



**Revista Eletrônica
Paulista de Matemática**

ISSN 2316-9664
Volume 14, fev. 2019
Edição Ermac

Alfredo Bonini Neto

UNESP - Universidade
Estadual Paulista "Júlio de
Mesquita Filho"
alfredo.bonini@unesp.br

Leandro Souto de Oliveira

UNESP - Universidade
Estadual Paulista "Júlio de
Mesquita Filho"
leandrosouto182@hotmail.com

Jhonatan Cabrera Piazzentin

UNESP - Universidade
Estadual Paulista "Júlio de
Mesquita Filho"
professorpiazzentin@gmail.com

Obtenção da margem de carregamento em sistemas elétricos de potência utilizando uma técnica geométrica no plano ângulo versus magnitude das tensões

Obtaining the loading margin in electric power systems using a geometric technique in the plane angle versus magnitude of voltages

Resumo

Atualmente, a tendência contínua de aumento nas demandas de carga, juntamente com as restrições econômicas e ambientais para a construção de novas usinas e linhas de transmissão, levou os sistemas de energia a operar mais próximos de seus limites, aumentando a probabilidade de ocorrência de problemas de estabilidade. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi criar uma técnica de parametrização para obtenção da margem de carregamento de um sistema elétrico, bem como o ponto de máximo carregamento (PMC) sem problemas relacionados a singularidade da matriz Jacobiana, utilizando para isso o plano ângulo versus magnitude da tensão da barra que apresentar a maior variação entre as tensões de um ponto atual em relação ao ponto anterior. Esta técnica acarretou em uma trajetória de soluções (TS) com um aspecto linear e com isso, possibilitou a remoção da singularidade durante o traçado de toda curva P-V. Dos resultados, o novo plano mostrou-se eficiente na obtenção das curvas P-V dos sistemas analisados, com uma redução do número total de iterações em torno de 10% quando comparado com a metodologia utilizando a tensão da barra crítica como parâmetro.

Palavras-chave: Ponto de Máximo Carregamento. Fluxo de Carga. Parametrização. Ponto crítico.

Abstract

Currently, the continuing trend of increasing load demands coupled with economic and environmental constraints for the construction of new power plants and transmission lines has led energy systems to operate closer to their limits, increasing the probability of problems occurring stability. In this context, the objective of this paper was to create a parametrization technique to obtain the loading margin of an electric system, as well as maximum loading point (MLP) without problems related to the singularity of the Jacobian matrix, using the plane angle versus magnitude of the bus voltage. This technique resulted in a trajectory of solutions (TS) with a linear aspect and with that, allowed the removal of the singularity during the tracing of any P-V curve. From the results, the new plan was efficient in obtaining the P-V curves of the analyzed systems, with a reduction of the total number of iterations around 10% when compared to the methodology using the critical bus voltage as parameter.

Keywords: Maximum Loading Point. Load Flow. Parameterization. Critical point.

1 Introdução

A demanda de energia elétrica está aumentando dia a dia e a geração por sua vez é limitada. Mercados de eletricidade desregulamentados e aumento na concorrência entre as empresas de energia devido a privatização das indústrias estatais são um dos principais fatores (ABBOTT, 2007), e é essencial manter uma energia confiável e de boa qualidade no fornecimento de eletricidade. Tudo isso resultou em grandes redes de energia interconectadas que são operadas sob condições de grande carga e estão frequentemente próximas de seus limites de estabilidade. A instabilidade da tensão do sistema de energia é agora um dos problemas desafiadores enfrentados pelas concessionárias.

Os sistemas elétricos de potência que possuem equipamentos mais modernos de gerenciamento de energia têm forte foco no monitoramento da estabilidade de tensão em tempo-real (ZIMA et al, 2005). O objetivo é o de se evitar que o sistema seja levado a operar próximo a uma condição crítica onde, p. ex., um pequeno aumento de carga ou uma contingência possa causar o colapso de tensão. O limite máximo de capacidade de carga da rede de transmissão é um dos índices amplamente utilizados para representar a segurança de tensão de um sistema de potência. É fundamental que as concessionárias acompanhem a proximidade da rede de transmissão, até o limite máximo de carga (ponto de máximo carregamento - PMC), de modo que, em caso de emergência, possam ser tomadas ações de controle adequadas.

A segurança pode ser obtida através de monitoramento apropriado, estimativa e controle do estado atual e analisada por várias técnicas convencionais baseadas em avaliações estáticas (BONINI NETO; MAGALHÃES; ALVES, 2017; DONG et al, 2018; GAN et al, 2015; JU et al, 2014; LEE; LIU; CHU, 2014; MOKHLIS et al, 2014;) e avaliações dinâmicas (ACHARJEE, 2012; PANTOS; VERBIC; GUBINA, 2006; VERBIC; GUBINA, 2004;).

Segundo Dobson (1994), a análise de estabilidade estática de tensão, independentemente do comportamento dinâmico em sistemas de energia, ainda apresentam algumas vantagens particulares. Em particular, os modelos de carga dinâmica podem ser reduzidos a equações estáticas e simplificados sem afetar as margens de carregamento e suas sensibilidades. Assim, para se manter o sistema operando de forma segura e evitar-se o colapso de tensão, passou-se a monitorar a estabilidade estática de tensão durante a operação em tempo-real de um sistema elétrico de potência.

