



Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

Melhorias no desempenho dos Sistemas Elétricos de Potência via pequenas mudanças no fluxo de carga continuado

ALFREDO BONINI NETO(1); JHONATAN CABRERA PIAZENTIN(2); DILSON AMANCIO ALVES(2);
FCE - UNESP(1);UNESP(2);

RESUMO

A alta intermitência nos atuais sistemas de energia renováveis e o custo proibitivo de atualizar a infraestrutura de rede junto com o crescimento da carga, tornaram a instabilidade de tensão uma ameaça iminente para muitos sistemas de energia. Isso exige maneiras mais rápidas e eficientes de identificar os limites de estabilidade de tensão. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi criar uma técnica para obtenção da margem de carregamento, sem problemas relacionados a matriz Jacobiana (J) e com baixo tempo de CPU. Nos resultados, a técnica mostrou-se eficiente, com uma redução em torno de 7% respectivamente, quando comparado com outras metodologias.

PALAVRAS-CHAVE

Curva P-V, Ponto de máximo carregamento, Estabilidade estática de tensão, Fluxo de carga, Parametrização geométrica

1.0 - INTRODUÇÃO

A demanda de energia elétrica está aumentando dia a dia e a geração por sua vez é limitada. Mercados de eletricidade desregulamentados e o aumento na concorrência entre as empresas de energia devido a privatização das indústrias estatais são um dos principais fatores (1), 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 (2). 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 (3), (4), (5), (6), (7) e (8) e avaliações dinâmicas (9), (10) e (11).

Segundo (12), 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 (13). O método de fluxo de carga continuado (FCC) é frequentemente usado para obter as curvas P-V (14), (15), (16) e (17). 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 (**J**). 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 é utilizado. Uma equação da reta é acrescentado ao sistema de equações básicas do fluxo de carga. 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, bem como um número reduzido de iterações e tempo de CPU.

2.0 - METODOLOGIA

As equações convencionais do fluxo de carga continuado (FCC) são:

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

sendo

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

onde λ representa o fator de carregamento do sistema, \mathbf{P}_k e \mathbf{Q}_k representam as equações de potência ativa e reativa injetadas em uma barra k , $\boldsymbol{\theta}$ e \mathbf{V} são os respectivos vetores de ângulo de fase e magnitude de tensão nodal; \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 $\mathbf{Q}_c^{\text{esp}}$ 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 (18).

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

A partir do caso base ($\lambda = 1$), o valor de λ é aumentado gradualmente (passo = 0.05) 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 ($\lambda = 1.05$), os valores das magnitudes das tensões de todas as barras são comparados em relação ao seu valor anterior. Quando o fluxo de carga divergir ou não convergir (10 iterações), a magnitude de tensão e o ângulo da barra que apresentar a maior variação em sua magnitude de tensão, entre os dois últimos pontos convergidos, serão utilizados para formar o plano ($V-\theta$) no qual a aplicação do método proposto possibilitará a obtenção dos pontos que serão usados para o traçado da curva P-V. Esta técnica de mudança de plano acarretou em uma trajetória de soluções (TS) com um aspecto bem linear para obtenção da curva P-V (Figura 1) e com isso, possibilitou a remoção da singularidade durante o traçado de toda curva P-V, diferente dos métodos utilizados na literatura, que utilizam a própria curva P-V (não linear) para obtenção da margem de carregamento.

Para a metodologia proposta neste trabalho, foi acrescentado uma equação da reta nas variáveis magnitude das tensões nodais (\mathbf{V}) e os ângulos das tensões nodais ($\boldsymbol{\theta}$), neste caso o sistema de equações (1) passa a ser:

$$\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) = \mathbf{0} \quad (3)$$

$$W(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda, \alpha) = \alpha(\boldsymbol{\theta}_k - \boldsymbol{\theta}_k^0) - (\mathbf{V}_k - \mathbf{V}_k^0) = 0$$

onde α representa o coeficiente angular da reta. Com a solução do caso base obtida com um fluxo de carga convencional (FC) onde $\lambda^1 = 1.0$, calcula-se sucessivas soluções do FC até o mesmo não encontrar solução (10 iterações). O valor de α é obtido a partir do ponto inicial escolhido $O(\lambda^0, \boldsymbol{\theta}_k^0, \mathbf{V}_k^0)$ e do respectivo valor obtido no último ponto convergido pelo fluxo de carga convencional $P(\lambda^1, \boldsymbol{\theta}_k^1, \mathbf{V}_k^1)$, Figura 2:

$$\alpha^1 = (\mathbf{V}_k^1 - \mathbf{V}_k^0) / (\boldsymbol{\theta}_k^1 - \boldsymbol{\theta}_k^0) \quad (4)$$

