

Método Desacoplado Rápido para o Fluxo de Carga: Uma Proposta 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: This work presented a version for the power flow method via current injection fast decoupled, BX version. A comparative study between some existing techniques in the literature for solving the power flow based on power injection equations and on current injection equations is presented. Results for different loading values and R/X transmission line ratios were presented. In larger systems, for loading conditions close to the critical point, the proposed method presented a superior performance to the conventional method.

Resumo: Este trabalho apresenta uma versão para o método do fluxo de potência via injeção de corrente desacoplado rápido, versão BX. É apresentado um estudo comparativo entre algumas técnicas existentes na literatura para resolução do fluxo de potência baseados em equações de injeção de potência e em equações de injeção de corrente. Foram apresentados resultados para diferentes valores de carregamento e relações R/X para os ramos. Em sistemas maiores, para condições de carregamento próximo ao ponto crítico, o método proposto apresentou um desempenho superior ao método convencional.

Keywords: Power flow; Current injection; Newton-Raphson; R/X relations; Fast decoupled.

Palavras-chaves: Fluxo de potência; Injeção de corrente; Newton-Raphson; Relações R/X; Desacoplado rápido.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência, a cada dia que passa, tornaram-se maiores e mais complexos, enquanto as necessidades sociais de redução da carga e custo ambiental, manutenção da confiabilidade e introdução mais ampla de fontes de energias renováveis aumentaram. Nesse contexto, o monitoramento em tempo real e a manutenção da estabilidade do sistema ganham importância, enquanto a análise da estabilidade do sistema deve ser realizada em menor tempo (Yuan e Li, 2015) e (Wu et al. 2017).

Uma das questões pendentes em relação à estabilidade do sistema elétrico de potência é a análise da estabilidade da tensão (IEEE W.G.V.S., 1990), (Yorino, 2003), (Nagata et al. 2013), (Oliveira et al. 2017), (Bonini Neto et al. 2018) e (Kuroda et al. 2020). Com a recente desregulamentação do mercado de energia elétrica e o aumento da transmissão de energia, essa questão se torna ainda mais crucial em todo o mundo. Assim, o monitoramento online da estabilidade de tensão torna-se ainda mais importante (Matarucco et al. 2014), (Yuan e Li, 2015) e (Wu et al. 2017). Na literatura, existem dois tipos de estabilidade, a dinâmica e a estática, a dinâmica tem por objetivo, esclarecer os mecanismos envolvidos no fenômeno de instabilidade de tensão, através do detalhamento

dos efeitos de todos os equipamentos de controle. Já a análise estática destina-se a avaliar a margem de estabilidade de tensão, que envolvem os estudos das curvas P-V e Q-V, feito por meio de sucessivas soluções do fluxo de potência ou fluxo de potência continuado.

Em Stott (1974), foi feito um levantamento sobre técnicas numéricas para cálculo de fluxo de potência. Várias 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). Em Wu et al. (2017) e Karimi et al. (2019) foram propostos métodos baseados no balanço de potência ou injeção de corrente e, em alguns casos, também uma combinação dos dois, chamados de métodos híbridos (Kamel et al. 2013), (Gómez-Expósito et al. 2015), (Kamel et al. 2016) e (Oliveira et al. 2017).

As características mais importantes (convergência, armazenamento e velocidade) na análise dos métodos numéricos para a resolução de sistemas elétricos estão constantemente sendo aperfeiçoadas, uma vez que em suas formulações levam-se em consideração os aspectos físicos do sistema. Considerando as características físicas da rede, o

método de Newton é um exemplo desse aprimoramento, quando se utiliza da esparsidade da matriz Jacobiana durante a eliminação de Gauss-Seidel. Seguindo essa linha, com o intuito de melhorias no fluxo de potência, foi desenvolvido os métodos desacoplados e, posteriormente, o método desacoplado rápido.

Em (Gao et al. 2020) foi proposto um modelo de fluxo de potência, e para resolver este modelo, um algoritmo de fluxo de potência desacoplado rápido eficiente e modificado foi apresentado. Os resultados dos testes mostraram a validade, convergência e eficiência do método proposto. Em (Bonini Neto et al. 2016) foi apresentado o método desacoplado de Newton, cujos algoritmos simultâneo e alternado são aplicados ao FCC com o objetivo de obter a margem de estabilidade e o PMC sem problemas relacionados a singularidade da matriz jacobiana. Foi feito uma comparação de tempo de processamento entre os algoritmos, a redução de tempo utilizando o algoritmo alternado foi bastante promissora.