As curvas P-V convencionais são amplamente utilizadas pelas concessionárias para determinação do PMC (AJJARAPU, 2006). O método de fluxo de carga continuado (FCC) é frequentemente usado para obter as curvas P-V (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; BONINI NETO; ALVES, 2010; BONINI NETO et al, 2017; BONINI NETO; MAGALHÃES; ALVES, 2016; SEYDEL, 1994). O limite de capacidade de carga é determinado aumentando a carga do sistema em uma determinada direção, representando o cenário de estresse mais provável.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é criar uma técnica de parametrização geométrica dentro dos estudos da análise da estabilidade estática de tensão para a obtenção da margem segura de carregamento, bem como do PMC sem os problemas relacionados à singularidade da matriz Jacobiana, utilizando para isso, o plano ângulo de uma barra qualquer (neste trabalho barra 2) versus a magnitude da tensão da barra que apresentar a maior variação entre as tensões de um ponto atual em relação ao ponto anterior. Esta técnica acarreta em uma trajetória de soluções (TS) com um aspecto linear e com isso, possibilita a remoção da

singularidade durante o traçado de toda curva P-V, os pontos foram obtidos pelo preditor secante de ordem zero (método trivial). Em Bonini et al (2018), estudos iniciais foram feitos, o qual foram utilizados o ângulo e a magnitude da tensão da barra que apresentar a maior variação entre as tensões de um ponto atual em relação ao ponto anterior para o traçado da curva P-V. Neste proposto trabalho, o ângulo da tensão permanecerá fixo na barra 2, outro valor do ângulo (θ) poderia ser escolhido, pois todos os ângulos das tensões não apresentam problemas de singularidade no traçado da curva P-V.

2 Metodologia

As equações convencionais do fluxo de carga (FC) são:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(\theta, \mathbf{V}) &= \mathbf{0}, \text{ ou} \\ \Delta \mathbf{P} &= \mathbf{P}^{\text{esp}} - \mathbf{P}(\theta, \mathbf{V}) = \mathbf{0} \\ \Delta \mathbf{Q} &= \mathbf{Q}^{\text{esp}} - \mathbf{Q}(\theta, \mathbf{V}) = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (1)$$

sendo

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_k(\theta, \mathbf{V}) &= V_k \sum_{m \in \kappa} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ \mathbf{Q}_k(\theta, \mathbf{V}) &= V_k \sum_{m \in \kappa} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \end{aligned} \quad (2)$$

em que \mathbf{P}_k e \mathbf{Q}_k representam as equações de potência ativa e reativa injetadas em uma barra k , θ e \mathbf{V} são os respectivos vetores de ângulo de fase e magnitude de tensão nodal, θ_{km} é a diferença angular entre as barras k e m ; \mathbf{P}^{esp} é o vetor da diferença entre os vetores de potência ativa, gerada ($\mathbf{P}_g^{\text{esp}}$) e consumida ($\mathbf{P}_c^{\text{esp}}$), especificada para as barras de carga (PQ) e geração (PV); e \mathbf{Q}^{esp} é o vetor de potência reativa consumida especificada para as barras PQ . G_{km} e B_{km} são os elementos pertencentes às matrizes condutância e susceptância nodal (MONTICELLI, 1983).

Para a metodologia proposta neste trabalho, foi acrescentado a variável λ ao sistema (1) para simular o aumento da carga no sistema, neste caso o sistema de Equações (1) passa a ser:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{P}(\theta, \mathbf{V}, \lambda) &= \mathbf{P}^{\text{esp}}(\lambda) - \mathbf{P}(\theta, \mathbf{V}) = \lambda(\mathbf{P}_g^{\text{esp}} - \mathbf{P}_c^{\text{esp}}) - \mathbf{P}(\theta, \mathbf{V}) = \mathbf{0} \\ \Delta \mathbf{Q}(\theta, \mathbf{V}, \lambda) &= \mathbf{Q}^{\text{esp}}(\lambda) - \mathbf{Q}(\theta, \mathbf{V}) = \lambda \mathbf{Q}_c^{\text{esp}} - \mathbf{Q}(\theta, \mathbf{V}) = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (3)$$

onde λ representa o fator de carregamento do sistema. $\mathbf{P}^{\text{esp}}(\lambda)$ é o vetor da diferença entre os vetores de potência ativa gerada ($\mathbf{P}_g^{\text{esp}}$) e consumida ($\mathbf{P}_c^{\text{esp}}$) especificada para as barras de carga (PQ) e geração (PV); e $\mathbf{Q}^{\text{esp}}(\lambda)$ é o vetor de potência reativa consumida especificada para as barras PQ .

A equação (3) assume que o carregamento da rede é proporcional ao do caso base e considera o fator de potência constante. $\mathbf{P}^{\text{esp}}(\lambda)$ e $\mathbf{Q}^{\text{esp}}(\lambda)$ também podem ser definido como sendo igual a $\lambda(\mathbf{k}_{Pg} \mathbf{P}_g^{\text{esp}} + \mathbf{k}_{Pc} \mathbf{P}_c^{\text{esp}})$ e $\lambda \mathbf{k}_{Qc} \mathbf{Q}_c^{\text{esp}}$, respectivamente. Os vetores \mathbf{k}_{Pg} , \mathbf{k}_{Pc} e \mathbf{k}_{Qc} são parâmetros fixos usado para caracterizar um específico cenário de carga.

A partir do caso base ($\lambda = 1$), o valor de λ é aumentado gradualmente (passo = 0,1) até um valor para o qual nenhuma solução seja obtida, ou seja, para qual o processo iterativo do fluxo de carga não convirja (considerando um máximo de 10 iterações) ou diverja. Durante esse

processo, a partir do segundo ponto ($\lambda = 1,1$), os valores das magnitudes das tensões de todas as barras são comparados em relação ao seu valor anterior. Em Bonini et al (2018), quando o fluxo de carga divergir ou não convergir (10 iterações), o ângulo e a magnitude de tensão da barra que apresentar a maior variação em sua magnitude de tensão entre os dois últimos pontos convergidos ($nk_{\max} = |V_k^{c-1} - V_k^c|$), serão utilizados para formar o novo plano ($\theta_{nk_{\max}} - V_{nk_{\max}}$) no qual a aplicação do método proposto possibilitará a obtenção dos pontos que serão usados para o traçado da curva P-V. Onde nk_{\max} é o número da barra que apresentou essa maior variação. A Figura 1 apresenta o fluxograma da metodologia utilizada em Bonini et al (2018).