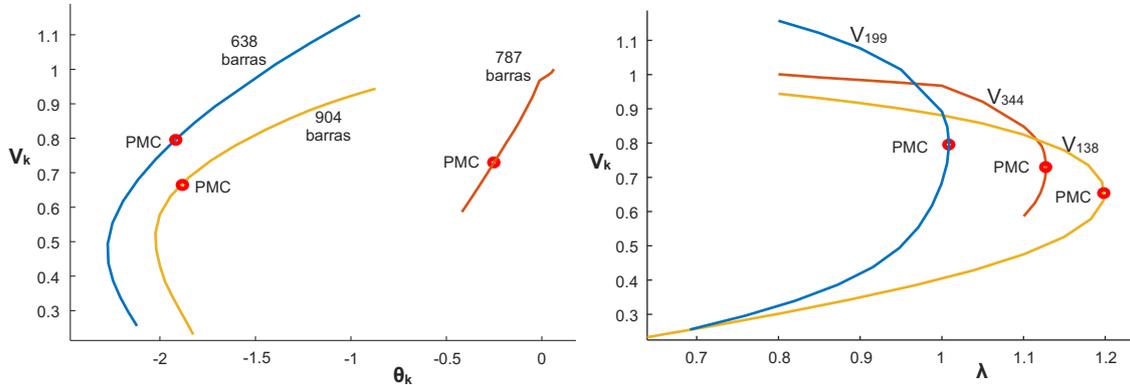


FIGURA 1 – (a) Curvas (V- θ) do método proposto para os três sistemas estudados, (b) Curvas P-V das barras críticas obtidas pelo método proposto dos três sistemas estudados.

Como $V_k^1 = V_k^0$, $\alpha^1 = 0.0$. A seguir, o fluxo de carga continuado proposto (FCCP) é utilizado para calcular as demais soluções através dos sucessivos incrementos ($\Delta\alpha$) no valor de α , Figura 2. Neste trabalho $\Delta\alpha = 0.001$. Para $\alpha = \alpha^1 + \Delta\alpha$, a solução do sistema de equações (3) fornecerá o novo ponto de operação ($\lambda^2, \boldsymbol{\theta}^2, \mathbf{V}^2$) correspondente a interseção da trajetória de soluções (curva θ -V) com a reta cujo novo valor de coeficiente angular ($\alpha^1 + \Delta\alpha$) foi especificado, Figura 2. O preditor trivial é utilizado (secante de ordem zero). O Método de Newton modificado é utilizado no passo corretor. Neste passo, a equação $\alpha - \alpha^e = 0$, onde α e α^e correspondem a variável escolhida como parâmetro da continuação e seu respectivo valor estimado, obtido pelo passo preditor. A expansão do sistema de equações (3) em série de Taylor, incluindo somente os termos de primeira ordem, considerando o valor prefixado no valor do parâmetro α calculado para o caso base, resulta em:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & \mathbf{G}_\lambda \\ [.,0,.,.,\alpha_k,.,.,0,.,.] & [.,0,.,.,-1_k,.,.,0,.,.] & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}_m \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta W \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde \mathbf{J}_m é a matriz Jacobiana modificada do FCC, e \mathbf{G}_θ , \mathbf{G}_V e \mathbf{G}_λ corresponde à derivada de \mathbf{G} em relação a θ , V e λ . ΔP , ΔQ e ΔW representam os fatores de correção (*mismatches*) das respectivas funções no sistema de equações (3).

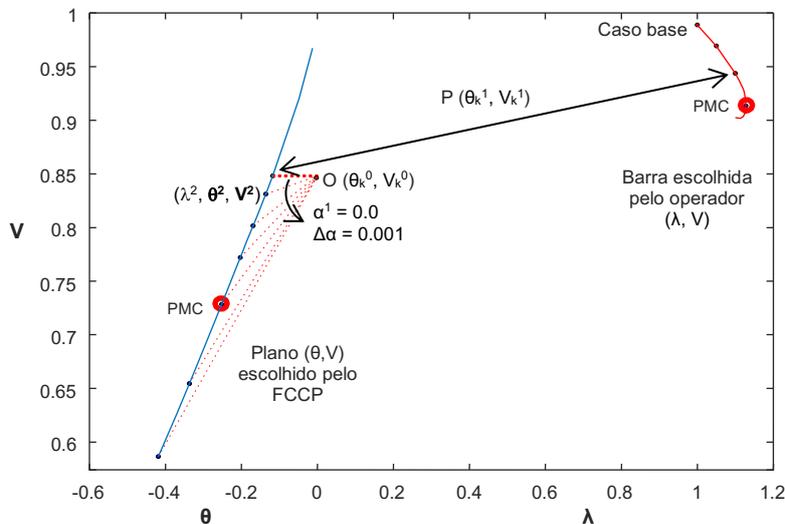


FIGURA 2 – (a) Curva P-V escolhida arbitrariamente pelo operador e a curva (V- θ) obtida automaticamente pelo método proposto.

A Figura 3 apresenta o fluxograma da metodologia utilizada neste trabalho.

