

# Avaliação de Índices de Estabilidade de Tensão para Utilização em Sistemas de Medições Fasórias

Geovane Michael Lentz\* Luís F. C. Alberto\*\*

\* *Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, (e-mail: geovanelentz@usp.br).*

\*\* *Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, (e-mail: lfcalberto@usp.br).*

**Abstract:** The search for methodologies to assess voltage stability in real-time is currently one of the greatest challenges for researchers. Some authors have used Phasor Measurement Unit (PMU) measurements to compute indexes to monitor how close the system is to the Maximum Load Point (MLP). However, in order to be able to correctly apply these indexes, they must work for all types of load increasing. This article investigates the performance of some existing indexes for stability margin assessment. Only MLP due to Saddle-Node Bifurcation (SNB) was considered in this paper. The results indicate these indexes are strongly dependent on the direction of load increase and fail to correctly detect the onset of a voltage collapse.

**Resumo:** A busca por metodologias para avaliar a estabilidade da tensão em tempo real é atualmente um dos maiores desafios para os pesquisadores. Alguns autores usaram medições da *Phasor Measurement Unit* (PMU) para calcular índices e monitorar o quão perto o sistema está do Ponto de Máximo Carregamento (PMC). No entanto, para poder aplicar corretamente esses índices, deve funcionar para todos os tipos de aumento de carga. Este artigo investiga o desempenho de alguns índices existentes para avaliar a margem de estabilidade. Apenas PMC devido a Bifurcação do tipo Sela-Nó (BSN) foi considerado neste artigo. Os resultados indicam que esses índices são fortemente dependentes da direção do aumento da carga e não conseguem detectar corretamente o início de um colapso de tensão.

*Keywords:* Electric Power System; PV Curve; Maximum Load Point; Phasor Measurement Unit; P-index; L-index; LSI; FVSI.

*Palavras-chaves:* Sistema Elétrico de Potência; Curva PV; Ponto de Máximo Carregamento (PMC); Unidade de Medição Fasorial; P-index; L-index; LSI; FVSI.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda de energia elétrica devido ao progresso econômico, os SEPs estão operando próximos aos seus limites e qualquer situação que gere uma mudança na topologia do sistema ou nos parâmetros, como por exemplo curto-circuitos, falhas de equipamentos de proteção, aumento gradativo de cargas ou contingências, podem causar instabilidade e levar o SEP a um colapso.

SEPs são muito complexos e podem colapsar devido a diversos mecanismos. Um destes mecanismos, que é relevante para a instabilização de SEPs carregados, é o fenômeno de estabilidade de tensão.

Para evitar instabilidades e a interrupção do fornecimento de energia elétrica, é fundamental monitorar a margem de estabilidade de tensão dos SEP em tempo real. Alguns autores propuseram o emprego de PMUs para monitorar a

margem de carregamento de um sistema elétrico em tempo real.

Três diferentes metodologias são comumente utilizadas para monitor a margem de estabilidade de tensão com PMUs: métodos baseadas no teorema de Thévenin, aquelas baseadas em Redes Neurais Artificiais e índices de estabilidade de tensão. Gong et al. (2006), Corsi and Taranto (2008), Mou et al. (2012), Su and Liu (2016) e Polster et al. (2017) utilizaram o equivalente de Thévenin, calculado a partir de medidas de PMU, para avaliar a estabilidade de tensão em tempo real.

As Redes Neurais Artificiais foram utilizadas para monitorar a estabilidade de tensão em tempo real, por Diao et al. (2009), Zhou et al. (2010), Innah and Hiyama (2011), Khoshkhou and Shahrash (2013), Mohammadi and Dehghani (2015), Nandanwar and Warkad (2016) e Shah and Verma (2016). As redes neurais estão sendo usadas em diferentes áreas de estudos, é uma ferramenta que detecta padrões e informam para os operadores qual a situação do sistema. Após ser treinada, a rede tem a atuação rápida para solução do problema, porém, o treinamento envolve um tempo computacional muito elevado

\* Agradecimento a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo pelo apoio financeiro e também pelo apoio financeiro parcial da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por meio dos processos 2018/20104-9 e 2014/50851-0, do CNPq Processo 308067/2017-7 e da CAPES.

e milhares de casos devem ser levados em consideração, como por exemplo todos os tipos de contingências, curto-circuitos e diferentes aumentos de carga, portanto, esse treinamento torna-se inviável.