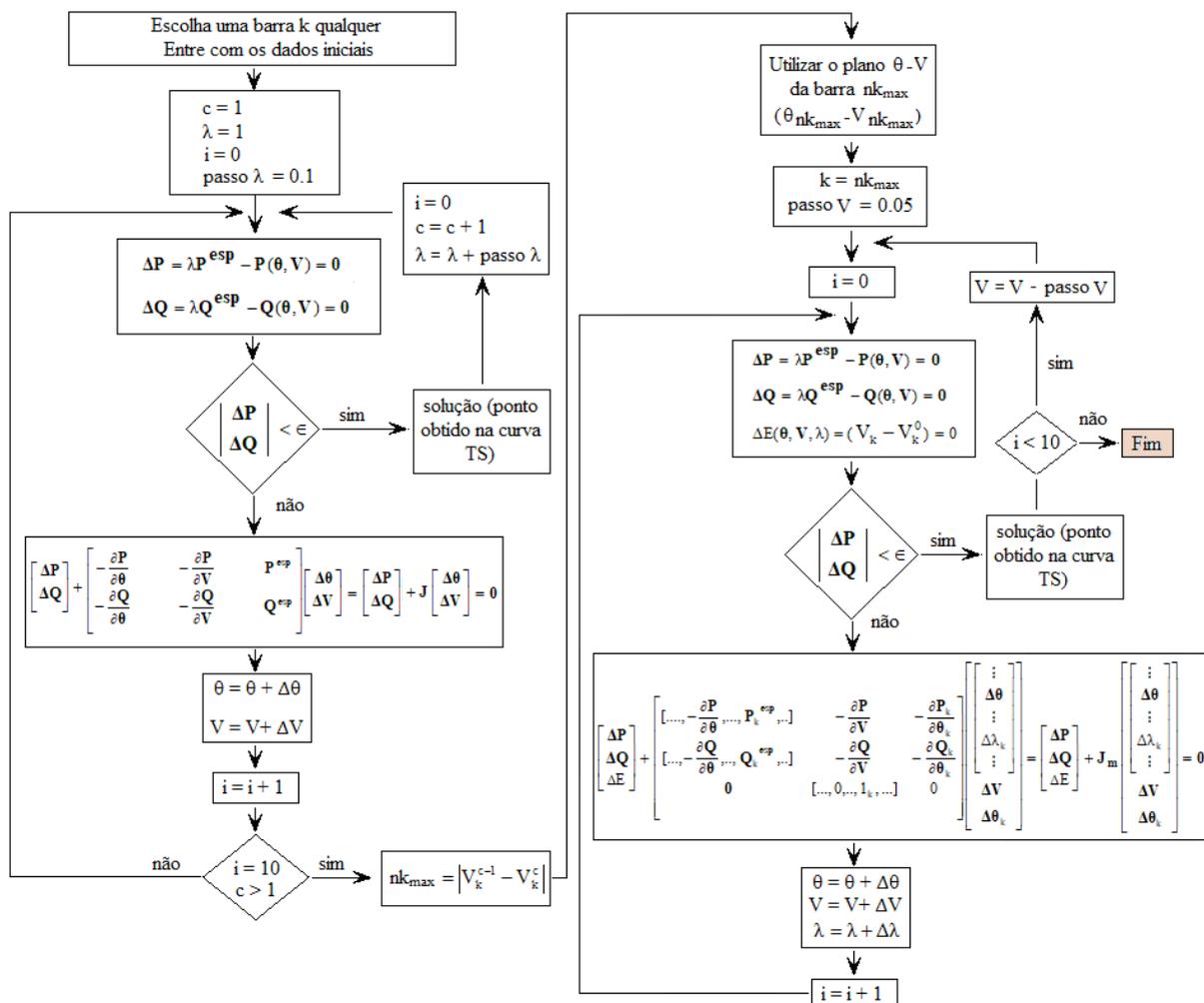


Figura 1: Fluxograma da metodologia apresentada em Bonini et al (2018).

Para a metodologia utilizada em Bonini et al (2018), a equação $\Delta E(\theta, V, \lambda)$ foi acrescentada ao sistema de equações (3), passando a ser:

$$\begin{cases} \Delta P = \lambda P^{\text{esp}} - P(\theta, V) = 0 \\ \Delta Q = \lambda Q^{\text{esp}} - Q(\theta, V) = 0 \\ \Delta E(\theta, V, \lambda) = (V_k - V_k^0) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Linearizando por intermédio da série de Taylor e na forma matricial, parametrizado por V_k no plano $\theta_k \times V_k$, o sistema passa a ser:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dots, -\frac{\partial P}{\partial \theta}, \dots, P_k^{esp}, \dots \\ \dots, -\frac{\partial Q}{\partial \theta}, \dots, Q_k^{esp}, \dots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{\partial P}{\partial V} \\ -\frac{\partial Q}{\partial V} \\ [\dots, 0, \dots, 1_k, \dots] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \lambda_k \\ \vdots \\ \Delta V \\ \Delta \theta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta E \end{bmatrix} + \mathbf{J}_m \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \lambda_k \\ \vdots \\ \Delta V \\ \Delta \theta_k \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (5)$$

A Figura 2 a seguir apresenta as curvas trajetória de soluções (TS) dos sistemas teste do IEEE-14 e 300 barras, as quais foram utilizadas em Bonini et al (2018) como plano para o traçado das curvas P-V. Pode-se observar o aspecto linear dessas curvas em torno do PMC, o que justificou o uso das mesmas para o traçado da curva P-V.