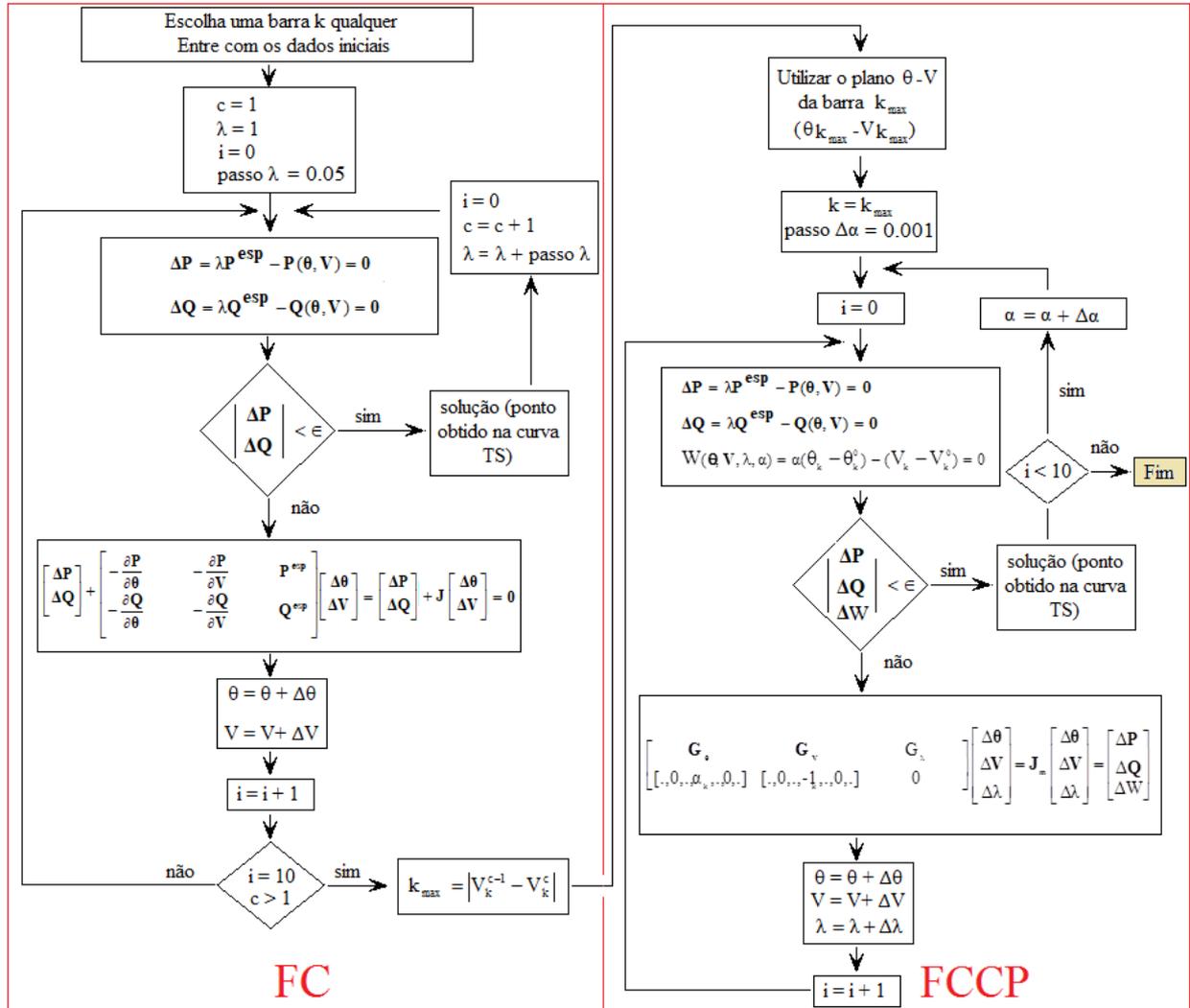


FIGURA 3 – Fluxograma do FCCP para obtenção das curvas P-V.

3.0 - 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. Os sistemas estudados foram duas configurações do sistema sul-sudeste brasileiro de 638 e 787 barras respectivamente e uma configuração do sistema localizado no sudoeste americano de 904 barras.

A Figura 4 apresenta resultados para o sistema de 638 barras. 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 129 (V_{129}), para obtenção da curva P-V. Para $\lambda=1$, por meio do fluxo de carga (FC), calcula-se o caso base e os demais pontos com passo de 0.05 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 638 barras, a barra que apresentou maior variação na tensão foi a crítica 199 (V_{199}), essa mudança ocorreu no ponto "a", conforme a Figura 4(a) a seguir. Com passo de 0.001 para $\Delta \alpha$ obtêm-se os demais pontos da curva ($\theta_{199}-V_{199}$), o ponto "b" representa o PMC na curva P-V da barra 129 (1.0087, 0.998) e barra crítica 199 (1.0087, 0.6327) e corresponde ao ponto "c" (-1.9192, 0.6327) na curva ($\theta_{199}-V_{199}$), os quais foram obtidos armazenando os valores das tensões e do fator de carregamento (λ) durante o traçado das curvas TS ($\theta_{199}-V_{199}$). Novamente, pode-se observar o aspecto linear dessas curvas em torno do PMC em relação as curvas P-V da barra 129 e 199. A Figura 4(b) apresenta as curvas P-V da barra escolhida aleatoriamente V_{129} e da barra crítica V_{199} , ambas obtida durante o traçado da curva ($\theta_{199}-V_{199}$). O ponto "d" corresponde ao valor mínimo do ângulo θ da curva ($\theta_{199}-V_{199}$) e equivale a (-2.2737, 0.4937), observando este ponto na barra crítica 199, nota-se que o ponto "d" se encontra bem após o PMC, correspondente a parte de baixo da curva P-V, parte instável da curva.

