



**XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GAT/08
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

**AValiação em Tempo Real da Estabilidade de Tensão em Sistemas de Potência Usando
Medições Fasoriais**

Juan S. Giraldo(*)

Jhon A. Castrillon

Carlos A. Castro

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

RESUMO

Este trabalho apresenta um método para a obtenção das condições de operação de redes elétricas de potência do ponto de vista da estabilidade de tensão na operação em tempo real a partir de medidas fasoriais. Estas medições foram usadas em dois métodos propostos chamados “Métodos de Inicialização” para encontrar uma primeira estimativa do ponto de máximo carregamento. Esta estimativa é usada posteriormente como dado de entrada para um método mais robusto baseado no fluxo de carga com otimização de passo que leva em conta uma margem de erro determinada pelo operador da rede, conservando a eficiência computacional do método.

PALAVRAS-CHAVE

Estabilidade de tensão, Margem de estabilidade de tensão, Medição fasorial sincronizada, Otimização de passo.

1.0 - INTRODUÇÃO

No Brasil, as diretrizes e os critérios dos estudos elétricos resultam da experiência obtida pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), como mencionado em [2]. Nos estudos de segurança de tensão, define-se uma margem de estabilidade de tensão (MET) como a distância mínima entre o ponto de operação do sistema e o Ponto de Máximo Carregamento (PMC). Um sistema elétrico é considerado seguro em relação à tensão quando, para uma dada condição operativa, a MET e os níveis de tensão pré-contingência e pós-contingência encontram-se em conformidade com os critérios estabelecidos. Usualmente são usados alguns métodos clássicos para a análise da estabilidade de tensão, como os baseados em fluxos de carga sucessivos [3] e no fluxo de carga da continuação [4]. Porém, estes métodos podem consumir muito tempo de processamento, ainda mais na operação em tempo real de sistemas de grande porte como o sistema brasileiro. Portanto, várias abordagens baseadas em fluxos de carga não-divergentes [5] e em métodos diretos [6] foram propostas como uma alternativa mais eficiente e prática. Recentemente foi proposto na literatura um método baseado na obtenção de circuitos Equivalentes de Thévenin (ET) vistos desde cada barra de carga da rede a partir de unidades de medição fasorial (PMUs) para estimar a proximidade do sistema ao PMC [1]. Neste trabalho são apresentadas duas variações deste método, que foram chamadas “Métodos de Inicialização”. Embora estes métodos apresentem bons resultados na maioria dos casos, existem algumas condições em que o erro é considerável, por exemplo, em casos de carga leve. Então, o valor obtido é usado como dado de entrada de um segundo método mais robusto. Este método aproveita as propriedades do vetor normal à fronteira de factibilidade calculada perto do PMC através de um Fluxo de Carga (Newton-Raphson) com Otimização de Passo (FCOP) [8]. Além disso, leva em conta um procedimento prático que inclui a informação do operador da rede com a definição de uma margem de erro aceitável ($x\%$) para o PMC (erro aceitável no resultado final). As principais vantagens dos Métodos de Inicialização são sua simplicidade e rapidez para a obtenção de resultados, pois para a estimativa inicial do PMC não há necessidade do modelo da rede, só medições locais. No entanto, são muito sensíveis a variações na rede já que a estimação do ET é altamente dependente da configuração do sistema e ao ponto de operação. Já o segundo método permite encontrar de forma

(*) Rua Albert Einstein, 400 – CEP 13083-852 Campinas, SP, – Brasil
Tel / Fax: (+55 19) 3521- 3866 – Email: j.s.g@ieee.org

rápida e precisa o PMC a partir de um ponto inicial usando o modelo proporcionado da rede nesse instante. A combinação destes métodos torna o algoritmo mais robusto e menos sensível a variações importantes na rede ou a erros no processo de medição, mantendo a praticidade, a rapidez e a eficiência de ambos.

2.0 - CONCEITOS TEÓRICOS

2.1 Estimação do equivalente de Thévenin a partir de medições fasoriais

Supondo que haja PMUs instaladas em todas as barras de carga da rede, cada uma delas pode ser representada como sendo conectada a um circuito equivalente de Thévenin que representa todo o restante da rede, como mostra a Figura 1 para uma barra i .