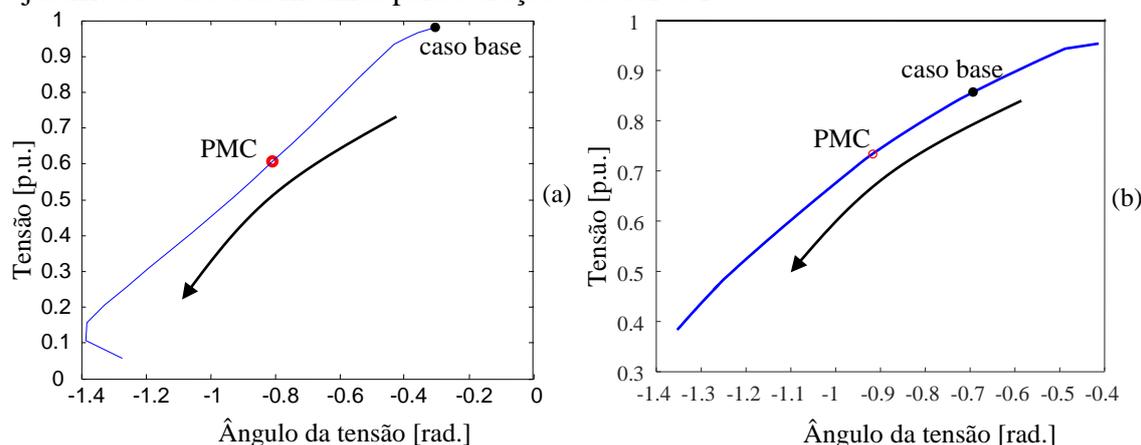


Figura 2: Curva magnitude versus o ângulo da tensão nodal apresentadas em Bonini et al (2018), (a) $(\theta_{14}-V_{14})$ do sistema IEEE-14 barras, (b) $(\theta_{526}-V_{526})$ do sistema IEEE-300 barras.

Para o presente trabalho, como o ângulo da tensão permanecerá fixo na barra 2 para obtenção da curva P-V, a equação (5) passa a ser:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_k^{esp}, \dots, -\frac{\partial P}{\partial \theta}, \dots \\ Q_k^{esp}, \dots, -\frac{\partial Q}{\partial \theta}, \dots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{\partial P}{\partial V} \\ -\frac{\partial Q}{\partial V} \\ [\dots, 0, \dots, 1_k, \dots] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_k \\ \vdots \\ \Delta \theta \\ \vdots \\ \Delta V \\ \Delta \theta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta E \end{bmatrix} + \mathbf{J}_m \begin{bmatrix} \Delta \lambda_k \\ \vdots \\ \Delta \theta \\ \vdots \\ \Delta V \\ \Delta \theta_k \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (6)$$

Para melhor compreensão, utilizando um sistema de três barras da Figura 3, o sistema de equações utilizando o plano $\theta_2 \times V_3$ é mostrado em (7).

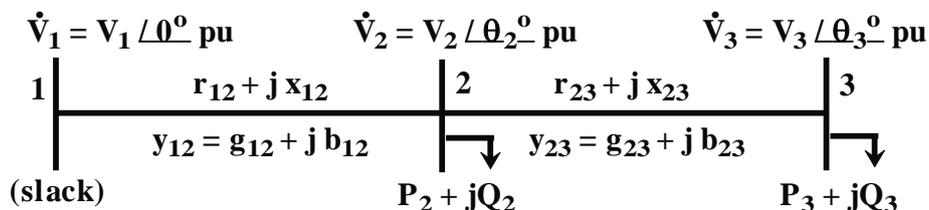


Figura 3: Sistema de três barras

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_2^{esp} & -\frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} & -\frac{\partial P_2}{\partial V_2} & -\frac{\partial P_2}{\partial V_3} & -\frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} \\ P_3^{esp} & -\frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} & -\frac{\partial P_3}{\partial V_2} & -\frac{\partial P_3}{\partial V_3} & -\frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} \\ Q_2^{esp} & -\frac{\partial Q_2}{\partial \theta_3} & -\frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & -\frac{\partial Q_2}{\partial V_3} & -\frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} \\ Q_3^{esp} & -\frac{\partial Q_2}{\partial \theta_3} & -\frac{\partial Q_3}{\partial V_2} & -\frac{\partial Q_3}{\partial V_3} & -\frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta E \end{bmatrix} + J_m \begin{bmatrix} \Delta \lambda \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta \theta_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

A Figura 4 a seguir apresenta as curvas trajetória de soluções (TS) dos sistemas teste do IEEE-14 e 300 barras proposta neste trabalho como plano para o traçado das curvas P-V. As curvas P-V foram obtidas armazenando os valores das tensões e do carregamento do sistema (λ) durante o traçado das curvas TS (θ_2 - V_k). Pode-se observar o aspecto linear dessas curvas em torno do PMC justificando o uso das mesmas para o traçado da curva P-V.

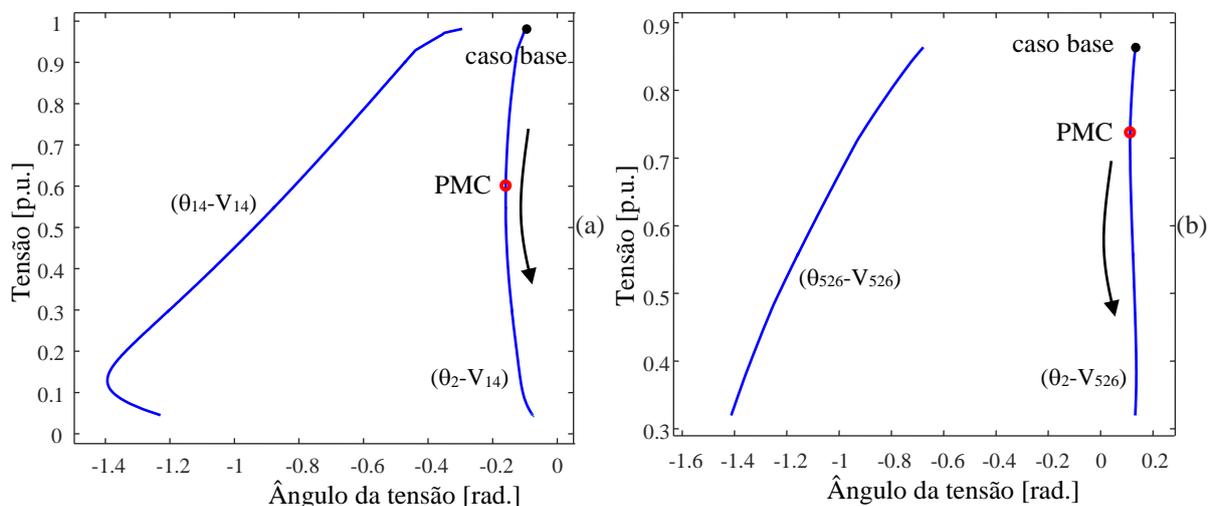


Figura 4: Curva ângulo da tensão nodal da barra 2 versus magnitude da tensão da barra que apresentar a maior variação em sua magnitude de tensão entre os dois últimos pontos convergidos, (a) $(\theta_{14}-V_{14})$ e (θ_2-V_{14}) do sistema IEEE-14 barras, (b) $(\theta_{526}-V_{526})$ e (θ_2-V_{526}) do sistema IEEE-300 barras.