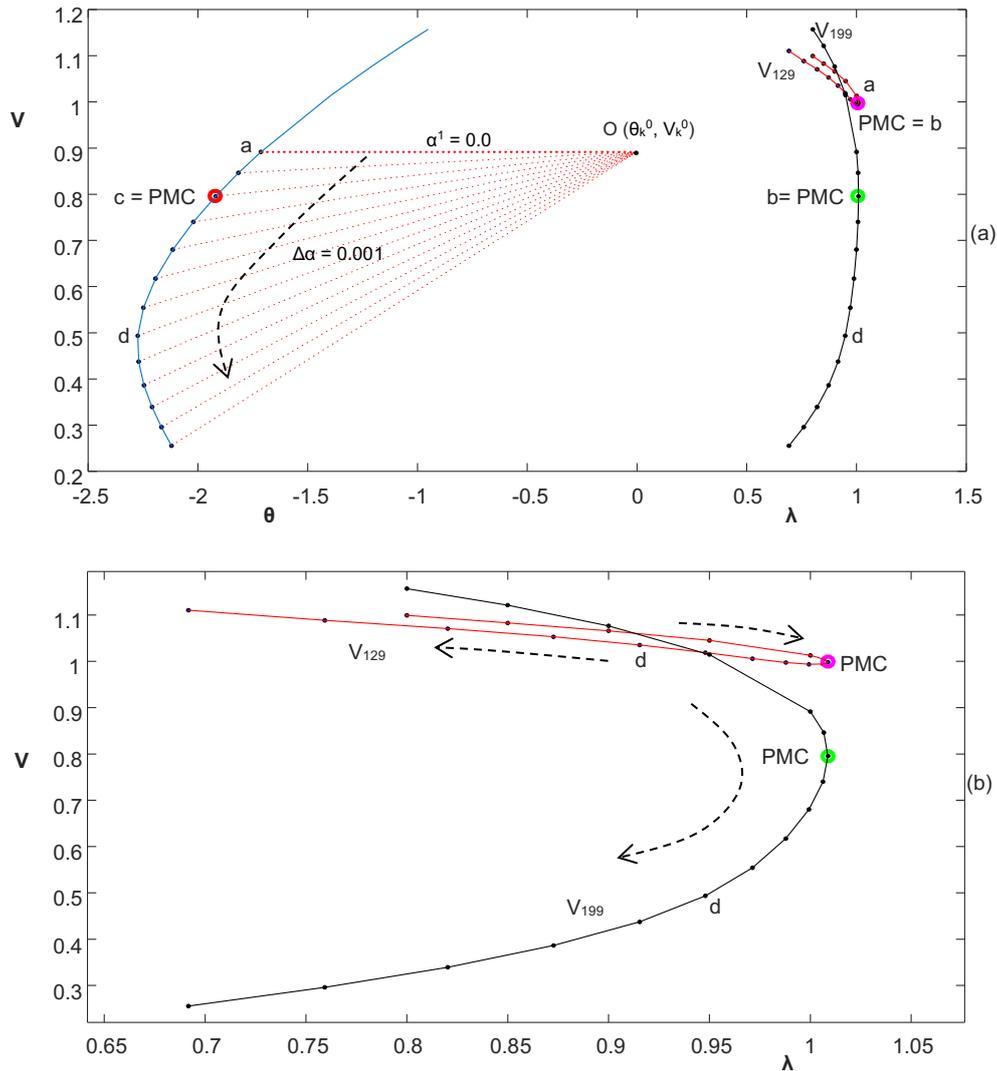


FIGURA 4 – Resultado para o sistema sul-sudeste brasileiro de 638 barras, (a) curva θ_{199} - V_{199} do FCCP, (b) curvas P-V obtidas pelo FCCP.

A Figura 5 e 6 apresentam resultados para sistemas maiores, o sul-sudeste brasileiro de 787 barras e o sistema localizado no sudoeste americano de 904 barras respectivamente. Resultados similares ao sistema 638 barras foram obtidos. A barra escolhida a priori para início do teste foi a 359 (V_{359}). Ao divergir, a tensão que apresentou maior variação foi da barra crítica 344, mudando para o plano θ_{344} - V_{344} conforme Figura 5(a). O PMC obtido por intermédio dessa nova curva para a barra crítica foi 1.1273 para λ e 0.7285 para tensão. Já para a curva θ_{344} - V_{344} foi de -0.2519 para θ_{344} e 0.7285 para V_{344} . As curvas P-V aleatória e crítica podem ser vistas com maiores detalhes na Figura 5(b).

A Figura 6(a) apresenta os resultados utilizando o FCCP para o sistema de 904 barras. A barra escolhida aleatoriamente para o traçado da curva P-V foi a barra 421 (V_{421}). Com passo de 0.05 obtêm-se os primeiros 4 pontos da curva P-V da barra 421, até o FC divergir (10 iterações). Neste processo, a tensão identificada para mudança de plano, foi a tensão da barra crítica (V_{138}), neste caso, muda-se de plano, ou seja, do plano (λ - V_{421}) para o plano (θ_{138} - V_{138}). Com passo de $\Delta\alpha = 0.001$ obtêm-se os demais pontos da curva θ_{138} - V_{138} , conforme a Figura 6(a). O ponto "a" que corresponde ao PMC das curvas P-V foi de $(\theta_{138}$ - $V_{138})=(-1.9432, 0.6327)$ e não apresenta singularidade nem para V e nem para θ , devido a seu aspecto linear em torno do ponto "a". O PMC das curvas P-V são (1.1979, 8548) para barra 421 e (1.1979, 0.6327) para a barra crítica 138. A Figura 6(b) apresenta as curvas P-V obtidas armazenando os valores das tensões correspondentes durante o traçado da curva (θ_{138} - V_{138}).