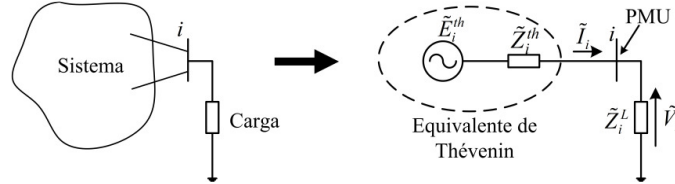


FIGURA 1 – Circuito equivalente de Thévenin na barra i .

Utilizando as medições das PMUs, os fasores $\tilde{V}_i(k)$ e $\tilde{I}_i(k)$ podem ser obtidos em tempo real, em que k corresponde ao instante de amostragem. A magnitude da impedância da carga i é dada por

$$|\tilde{Z}_i^L(k)| = |\tilde{V}_i(k) / \tilde{I}_i(k)| \quad (1)$$

e a potência consumida pela carga na barra i é:

$$\tilde{S}_i^L(k) = \tilde{V}_i(k) \cdot \tilde{I}_i(k)^* = P_i(k) + jQ_i(k) \quad (2)$$

O símbolo “~” indica uma grandeza complexa. É importante destacar que as medições provenientes das PMUs devem estar devidamente processadas e filtradas, pois as medições em ambiente de tempo real levam intrinsecamente, por exemplo, o efeito da comutação de dispositivos de chaveamento, eventos inesperados nas medições, o comportamento do meio ambiente, ruído, valores atípicos, entre outros fatores que podem ocasionar erros na estimação do equivalente e finalmente no cálculo da margem de estabilidade. Alguns métodos de filtragem, como o usado em [8] para suavizar os sinais antes de calcular as sensibilidades de tensão ou em [9] para facilitar a estimação on-line do ET podem ser usados para superar estes inconvenientes.

São necessárias apenas duas amostras consecutivas ou muito próximas em pontos de operação diferentes para determinar os parâmetros do ET. Portanto, aplicando a segunda lei de Kirchhoff ao circuito da Figura 1 para os instantes $(k - 1)$ e k tem-se:

$$\tilde{E}_i^{th}(k - 1) = \tilde{Z}_i^{th}(k - 1)\tilde{I}_i(k - 1) + \tilde{V}_i(k - 1) \quad (3)$$

$$\tilde{E}_i^{th}(k) = \tilde{Z}_i^{th}(k)\tilde{I}_i(k) + \tilde{V}_i(k) \quad (4)$$

Considera-se que os parâmetros do ET permanecem constantes durante as duas amostras, supondo-se que não ocorreram perturbações consideráveis entre elas, como por exemplo, saída de linhas, comutação dos taps dos transformadores, geradores atingindo os limites de potência reativa, etc. Assim, tem-se:

$$\tilde{E}_i^{th}(k) \approx \tilde{E}_i^{th}(k - 1) = \tilde{E}_i^{th}, \quad \tilde{Z}_i^{th}(k) \approx \tilde{Z}_i^{th}(k - 1) = \tilde{Z}_i^{th} \quad (5)$$

Finalmente os parâmetros do circuito equivalente podem ser encontrados por:

$$\tilde{Z}_i^{th} = \frac{\tilde{V}_i(k - 1) - \tilde{V}_i(k)}{\tilde{I}_i(k) - \tilde{I}_i(k - 1)} \quad (6)$$

$$\tilde{E}_i^{th} = \frac{\tilde{V}_i(k - 1)\tilde{I}_i(k) - \tilde{V}_i(k)\tilde{I}_i(k - 1)}{\tilde{I}_i(k) - \tilde{I}_i(k - 1)} \quad (7)$$