O objetivo desse trabalho é apresentar uma proposta para o fluxo de potência, via injeção de corrente desacoplado rápido (**FPICDR**) e, além disso, comparar os resultados com os métodos convencionais da literatura (Monticelli, 1983) (fluxo de potência via injeção de potência (**FPIP**) e fluxo de potência via injeção de potência desacoplado rápido (**FPIPDR**)) e métodos apresentados em Oliveira et al. (2017) (fluxo de potência via injeção de corrente modificado (**FPICM**) e fluxo de potência via injeção de corrente híbrido (**FPICH**) (Kamel et al. 2013), mostrando que os métodos propostos apresentam resultados bem próximos e até superiores em relação ao convencional de Newton-Raphson. O *software* utilizado para preparação dos dados e obtenção dos resultados foi o Matlab® (Mathworks, 2022).

2. DESACOPLADO: FORMULAÇÃO VIA INJEÇÃO DE POTÊNCIA

As simplificações introduzidas por Stott (1974) na matriz Jacobiana do fluxo de potência pelo método de Newton deram origem ao método **FPIPDR**. Como o próprio nome sugere, os métodos estão baseados no desacoplamento $P\theta - QV$, isto é, são obtidos considerando o fato de as sensibilidades $\partial P/\partial\theta$ e $\partial Q/\partial V$ serem mais intensas que as sensibilidades $\partial P/\partial V$ e $\partial Q/\partial\theta$ (Monticelli, 1983). Assim, diz-se que existe um acoplamento forte quando a sensibilidade é grande e, um acoplamento fraco (desacoplamento) caso a sensibilidade seja pequena. No método desacoplado, as submatrizes Jacobianas **N** e **M** são desprezadas, uma vez que seus valores são menores que os da submatrizes **H** e **L**. Ressalta-se que foram introduzidas aproximações na matriz Jacobiana, sendo os vetores de *mismatches* calculados da mesma maneira que no método de Newton-Raphson. Sendo assim, essas aproximações acabam alterando o processo de convergência, ou seja, a trajetória percorrida entre o ponto de partida e a solução final é diferente de um método para o outro, mas não alteraram a solução final, pois o problema resolvido permanece o mesmo e, também, depende das tolerâncias preespecificadas (Monticelli, 1983). Nesse método o desacoplamento permite o uso de duas técnicas de resolução: simultânea e a alternada para os subproblemas.

2.1 Simultâneo

Como no método Desacoplado as submatrizes **N** e **M** são ignoradas, tem-se que as equações na forma de resolução simultânea são dadas por:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}^v, |\mathbf{V}|^v) = \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}^v, |\mathbf{V}|^v) \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ \Delta \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}^v, |\mathbf{V}|^v) = \mathbf{L}(\boldsymbol{\theta}^v, |\mathbf{V}|^v) \Delta |\mathbf{V}|^v \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^v + \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ |\mathbf{V}|^{v+1} = |\mathbf{V}|^v + \Delta |\mathbf{V}|^v \end{cases} \quad (2)$$

Neste método de resolução simultânea $\boldsymbol{\theta}$ e **V** são atualizados simultaneamente e, os *mismatches* de potência ativa e reativa são calculados baseados nos valores do estado da iteração anterior.

2.2 Alternado

Para melhorar o desempenho por meio da característica de convergência do método utiliza-se a resolução alternada, no qual as equações são dadas na seguinte forma:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}^v, |\mathbf{V}|^v) = \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}^v, |\mathbf{V}|^v) \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ \boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^v + \Delta \boldsymbol{\theta}^v \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}^{v+1}, |\mathbf{V}|^v) = \mathbf{L}(\boldsymbol{\theta}^{v+1}, |\mathbf{V}|^v) \Delta |\mathbf{V}|^v \\ |\mathbf{V}|^{v+1} = |\mathbf{V}|^v + \Delta |\mathbf{V}|^v \end{cases} \quad (4)$$

No sistema (3) constitui-se meia-iteração ativa, através da qual é feita a atualização dos ângulos de fase das tensões, relacionados aos resíduos de potência ativa. O sistema (4) é a meia-iteração reativa, na qual é feita a atualização das magnitudes das tensões, relacionadas aos resíduos de potência reativa. Na resolução alternada, tem-se, uma atualização de variáveis de estado a cada meia-iteração.

3. DESACOPLADO RÁPIDO: FORMULAÇÃO VIA INJEÇÃO DE POTÊNCIA (**FPIPDR**)

O método desacoplado rápido tem o mesmo algoritmo básico que o método desacoplado apresentado no item 2.2. A principal diferença entre eles é que no método desacoplado rápido são utilizadas as seguintes equações:

$$\begin{cases} \frac{\Delta \mathbf{P}}{\mathbf{V}} = \mathbf{B}' \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \frac{\Delta \mathbf{Q}}{\mathbf{V}} = \mathbf{B}'' \Delta \mathbf{V} \end{cases} \quad (5)$$

nas quais aparecem as matrizes constantes **B'** e **B''**, respectivamente:

$$\begin{cases} B'_{kk} = -B_{kk} \\ B'_{km} = -B_{km} \\ B'_{mk} = -B_{mk} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} B''_{kk} = -B_{kk} \\ B''_{km} = -B_{km} \\ B''_{mk} = -B_{mk} \end{cases} \quad (7)$$

Essas matrizes não dependem das variáveis de estado do sistema (magnitudes e ângulos das tensões nodais) mas sim dos parâmetros da rede (impedâncias e susceptâncias dos ramos e elementos shunt). Essas matrizes são constantes ao

longo do processo iterativo, caracterizando uma redução no esforço computacional e a quantidade de memória utilizada para calcular e inverter as matrizes \mathbf{H} e \mathbf{L} a cada iteração (Monticelli, 1983).