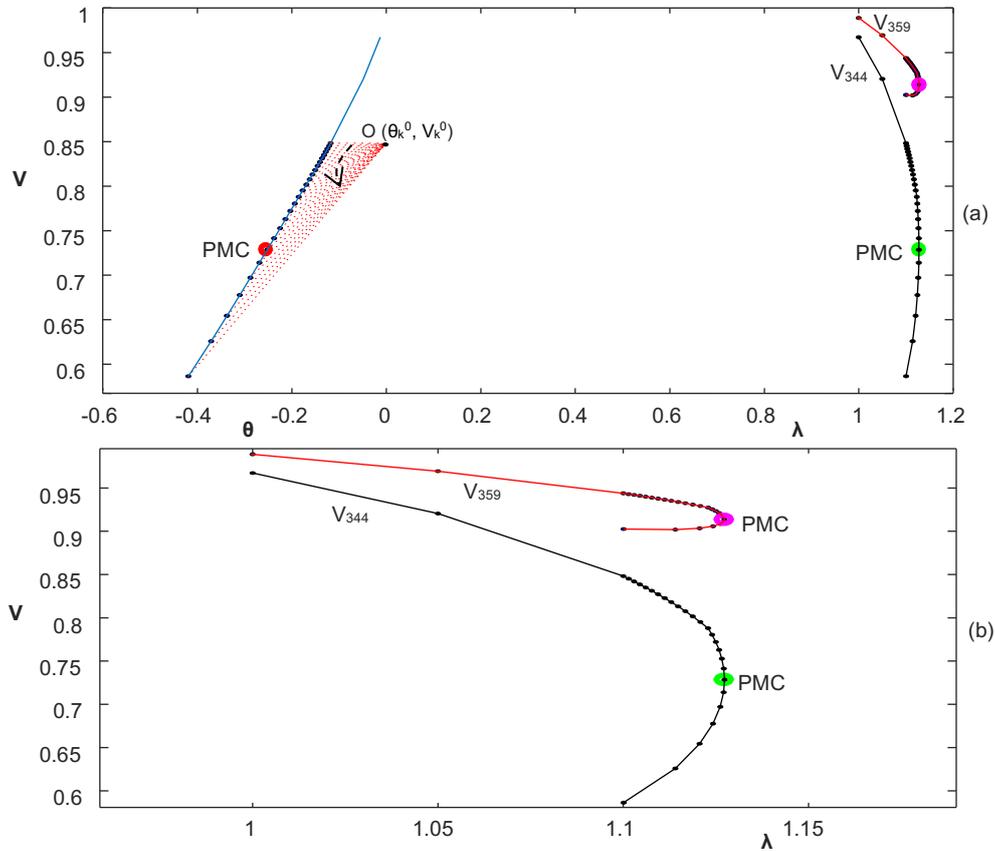


FIGURA 5 – Resultado para o sistema sul-sudeste brasileiro de 787 barras, (a) curva θ_{344} - V_{344} do FCCP, (b) curvas P-V obtidas pelo FCCP.