Diferentes índices para avaliar a estabilidade de tensão em tempo real por meio de PMUs foram empregados. Momoh et al. (2008) e Kamel and Karrar (2018), por exemplo, utilizaram o L-index e o P-index respectivamente. A partir das medidas das PMUs é realizada uma estimação de variáveis e/ou parâmetros e por fim esses índices são calculados. Shah and Verma (2016), aliando redes neurais e medidas de PMU, utilizou os índices *Line Stability Index* (LSI) e o *Fast Voltage Stability Index* (FVSI) para avaliar a estabilidade de tensão. A principal vantagem desses índices é a velocidade computacional para determiná-los, porém este artigo mostrará que os índices são muito dependentes da direção de crescimento de carga, portanto não são adequados para a avaliação da margem de estabilidade de SEP.

O presente artigo, além desta parte introdutória, está dividido da seguinte maneira: no capítulo 2 são apresentados os índices que serão abordados neste artigo. No capítulo 3, apresenta-se os sistemas testes e os cenários que serão utilizados para avaliar os índices. No capítulo 4, os resultados obtidos são apresentados. E por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas.

## 2. ÍNDICES PARA AVALIAR A ESTABILIDADE DE TENSÃO EM SEP

Neste capítulo serão apresentados alguns índices que foram propostos na literatura para avaliar a estabilidade de tensão em SEP.

### 2.1 L-index

De acordo com Kessel and Glavitsch (1986), o L-index pode ser utilizado para a detecção da instabilidade de tensão em SEP. Espera-se que o índice assumira valores entre 0 e 1. Quando igual a 1, o sistema atingiu o limite de carregamento e o ponto de bifurcação que leva o sistema ao colapso de tensão. A demonstração do L-index é realizada a partir do sistema de 2 barras Figura 1.

A corrente elétrica injetada nas barras é dada por (1).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

A corrente elétrica na barra de carga (barra 2), pode ser encontrada de duas diferentes maneiras mostradas em (2).

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \dot{Y}_{21}\dot{V}_1 + \dot{Y}_{22}\dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 &= \frac{\dot{S}_2^*}{\dot{V}_2^*} \end{aligned} \quad (2)$$

Igualando as duas equação em (2), obtém-se (3).

$$|\dot{V}_2|^2 + \dot{V}_0\dot{V}_2^* = \frac{\dot{S}_2^*}{\dot{Y}_{22}} = a + jb \quad (3)$$

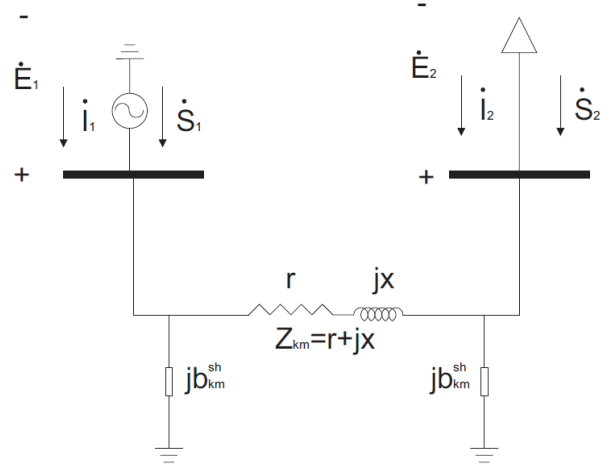


Figura 1. Sistema Elétrico de Potência com Duas Barras

onde  $\dot{V}_0 = \frac{\dot{Y}_{21}\dot{V}_1}{\dot{Y}_{22}}$ . Isolando  $\dot{V}_0\dot{V}_2^*$ , aplicando o módulo, obtém-se equação de quarta ordem. Resolvendo esta equação temos que  $|\dot{V}_2|$  é dado por (4).

$$|\dot{V}_2| = \sqrt{\frac{|\dot{V}_0|^2}{2} + a \pm \sqrt{\frac{|\dot{V}_0|^2}{4} + a|\dot{V}_0|^2 - b^2}} \quad (4)$$