De acordo com as equações (5) as equações do método passam a ser dadas por:

$$\begin{cases} \Delta\theta = (\mathbf{B}')^{-1} * \frac{\Delta\mathbf{P}}{\mathbf{V}} \\ \Delta\mathbf{V} = (\mathbf{B}'')^{-1} * \frac{\Delta\mathbf{Q}}{\mathbf{V}} \end{cases} \quad (8)$$

As matrizes constantes \mathbf{B}' e \mathbf{B}'' e suas inversas são calculadas uma única vez durante todo o processo iterativo.

3.1 Versão XB

De acordo com Stott (1974) para melhorar as características de convergência do método, nas formulações das matrizes \mathbf{B}' e \mathbf{B}'' deve-se: omitir em \mathbf{B}' os elementos predominantemente relacionados ao fluxo de potência reativa (elementos *shunt* e transformadores em fase com tap fora do valor nominal); omitir em \mathbf{B}'' os elementos predominantemente relacionados ao fluxo de potência ativa (como os transformadores); desprezar as resistências séries dos ramos na formação de \mathbf{B}' . Realizando essas mudanças, obtém-se o método XB, no qual \mathbf{B}' e \mathbf{B}'' são reais, esparsas e com estruturas semelhantes às matrizes \mathbf{H} e \mathbf{L} , respectivamente. Assim tem-se que:

$$\begin{cases} B'_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} \frac{1}{x_{km}} \\ B'_{km} = -\frac{1}{x_{km}} \\ B'_{mk} = -\frac{1}{x_{km}} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} B''_{kk} = -B_{kk} \\ B''_{km} = -B_{km} \\ B''_{mk} = -B_{km} \end{cases} \quad (10)$$

3.2 Versão BX

Uma nova proposta é apresentada por Van Amerongen (1989) para a construção das matrizes \mathbf{B}' e \mathbf{B}'' , que sugere que as resistências dos ramos sejam desprezadas na Matriz \mathbf{B}'' e não mais na matriz \mathbf{B}' . De acordo com a proposta, tem-se:

$$\begin{cases} B'_{kk} = -\sum_{m \in \Omega_k} b_{km} \\ B'_{km} = b_{km} \\ B'_{mk} = b_{km} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} B''_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} \frac{1}{x_{km}} - 2 \left(b_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} b_{km}^{sh} \right) \\ B''_{km} = -\frac{1}{x_{km}} \\ B''_{mk} = -\frac{1}{x_{km}} \end{cases} \quad (12)$$

Neste método o número de iterações, é bastante próximo daquele para o método XB. As vantagens da versão BX ficam evidentes para redes com relações R/X (resistência/reatância) mais altas. Em geral, o número de iterações necessárias para a convergência do problema utilizando a versão XB é levemente superior ao do método BX. Outro dado importante discutido na literatura é a versão BX ser mais robusta, convergindo em casos que a versão XB diverge ou apresenta comportamento cíclico.

4. DESACOPLADO RÁPIDO: FORMULAÇÃO PROPOSTA PARA O FLUXO DE POTÊNCIA VIA INJEÇÃO DE CORRENTE (FPICDR)

Simplificações introduzidas na matriz Jacobiana por Stott e Alsac (1974) levaram à versão XB do método fluxo de potência desacoplado rápido (FPIPRD). Em Van Amerongen (1989) a versão BX para fluxo de potência via injeção de potência desacoplado rápido foi implementada e testada. A diferença básica entre as versões são os elementos das matrizes \mathbf{B}' e \mathbf{B}'' (Monticelli et. al. 1990).

