

Obtenção da Margem de Carregamento de Pós-contingência Através de uma Técnica de Parametrização Geométrica

A. Bonini Neto*, J. C. Piazzentin**, R. S. Moura***, D. A. Alves****

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

***Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu (e-mail:professorpiazzentin@gmail.com).*

****Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), Campus Formiga (e-mail: renan.moura@ifmg.edu.br).*

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

Abstract: Nowadays, with increasing demand for electricity, electric power systems are operating closer to their limits. In this context, this work aims to develop a methodology for complete tracing of P-V curves under normal operating conditions and also subject to a contingency. A Q-V curve analysis for reactive support under severe conditions is also performed. The proposed technique linearizes the trajectory of solutions around the maximum loading point, thus eliminating the problem related to the singularity of Jacobian matrix. From the results, for all contingencies tested, the method proved to be efficient in the complete plotting of the P-V curve under normal operating conditions and subjected to any contingency.

Resumo: Hoje em dia, com o aumento da demanda de energia elétrica, os sistemas elétricos de potência vêm operando cada vez mais próximos dos seus limites. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo desenvolver uma metodologia para traçado completo das curvas P-V em condições normais de operação e também submetidos a uma contingência. Também é feito uma análise da curva Q-V para suporte de reativos em condições severas. A técnica proposta lineariza a trajetória de soluções em torno do ponto de máximo carregamento eliminando assim, o problema relacionado a singularidade da matriz Jacobiana. Dos resultados, para todas as contingências testadas, o método se mostrou eficiente no traçado completo da curva P-V em condições normais de operação e submetidos a qualquer contingência.

Keywords: Load flow; Mathematical modeling; Contingency; P-V curve; Singularity.

Palavras-chaves: Fluxo de carga; Modelagem matemática; Contingência; Curva P-V; Singularidade.

1. INTRODUÇÃO

A eletricidade é um benefício importante para a sociedade, gerando indicadores de desenvolvimento socioeconômico. Portanto, hoje em dia, a qualidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica são essenciais para nosso modo de vida (Bompard et al., 2013). Nesse contexto, a análise de segurança em sistemas elétricos de potência é importante para identificar as contingências que possam prejudicar a operação normal do sistema (Kalyani e Swarup, 2013).

Um sistema elétrico de potência está exposto à ocorrência de um grande número de contingências. Porém, apenas algumas delas são severas o suficiente para causar o colapso de tensão ao sistema, ou seja, aquelas que podem comprometer o fornecimento de energia elétrica. Assim, antes da análise de estabilidade de tensão, realiza-se a seleção e a ordenação das contingências de acordo com o impacto que estas causam ao sistema, reduzindo assim o tempo computacional das análises (Matarucco et al. 2014).

Para a avaliação da estabilidade de tensão são empregados os métodos de análise estática onde são traçadas curvas P-V e Q-V para cada contingência. O fluxo de carga e o fluxo de carga continuado são os métodos mais utilizados para o traçado das curvas e para isso, devem ser eficientes e confiáveis a fim de atender os requisitos necessários para as aplicações na etapa de planejamento e operação em tempo-real (Matarucco et al. 2014).

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos envolvendo análise de contingência em sistemas elétricos de potência (Wu et al. 2017). Apesar dos atuais avanços tecnológicos, uma análise de todas as contingências possíveis é impraticável. Em (Santos et al. 2015), é apresentado um novo método para executar com eficiência a seleção de múltiplas contingências. O problema é modelado como um problema de otimização combinatória e resolvido por algoritmos genéticos. Os resultados mostraram precisão próxima de 100%, quando comparados com um método exato.

O Western System Coordinating Council (WSCC, 1998) exige que suas empresas avaliem as margens de estabilidade de tensão pelas análises P-V e V-Q, exigindo pelo menos, uma margem de 5% de potência ativa em qualquer situação de contingência simples.

No Brasil, os procedimentos operacionais das redes do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2002) considera o traçado da curva P-V como a metodologia mais apropriada e o traçado da curva V-Q uma metodologia complementar para avaliar as margens de reativo e os locais para reforço do sistema. Os critérios para avaliar a estabilidade de tensão definida pelo WSCC (WSCC, 1998) são especificados em termos de margens mínimas de potência ativa e reativa, e variam de acordo com quatro categorias de desempenho (A, B, C e D). Para o nível A (contingência simples N-1), $MC \geq 5\%$, para o nível B e C (contingências duplas N-2), $MC \geq 2,5\%$, e para saída de três ou mais elementos, nível D, $MC \geq 2,5\%$. Já pelos critérios da ONS, para contingência simples N-1 recomenda-se $MC \geq 6\%$, não sendo abordado o critério para contingências múltiplas. Para os sistemas em condições normais de operação será utilizado o símbolo N-0.