Separando (3) em parte real e imaginária é possível determinar  $a$  e  $b$ :

$$\left| \frac{\dot{S}_2}{\dot{Y}_{22}} \right| [\cos(\Phi_{S_2} + \Phi_{Y_{22}}) - j \sin(\Phi_{S_2} + \Phi_{Y_{22}})] = a + jb \quad (5)$$

Substituindo  $a$  e  $b$  em (4) e fazendo algumas manipulações, obtém-se (6).

$$|\dot{V}_2| = \sqrt{\frac{|\dot{S}_2|}{|\dot{Y}_{22}|} \left( r \pm \sqrt{r^2 - 1} \right)} \quad (6)$$

onde  $r = \frac{|\dot{V}_0|^2}{2} \frac{|\dot{Y}_{22}|}{|\dot{S}_2|} + \cos(\Phi_{S_2} + \Phi_{Y_{22}})$ .

No ponto de bifurcação o SEP admite uma única solução, e portanto  $\sqrt{r^2 - 1} = 0$ , e logo  $r = 1$ . Para esse caso, a tensão na barra 2 é dada por (7).

$$|\dot{V}_2| = \sqrt{\frac{|\dot{S}_2|}{|\dot{Y}_{22}|}} \quad (7)$$

Dividindo (7) por  $|\dot{V}_2|$ , obtemos a expressão matemática do L-index mostrada em (8).

$$L - index = \left| \frac{\dot{S}_2^*}{\dot{Y}_{22}\dot{V}_2^2} \right| = \left| \frac{\dot{V}_2^*\dot{I}_2}{\dot{Y}_{22}\dot{V}_2^2} \right| = \left| \frac{\dot{I}_2}{\dot{Y}_{22}\dot{V}_2} \right| \quad (8)$$

O L-index assume o valor 1 no ponto de bifurcação, o índice também pode ser calculado por (9).

$$L - index = \left| 1 + \frac{\dot{V}_0}{\dot{V}_2} \right| \quad (9)$$

O L-index pode ser estendido para um sistema de n-barras. Entretanto nesta extensão são feitas aproximações. Estas aproximações, como veremos a seguir, levam a avaliações erradas da margem de estabilidade de tensão. A equação do L-index para n-barras é desenvolvida a partir da matriz admitância de acordo com (10), sendo G barras de geração e L barras de carga.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_G \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{GG} & \dot{Y}_{GL} \\ \dot{Y}_{LG} & \dot{Y}_{LL} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_G \\ \dot{V}_L \end{bmatrix} \quad (10)$$

Manipulando a equação (10), chegamos em (11).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_G \\ \dot{V}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{GG} - \dot{Y}_{LG} \dot{Y}_{LL}^{-1} & \dot{Y}_{GL} \dot{Y}_{LL}^{-1} \\ -\dot{Y}_{LG} \dot{Y}_{LL}^{-1} & \dot{Y}_{LL}^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_G \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} \quad (11)$$

Portanto, a tensão na carga j pode ser calculada a partir de (12), sendo que  $\dot{Z}_{LL} = \dot{Y}_{LL}^{-1}$  e  $\dot{F}_{LG} = -\dot{Y}_{LG} \dot{Z}_{LL}$ .

$$\dot{V}_{Lj} = \sum_{i \in G} \dot{F}_{ji} \dot{V}_i + \sum_{i \in L} \dot{Z}_{ji} \dot{I}_i \quad (12)$$

De acordo com o autor Kessel and Glavitsch (1986), o termo  $\sum_{i \in L} \dot{Z}_{ji} \dot{I}_i$  pode ser aproximado e o L-index para a carga j é calculado por (13), de forma similar à (9).

$$L - index_j = \left| 1 + \frac{\dot{V}_{0j}}{\dot{V}_j} \right| \quad (13)$$

onde  $\dot{V}_{0j} = \sum_{i \in G} \dot{F}_{ji} \dot{V}_i$ .

Mais informações sobre o L-index podem ser encontradas na referência Kessel and Glavitsch (1986). Este índice foi empregado em Momoh et al. (2008) para a avaliação de estabilidade utilizando PMUs.