2.2 Método para estimar a margem de estabilidade de tensão (MET) [1]

Segundo o teorema da máxima transferência de potência, a máxima potência transferida à carga \tilde{Z}_i^L do circuito da Figura 1 ocorre quando:

$$|\tilde{Z}_i^L| = |\tilde{Z}_i^{th}| \quad (8)$$

O ponto crítico do equivalente visto da barra i ocorre no ponto de máxima potência consumida pela carga. Portanto, este ponto permite estimar facilmente o ponto de máximo carregamento. A Figura 2 mostra graficamente o processo usando a extrapolação por splines cúbicas (CSE) [10] para a barra i , onde a linha pontilhada é a curva representando a extrapolação, \hat{P}_i^{max} é o PMC estimado, P_i^{max} é o PMC real, $P_i(k)$ é a potência ativa corrente da barra e P_i^{cb} é a potência da barra no caso base.

3.0 - MÉTODOS DE INICIALIZAÇÃO

3.1 Método de inicialização 1

A MET usada em [1] leva em conta informações de todas as barras do sistema. No entanto, espera-se que quando a geração e a carga são escaladas uniformemente, a instabilidade de tensão ocorrerá primeiramente na barra mais fraca, isto é, a barra que define o PMC. É possível identificá-la comparando a proximidade de cada barra ao PMC calculado [11]. O *Método de inicialização 1* leva em conta apenas uma barra, a qual é determinada por:

$$\hat{P}_i^M = \min\{\hat{P}_j^M\} \text{ , para } j = 1, 2, \dots, n \text{ , onde } \hat{P}_j^M = \hat{P}_j^{max} - P_j(k) \quad (9)$$

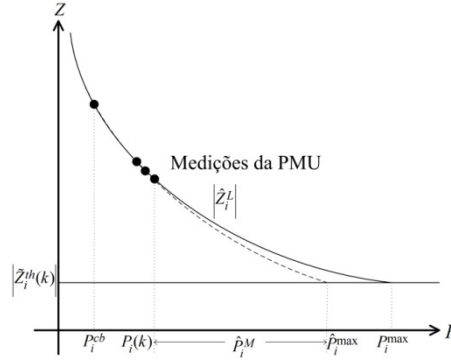


FIGURA 2 – Ponto de máximo carregamento usando CSE para a barra i .

Baseado na estimação do ET, no conhecimento da barra mais fraca usando a CSE e na potência ativa na barra, é possível recalculá-la analiticamente o PMC somente para aquela barra. Usando o circuito da Figura 1 tem-se:

$$V_i^4 + V_i^2 \left[2(r_i^{th} P_i^{max} + x_i^{th} Q_i^{max}) - E_i^{th2} \right] + \left[(r_i^{th} Q_i^{max} - x_i^{th} P_i^{max})^2 + (r_i^{th} P_i^{max} - x_i^{th} Q_i^{max})^2 \right] = 0 \quad (10)$$

onde $P_i^{max} = \hat{P}_i^{max}$ e $Q_i^{max} = \hat{P}_i^{max} \left(\frac{Q_i(k)}{P_i(k)} \right)$ assumindo que a carga aumenta com fator de potência constante. A Eq. (10) pode ser escrita como $aV_i^4 + bV_i^2 + c = 0$, portanto o valor de \hat{P}_i^{max} correspondente ao valor da potência ativa da barra i no PMC, pode ser encontrado resolvendo $b^2 - 4ac = 0$. Logo, carregamento pode ser encontrado por:

$$\rho_1^{ini} = \left(\frac{\hat{P}_i^{max}}{P_i(k)} \right) \frac{P_i(k)}{P_i^{cb}} = \left(\frac{\hat{P}_i^{max}}{P_i(k)} \right) \lambda_i \quad (11)$$

3.2 Método de inicialização 2

Usando o ET estimado para cada barra de carga i , considerando $P_i(k)$ e resolvendo a Eq. (10) para cada uma delas assumindo $P_i^{max} = \hat{P}_i^{max}$ e $Q_i^{max} = \hat{P}_i^{max} \left(\frac{Q_i(k)}{P_i(k)} \right)$, o PMC de cada circuito equivalente pode ser encontrado sem usar a CSE. Assim, as barras mais representativas podem ser identificadas calculando:

$$a_i = \frac{P_i(k)}{\hat{P}_i^{max}} \text{ , e } w_i = \frac{a_i}{\sum_{k=1}^n a_k} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

Depois, o vetor w_i é ordenado de forma decrescente e finalmente o valor inicial pode ser calculado por:

$$\rho_2^{ini} = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{\hat{P}_i^{max}}{P_i(k)} \lambda_i \quad (13)$$

onde a somatória contém as primeiras j barras para as quais $\sum_{i=1}^j w_i > \gamma$, com γ sendo uma tolerância predefinida.