3 Resultados

Para todos os testes realizados, a tolerância (ϵ) adotada para o *mismatch* total de potência foi de 10^{-5} p.u. O controle dos limites de potência reativa (Q) nas barras PV's é o mesmo utilizado no método convencional de FC. Em cada iteração a geração de reativos de cada uma dessas barras é comparada com seus respectivos limites. No caso de violação, ela é alterada para tipo PQ. Estas barras podem voltar a ser PV nas iterações futuras.

A Figura 5 e 6 apresentam resultados para o sistema IEEE-14 e 300 barras pela metodologia proposta em Bonini et al (2018). Como a priori, em um sistema elétrico de potência não se conhece a curva a ser traçada, foi escolhido aleatoriamente uma barra do sistema, neste caso a barra 3 (V_3), para obtenção da margem de carregamento. Para $\lambda=1$, por meio do fluxo de carga (FC), calcula-se o caso base e os demais pontos com passo de 0.1 até o FC divergir ou não convergir (10 iterações), neste caso, troca-se o plano para o ângulo e magnitude da tensão da barra que apresentar maior variação entre a tensão do ponto atual e anterior. Para o sistema IEEE-14 barras a barra que apresentou maior variação na tensão foi a crítica 14 (V_{14}), essa mudança ocorreu no ponto *a*, conforme a Figura 5(a) a seguir. Com passo de 0.05 para a tensão e com preditor trivial obtem-se os demais pontos da curva $(\theta_{14}-V_{14})$, o ponto *d'* representa o PMC na curva P-V da barra 3 (1.7680, 0.7507) e barra crítica 14 (1.7680, 0.6070) e corresponde ao ponto *d* (-0.8068, 0.6070) na curva $(\theta_{14}-V_{14})$, os quais foram obtidos armazenando os valores das tensões e do fator de carregamento (λ) durante o traçado das curvas TS $(\theta_{14}-V_{14})$. Novamente, pode-se observar o aspecto linear dessas curvas em torno do PMC em relação as curvas P-V da barra 3 e 14. A Figura 5(b) apresenta o número de iterações para o traçado completo da curva P-V utilizando a metodologia proposta em Bonini et al (2018) comparando com a metodologia a qual utiliza a magnitude da tensão da barra crítica 14 como parâmetro. O número global de iterações para a metodologia proposta neste trabalho foi de 69 iterações, já o método parametrizado pela tensão da barra crítica utilizou 74 iterações, cerca de 7% a mais.

A Figura 6 apresenta os resultados para um sistema maior, o IEEE-300 barras. Resultados similares ao sistema IEEE-14 barras foram obtidos. A barra escolhida a priori para início do teste foi a 43 (V_{43}). Ao divergir, a tensão que apresentou maior variação foi da barra crítica 526, mudando para o plano $\theta_{526}-V_{526}$ conforme Figura 6(a). O PMC obtido por intermédio dessa nova curva para a barra crítica foi 1.0551 para λ e 0.7248 para tensão. Já para a curva $\theta_{526}-V_{526}$ foi de -0.9320 para θ_{526} e 0.7248 para V_{526} . O número de iterações utilizadas pela metodologia proposta em Bonini et al (2018) e parametrizado por V_{526} pode ser visto na Figura 6(b), cerca de 5% a mais em relação a metodologia proposta em Bonini et al (2018).