## 2.2 P-index

Proposto por Kamel and Karrar (2018), o P-index pode estimar a distância até o ponto de colapso e a quantidade de carga a ser eliminada. A descrição deste índice é demonstrada logo a seguir.

Para uma barra de carga com potência  $S = P_L + jQ_L$  e tensão V, a admitância equivalente da carga é dada por (14).

$$G_L = \frac{P_L}{V^2}, \quad B_L = \frac{Q_L}{V^2} \quad (14)$$

Quando ocorre uma mudança no valor da carga  $\Delta G_L$ , a tensão também é alterada ( $\Delta V$ ) no barramento onde esta conectada a carga, com isso o valor da tensão no barramento será  $(V + \Delta V)$ . Portanto, o valor da potência ativa incrementada é mostrada em (15).

$$\begin{aligned} \Delta P_L &= (V + \Delta V)^2 (G_L + \Delta G_L) - V^2 G_L \\ &= (V + \Delta V)^2 \Delta G_L + (2V + \Delta V) G_L \Delta V \end{aligned} \quad (15)$$

No limite de estabilidade de tensão o termo  $\Delta P_L$  se anula, pois não há acréscimo de potência na barra no ponto de máximo carregamento da curva PV do fluxo de carga continuado. Fazendo  $\Delta P_L = 0$  em (15), obtém-se o índice P-index mostrado em (16).

$$P - index = -\frac{(2V + \Delta V) G_L}{(V + \Delta V)^2} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta G_L} \quad (16)$$

No caso limite, ou seja, quando  $\Delta G_L, \Delta V \rightarrow 0$ .

$$P - index = -\frac{2G_L}{V} \frac{dV}{dG_L} \quad (17)$$

A derivada  $dV/dG_L$  pode ser expressa em termos da sensibilidade de tensão do sistema como em (18).

$$\frac{dV}{dG_L} = \frac{dV}{dP_L} \frac{dP_L}{dG_L} \quad (18)$$

Sabe-se que  $P_L = V^2 G_L$ , logo:

$$\begin{aligned} dP_L &= V^2 dG_L + 2V G_L dV \\ \frac{dP_L}{dG_L} &= V^2 + 2V G_L \frac{dV}{dG_L} \end{aligned} \quad (19)$$

Substituindo (19) em (18), obtém-se:

$$\frac{dV}{dG_L} = \frac{dV}{dP_L} \left[ V^2 + 2V G_L \frac{dV}{dG_L} \right] \quad (20)$$

Após manipulações em (20), obtém-se (21).

$$\frac{dV}{dG_L} = \frac{V^2 \frac{dV}{dP_L}}{1 - 2V G_L \frac{dV}{dP_L}} \quad (21)$$

Substituindo (21) em (17), tem-se:

$$P - index = -\frac{2V G_L \frac{dV}{dP_L}}{1 - 2V G_L \frac{dV}{dP_L}} \quad (22)$$

Ainda, a equação (22) pode ser escrita em termos da potência ativa conforme mostra (23).

$$P - index = -\frac{2 \frac{P_L}{V} \frac{dV}{dP_L}}{1 - 2 \frac{P_L}{V} \frac{dV}{dP_L}} \quad (23)$$

O P-index tem o valor teórico de 1 no limite de estabilidade quando  $dV/dP_L \rightarrow \infty$ . Este índice pode ser facilmente obtido a partir de medidas de PMU, entretanto ele falha no sentido de que apenas variações em  $\Delta G_L$  são consideradas no desenvolvimento do índice.

Para calcular o P-index para uma carga j em um sistema de n barras, devemos encontrar o valor de  $dV_j/dP_{Lj}$  calculado a partir da matriz jacobiana do sistema mostrado em (24).