Note-se que enquanto o *Método de inicialização 1* leva em conta só uma barra para calcular o valor inicial ρ^{ini} , o *Método de inicialização 2* envolve um certo número de barras que representa o comportamento da rede e que pode fazer com que a estimação seja menos sensível a erros. Essa diferença pode ser vista na Figura 3 para o sistema de teste da IEEE de 118 barras. Para o *Método de inicialização 1* a barra 40 foi encontrada como a mais fraca em 9 dos 24 períodos testados, enquanto que a barra 41 foi a escolhida nos 15 períodos restantes. Por outro lado, no *Método de inicialização 2* a barra 20, por exemplo, foi selecionada em todos os 24 períodos. O mesmo aconteceu com outras barras, como a 42, 43 e assim por diante, indicando que o *Método de inicialização 2* pode levar em conta mais de uma barra. Deve-se destacar também, que as barras críticas encontradas com o *Método de inicialização 1* foram também levadas em conta no *Método de inicialização 2*.

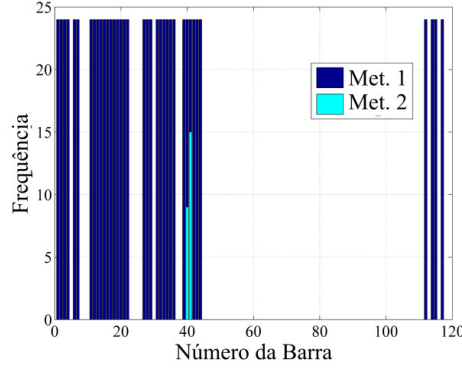


FIGURA 3 – Barras críticas dependendo do método de inicialização – IEEE 118-barras.

4.0 - PONTO DE MÁXIMO CARREGAMENTO USANDO O FLUXO DE CARGA COM OTIMIZAÇÃO DE PASSO

Dependendo das características do sistema, os fluxos de carga convencionais podem apresentar problemas de convergência ou até divergir embora o ponto de operação esteja dentro da região de factibilidade, onde de fato existe solução para o sistema, o que não é uma situação desejável do ponto de vista dos operadores do sistema. Além disso, é importante que programas comerciais forneçam informações adicionais para pontos de operação infactíveis. O FCOP foi inicialmente proposto em [12], representando as tensões em coordenadas retangulares. Em [13] foi proposto um método considerando tensões em coordenadas polares, permitindo sua aplicação direta nos programas comerciais de fluxo de carga. A vantagem de usar este método é que ele permite obter a solução correta do sistema, mesmo se o ponto de operação estiver perto da fronteira de factibilidade, Σ . De fato, se o ponto de operação localiza-se na zona de infactibilidade, o fator de otimização de passo, μ , tende para zero e fornece um ponto de operação sobre a fronteira Σ . Em termos gerais o FCOP é baseado em um fluxo de carga Newton-Raphson convencional, com um sistema de equações não lineares $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \rho)$, onde \mathbf{x} é o vetor de variáveis de estado do sistema (\mathbf{V}, θ) e ρ fator de escalamento usado para modificar a carga e a geração. As variáveis de estado na iteração r são representadas como:

$$\mathbf{x}^{(r+1)} = \mathbf{x}^{(r)} + \mu^{(r)} \Delta \mathbf{x}^{(r)}. \quad (14)$$