A metodologia proposta para o fluxo de potência via injeção de corrente desacoplado rápido (versão BX), denominada FPICDR, é obtida considerando o estado *flat-start* ($|V_k| = |V_i| = 1,0$ p.u. e $\theta_k = \theta_i = 0$) e P_k^{sp} e Q_k^{sp} iguais às suas respectivas potências ativa (13) e reativa (14).

$$P_k(\theta, |V|) = G_{kk}|V_k|^2 + |V_k| \sum_{i \in \Omega_k} |Y_{ki}| |V_i| \cos(\varphi_{ki} - \theta_{ki}) \quad (13)$$

$$Q_k(\theta, |V|) = -B_{kk}|V_k|^2 - |V_k| \sum_{i \in \Omega_k} |Y_{ki}| |V_i| \sin(\varphi_{ki} - \theta_{ki}) \quad (14)$$

Aplicando essas considerações às equações do método de Newton-Raphson via injeção de corrente proposto em Oliveira et al. (2017), os elementos das submatrizes \mathbf{J}_1 , \mathbf{J}_2 , \mathbf{J}_3 e \mathbf{J}_4 são:

Submatriz \mathbf{J}_1 para as barras PQ e PV:

$$\mathbf{J}_1 \begin{cases} J_1(k, i) = -B_{ki} \text{ para } k \neq i \\ J_1(k, k) = -B_{kk} - Q_k^{sp} = \\ -B_{kk} - \left(-B_{kk} - \sum_{i \in \Omega_k} B_{ki} \right) = \sum_{i \in \Omega_k} B_{ki} \end{cases} \quad (15)$$

Submatrizes \mathbf{J}_2 para as barras PQ:

$$\mathbf{J}_2 \begin{cases} J_2(k, i) = G_{ki} \text{ para } k \neq i \\ J_2(k, k) = G_{kk} + P_k^{sp} = \\ G_{kk} + \left(G_{kk} + \sum_{i \in \Omega_k} G_{ki} \right) = G_{kk} \end{cases} \quad (16)$$

Para as barras PV:

$$J_2(k, i) = G_{ki} \text{ para } k \neq i \quad (17)$$

Submatrizes \mathbf{J}_3 para as barras PQ:

$$\mathbf{J}_3 \left\{ \begin{array}{l} J_3(k, i) = G_{ki} \text{ para } k \neq i \\ J_3(k, k) = G_{kk} - P_k^{sp} = \\ G_{kk} - (G_{kk} + \sum_{i \in \Omega_k} G_{ki}) = - \sum_{i \in \Omega_k} G_{ki} = G_{kk} \end{array} \right\} \quad (18) \quad \|\mathbf{R}\|_\infty = \max\{|R_i|\} \quad (24)$$

Submatrizes \mathbf{J}_4 para as barras PQ:

$$\mathbf{J}_4 \left\{ \begin{array}{l} J_4(k, i) = B_{ki} \text{ para } k \neq i \\ J_4(k, k) = B_{kk} - Q_k^{sp} = 2B_{kk} + \sum_{i \in \Omega_k} B_{ki} = \\ - \sum_{i \in \Omega_k} B_{ki} + 2 \left(b_k^{sh} + \sum_{i \in \Omega_k} b_{ki}^{sh} \right) \end{array} \right\} \quad (19)$$

onde G_{ki} , G_{kk} , B_{ki} e B_{kk} são as partes reais e imaginárias da matriz de admitância nodal \mathbf{Y} , Ω_k é o conjunto de barras diretamente conectados a barra k , b_{ki}^{sh} é a susceptância *shunt* da linha de transmissão entre as barras k - i , e b_k^{sh} é o *shunt* de barra (p. ex: banco de reatores e de capacitores). A versão BX proposta do método **FPICDR** é dada por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{c} \Delta \mathbf{G}_{pq} \\ (\Delta \mathbf{P}_{pv}) \\ |\mathbf{V}_{pv}| \end{array} \right] = \mathbf{B}' \left[\begin{array}{c} \Delta \theta_{pq} \\ \Delta \theta_{pv} \end{array} \right] \\ \left[\Delta \mathbf{H}_{pq} \right] = \mathbf{B}'' \left[\Delta |\mathbf{V}_{pq}| \right] \end{array} \right\} \quad (20)$$

sendo os elementos de fora da diagonal e da diagonal da matriz \mathbf{B}' dados por:

$$\left. \begin{array}{l} B'(k, i) = -B_{ki} \text{ para } k \neq i \\ B''(k, k) = \sum_{i \in \Omega_k} B_{ki} \end{array} \right\} \quad (21)$$

Para sistemas radiais e sistemas em malha com razão R/X constante, os elementos da matriz $\mathbf{B}'' = \mathbf{J}_4 - \mathbf{J}_3 (\mathbf{J}_1)^{-1} \mathbf{J}_2$, considerados da condição *flat-start*, são dados por:

$$\left. \begin{array}{l} B''(k, i) = x_{ki}^{-1} \text{ para } k \neq i \\ B''(k, k) = - \sum_{i \in \Omega_k} x_{ki}^{-1} + 2(b_k^{sh} + \sum_{i \in \Omega_k} b_{ki}^{sh}) \end{array} \right\} \quad (22)$$

Observe em (21) que os elementos *shunt* não aparecem nas derivações dos elementos da diagonal de \mathbf{B}' , enquanto que na diagonal de \mathbf{B}'' eles aparecem naturalmente com as derivações.