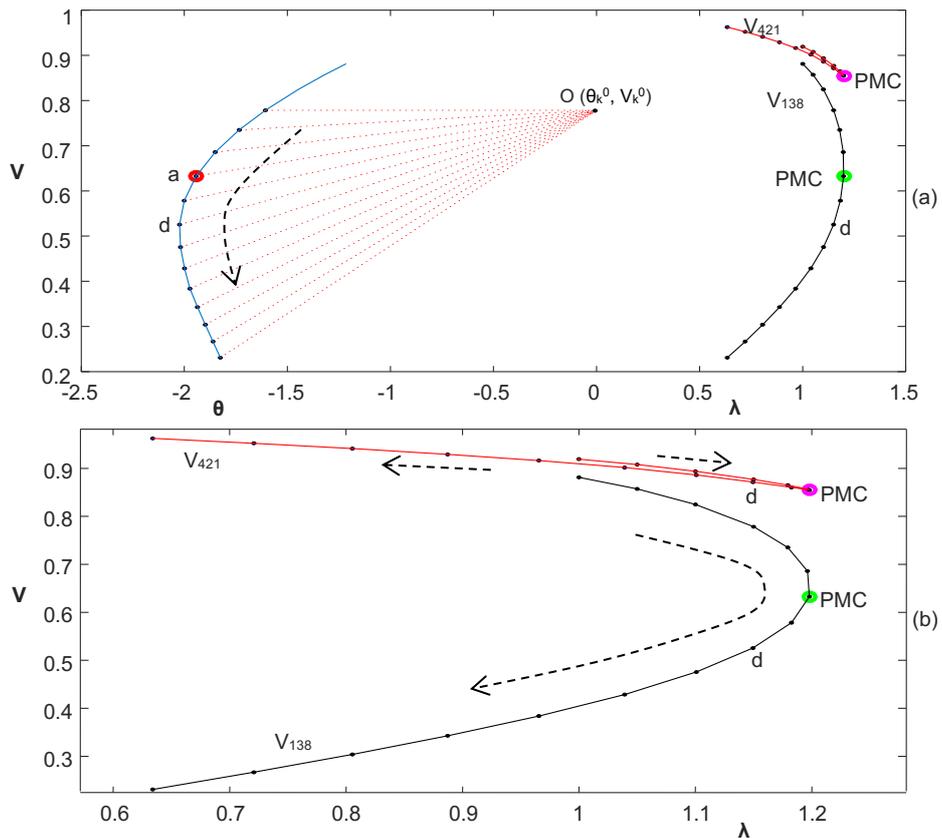


FIGURA 6 – Resultado para o sistema americano de 904 barras, (a) curva θ_{138} - V_{138} do FCCP, (b) curvas P-V obtidas pelo FCCP.

3.1 Desempenho do FCCP

No método de FC, os elementos pertencentes à matriz Jacobiana (**J**) são atualizados a cada iteração. No entanto, após vários estudos realizados concluiu-se que a matriz Jacobiana é importante para a convergência do processo, mas não influencia a solução final. Assim, no tocante a eficiência computacional, um procedimento comumente utilizado nos métodos de fluxo carga é o de não atualizar a matriz Jacobiana a cada iteração, mas somente quando o sistema sofrer alguma mudança significativa (p.ex., quando da mudança no tipo da barra PV para PQ em virtude da violação de seus limites). Esse procedimento, conhecido como *Dishonest Newton Method* (19), muitas vezes possibilita um ganho considerável no tempo de processamento. Assim, o objetivo desse item é o de avaliar as técnicas de parametrização proposta (FCCP), comparando seus desempenhos considerando dois procedimentos. No primeiro procedimento (P1) a atualização da matriz Jacobiana é realizada a cada iteração e no segundo (P2), somente quando o sistema sofrer violação de seus limites. Os resultados dessa comparação podem ser vistos na Tabela 1 a seguir. Duas técnicas conhecidas da literatura também foram submetidas ao procedimento P2, a técnica parametrizada pela tensão (V) da barra crítica e a técnica parametrizada pelo ângulo da tensão (θ) também da barra crítica. Essas técnicas foram escolhidas por apresentar o mesmo passo corretor do FCCP (preditor secante de ordem zero). Para ambos os procedimentos P1 e P2, é apresentado o número total de iterações (IC) necessários para o traçado completo da curva P-V, e no caso de P2, também é mostrado o número total de iterações (ATu) para o qual há a atualização da matriz. Os tempos computacionais requeridos pelo FCCP, considerando o procedimento P2, são apresentados na sexta coluna e o ganho em porcentagem (tempo de CPU) do procedimento P2 em relação ao procedimento P1 é mostrado na sétima coluna, nota-se um ganho em média de 43% para o FCCP e 40% para todas as técnicas utilizadas.

A Figura 7 apresenta resultados em termos de número de iterações e tempo de CPU para os três sistemas analisados. Na Figura 7(a) é mostrado os resultados para o sistemas sul-sudeste brasileiro de 638 barras, embora o número de iterações (IC) utilizando o procedimento P2 seja maior (100 iterações) em relação ao procedimento P1 (58 iterações), houve apenas 19 atualizações (Atu) da matriz Jacobiana por P2, sendo que por P1, as 58 iterações houve atualização da matriz J, acarretando nos 38,2% a mais no tempo de processamento, ver Tabela 1. O mesmo procedimento ocorre na Figura 7(b) e (c), o ganho computacional utilizando o procedimento P2 em relação ao P1 foram 50% e 40,2% respectivamente para o sistema sul-sudeste brasileiro de 787 barras e 904 barras localizado no sudoeste americano. A mesma metodologia foi aplicada para as técnicas cuja a tensão e o ângulo da tensão (θ) da barra crítica foram utilizados como parâmetro. Em média, o ganho computacional utilizando o procedimento P2 em relação ao P1 foram 40% e 38% respectivamente. A Figura 8 apresenta uma comparação em tempo de CPU das três técnicas utilizadas, FCCP em relação as técnicas parametrizadas pela tensão e ângulo da barra crítica. O FCCP apresentou uma redução em torno de 5% e 9% respectivamente.

Tabela 1 – Desempenho das técnicas de parametrização considerando o coeficiente angular (α) da reta situada no plano (θ_k -V $_k$) e das técnicas parametrizado pela tensão e ângulo da barra crítica para os procedimentos P1 e P2.