Assumindo um carregamento inicial grande o suficiente para levar o sistema à região infactível ($\rho^0 > \rho^{pmc}$), o FCOP converge no ponto PMC^0 na fronteira de factibilidade como mostrado na Figura 4. Segundo o procedimento descrito em [5], $\vec{\mathbf{w}}$ é o autovetor unitário à esquerda, normal à fronteira no ponto PMC^0 e calculado a cada iteração do FCOP assim

$$\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{g}(\mathbf{x}_{\text{pmc}^0})^T \vec{\mathbf{w}} = 0 \quad (15)$$

onde $\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{g}(\mathbf{x}_{\text{pmc}^0})$ é a matriz Jacobiana de \mathbf{g} no ponto PMC^0 . Em seguida, obtém-se o plano tangente a PMC^0 que intercepta a direção do incremento de potência $\vec{\mathbf{s}}$ com fator de potência constante (caso base), resultando em ρ^1 e determinando a quantidade de potência que deve ser diminuída $|\Delta \vec{\mathbf{s}}_{cl}|$. Esta potência é calculada como uma variação no fator de escalamento como:

$$\Delta \rho = \frac{|\Delta \vec{\mathbf{s}}_{cl}|}{|\vec{\mathbf{s}}|} = \frac{\Delta \vec{\mathbf{s}} \cdot \vec{\mathbf{w}}}{\vec{\mathbf{s}} \cdot \vec{\mathbf{w}}} \quad (16)$$

onde $\Delta \vec{\mathbf{s}}$ é a diferença de potência entre o ponto na fronteira e no fator de escalamento e $\vec{\mathbf{s}}$ a potência no caso base. Esse procedimento de cálculo deve ser executado até que o PMC considerado como solução seja encontrado, usando os valores atualizados de PMC^r e ρ^r para iterações posteriores.

O método em [7] leva em conta uma margem de erro aceitável $\pm x\%$ no cálculo do PMC, isto é, o operador da rede está disposto a aceitar um erro de $\pm x\%$ na margem de estabilidade calculada. O parâmetro α é dado por:

$$\alpha = (1 + x/100) / (1 - x/100) \quad (17)$$

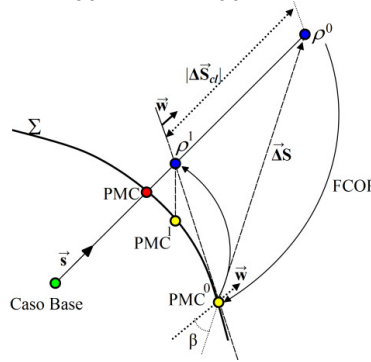


FIGURA 4 – Processo de obtenção do PMC usando o FCOP (figura adaptada de [7]).

5.0 - MÉTODO PROPOSTO

O método proposto usa as excelentes características dos métodos de inicialização propostos como valores iniciais (ρ^0) e do método robusto para calcular o PMC baseado no FCOP. Assim, dependendo do método de inicialização usado, a MET pode ser calculada por:

$$MET_m = \hat{\rho}_m^{pmc} \left(\sum_{i \in \Omega} P_i^{cb} / \sum_{i \in \Omega} P_i(k) \right). \quad (18)$$

onde m é o método de inicialização usado, $\hat{\rho}_m^{pmc}$ é o valor que multiplica o caso base para levar o sistema até o PMC calculado pelo método baseado em FCOP e Ω o conjunto de barras usadas por cada método. Deve-se destacar que se os fatores de carga (λ_i) são iguais, logo a $MET_m = \hat{\rho}_m^{pmc} / \lambda$. Finalmente o método proposto é mostrado na Figura 5.

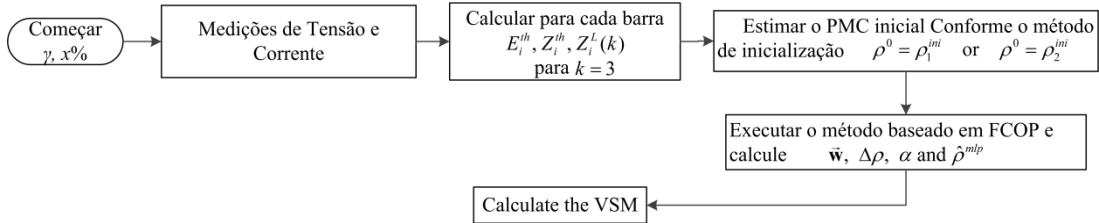


FIGURA 5 – Fluxograma do método proposto.