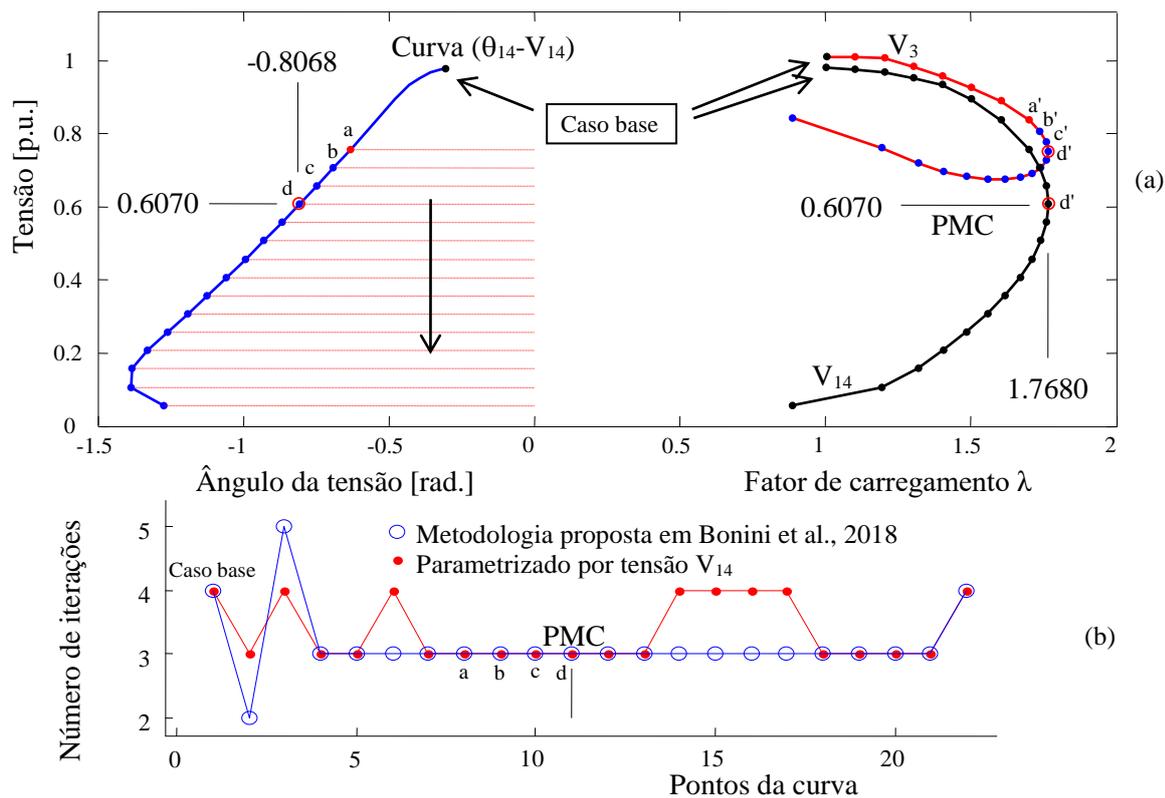


Figura 5: Resultado para o sistema IEEE-14 barras, (a) Curva magnitude versus o ângulo da tensão nodal ($\theta_{14}-V_{14}$), curva da barra 3 e da barra crítica 14, (b) número de iterações.

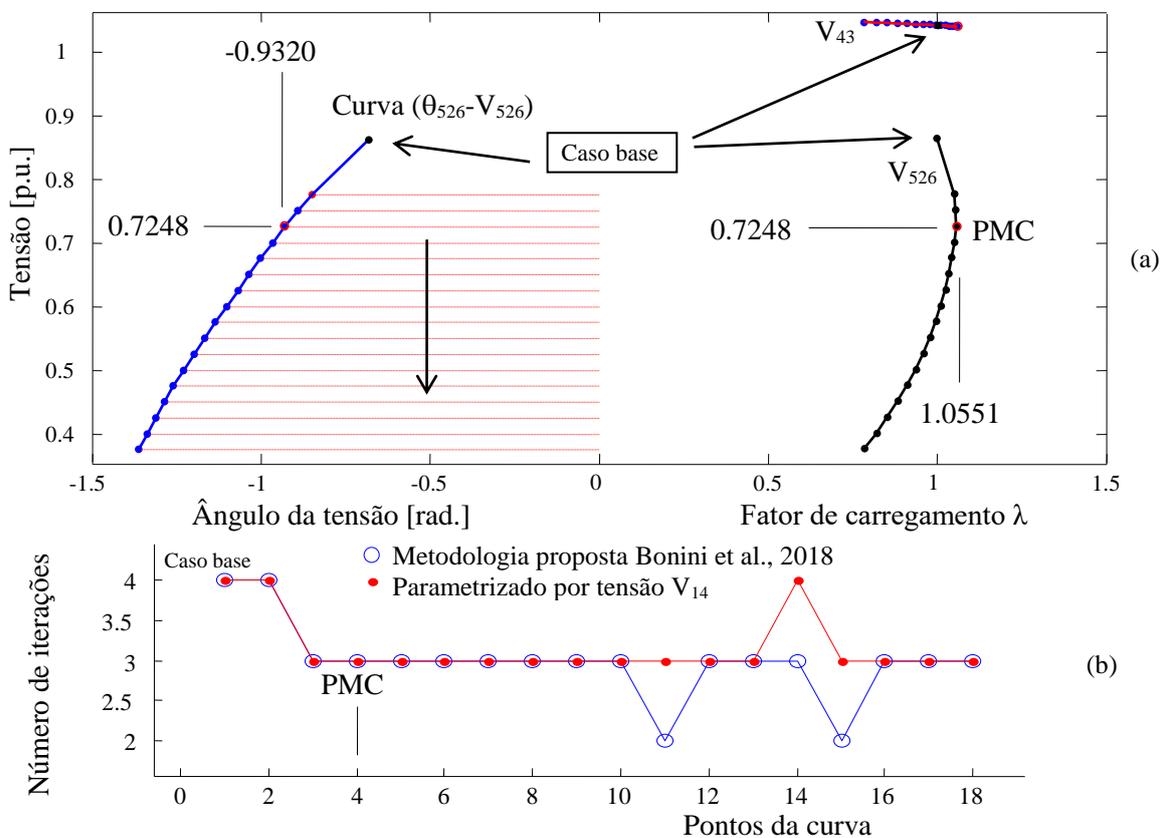
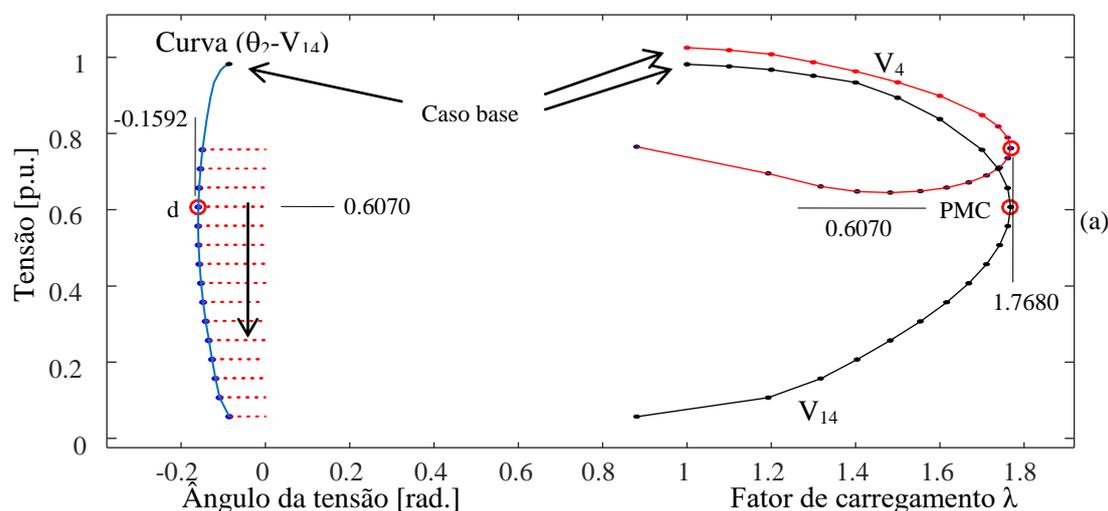


Figura 6: Resultado para o sistema IEEE-300 barras, (a) Curva magnitude versus o ângulo da tensão nodal c, curva da barra 43 e da barra crítica 526, (b) número de iterações.