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia de parametrização para o fluxo de carga continuado que possibilita o traçado completo das curvas P-V de um sistema submetido a uma contingência, e também a análise de suporte de reativos via curva Q-V.

2. PROPOSTA PARA OBTENÇÃO DA CURVA P-V DE PÓS-CONTINGÊNCIA

A técnica utilizada consiste em trabalhar com uma equação da reta e dois planos bidimensionais, o plano (P-V) ou (λ -V), em que λ representa o fator de carregamento do sistema e (θ -V), ângulo das tensões nodais versus magnitude das tensões nodais.

As equações utilizadas passam a ser:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(\theta, \mathbf{V}, \lambda) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{W}_1(\theta, \mathbf{V}, \lambda, \alpha) &= \alpha(\lambda - \lambda^0) - (V_k - V_k^0) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

e

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(\theta, \mathbf{V}, \lambda) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{W}_2(\theta, \mathbf{V}, \lambda, \alpha) &= \alpha(\theta_k - \theta_k^0) - (V_k - V_k^0) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

em que \mathbf{G} representa as equações básicas do fluxo de carga, \mathbf{W}_1 e \mathbf{W}_2 as equações da reta e α o coeficiente angular da reta. Os valores iniciais de λ^0 , V^0 e θ^0 são escolhidos no plano e representam o centro dos feixes de retas (ponto "O"). A expansão do sistema de equações (1) e (2) em série de Taylor resulta em:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & G_\lambda \\ [..,0,..,0,..,0,..] & [..,0,..,-1_k,..,0,..] & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_{m1} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta W_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & G_\lambda \\ [..,0,..,\alpha_m,..,0,..] & [..,0,..,-1_m,..,0,..] & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_{m2} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta W_2 \end{bmatrix}$$

sendo \mathbf{J}_{m1} e \mathbf{J}_{m2} as matrizes Jacobianas modificadas do Fluxo de Carga Continuado (FCC) devido a inserção das equações \mathbf{W}_1 e \mathbf{W}_2 ao sistema, \mathbf{G}_θ , \mathbf{G}_V e G_λ correspondem à derivada de \mathbf{G} em relação a θ , V e λ , respectivamente. Os termos $[..,0,..,0,..,0,..]$, $[..,0,..,-1_k,..,0,..]$, α , $[..,0,..,\alpha_m,..,0,..]$, $[..,0,..,-1_m,..,0,..]$ e 0 correspondem às derivadas de \mathbf{W}_1 e \mathbf{W}_2 em relação a θ , V e λ , para suas respectivas equações (3) e (4). Os vetores ΔP , ΔQ , ΔW_1 e ΔW_2 representam os fatores de correção (*mismatches*) das respectivas funções nas equações (3) e (4). Para o *flat start*, o valor inicial de α é igual a 1 em (3), $\alpha^1 = 1.0$.

A Fig. 1(a) apresenta a técnica em sua forma geométrica, com todas as variáveis e planos envolvidos. O sistema utilizado é o IEEE-14 em condições normais de operação (N-0).

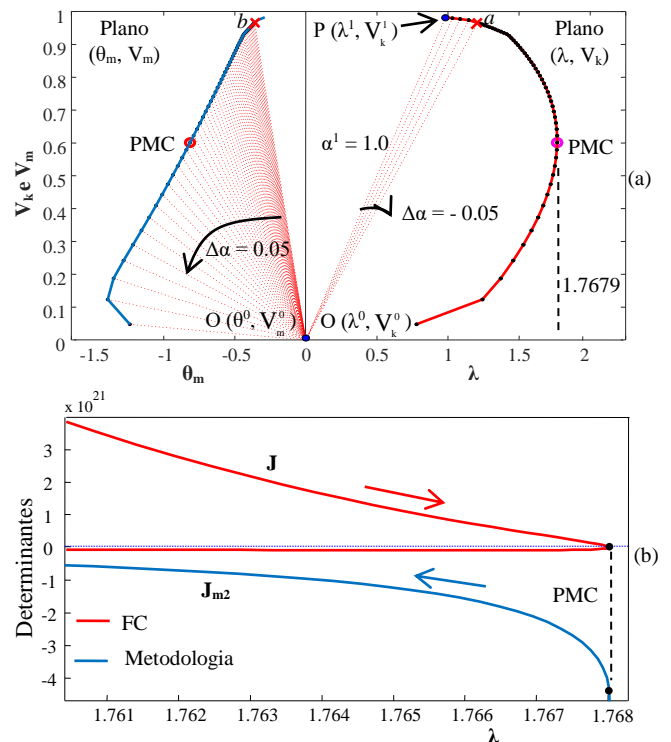


Fig. 1 Metodologia: a) curva (θ_{14} , V_{14}) e curva P-V da barra crítica 14, b) determinante da matriz \mathbf{J} e \mathbf{J}_{m2} em torno do PMC.