6.0 - RESULTADOS

O método proposto foi testado usando os sistemas de 14, 57 e 118 barras da IEEE e para uma porção do sistema de transmissão brasileiro (2011) com um total de 4,526 barras, 500 máquinas síncronas gerando 64.78 GW e uma carga base de 61.47 GW e 20.46 GVar. Todas as cargas e geradores foram modificados por um fator de carga (λ_i) em períodos de uma hora com o objetivo de simular uma curva de carga diária, deliberadamente levando cada sistema relativamente próximo ao seu MLP. Valores aleatórios foram adicionados à curva de carga para cada carga e gerador e para cada amostra, assim um cenário mais realista pode ser simulado. O valor de γ para os métodos de inicialização foi estabelecido em 0.5, o erro aceitável $\pm 2\%$ e a tolerância do multiplicador ótimo para o FCOP em 0.01 p.u.. Os limites de potência reativa dos geradores foram respeitados.

Os métodos de inicialização mostraram melhores resultados em cenários de carga pesada. Basicamente a estimação é feita usando medições locais unicamente e tanto o processo de extrapolação usado (CSE) quanto o método para calcular o ET são mais precisos quando o ponto de operação atual localiza-se mais próximo ao PMC, como pode ser visto na Figura 6 para o sistema de teste de 118 barras da IEEE.

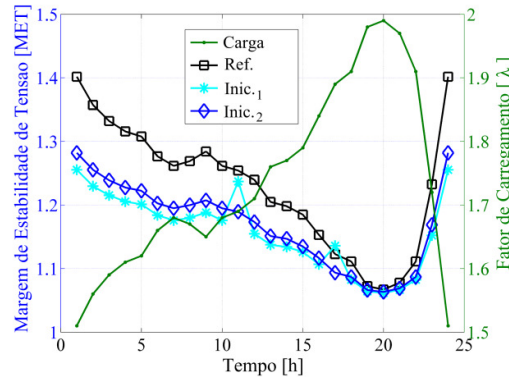


FIGURA 6 – Margem de estabilidade – IEEE 118-barras.

Em [14] foi mostrado que o método baseado no FCOP obteve o PMC depois de algumas iterações independentemente do valor inicial ρ^0 escolhido ou se esse ponto escolhido encontra-se na região factível ou infactível. Contudo, o número de iterações mostrou estar relacionado com o valor inicial. Uma vez que os resultados foram tomados por 24 horas, é mostrada a média dos valores de inicialização encontrada (ρ_1^0 e ρ_2^0) e do PMC final obtido ($\hat{\rho}^{pmc}$) junto com o número médio de FCOP executados usando o método proposto na Tabela 1. Estes valores podem ser comparados com os obtidos usando um valor de inicialização arbitrário na região de infactibilidade ($\rho_r^0 = 10$).

Tabela 1 – PMC usando diferentes valores de inicialização

Sistema ρ^1		ρ_1^{ini}	ρ_2^{ini}	ρ_r^{ini}
IEEE 14-barras 1.7830	ρ^0	1.7768	1.6811	10
	$\hat{\rho}^{pmc}$	1.7897	1.7849	1.7486
	#FCOP	4	3	7
IEEE 57-barras 1.6170	ρ^0	1.7331	1.7063	10
	$\hat{\rho}^{pmc}$	1.6201	1.6258	1.6145
	#FCOP	6	3	11
IEEE 118-barras 2.1446	ρ^0	1.8571	1.9465	10
	$\hat{\rho}^{pmc}$	2.1348	2.1326	2.1021
	#FCOP	5	4	13
BR 4.526-barras 1.3390	ρ^0	1.2817	1.3143	10
	$\hat{\rho}^{pmc}$	1.3302	1.3283	1.2795
	#FCOP	5	4	8

Ambos os métodos de inicialização fornecem valores dentro ou fora da fronteira de factibilidade o que confirma a robustez do método proposto. Nota-se que o número de FCOP executados para encontrar o PMC depende do ponto inicial ρ^0 , mostrando um decremento quando valores próximos à fronteira são tomados. Comprova-se também que os resultados fornecidos pelo método baseado em FCOP são muito próximos aos valores tomados como referência. O processo iterativo para encontrar o PMC para o sistema IEEE de 118 barras é mostrado na Figura 7. Foi obtida particularmente usando os valores de inicialização na Tabela 1. Vale a pena ressaltar que o número de FCOP executados não corresponde exatamente com os da Tabela 1, porque, como explicado anteriormente, apenas os valores médios foram mostrados.

