratic Curve. *Electric Power Components and Systems*, v. 45, p. 1-13, 2018.
- Da Costa, V.M., Martins, N., Pereira, J.L.R. (1999). Developments in the Newton-Raphson power flow formulation based on current injections, *IEEE Trans Power Syst*, 14 (4): 1320-1326.
- Da Costa, V.M., Martins, N., Pereira, J.L.R. (2001). An augmented Newton-Raphson power flow formulation based on current injections. *Electr Power Energy Syst*, 23: 305-312.
- Dommel, H.W., Tinney, W.F., Powell, W.L. (1970). Further developments in Newton's method for power system applications. IEEE winter power meeting, conference paper no. 70 CP 161-PWR, New York.
- El-Hawary, M.E. (1995). *Electrical power systems: design and analysis*. Revised printing, vol. 2. John Wiley & Sons, 799p.
- Garcia, P.A.N., Pereira, J.L.R., Carneiro Junior, S., Vinagre, M.P., Gomes, F.V. (2004). Improvements in the representation of PV buses on three-phase distribution power flow. *IEEE Trans Power Deliv*, 19 (2): 894–6
- Gómez-Expósito, A., Romero-Ramos, E., Dzafic, I. (2015). Hybrid real-complex current injection-based load flow formulation. *Electr Power Syst Res*, 119: 237–246.
- Kamel, S., Abdel-Akher, M., Jurado, F. (2013). Improved NR current injection load flow using power mismatch representation of PV bus. *Electr Power Energy Syst*, 53 (1): 64–68.
- Kamel, S., Jurado, F., Chen, Z., Abdel-Akher, M. and Ebeed, M. (2016). Developed generalised unified power flow controller model in the Newton–Raphson power-flow analysis using combined mismatches method. *IET Gener. Transm & Distrib*, 10 (9): 2177-2184.
- Karimi, M., Shahriari, A., Aghamohammadi, M.R., Marzooghi, H., Terzija, V. (2019). Application of Newton-based load flow methods for determining steady state condition of well and ill-conditioned power systems: A review. *Electr Power Energy Syst*, 113: 298–309.
- Kulworawanichpong, T. (2010). Simplified Newton–Raphson power-flow solution method, *Electr Power and Energy Syst*, 32: 551–558.
- Matarucco, R.R., Bonini Neto, A., Alves, D.A. (2014). Assessment of branch outage contingencies using the continuation method. *Electr Power and Energy Syst*, 14: 55: 74-81.
- Mathworks. Disponível em: <<http://www.mathworks.com>>. Acesso em: 02 de março de 2021.
- Monticelli, A.J. (1983). *Power flow in electric networks*. São Paulo (Brazil): Edgard Blucher, [In Portuguese].
- Oliveira, C.C., Bonini Neto, A., Minussi, C.R., Alves, D.A., Castro, C.A. (2017). New Representation of PV Buses in the Current Injection Newton Power Flow. *Electr Power Energy Syst*, 90 (9): 237-244.
- Powell, L. (2004). *Power system load flow analysis*. New York – USA: The McGraw-Hill Education.
- Stott, B. (1974). Review of load-flow calculation methods. *Proc IEEE*, 62: 916-929.
- Western System Coordinating Council (WSCC) - Reactive Power Reserve Work Group. Final Report, *Voltage Stability Criteria*, Undervoltage Load Shedding Strategy, and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology, May, 154p, 1998.
- Wu, L., Gao, J., Wang, Y., Harley, R.G. (2017). A survey of contingency analysis regarding steady state security of a power system. In: *North American Power Symposium*, Morgantown (WV), p. 1-6.
- Yuan, H., Li, F. (2015). Hybrid voltage stability assessment (VSA) for N–1 contingency. *Electr Power Syst Res*, 122: 65–75.