Já Fig. 1(b) é apresentado o determinante da matriz Jacobiana do Fluxo de Carga convencional (FC) \mathbf{J} , e que apresenta singularidade no ponto de máximo carregamento (PMC) [$\det(\mathbf{J}) = 0$], e da matriz Jacobiana modificada \mathbf{J}_{m2} , a qual não apresenta singularidade no PMC [$\det(\mathbf{J}_{m2}) \neq 0$]. Na Fig. 1(a), k e m corresponde à barra 14 (barra crítica), o valor do PMC foi de $(\lambda, V_{14}) = (1.7679, 0.6010)$, ou seja, uma margem de carregamento de pré-contingência (MC_{pre}) de 0.7679 p.u.

2.1 Algoritmo de obtenção da curva P-V de pós-contingência

i) Escolha uma barra k qualquer do sistema e no plano (λ, V_k) inicie o *flat start* com $\alpha^1=1.0$ e centro de feixe de retas no ponto O (λ^0, V_k^0) .

ii) Após o primeiro ponto obtido P (λ^1, V_k^1) , mais quatro pontos são calculados com $\alpha = \alpha^1 + \Delta\alpha$, em que $\Delta\alpha = -0.05$. Neste processo, todas as barras do sistema são monitoradas para descobrir qual barra apresenta a menor magnitude de tensão.

iii) Após cinco pontos calculados, muda-se do plano (λ, V_k) para o plano (θ_m, V_m) . Outras alternativas podem interromper o processo iterativo e mudar o plano antes dos cinco primeiros pontos calculados, por exemplo, com 10 iterações (*mismatches*) ou o fator de carregamento diminuir de valor (ao passar pelo PMC).

iv) A barra m que apresentar menor magnitude de tensão será adotada para o plano (θ_m, V_m) . Em seguida obtém-se para a barra m , o ponto b , correspondente ao ponto a no plano (λ, V_k) , e com centro de feixe de retas no ponto O (θ^0, V_m^0) e passo $\Delta\alpha = 0.05$, calcula-se os demais pontos da curva P-V no plano (λ, V_k) , ou seja, traça-se no plano θ_m versus V_m e com os valores armazenados de λ e V_k , plota-se na curva P-V.

É importante notar o diferencial que a técnica apresenta, o PMC no plano (θ_m, V_m) se encontra em uma região praticamente linear, eliminando assim qualquer problema de singularidade de \mathbf{J}_{m2} na obtenção da curva P-V. O mesmo acontece para obtenção das curvas P-V de pós-contingência.

2.2 Algoritmo para suporte de reativos

i) Caso $MC < 0.05$ (5% segundo a WSCC) obtém-se a curva Q-V para o fator de carregamento crítico e analisa-se a quantidade de reativos que a barra precisa para uma magnitude de tensão de 1 p.u. (que é a distância entre a curva Q-V, operando no PMC, e a abscissa).

ii) Feito a análise das duas curvas e determinado o montante de compensação reativa a ser injetado no sistema, obtém-se a curva P-V novamente e verifica-se se a MC é maior ou igual a 5%.

3. RESULTADOS

Para todos os testes realizados, a tolerância adotada para o *mismatch* total de potência foi de 10^{-5} p.u. O controle dos limites de potência reativa (Q) nas barras PV é o mesmo utilizado no método convencional de FC. Os sistemas

estudados foram o IEEE-14 e o IEEE-57. A Fig. 2 apresenta o diagrama unifilar do sistema IEEE-14 com duas contingências que serão estudadas neste trabalho. Uma contingência simples (N-1), saída da linha de transmissão (LT) entre as barras 2 e 3, e uma dupla (N-2), saída das duas LT's entre as barras 1 e 2 (severa), que resulta numa margem de carregamento de pós-contingência (MC_{pos}) negativa. A Fig. 3 apresenta resultados para o IEEE-14 com a contingência N-1, saída da LT entre os barramentos 2 e 3, Fig. 2. A barra 2 (V_2) foi escolhida aleatoriamente para iniciar o traçado da curva P-V.

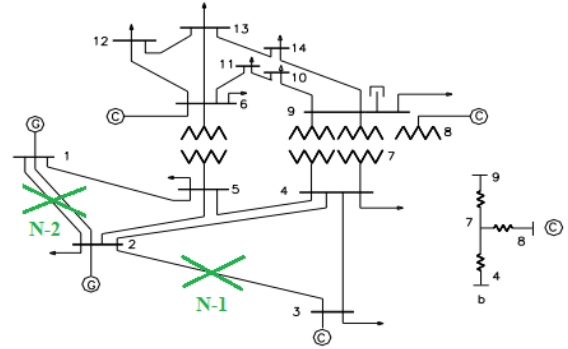


Fig. 2 Diagrama do sistema do IEEE-14 com as contingências N-1 e N-2.