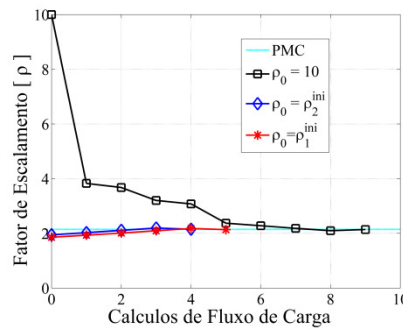


FIGURA 7 – Processo de cálculo do PMC – IEEE 118-barras.

¹ Fator de escalamento obtido para o caso base usando fluxos de carga sucessivos.

A MET para o sistema brasileiro de 4,526 barras em um período de 24 horas é mostrado na Figura 8 usando só os métodos de inicialização e podem ser comparados com o método proposto e a referência, a qual foi obtida executando fluxos de carga sucessivos. Pode-se ver que os métodos de inicialização fornecem boas primeiras estimativas à MET, mas podem porém apresentar erros relativamente altos, dependendo basicamente do ponto atual de operação do sistema e suas condições. Quando o método proposto é usado (métodos de inicialização junto com o FCOP), a MET estimada aproxima-se ainda mais ao valor de referência. De fato, os valores médios das margens obtidas usando só os métodos de inicialização e o método propostos, junto com os valores médios dos erros na estimação da MET em relação à referência são mostrados na Tabela 2 para os sistemas testados.

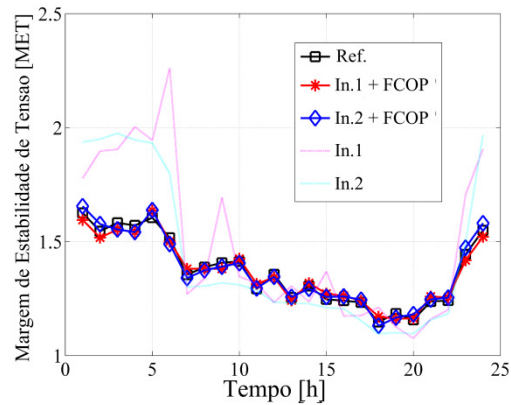


FIGURA 8 – MET usando diferentes métodos – BR 4,526-barras.

Os erros obtidos com o método proposto foram consideravelmente menores do que os obtidos só usando os métodos de inicialização. Esse é um resultado esperado, já que o método baseado em FCOP foi testado previamente e mostrou resultados notáveis. Contudo, deve-se ressaltar que estes resultados foram obtidos com menor número de execuções do FCOP, considerando que o valor inicial ρ^0 foi previamente computado.

Tabela 2 – MET usando diferentes métodos de cálculo

Sistema MET ²		Inic. 1	Inic. 2	Inic. 1 + FCOP	Inic. 2 + FCOP
IEEE 14-barras 1.3756	MET	1.2990	1.2919	1.3768	1.3701
	$\varepsilon\%$	13.70	9.70	2.10	2.31
IEEE 57-barras 1.2368	MET	1.2465	1.2463	1.2440	1.2388
	$\varepsilon\%$	19.60	9.40	2.47	2.02
IEEE 118-barras 1.2291	MET	1.0400	1.1132	1.2340	1.2312
	$\varepsilon\%$	11.60	4.60	3.01	3.13
BR 4.526-barras 1.3596	MET	1.1165	1.2709	1.3233	1.3314
	$\varepsilon\%$	12.50	9.30	3.10	2.50