Para o **FPICM** e **FPICH**, o desacoplamento ocorre da mesma forma que **FPICDR**, mas considerando que, as formulações em **FPICM**, considera a potência reativa gerada como função das variáveis de estado quando da formação da matriz Jacobiana, e o **FPICH**, utiliza a equação do *mismatch* de potência ativa normalizado no caso das barras PV's (Oliveira et al. 2017).

5. RESULTADOS

Com o intuito de comparar os desempenhos para todos os métodos, foi adotado como critério de convergência, o máximo valor absoluto do vetor de resíduos de 10^{-4} p.u. como mostra a equação abaixo:

$$\mathbf{R} = \left[\begin{array}{c} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{array} \right] \quad (23)$$

no qual, tem-se que:

A adoção de um mesmo critério de convergência visa uma comparação mais justa dos desempenhos dos métodos, posto que os resíduos referentes ao balanço de injeção de corrente diferem dos de balanço de injeção de potência.

Para realizar os testes nos sistemas do IEEE de 14, 30, 57, 118 e 300 barras, partiram-se do banco de dados. O tratamento dos limites de potência reativa (Q) nas barras de tensão controlada segue o procedimento descrito em Monticelli (1983). Em cada iteração a geração de reativo de cada barra PV é comparada com seus respectivos limites. No caso de violação, a barra PV é alterada para tipo PQ. Estas barras podem voltar a ser PV nas iterações futuras. A fim de destacar as semelhanças de convergência entre os métodos de fluxo de potência desacoplado rápido, um número maior de meias iterações P0 e QV foi permitido nas simulações. Já para os métodos de N-R, foi adotado um máximo de 20 iterações completas. Para as versões desacopladas, foi utilizado o esquema de iteração padrão, conforme Stott e Alsac (1974). Além disso, todos os testes com o **FPICDR** (versão BX) foram conduzidos usando *mismatches* normalizados ($\Delta P/V$ e $\Delta Q/V$) (Monticelli et. al. 1990).

A avaliação de desempenho é realizada considerando diferentes relações R/X dos ramos. Como apresenta Monticelli et. al. (1990), variaram-se os valores dos parâmetros R e X de todos os ramos de acordo com os multiplicadores apresentados nas primeiras colunas das tabelas.

Os estados convergidos apresentados nas Tabelas de 1 a 5 são referentes a relação (1,0xR/1,0xX), no qual os multiplicadores da relação R/X são iguais a um. O resíduo total de potência, definido como sendo a soma dos valores absolutos dos resíduos de potência ativa e reativa, foi usado como critério de convergência para os quatros métodos.

5.1 Análise e Desempenho dos Sistemas

Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos por meio dos testes realizados para os seguintes métodos: fluxo de potência via injeção de potência: **FPIP**; fluxo de potência via injeção de corrente modificado: **FPICM**; fluxo de potência via injeção de corrente híbrido: **FPICH**; fluxo de potência via injeção de potência desacoplado rápido: **FPIPDR** e o fluxo de potência via injeção de corrente desacoplado rápido proposto: **FPICDR**.

Para realizar os testes foram utilizados vários carregamentos (λ), assim como diferentes relações R/X dos ramos. Destaca-se que todos os métodos desacoplados aqui estudados, foram implementados na versão BX.

Nas Tabelas de 1 a 5 tem-se o desempenho dos cinco métodos numéricos analisados para diferentes condições de carregamento. As escolhas dos valores de carregamento (λ) que constam nas primeiras colunas das tabelas foram realizadas a partir do conhecimento do valor máximo de carregamento (λ_{\max}) dos sistemas apresentados. O fator de carregamento (λ) é utilizado para simular incrementos de carga ativa e reativa, considerando fator de potência constante. Cada incremento de carga vem acompanhado de um aumento na

geração equivalente (Ajarapu, 2010). Estes métodos possibilitam a obtenção de toda a curva P-V, incluindo o próprio ponto de máximo carregamento, o que já não ocorre com os métodos de fluxo de potência em geral, por causa da singularidade da matriz Jacobiana das equações do fluxo de potência nesse ponto.

Observa-se que os três métodos de Newton-Raphson tiveram para todos os sistemas, exatamente o mesmo desempenho. Já os métodos desacoplados rápidos, apresentaram algumas diferenças no desempenho. Para os sistemas IEEE-14, 30 e 57 barras, o método desacoplado rápido convencional (FPIPDR) e o desacoplado rápido proposto (FPICDR) apresentaram um resultado muito próximo. Entretanto, para o sistema IEEE-118 barras, Tabela 4, o método proposto FPICDR, apresentou um desempenho superior ao método convencional, para condições de carregamento igual ou acima de $\lambda = 1,86$. Ambos divergem a partir de $\lambda = 1,9$. Como já era esperado há um aumento no número de iterações à medida que o carregamento se aproxima do máximo carregamento. A última linha das tabelas corresponde a uma condição ligeiramente maior que a máxima possível. Assim, para essa condição, como esperado, todos os métodos Não Convergem (NC) ou divergem.