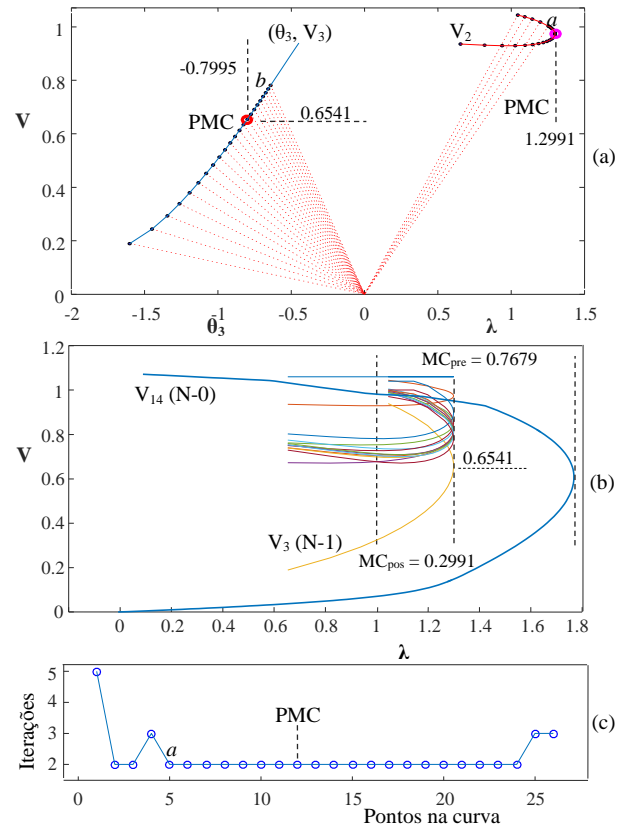


Fig. 3 Desempenho do IEEE-14 para contingência N-1: (a) curva (θ_3, V_3) e curva P-V da barra 2, (b) curva P-V de todas as barras do sistema, (c) número de iterações.

A Fig. 3(a) mostra o traçado completo da curva P-V do barramento de geração 2 (barra PV) do sistema com a contingência N-1, obtida com o algoritmo apresentado no item 2.1, onde se pode ver que o PMC foi de 1.2991

acarretando em uma MC_{pos} de 0.2991. A barra que apresentou menor tensão durante o cálculo dos primeiros cinco pontos foi a barra 3, com isso, o plano escolhido para o segundo feixe de retas foi (θ_3, V_3) . Na Fig. 3(b) são exibidas a curva crítica V_{14} (N-0) de pré-contingência e as curvas P-V de todas as barras do sistema contingenciado (N-1). Após a contingência, a barra 3 (V_3) passou a ser a crítica. Como a MC_{pos} é 0.2991 (29%) não é necessário a injeção de reativos por meio de banco de capacitores no sistema. O número de iterações gastos pela metodologia para o traçado completo da curva P-V do sistema com contingência N-1 é apresentado na Fig. 3(c).

A Fig. 4(a) apresenta os resultados para uma contingência severa (contingência dupla, N-2), saída da LT entre as barras 1 e 2. A barra 5 foi escolhida aleatoriamente para iniciar o método, e como a MC é negativa, ou seja, o PMC_{pos} é igual a 0.9809, apenas três pontos foram obtidos utilizando o primeiro feixe de retas. A barra que apresentou menor tensão foi a 14, com isso o plano utilizado para obtenção do restante da curva P-V foi (θ_{14}, V_{14}) . A Fig. 4(b) apresenta as curvas P-V de todas as barras do IEEE-14 com a contingência N-2 e a curva crítica V_{14} (N-0) de pré-contingência. Observe que ocorreu uma redução de 0.787 na MC, ou seja, nesta condição, será necessário estabelecer uma estratégia de corte de carga para manter a estabilidade de tensão, isto é, para mover o sistema para um ponto de operação de tensão segura, ou injetar reativos no sistema. Isso ocorre porque a margem de carregamento de pós-contingência ($PMC_{pos} = 0.9809$ p.u.) é menor que a do caso base (1.0 p.u.).