7.0 - CONCLUSÃO

Foi proposto um método robusto e eficiente para calcular a proximidade do sistema ao ponto de instabilidade usando medições fasoriais. Deve-se notar que o método também poderia ser usado com informação a partir de sistemas SCADA, no entanto as medições têm de ser tratadas primeiramente por um estimador de estado. O método mantém os principais atributos dos métodos de inicialização baseados em PMU, tais como a sua eficiência e simplicidade e também tira proveito das características de robustez do método baseado no FCOP, o qual permite tanto valores iniciais factíveis como infactíveis e possibilita o uso de uma margem aceitável de erro para o valor final do PMC. Simulações exaustivas com sistemas de teste da IEEE e com sistemas reais foram realizadas mostrando um bom comportamento em geral, uma vez que o número de FCOP executados foi reduzido significativamente quando comparado com o valor de inicialização arbitrariamente escolhido, mostrando a eficiência e robustez do método.

² Margem obtida usando fluxos de carga sucessivos (valor médio)

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Su, Heng-Yi, Yi-Ting Chou, and Chih-Wen Liu. "Estimation of voltage stability margin using synchrophasors" Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE. IEEE, 2012.
- [2] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Procedimentos de Rede: Módulo 10, Disponível: <http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>. (26/02/2015).
- [3] Kessel, P., and H. Glavitsch. "Estimating the voltage stability of a power system." Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol1, No.3, pp. 346-354, 1986.
- [4] Ajarapu, V.; Christy, C. "The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis". Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 7, no 1, p. 416-423, 1992.
- [5] Bedriñana, M. F., & Castro, C. A. "Maximum loading point computation based on load flow with step size optimization". In Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE (pp. 1-8). 2008.
- [6] Canizares, Claudio A., and Fernando L. Alvarado. "Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems." Power Systems, IEEE Transactions on, Vol.8, No.1, pp. 1-8, 2008.
- [7] Xavier, Carlos E., Manfred F. Bedriñana, and Carlos A. Castro. "Robust computation of voltage stability margins for transmission and distribution grids." Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE. IEEE, 2013.
- [8] Leelaruij, Rujiraj, Luigi Vanfretti, and M. Shoaib Almas. "Voltage stability monitoring using sensitivities computed from synchronized phasor measurement data." Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE. IEEE, 2012.
- [9] Abdelkader, Sobhy M., and D. John Morrow. "Online tracking of Thévenin equivalent parameters using PMU measurements." Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 27, N. 2, pp. 975-983, 2012.
- [10] De Boor, Carl. "A practical guide to splines." Mathematics of Computation, 1978.
- [11] Haque, M. H. "On-line monitoring of maximum permissible loading of a power system within voltage stability limits." IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution Vol. 150, N. 1, pp. 107-112, 2003.
- [12] Iwamoto, S., and Y. Tamura. "A load flow calculation method for ill-conditioned power systems." Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, Vol. 4, pp. 1736-1743, 1981.
- [13] Castro, C. A., and L. M. C. Braz. "A new approach to the polar Newton power flow using step size optimization." Proceedings of the 29th North American Symposium, Laramie, Wyoming, USA. 1997.
- [14] Tavares, B. L., M. F. Bedrinana, and C. A. Castro. "Practical method for computing the maximum loading point based on load flow with step size optimization." Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. IEEE, 2010.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Juan Sebastian Giraldo é Engenheiro Eletricista (2012) pela Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colômbia, atualmente encontra-se terminando estudos de Mestrado na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) na área de sistemas elétricos de potência. Sua área principal de pesquisa é estabilidade de tensão e sistemas de transmissão.

Jhon Alexander Castrillón possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidad Tecnológica de Pereira, Colômbia, (2012), atualmente encontra-se terminando estudos de Mestrado na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) na área de sistemas elétricos de potência. Sua área principal de pesquisa é estabilidade de tensão e sistemas de transmissão.

Carlos Alberto Castro é Engenheiro Eletricista (1982) e Mestre em Engenharia Elétrica (1985) pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Doutor em Engenharia Elétrica (1993) pela Arizona State University, Tempe, USA. Está com a UNICAMP desde 1983, onde atualmente é professor.