A Figura 7 e 8 apresentam resultados para a metodologia proposta neste trabalho aplicados aos sistemas testes IEEE-14 e 300 barras, respectivamente. Novamente, como apresentado na metodologia iniciada em Bonini et al, 2018b, a priori não se conhece a curva a ser traçada, logo, foram escolhidas aleatoriamente uma barra dos sistemas 14 e 300 barras, neste caso a barra 4 (V_4) e 117 (V_{117}), para obtenção da margem de carregamento. Para $\lambda=1$, por meio do fluxo de carga (FC), calcula-se o caso base e os demais pontos com passo de 0.1 até o FC divergir ou não convergir (10 iterações), neste caso, troca-se o plano para o ângulo da barra 2 e a magnitude da tensão da barra que apresentar maior variação entre a tensão do ponto atual e anterior. Para os sistemas IEEE-14 e 300 barras, as barras que apresentaram maior variação na tensão foram as críticas 14 (V_{14}) e 526 (V_{526}). Com passo de 0.05 para a tensão e com preditor trivial obtêm-se os demais pontos das curvas (θ_2-V_{14}) e (θ_2-V_{526}). Os PMC nas curvas P-V das barras críticas 14 e 526 foram (1.7680, 0.6070) para o IEEE-14 barras e (1.0551, 0.7248) para o IEEE-300 barras e correspondem aos pontos “d” (-0.1592, 0.6070) na curva (θ_2-V_{14}) da Figura 7(a) e “e” (0.1127, 0.7248) na curva (θ_2-V_{526}) da Figura 8(a), os quais foram obtidos armazenando os valores das tensões e do fator de carregamento (λ) durante o traçado das curvas TS (θ_2-V_{14}) e (θ_2-V_{526}), respectivamente. Novamente, pode-se observar o aspecto linear dessas curvas em torno do PMC em relação as curvas P-V da barra 4 e 14 na Figura 7(a) e em relação as curvas P-V da barra 117 e 526 na Figura 8(a). A Figura 7(b) e 8(b) apresentam os números de iterações para o traçado completo das curvas P-V utilizando a metodologia proposta comparando com a metodologia a qual utilizam a magnitude da tensão das barras críticas 14 e 526 como parâmetro. O número global de iterações para a metodologia proposta neste trabalho foram de 65 e 40 iterações, já o método parametrizado pela tensão da barra crítica utilizaram 74 e 43 iterações, cerca de 13% e 7% a mais para os sistemas IEEE-14 e 300 barras, respectivamente.



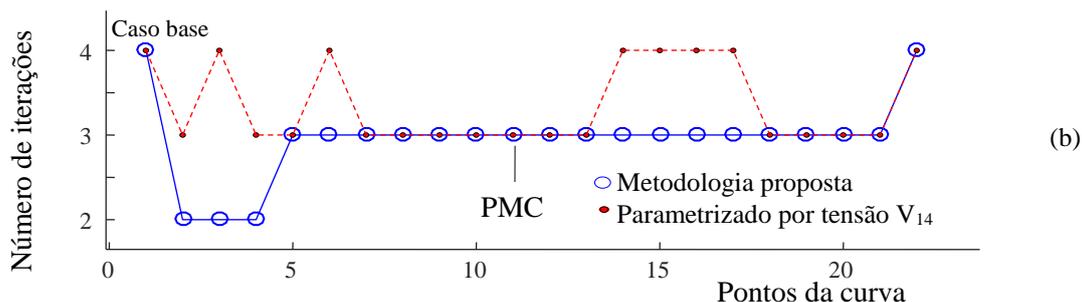


Figura 7: Resultado para o sistema IEEE-14 barras, (a) Curva magnitude versus o ângulo da tensão nodal (θ_2-V_{14}), curva da barra 4 e da barra crítica 14, (b) número de iterações.