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_L \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} \quad (24)$$

Para a barra j, o valor de  $dV_j/dP_{Lj}$  é mostrado em (25).

$$\frac{dV_j}{dP_j} = \sum_{i \in L \text{ e } G} m_{ji} \alpha_{ji} + \sum_{i \in L} l_{ji} \alpha_{ji} \beta_i \quad (25)$$

Onde,  $\alpha_{ji} = \Delta P_{Li} / \Delta P_{Lj}$  e  $\beta_i = \Delta Q_{Li} / \Delta P_{Li}$ . O P-index para o barramento de carga j de um sistema de n barras é mostrado em (26).

$$P - index_j = - \frac{2 \frac{P_{Lj}}{V_j} \frac{dV_j}{dP_{Lj}}}{1 - 2 \frac{P_{Lj}}{V_j} \frac{dV_j}{dP_{Lj}}} \quad (26)$$

Mais informações sobre o índice podem ser encontradas na referência Kamel and Karrar (2018).

### 2.3 Line Stability Index (LSI)

Proposto por Moghavvemi (1997), o LSI é utilizado para verificar a estabilidade de um SEP a partir de cada linha de transmissão segundo os autores, para que o sistema esteja estável, o índice deverá permanecer menor que 1. O desenvolvimento do índice é mostrado a seguir a partir da Figura 1, desconsiderando as admitâncias shunt. Sabe-se que a potência e a corrente elétrica da barra 2 são dadas por (27) e (28).

$$\dot{S}_2 = \dot{V}_2 \dot{I}_2^* \quad (27)$$

$$\dot{I}_{12} = \left( \frac{|V_1| \angle \delta_1 - |V_2| \angle \delta_2}{|Z| \angle \theta} \right) \quad (28)$$

Sabe-se que  $\dot{I}_2 = \dot{I}_{12}$ , portanto substituindo (28) em (27) temos que:

$$\dot{S}_2 = \dot{V}_2 \left( \frac{|V_1| \angle \delta_1 - |V_2| \angle \delta_2}{|Z| \angle \theta} \right)^* \quad (29)$$

Desenvolvendo (29) a potência reativa da barra 2 é mostrada em (30).

$$Q_2 = \frac{|V_1| |V_2|}{|Z|} \sin(\theta - \delta_1 - \delta_2) - \frac{|V_2|^2}{|Z|} \sin \theta \quad (30)$$

Deixando (30) em formato de uma equação do segundo grau e considerando que  $\delta = \delta_1 - \delta_2$ , chegamos em (31).

$$|V_2|^2 \sin \theta - |V_1| |V_2| \sin(\theta - \delta) + Q_2 |Z| = 0 \quad (31)$$

Aplicando a Fórmula de Bhaskara temos que:

$$|V_2| = \frac{|V_1| \sin(\theta - \delta) \pm \sqrt{(|V_1| \sin(\theta - \delta))^2 - 4Q_2 |Z| \sin \theta}}{2 \sin \theta} \quad (32)$$

Ocorre o colapso de tensão no SEP quando o termo dentro da raiz quadrada de (32) é menor ou igual a zero, portanto a partir desse termo é desenvolvido o índice mostrado em (33).

$$LSI = \frac{4Q_2 X}{[|V_1| \sin(\theta - \delta)]^2} \quad (33)$$

Mais informações sobre o índice LSI podem ser encontradas na referência Moghavvemi (1997).

### 2.4 Fast Voltage Stability Index (FVSI)

Musirin and Rahman (2002) propuseram um índice para avaliação rápida da estabilidade de tensão em SEP, derivado do LSI, que não requer a medida da diferença angular. O desenvolvimento da equação do FVSI é obtida em (34), a partir de (33) e de que  $\sin(A - B) = \sin A \cos B - \sin B \cos A$ .

$$FVSI = \frac{4Q_2 X}{[|V_1| (\sin \theta \cos \delta - \sin \delta \cos \theta)]^2} \quad (34)$$

A diferença angular ( $\delta_1 - \delta_2$ ) entre duas barras normalmente é próxima de zero, portanto considerando a aproximação  $\delta \approx 0$  e  $\sin \theta = X/Z$ , o FVSI é mostrado em (35).

$$FVSI = \frac{4Q_2 |Z|^2}{|V_1|^2 X} \quad (35)$$

## 3. METODOLOGIA

Com o objetivo de avaliar os índices mostrados na Seção 2, um sistema acadêmico de 2 barras, igual ao da Figura 1, com  $Z = 0,01 + j0,20(p.u.)$ ,  $E = V = 1,00p.u.$  e uma carga  $S = 80 + j60(MVA)$  sem as admitâncias shunt, e o sistema IEEE 14 barras (Washington (1993)) serão utilizados. Foram simulados 3 cenários diferentes de crescimento de carga: o primeiro mantendo o Fator de Potência (FP) constante, o segundo aumentando apenas a potência reativa e o último caso mantendo fixo a condutância da carga e alterando somente a susceptância.