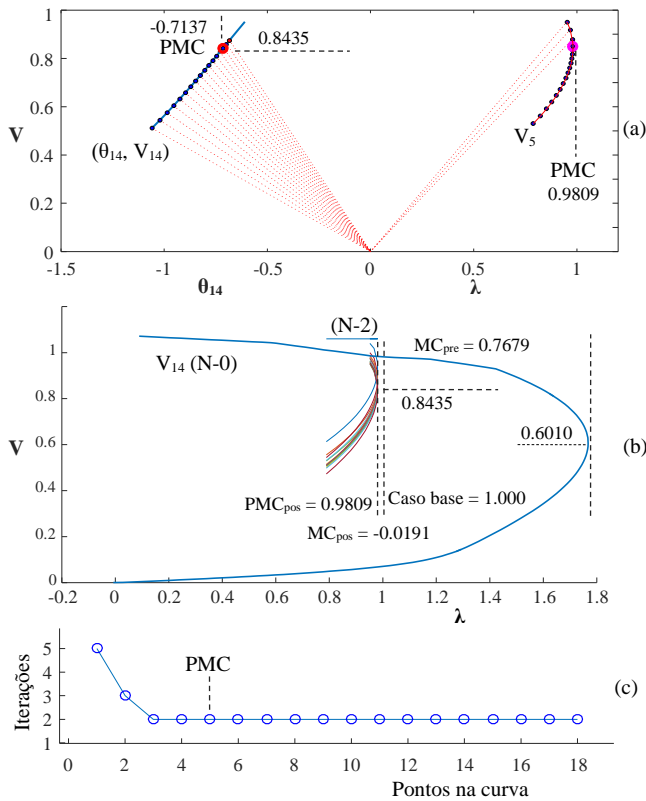


Fig. 4 Desempenho do IEEE-14 para contingência N-2: (a) curva (θ_{14}, V_{14}) e curva P-V da barra 5, (b) curva P-V de todas as barras, (c) número de iterações.

A Fig. 5 apresenta a curva Q-V obtida utilizando o algoritmo do item 2.2. Observa-se que quando se atinge o PMC a curva Q-V estará tangenciando a abscissa, ou seja não possui mais folga de reativo. Neste ponto a tensão para este sistema está fora das condições normais (0.9 até 1.1 p.u.) de operação ($V=0.8435$ p.u.). Assim, para se elevar a magnitude de tensão para as condições normais (1 p.u.), com o mesmo fator de carregamento $\lambda = 1$, é feita uma análise entre as duas curvas visando obter o montante de compensação de reativos que deve ser providenciada (a distância entre a curva Q-V, operando no PMC, e a abscissa). Com a inserção de um banco de capacitores de 35.281 Mvar na barra 14, o sistema possuirá a potência reativa suficiente para suportar a contingência e ainda apresentar uma MC positiva de 0.0585 p.u., como pode ser visto na Fig. 6(a) e, portanto, atender aos critérios da WSCC (5%). A Fig. 6(b) apresenta a região das curvas P-V ampliada, de onde se pode observar que houve um aumento do fator de carregamento de 0.0776 (8%) em relação à curva P-V sem injeção de reativos. Pode-se notar que ao obter a curva P-V com a inserção do banco de capacitores na barra 14, o menor valor da tensão se deu na barra 5 e não mais na barra 14, ambas com aspectos lineares em torno do PMC.

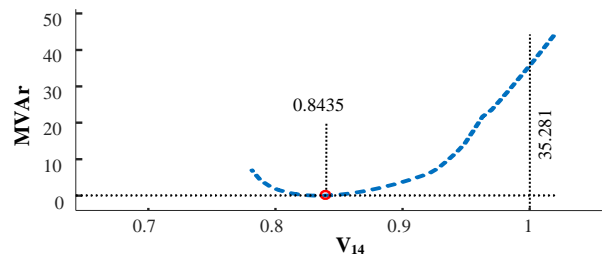


Fig. 5 Curva Q-V da barra crítica 14 operando no PMC.

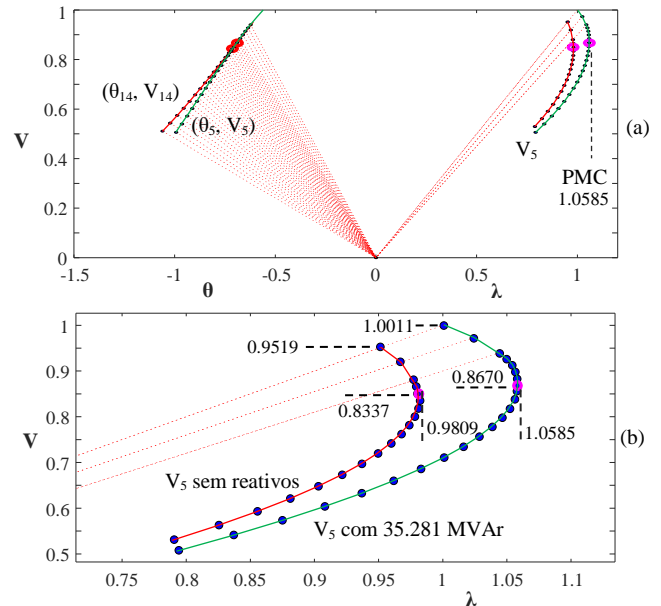


Fig. 6 Desempenho do IEEE-14 para contingência N-2: (a) curva (θ_{14}, V_{14}) e (θ_5, V_5) , curva P-V da barra 5, sem injeção de reativos e com a injeção de 35.281 Mvar, (b) região da curva P-V ampliada.