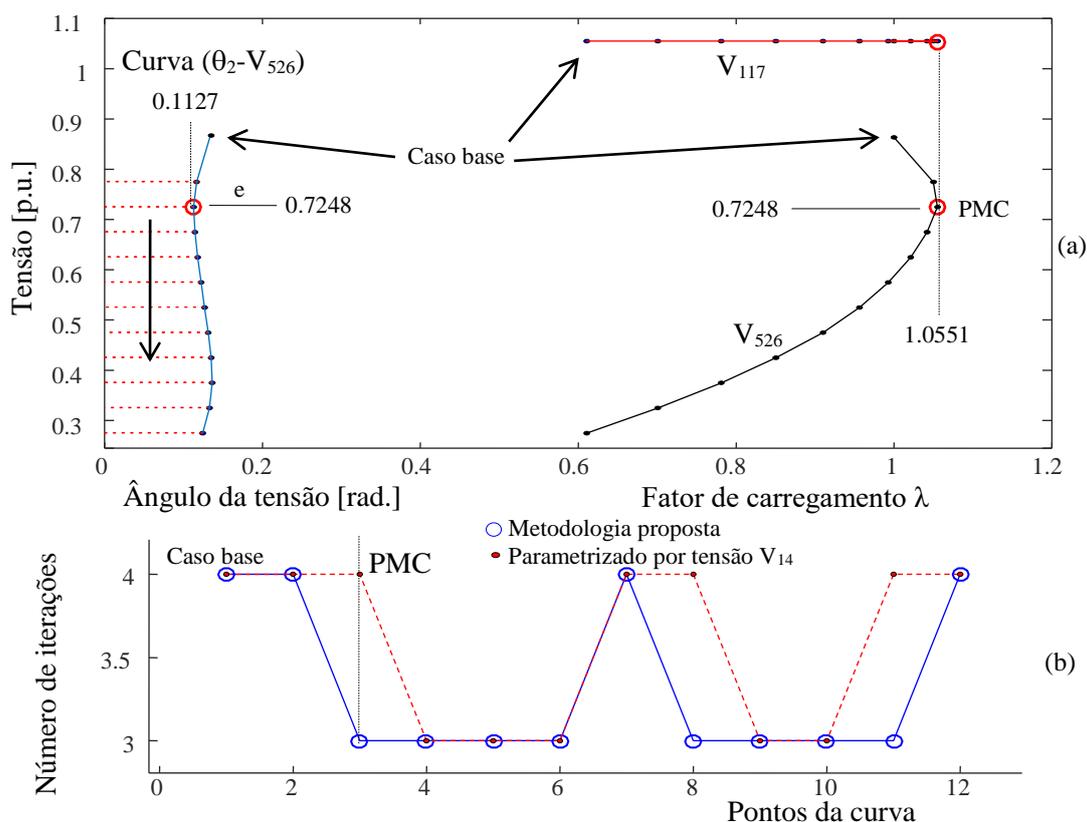


Figura 8: Resultado para o sistema IEEE-300 barras, (a) Curva magnitude versus o ângulo da tensão nodal (θ_2-V_{526}), curva da barra 117 e da barra crítica 526, (b) número de iterações.

4 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado uma nova metodologia para traçado das curvas P-V sem problemas numéricos relacionados à singularidade da matriz Jacobiana. A mesma pôde ser removida com uma simples mudança do plano, ($\lambda-V_k$) para (θ_2-V_k). A tensão V_k escolhida para representar o plano (θ_2-V_k) foi a que apresentou a maior variação entre os dois últimos pontos convergidos durante o traçado do plano ($\lambda-V_k$) e para ambos os sistemas estudados, a tensão da barra crítica V_{14} e V_{526} foi a escolhida, passando a utilizar o plano (θ_2-V_{14}) no sistema IEEE-14 barras e (θ_2-V_{526}) no sistema IEEE-300 barras. Foi comparado o número de iterações utilizando a metodologia proposta e a metodologia parametrizada pela tensão da



barra crítica. Em média, a metodologia proposta apresentou uma redução em torno de 10% a menos no número total de iterações.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a UNESP – FCE – Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã, ao CNPq e a FAPESP.

6 Referências

ABBOTT, M. Electricity reform and gains from the reallocation of resources. **The Electricity Journal**, v. 20, p. 72-78, 2007.

ACHARJEE P. Identification of maximum loadability limit and weak buses using security constraint genetic algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 36, n. 1, p. 40–50, 2012.

AJJARAPU, V. **Computational techniques for voltage stability assessment and control (power electronics and power systems)**. New York: Springer-Verlag, 2006.

AJJARAPU, V.; CHRISTY, C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 7, n. 1, p. 416-423, 1992.

BONINI NETO, A. et al. Estudo de singularidades da matriz Jacobiana no fluxo de carga continuado através de uma técnica de parametrização geométrica. **C.Q.D.- Revista Eletrônica Paulista de Matemática**, v. 10, p. 251-262, 2017. Edição Ermac.

BONINI NETO, A. et al. Obtenção da margem segura de carregamento em sistemas elétricos de potência utilizando uma técnica geométrica no plano ângulo versus magnitude das tensões. In: ENCONTRO REGIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 5., 2018, Bauru. **Caderno de trabalhos completos e resumos...** Bauru: Unesp, Faculdade de Ciências, 2018. p. 199-205. Disponível em: <<https://www.fc.unesp.br/#!/departamentos/matematica/eventos2341/ermac-2018/>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

BONINI NETO, A.; ALVES, D. A. Improved geometric parameterisation techniques for continuation power flow. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 4, n. 12, p. 1349-1359, 2010.

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, n. 17, p. 1905-1917, 2017.

BONINI NETO, A.; MAGALHÃES, E. M.; ALVES, D. A. Obtaining the maximum loading point of electric power systems using the decoupled methods of newton. **Revista IEEE América Latina**, v. 14, n. 1, p. 371-379, 2016.



DOBSON, I. The irrelevance of load dynamics for the loading margin to voltage collapse and its sensitivities. In: **Bulk power system voltage phenomena III**, voltage stability, security and control: an international seminar, Davos, ECC, 1994.

DONG, X. et al. Calculation of optimal load margin based on improved continuation power flow model. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 94, p. 225–233, 2018.

GAN, R. et al. Static voltage stability analysis based on improved continuous power flow. In: TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference, 2015. Macao. **Proceedings...** Macao, China: IEEE, 2015.

JU, Y. et al. Continuation power flow based on a novel local geometric parameterisation approach. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 8, n. 5, p. 811–818, 2014.

LEE, S.-H.; LIU, J.-H.; CHU, C.-C. Modelling and locating unified power-flow controllers for static voltage stability enhancements. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 24, n. 11, p. 1524-1540, 2014.

MOKHLIS, H. et al. Improved step size Newton Raphson method using quadratic equations properties in ill-conditioned power system. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 24, n. 9, p. 1323–1342, 2014.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

PANTOS, M.; VERBIC, G.; GUBINA, F. An improved method for assessing voltage stability based on network decomposition. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 28, n. 5, p. 324–330, 2006.

SEYDEL, R. **Practical bifurcation and stability analysis: from equilibrium to chaos**. 2nd ed., New York: Springer-Verlag, 1994.

VERBIC, G.; GUBINA, F. A novel scheme of local protection against voltage collapse based on the apparent-power losses. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 26, n. 5, p. 341-347, 2004.

ZIMA, M. et al. Design aspects for wide-area monitoring and control systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 93, n. 5, p. 980-996. 2005.