Observa-se que todos os métodos de Newton-Raphson apresentaram um bom desempenho e que também foi possível obter soluções para condições de carregamento até muito próximas do PMC. Já no caso dos desacoplados, estes apresentaram um número relativamente maior de iterações que os de Newton-Raphson para valores próximos do PMC. Esse comportamento também já era esperado visto que esses métodos apresentam problemas de mau condicionamento nas proximidades do PMC (Alves, 2003).

Tabela 1: Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-14 barras

λ	FPIP	PICM	FPICH	FPIPDR Iter θ - iterV	FPICDR Iter θ - iterV
1,0	3	3	3	7-6	7-6
1,4	5	5	5	9-8	9-8
1,7	6	6	6	15-14	17-14
1,75	6	6	6	20-19	21-20
1,767	7	7	7	23-22	25-24
1,78	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte

Tabela 2: Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-30 barras

λ	FPIP	PICM	FPICH	FPIPDR Iter θ - iterV	FPICDR Iter θ - iterV
1,0	4	4	4	7-7	8-7
1,4	6	6	6	12-11	14-13
1,5	9	9	9	20-19	22-21
1,53	10	10	10	38-37	42-40
1,533	10	10	10	58-57	62-60
1,54	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte

Tabela 3: Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-57 barras

λ	FPIP	PICM	FPICH	FPIPDR Iter θ - iterV	FPICDR Iter θ - iterV
1,0	4	4	4	8-8	8-8
1,4	5	5	5	10-9	11-11
1,5	5	5	5	12-11	13-13
1,58	6	6	6	21-20	23-22
1,596	7	7	7	41-40	44-43
1,6	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte

Tabela 4: Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-118 barras

λ	FPIP	PICM	FPICH	FPIPDR Iter θ - iterV	FPICDR Iter θ - iterV
1,0	4	4	4	8-8	9-8
1,4	5	5	5	9-9	9-9
1,7	6	6	6	12-12	13-13
1,86	8	8	8	51-50	41-40
1,865	8	8	8	82-81	49-48
1,9	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte

Tabela 5: Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-300 barras

λ	FPIP	PICM	FPICH	FPIPDR Iter θ - iterV	FPICDR Iter θ - iterV
1,0	4	4	4	13-12	13-12
1,02	4	4	4	16-15	15-14
1,04	5	5	5	24-23	22-21
1,05	5	5	5	36-35	32-32
1,055	7	7	7	80-80	74-73
1,056	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte

Nas Tabelas 6 a 10, compara-se o desempenho dos cinco métodos para os sistemas, considerando as respectivas relações de R/X. As escolhas dos valores dos multiplicadores de R que constam nas primeiras colunas das tabelas foram realizadas a partir do conhecimento do valor máximo de carregamento (λ_{\max}) dos sistemas apresentados, na condição de relação R/X em questão. Como se pode observar na última coluna das tabelas, à medida que se incrementa a relação R/X, o valor do PMC reduz, sendo que a última linha de cada uma das tabelas corresponde a uma condição de não solução uma vez que λ_{\max} da respectiva relação apresenta um valor menor do que o valor considerado nas simulações como sendo o caso base ($\lambda = 1$).

Analisando as informações, verifica-se que o número de iterações necessário para a convergência do problema é bem próximo para os métodos de Newton-Raphson, mostrando assim o bom desempenho do método proposto em Oliveira et al. (2017) (FPICH). Por outro lado, o método FPICDR teve um desempenho similar ao do FPIPDR para várias relações R/X.

Tabela 6: Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-14 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR Iter θ -iterV	FPICDR Iter θ -iterV	λ_{max}
1,0×R/0,5×X	4	4	4	8-7	10-9	2,6714
1,0×R/1,0×X	3	3	3	7-6	7-6	1,7940
2,0×R/1,0×X	4	4	4	9-8	9-8	1,4917
3,0×R/1,0×X	5	5	5	10-10	29-28	1,2485
4,0×R/1,0×X	6	6	6	12-14	48-47	1,0556
4,5×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	0,9760

NC: Não Converge

Tabela 7: Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-30 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR Iter θ -iterV	FPICDR Iter θ -iterV	λ_{max}
1,0×R/0,5×X	6	6	6	9-9	12-11	2,2349
1,0×R/1,0×X	4	4	4	7-7	8-7	1,5335
2,0×R/1,0×X	5	5	5	10-9	13-12	1,2805
3,0×R/1,0×X	6	6	6	15-14	19-18	1,0758
3,5×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	0,9898