As Figs. 7(a) e 7(b) apresentam os respectivos perfis de tensão do IEEE-14 para o caso base e para o PMC, com e sem a inserção de um banco de capacitores de 35.281 Mvar na barra 14. Note que após a injeção de reativos, a magnitude de tensão da barra 14 ficou próxima de 1 p.u.

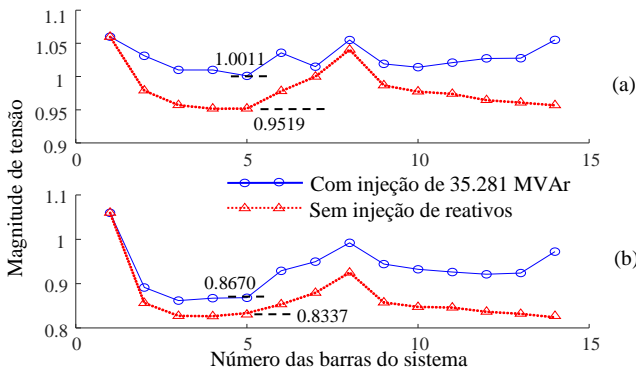


Fig. 7 Perfis de tensão do IEEE-14 com e sem injeção de reativos: (a) no caso base ($\lambda = 1$) e (b) no PMC.

A Fig. 8 apresenta o diagrama unifilar do sistema IEEE de 57 barras com uma contingência simples, N-1, (saída da LT entre as barras 46 e 47) e outra N-1 mais severa, saída da LT entre as barras 25 e 30.

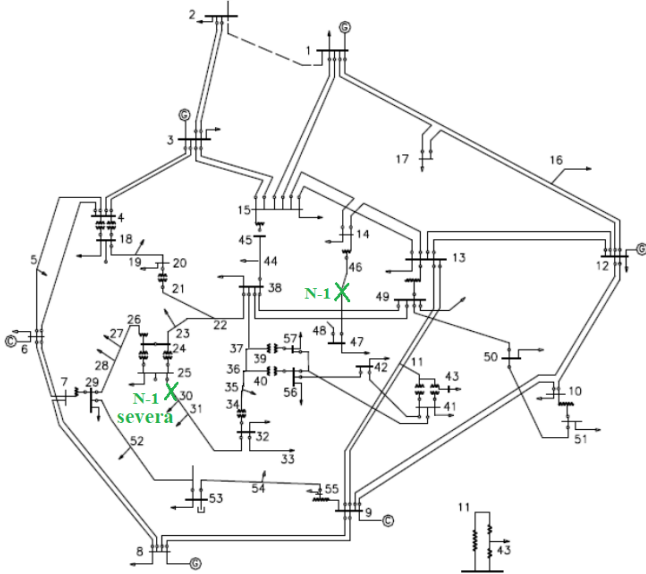


Fig. 8 Diagrama unifilar do sistema do IEEE de 57 barras com as contingências N-1 e N-1 mais severa.

A Fig. 9 apresenta resultados do sistema com a contingência N-1. A margem de carregamento de pre-contingência (MC_{pre}) é de 0.7248, ou seja, $PMC_{pre} = 1.7248$. A barra aleatoriamente escolhida foi a barra 4 e com $\alpha^1=1.0$ e $\Delta\alpha = -0.05$ obteve os cinco primeiros pontos da curva P-V. A barra que apresentou menor magnitude de tensão foi a 31 (crítica em condições normais de operação N-0 e também para N-1). Conforme apresentado na Fig. 9(a), mudou-se para o plano (θ_{31}, V_{31}) e com passo $\Delta\alpha = 0.05$ obteve-se a curva P-V completa. Pode-se notar em torno do PMC, o aspecto linear da trajetória de soluções no plano (θ_{31}, V_{31}) . As coordenadas do PMC para a curva no plano (θ_{31}, V_{31}) são $(-0.9225, 0.4612)$ e que correspondem as coordenadas $(\lambda = 1.5842, V_4=0.9637)$ na curva P-V da

barra 4 e ($\lambda = 1.5842, V_{31}=0.4612$) na curva P-V da barra crítica 31, ver Fig. 9(a). A Fig. 9(b) apresenta a curva da barra 4 ampliada, nota-se uma trajetória “aguda” da mesma, mas por meio da mudança de plano, o seu traçado (barra 4), bem como o de todas as demais barras do sistema, foram obtidos por completo sem problemas de singularidade ou numéricos, ver Fig. 9(c). A Fig. 9(d) apresenta o número de iterações utilizadas nesse processo.