Sistemas	P1		P2			Diferença CPU (%)
	IC	Tempo CPU (pu)	IC	ATu	Tempo CPU (pu)	
638	58	1,000	100	19	0,618	38,2
787	69	1,000	123	13	0,500	50,0
904	56	1,000	67	24	0,598	40,2
638*	59	1,000	102	22	0,636	36,2
787*	71	1,000	127	13	0,560	44,0
904*	59	1,000	78	26	0,613	38,7
638**	59	1,000	105	23	0,679	32,1
787**	70	1,000	126	14	0,570	43,0
904**	61	1,000	74	27	0,634	33,6

ACo – número de atualizações. * parametrizado por V da barra crítica. ** parametrizado pelo θ da barra crítica

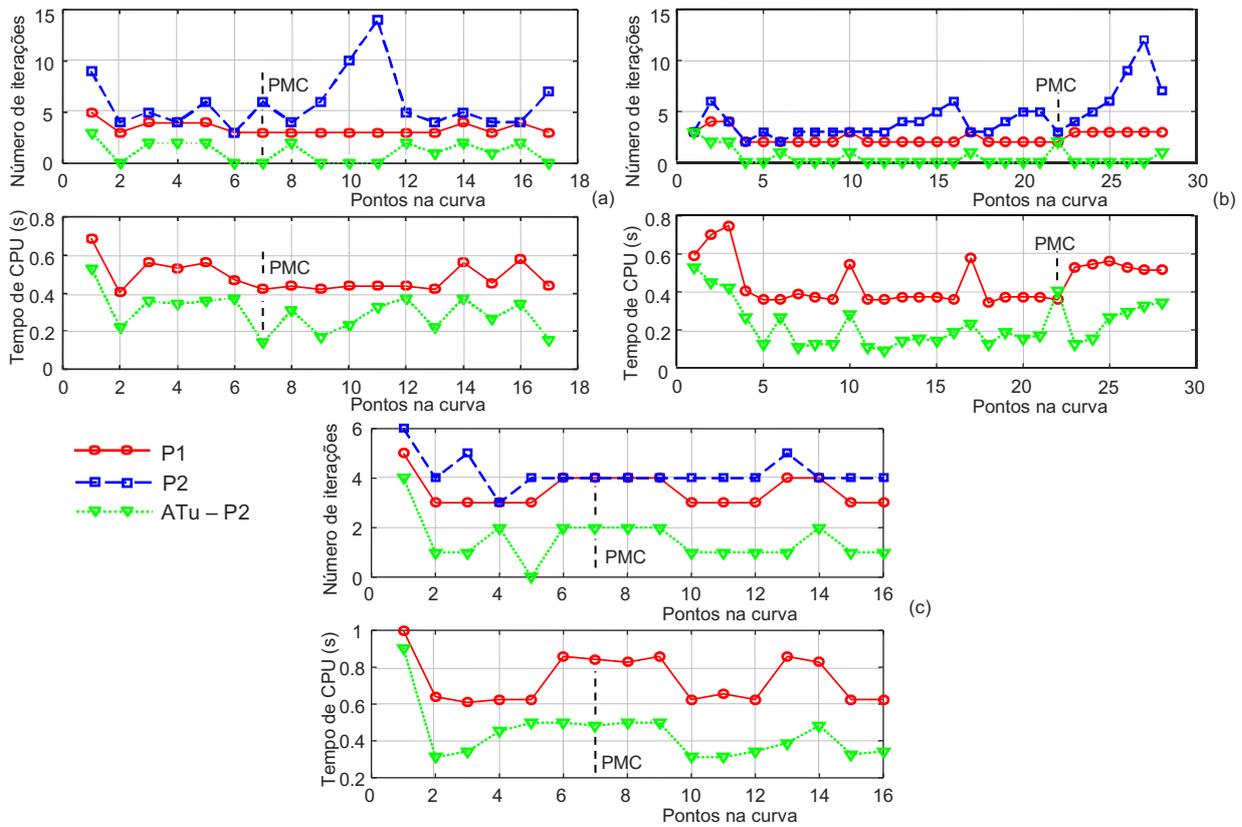


FIGURA 7 – Resultados dos sistemas analisados em termos de número de iterações e tempo de CPU para o FCCP, (a) sistema sul-sudeste brasileiro de 638 barras, (b) sistema sul-sudeste brasileiro de 787 barras, (c) sistema americano de 904 barras.

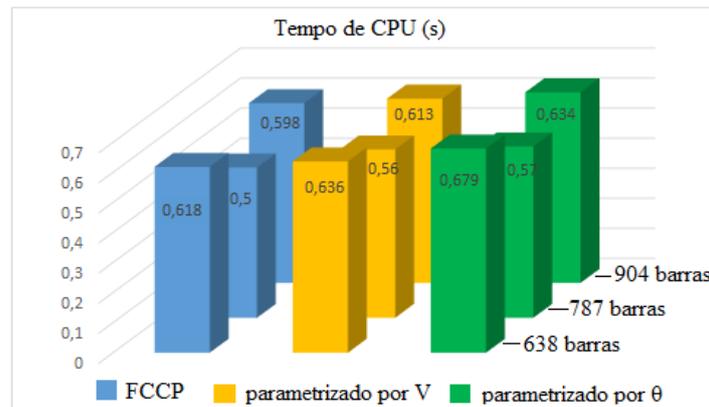


FIGURA 8 – Comparação entre o FCCP e as técnicas parametrizadas pela tensão (V) e ângulo (θ) da barra crítica dos sistemas sul-sudeste brasileiro de 638 barras, sistema sul-sudeste brasileiro de 787 barras e o sistema do sudoeste americano de 904 barras.