NC: Não Converge

Tabela 8: Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-57 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR Iter θ -iterV	FPICDR Iter θ -iterV	λ_{max}
1,0×R/0,5×X	3	3	4	11-10	13-12	2,2296
1,0×R/1,0×X	4	4	4	8-8	8-8	1,5972
2,0×R/1,0×X	5	5	5	10-10	17-16	1,3444
3,0×R/1,0×X	8	8	7	13-21	44-44	1,1104
3,5×R/1,0×X	8	8	9	17-29	NC	1,0166
4,0×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	0,9339

NC: Não Converge

Tabela 9: Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-118 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR Iter θ -iterV	FPICDR Iter θ -iterV	λ_{max}
1,0×R/0,5×X	5	5	5	11-10	10-10	2,5868
1,0×R/1,0×X	4	4	4	8-8	9-8	1,8664
2,0×R/1,0×X	5	5	5	10-9	10-10	1,6228
3,0×R/1,0×X	5	5	6	10-10	13-13	1,2371
3,5×R/1,0×X	5	5	6	17-16	21-20	1,0601
4,0×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	0,9154

NC: Não Converge

Tabela 10: Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-300 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR Iter θ -iterV	FPICDR Iter θ -iterV	λ_{max}
1,0×R/0,5×X	5	6	4	7-7	16-18	1,4303
1,0×R/1,0×X	4	4	4	13-12	12-12	1,0553
1,2×R/1,0×X	5	5	4	17-16	15-15	1,0292
1,4×R/1,0×X	6	5	5	28-27	25-25	1,0086

1,47×R/1,0×X	7	7	6	79-77	70-69	1,0002
1,473 R/1,0X	NC	NC	NC	NC	NC	0,9998

NC: Não Converge

Com o objetivo de ilustrar que os estados obtidos pelos métodos ao final do processo iterativo são os mesmos, nas Figs. 1(a) e 1(b) são apresentados os estados convergidos (θ , V) obtidos para a condição 3,0×R/1,0×X do sistema de 118 barras. Na Fig. 1(c) têm-se as trajetórias dos *mismatches* totais para os cinco métodos. Comparando a evolução dos *mismatches* dos métodos propostos com a de seus respectivos métodos padrões, pode-se verificar que os propostos apresentam boas características de convergência.

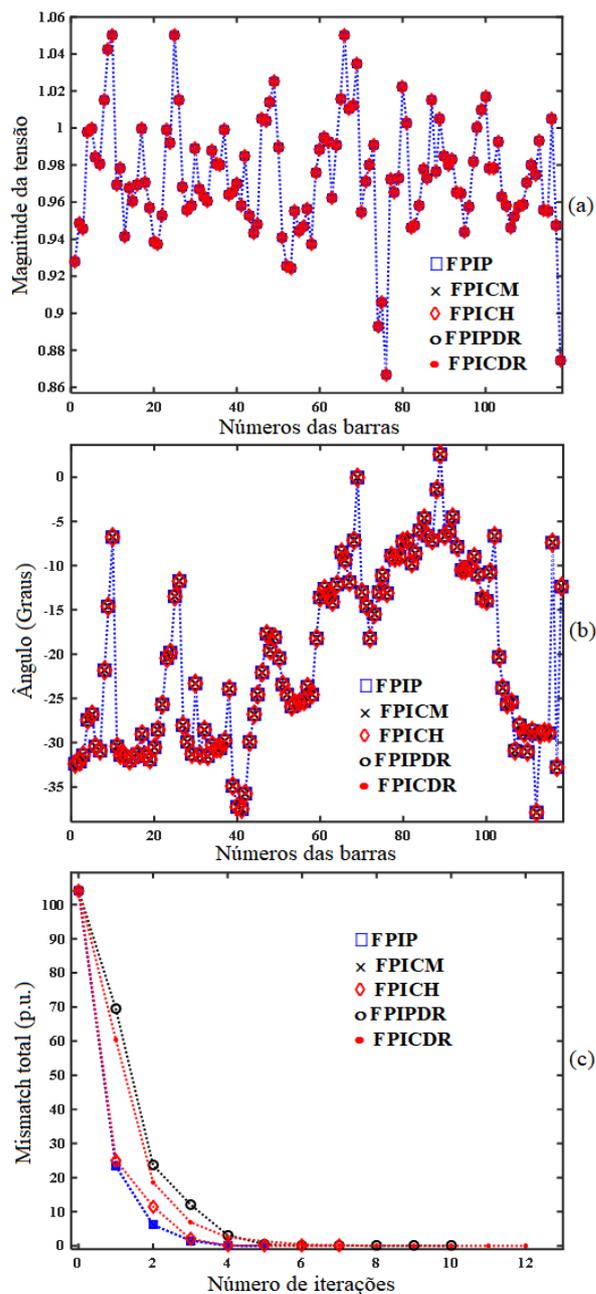


Fig. 1 Resultados para o sistema IEEE-118 barras obtidos na relação 3,0×R/1,0×X, (a) estados convergidos para magnitude da tensão V , (b) estados convergidos para ângulo da tensão θ , (c) *Mismatch* total em p.u.