Para avaliar os índices mostrados no capítulo 2, foi utilizado o *software* Matlab. Para realizar o fluxo continuado foi utilizado o Vetor Tangente como passo previsor e a solução do fluxo de potência como o passo corretor (De Souza et al. (1997)). Para realizar a simulação dos dois sistemas, não foram considerados os limites da potência reativa nas barras PVs e o tap dos transformadores foi fixado.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Sistema Acadêmico de 2 Barras

Na Figura 2, a curva PV, os índices P-index, L-index, LSI e FVSI, considerando um aumento de carga com FP constante, são mostrados.

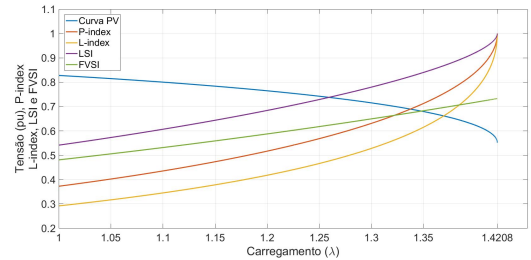


Figura 2. Curva PV, P-index, L-index, LSI e FVSI com aumento de carga com FP constante

Nota-se que o P-index, L-index e o LSI atingiram o valor 1 quando o sistema atinge o PMC. Como FVSI não utiliza

a diferença angular entre as barras para realizar o cálculo do seu índice, o mesmo não irá atingir o valor 1 no PMC.

Para a Figura 3, considerou-se um aumento de carga apenas na potência reativa da carga na barra 2.

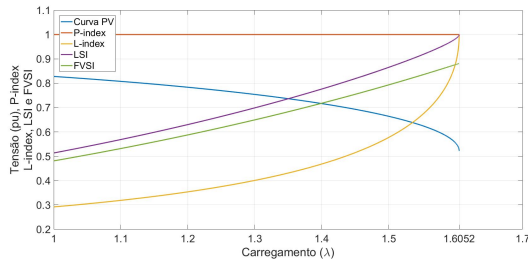


Figura 3. Curva PV, P-index, L-index, LSI e FVSI com aumento de carga apenas na potência reativa

Nota-se que o P-index, para esse caso, assumiu o valor de 1 desde o início, ou seja, para o primeiro aumento o índice nos informou erroneamente que o sistema está no PMC. O P-index avalia apenas a variação da potência ativa da carga e quando esta não varia, o mesmo não apresenta um resultado satisfatório. O L-index e o LSI como esperado, atingiram 1 no PMC. Já FVSI assumiu um valor bem próximo a 1.

Para o último caso, a condutância da carga foi fixada e alteramos apenas a susceptância. Como é possível notar na equação (16), o índice P-index assumiu o valor infinito, pois  $\Delta G_L = 0$ , mostrando que este índice não é recomendado para análise da estabilidade de tensão. Na Figura 4, mostra-se o resultado dos outros índices.

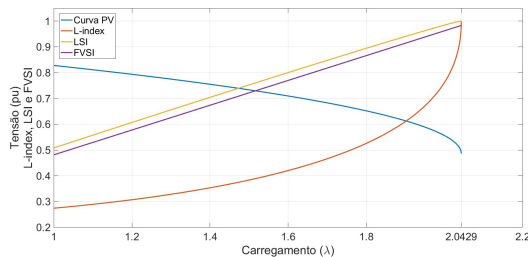


Figura 4. Curva PV, L-index, LSI e FVSI deixando a condutância fixa e aumentando somente a susceptância da carga

Como é possível notar na Figura 4, o LSI e o L-index novamente assumiram o valor 1 no PMC e como o FVSI é uma aproximação do LSI, o mesmo apresentou um valor próximo de 1.