4.0 - 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 de plano (θ_k - V_k) que apresentou maior variação na tensão. Para ambos os sistemas estudados, a barra crítica apresentou maior variação na tensão. Foi comparado o tempo de CPU e o número de iterações utilizando a metodologia proposta e a metodologia parametrizada pela tensão e pelo ângulo da barra crítica. Em média, a metodologia proposta apresentou uma redução em torno de 7% a menos no tempo de CPU e 3,5% no número de iterações. Já utilizando o procedimento P2 em relação ao P1, o FCCP reduziu o tempo de CPU em média 39% respectivamente.

5.0 - AGRADECIMENTOS

Agradecemos a FAPESP – processo 2018/12353-9 e ao CNPq – processo 408630/2018-3 pelo suporte financeiro.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Abbott, M. Electricity reform and gains from the reallocation of resources. *The Electricity Journal*, Atlanta, v. 20, p. 72-78, 2007.
- (2) Zima, M.; Larsson, M.; Korba, P. Design aspects for wide-area monitoring and control systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 93, p. 980-996. 2005.
- (3) Lee, S. H.; Liu, J. H.; Chu, C. C. Modelling and locating unified power-flow controllers for static voltage stability enhancements. *Int. Trans. Electr. Energ. Syst.*, v. 24, p. 1524-1540, 2014.
- (4) Mokhlis, H.; Shahriari, A.; Bakar, A. H. A.; Illias, H. A.; Karimi, M. Improved Step Size Newton Raphson Method using quadratic equations properties in ill-conditioned power system. *Int. Trans. Electr. Energ. Syst.* v. 24, p. 1323–1342, 2014.
- (5) Ju, Y.; Wu, W.; Zhang, B.; Sun, H. Continuation power flow based on a novel local geometric parameterisation approach. *IET Gener. Transm. Distrib.*, v. 8, Iss. 5, p. 811–818, 2014.
- (6) Gan, R.; Luan, Z.; Yang, Y.; Liu, W.; Yang, S. Static Voltage Stability Analysis Based on Improved Continuous Power Flow. *TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference*. p. 1-4, 2015.
- (7) Dong, X.; Wang, C.; Yun, Z.; Han, X.; Liang, J.; Wang, Y. Zhao, P. Calculation of optimal load margin based on improved continuation power flow model. *Electrical Power and Energy Systems*. v. 94, p. 225–233, 2018.
- (8) 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.
- (9) Verbi, 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.
- (10) Pantos, M.; Verbi, G.; Gubina, F. An improved method for assessing voltage stability based on network decomposition. *Int J Electr Power Energy Syst.* v. 28, n. 5, p. 324–330, 2006.
- (11) Acharjee P. Identification of maximum loadability limit and weak buses using security constraint genetic algorithm. *Int J Electr Power Energy Syst.* v. 36, p. 40–50, 2012.
- (12) 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 & control*, Proceedings of the ECC/NSF workshop, Davos, Switzerland, 1994
- (13) Ajarapu V. *Computational techniques for voltage stability assessment and control (power electronics and power systems)*; New York: Springer-Verlag, 2006.
- (14) Ajarapu, V.; Christy, C. The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis. *IEEE Trans. on Power Systems*, v. 7, n. 1, p. 416-423, February, 1992.
- (15) Seydel, R. *From Equilibrium to Chaos: Practical Bifurcation and Stability Analysis*, 2ª ed., New York: Springer-Verlag, 1994, p. 407.
- (16) Bonini Neto, A.; Alves, D. A. Improved Geometric Parameterization Techniques for Continuation Power Flow. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 4, p. 1349-1359, 2010.
- (17) 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, p. 371-379, 2016.
- (18) Monticelli, A. J. *Fluxo de carga em Redes de Energia Elétrica*, Edgard Blucher, São Paulo, 1983.
- (19) Semlyen A., Léon F. Quasi-newton power flow using partial Jacobian updates, *IEEE Trans. Power Syst.*, 6, (3), pp. 332–339, 2001.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Alfredo Bonini Neto, graduado em Matemática pela Faculdade de Dracena - UNIFADRA, em 2002, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista – UNESP, campus de Ilha Solteira em 2006 e 2011 respectivamente. Trabalha com pesquisas na área de matemática aplicada à engenharia, técnicas de parametrização no fluxo de carga continuado. Atualmente é professor assistente doutor da Universidade Estadual Paulista – UNESP, campus de Tupã.



Jhonatan Cabrera Piazentin, graduado em Matemática pela Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT - UNESP, Campus de Presidente Prudente, Brasil, em 2017. Trabalha com pesquisas na área de modelagem matemática aplicada na engenharia e agronomia. Atualmente é mestrando da Faculdade de Ciências Agrônomicas – FCA - Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Botucatu.



Dilson Amancio Alves, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo – USP em 1980, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Campinas – UNICAMP em 1988 e 2000 respectivamente. Trabalha com pesquisas na área de fluxo de carga continuado. Atualmente é professor adjunto da Universidade Estadual Paulista – UNESP, campus de Ilha Solteira.