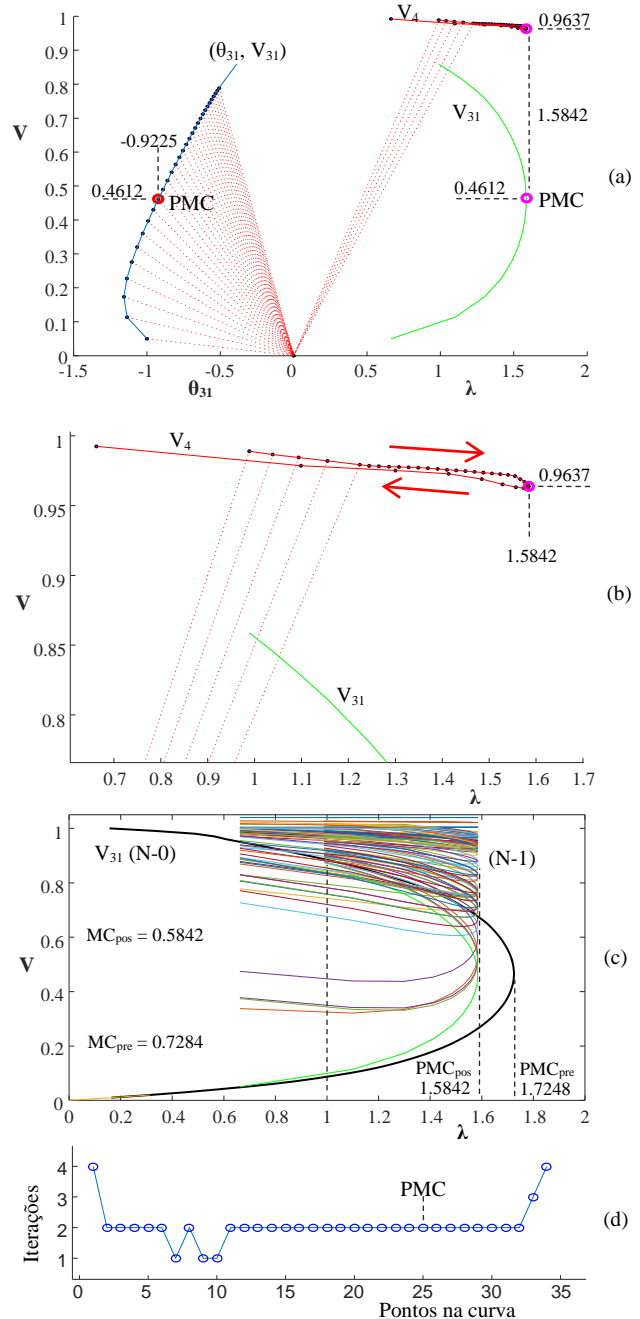


Fig. 9 Desempenho do IEEE-57 para a contingência N-1 (mais severa): (a) curva (θ_{31}, V_{31}) e curva P-V da barra 4 e 31, (b) curva P-V da barra 4 ampliada. (c) curva P-V de todas as barras do sistema, (d) número de iterações.

A Fig. 10 apresenta uma condição de contingência mais severa N-1 (saída da LT entre as barras 25 e 30). A priori, não se conhece a barra a ser escolhida para iniciar o traçado, neste caso, a barra aleatoriamente escolhida para

obtenção das curvas P-V foi a barra 36. Após cinco pontos calculados, a barra que apresentou a menor magnitude de tensão foi a 30. Mudando para o plano (θ_{30}, V_{30}) e com passo $\Delta\alpha = 0.05$, obtém-se o traçado completo da curva θ_{30} - V_{30} e conseqüentemente de todas as demais curvas P-V de pós-contingência, ver Fig. 10(a). Como a MC_{pos} é negativa (-0.0237), ou seja, o fator de carregamento do PMC_{pos} (0.9763) é menor que o do caso base, uma análise da curva Q-V foi necessário. Por intermédio da curva Q-V determinou-se que uma injeção de 1.57 Mvar é suficiente para o sistema operar de forma segura, dentro do estabelecido pelo WSCC. A Fig 10(a) apresenta a curva P-V da barra 36 considerando-se a inserção do banco de capacitores de 1.57 Mvar na barra 30. Uma ampliação das curvas sem e com a injeção de reativos podem ser vistas na Fig. 10(b).