#### 4.2 Sistema IEEE 14 Barras

O P-index e o L-index avaliam a margem de estabilidade a partir de cada barra de carga e os índices LSI e FVSI monitoram a margem para cada linha de transmissão do sistema. Para o sistema do IEEE 14 barras, os índices P-index e L-index foram calculados para cada barra e os índices LSI e FVSI foram calculados para cada linha de transmissão do sistema. Nas figuras abaixo, apenas a curva destes índices referentes à barra e a linha que possuem

o maior valor do índice é apresentada. Para o primeiro caso de crescimento de carga (FP constante), o P-index da barra 14 é que apresentou o maior valor, já para o L-index foi a barra 5. Para o LSI e o FVSI a linha de transmissão que interliga as barras 4 e 9 foi a que apresentou o maior valor. A Figura 5 mostra esse primeiro caso.

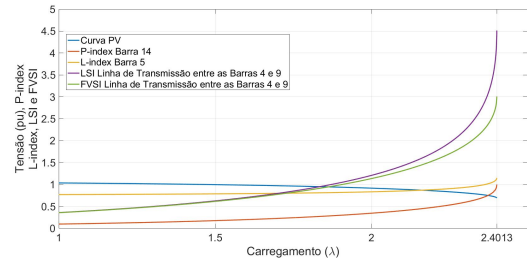


Figura 5. Curva PV, P-index, L-index, LSI e FVSI com aumento de carga com FP constante sistema IEEE 14 barras

Nota-se na Figura 5 que apenas o P-index no PMC assumiu o valor 1, os outros 3 índices assumiram valores maiores de que 1. O LSI e o FVSI foram os que sobressaíram com relação aos outros dois índices, apresentando um valor alto em comparação com o P-index e o L-index. Já o L-index ficou pouco acima de 1, caso parecido com o da Figura 4.

A Figura 6 mostra o comportamento dos índices com relação a um crescimento de carga apenas na parte reativa das cargas.

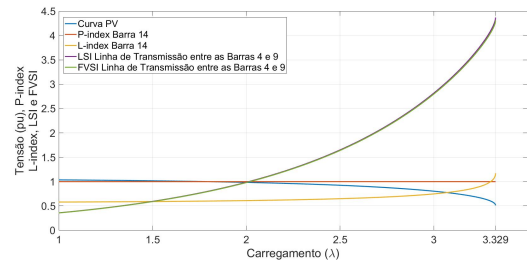


Figura 6. Curva PV, P-index, L-index, LSI e FVSI com aumento de carga apenas na parte reativa do sistema IEEE 14 barras

A partir da Figura 6 percebe-se que o P-index apresentou um resultado parecido com o da Figura 3. Já os outros três índices assumiram valores maiores que 1 mesmo que o sistema não tenha chegado no PMC.

A Figura 7 mostra a resposta dos índices quanto apenas a variação da susceptância das cargas, deixando a condutância fixa. Vale destacar que quando ocorre esse caso de crescimento da carga, como é fixado a parte real da admitância da carga e a tensão diminui, a potência ativa é menor em cada variação da parte imaginária, portanto, o carregamento da carga está relacionado apenas com a potência reativa da carga.

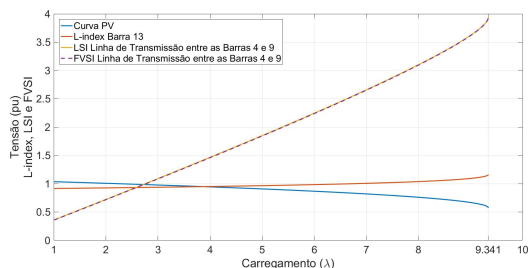


Figura 7. Curva PV, L-index, LSI e FVSI deixando a condutância fixa e aumentando somente a susceptância da carga do sistema IEEE 14 barras

Igual ao caso da Figura 4, o índice P-index assume o valor infinito para todos os crescimentos de carga. Já os outros índices apresentaram valores maiores que 1 quando o sistema atinge o PMC.

## 5. CONCLUSÃO

O presente artigo avaliou 4 diferentes índices, propostos na literatura para avaliar a estabilidade de tensão em SEP.

Observa-se que o P-index apresentou um bom desempenho quando ocorre um crescimento de carga de potência ativa, porém, quando o aumento é apenas na parte reativa ou quando a condutância das cargas variam o índice não funciona.