6. CONCLUSÕES

A metodologia proposta neste trabalho consiste na formulação do fluxo de potência por meio da versão BX do método desacoplado rápido, baseado nas equações de injeção de corrente escritas em termos de coordenadas polares. Seu desempenho é comparado com a versão BX do método desacoplado formulado via equações de injeção de potência (**FPIPDR**) e outras versões do fluxo de carga convencional (**FPIP**) e via injeção de corrente (**FPICM**) e (**FPICH**).

Observa-se que os três métodos de Newton-Raphson tiveram para todos os sistemas, exatamente o mesmo desempenho com a variação do fator de carregamento. Já os métodos desacoplados rápidos, apresentaram algumas diferenças no desempenho. Para os sistemas IEEE-14, 30 e 57 barras, o método desacoplado rápido convencional (**FPIPDR**) e o desacoplado rápido proposto (**FPICDR**) apresentaram um resultado muito próximo. Entretanto, para o sistema IEEE-118 barras, o método proposto **FPICDR**, apresentou um desempenho superior ao método convencional, para condições de carregamento igual ou acima de $\lambda = 1,86$.

Considerando as respectivas relações de R/X, verificou-se que o número de iterações necessário para a convergência do problema é bem próximo para os métodos de Newton-Raphson, mostrando assim o bom desempenho do método (**FPICH**). O método **FPICDR** teve um desempenho similar ao do **FPIPDR** para quase a totalidade das relações R/X. Para futuros trabalhos, a ideia é aplicar os métodos aqui propostos para o fluxo de potência continuado (obtenção das curvas P-V) e em sistemas contingenciados.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- Alves, D.A., Silva, L.C.P., Castro, C.A., da Costa, V.F. (2003). Continuation fast decoupled power flow with secant predictor. *IEEE Trans. on Power Syst.* 1078 - 1085.
- Bonini Neto, A., Magalhães, E. M., Alves, D. A. (2016). Obtaining the Maximum Loading Point of Electric Power Systems using the Decoupled Methods of Newton, *Revista IEEE América Latina*, v. 14, p. 371-379.
- Bonini Neto, A., Magalhães, E. M., Alves, D. A. (2018). Geometric Parameterization Technique for Continuation Power Flow Based on Quadratic Curve. *Electric Power Components and Systems*, 45,1-13.
- El-Hawary, M.E. (1995). *Electrical power systems: design and analysis*. Revised printing, vol. 2. John Wiley & Sons, 799p.
- Gao S. *et al.* (2020). Fast Decoupled Power Flow Calculation with Complementary Constraints of Reactive Power Generation and Node Voltage, *2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, pp. 1-5.
- 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.
- IEEE Working Group on Voltage Stability. (1990). *Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience*. *IEEE Special Publication, 90TH0358-2-PWR*.
- 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.
- Kuroda, E., Watanabe, M., Kato, D., Saito, N., Yatsu, M. (2020). Fast computation method of static voltage stability using geometric parameter adjustment for the continuation power flow. *Electr Eng Jpn.*, 1–10. <https://doi.org/10.1002/eej.23296>
- 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. Matrix Laboratory (2022). Disponível em: <<http://www.mathworks.com>>. Acesso em: 02 de março de 2022.
- Monticelli, A., Garcia, A., Saavedra, O. (1990). Fast decoupled load flow: hypothesis, derivations and testing, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1425–1431.
- Monticelli, A.J. (1983). *Power flow in electric networks*. São Paulo (Brazil): Edgard Blucher, [In Portuguese].
- Nagata, M., Yoshimura, K., Sugiuchi, T., Takashita, M., Yonei, K. (2013). A study on power system control considering both transient stability and voltage stability. *IEEJ Trans PE*. 133 (10), 470- 475. Japanese.
- 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.
- Stott, B. (1974). Review of load-flow calculation methods. *Proc IEEE*, 62: 916-929.
- Stott, B., Alsac, O. (1974). Fast decoupled load flow. *IEEE Trans. on Power Syst.*, Piscataway, 93 (3), 859-869.
- Van Amerongen, R.A.M. (1989). A general-purpose version of the fast decoupled load ow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4, 760-770.
- 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)*, 1-6.
- Yorino, Y. (2003). Trend in voltage stability problem and its analysis methods in power systems. *IEEJ Trans PE*, 123 (7), 803-807.
- Yuan, H., Li, F. (2015). Hybrid voltage stability assessment (VSA) for N–1 contingency. *Electr Power Syst Res*, 122, 65–75.