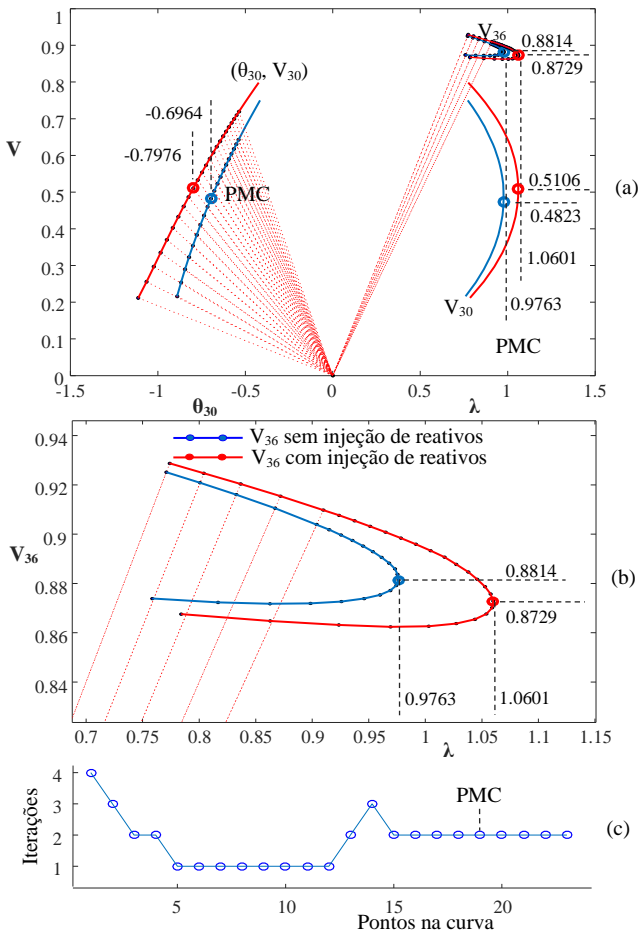


Fig. 10 Desempenho do IEEE-57 para a contingência N-1 (mais severa): (a) curva (θ_{30}, V_{30}) , curva P-V da barra 36 e 30, sem e com a injeção de 1.57 Mvar, (b) região da curva P-V da barra 36 ampliada, (c) número de iterações.

As coordenadas do PMC no plano (θ_{30}, V_{30}) considerando a injeção de reativos na barra 30 são $(-0.7976, 0.5106)$ e corresponde aos pontos $(1.0601, 0.8729)$ da curva P-V da barra 36, e $(1.0601, 0.5106)$ para a curva P-V da barra crítica 30, ver Fig. 9(a). Observa-se que MC_{pos} é igual a 0.0601 (6%) obedecendo aos critérios do WSCC (5%) e ONS (6%). A Fig. 10(b) apresenta uma ampliação das curvas P-V da barra 36 com e sem injeção de reativos. O número de iterações para obtenção da curva P-V do IEEE-

57 com inserção do banco de capacitores de 1.57 Mvar pode ser visto na Fig. 10(c).

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para obtenção das curvas P-V de sistemas elétricos de potência em condições normais de operação e em condições de contingências (N-1, N-1 mais severa e N-2). Com a mudança de plano (λ, V_k) para o plano (θ_m, V_m) foi possível verificar na curva, uma linearização em torno do PMC eliminando assim os problemas de singularidade no traçado das curvas P-V. Foi possível analisar o montante de reativos necessários para os sistemas elevar a margem de carregamento de forma a atender as condições estabelecidas pelo WSCC. Todas as curvas P-V foram obtidas com um número reduzido de iterações.

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 da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Bompard, E., Huang, T., Wu, Y., Cremenescu, M. Classification and trend analysis of threats origins to the security of power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, volume (50), p. 50-64, 2013
- Kalyani, S., Swarup, K. S. Pattern analysis and classification for security evaluation in power networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume (44), p. 547-560, 2013.
- Matarucco, R.R., Bonini Neto, A. and Alves, D.A. Assessment of branch outage contingencies using the continuation method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, volume (55), p. 74-81, 2014.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Procedimentos de Rede, Sub-módulo 23.3, *Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos*, 2002.
- Dos Santos, J.V.C., Costa, I.F., Nogueira, T., New genetic algorithms for contingencies selection in the static security analysis of electric power systems, *Expert Systems with Applications*, volume (42), n° 6, p. 2849-2856, 2015.
- 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., A survey of contingency analysis regarding steady state security of a power system, 2017 North American Power Symposium (NAPS), Morgantown, WV, 2017, pp. 1-6.