Para o sistema teste de duas barras, o L-index apresentou um bom resultado, porém como Kessel and Glavitsch (1986) afirmaram, para sistemas maiores o índice possui uma aproximação, portanto, dificilmente o índice irá assumir o valor 1 no PMC.

Os índices LSI e FVSI, avaliaram a margem de estabilidade de tensão a partir das linhas de transmissão. Foi notado, para sistemas maiores que os índices não seguem um padrão para avaliação correta da margem de carregamento.

## REFERÊNCIAS

Corsi, S. and Taranto, G.N. (2008). A real-time voltage instability identification algorithm based on local phasor measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(3), 1271–1279. ISSN:1558-0679.

De Souza, A.C.Z., Cañizares, C.A., and Quintana, V.H. (1997). New techniques to speed up voltage collapse computations using tangent vectors. *IEEE Transactions on Power Systems*, 12, 1380–1387. ISSN:1558-0679.

Diao, R., Sun, K., Vittal, V., O’Keefe, R.J., Richardson, M.R., Bhatt, N., Stradford, D., and Sarawgi, S.K. (2009). Decision tree-based online voltage security assessment using pmu. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(2), 832–839. ISSN: 1558-0679.

Gong, Y., Schulz, N., and Guzmán, A. (2006). Synchrophasor-based real-time voltage stability index. *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*. ISBN: 1-4244-0177-1.

Innah, H. and Hiyama, T. (2011). Neural network method based on pmu data for voltage stability assessment and visualization. *TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference*. ISSN: 2159-3450.

Kamel, M. and Karrar, A.A. (2018). Development and application of a new voltage stability index for on-line monitoring and shedding. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33, No. 2, 1231–1241. ISSN:1558-0679.

Kessel, P. and Glavitsch, H. (1986). Estimating the voltage stability of a power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, PWRD-1, No. 3, 346–354. ISSN:1937-4208.

Khoshkhou, H. and Shahrtash, M. (2013). Fast online dynamic voltage instability prediction and voltage stability classification. *IET Generation, Transmission Distribution*, 8(5), 957–965. ISSN: 1751-8687.

Moghavvemi, M. (1997). New method for indicating voltage stability condition in power system. *Proceedings of IEEE international conference on Power engineering*, 223–221.

Mohammadi, H. and Dehghani, M. (2015). Pmu based voltage security assessment of power systems exploiting principal component analysis and decision trees. *International Journal of Electrical Power Energy Systems - Elsevier*, 64, 655–663. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.07.077>.

Momoh, J.A., Xia, Y., and Boswell, G. (2008). Voltage stability enhancement using phasor measurement unit (pmu) technology. *2008 40th North American Power Symposium*. ISBN: 978-1-4244-4283-6.

Mou, X., Li, W., and Li, Z. (2012). Pmu placement for voltage stability assessment and monitoring of power systems. *2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia*. ISBN: 978-1-4577-2085-7.

Musirin, I. and Rahman, T.K.A. (2002). Novel fast voltage stability index (fvsi) for voltage stability analysis in power transmission system. *Student Conference on Research and Development*. ISBN:0-7803-7565-3.

Nandanwar, S.R. and Warkad, S.B. (2016). Voltage security assessment with application of pmus using decision tree. *2016 8th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*. ISSN: 2472-7555.

Polster, S., Renner, H., Duong, D.T., and Uhlen, K. (2017). Voltage stability monitoring using a modified thevenin impedance. *2017 IEEE Manchester PowerTech*. ISBN: 978-1-5090-4237-1.

Shah, H. and Verma, K. (2016). Pmu-ann based approach for real time voltage stability monitoring. *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*. ISBN: 978-1-5090-0128-6.

Su, H.Y. and Liu, C.W. (2016). Estimating the voltage stability margin using pmu measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(4), 3221–3229. ISSN: 1558-0679.

Washington, U.o. (1993). Power systems test case archive. URL <https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/>.

Zhou, D.Q., Annakkagem, U.D., and Rajapakse, A.D. (2010). Online monitoring of voltage stability margin using an artificial neural network. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(3), 1566–1574. ISSN: 1558-0679.