

METODOLOGIA UNIFICADA PARA A DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE SEGURANÇA DO SISTEMA DE POTÊNCIA DEVIDO A BIFURCAÇÕES

MURILO EDUARDO CASTEROBA BENTO*, RODRIGO ANDRADE RAMOS*

**Avenida Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
Universidade de São Paulo - USP
São Carlos, SP, Brasil*

Emails: murilocasteroba@gmail.com, rodrigo.ramos@ieee.org

Abstract— This paper presents a methodology to identify a power system stability margin in the security region due to the Hopf (HB) and Saddle-Node (SNB) Bifurcations. The security region due to the HB is the minimum damping ratio of 5% for all eigenvalues of the power system linear model and the security region due to the SNB is the 96% of the load level of the BSN operation point. The proposed methodology is based on linear models. Pre-conditioning of the initial conditions of the variables was used in order to improve the convergence of the proposed method. Besides, parallel computing and a method to handle the sparsity of the linear model were used to improve the convergence time. The proposed methodology was applied in the IEEE 39 bus system considering the base case and the N-1 contingency criterion of transmission line disconnection.

Keywords— Small-Signal Stability, Voltage Stability, Stability Margin, Direct Methods, Dynamic Security Assessment.

Resumo— Este artigo apresenta uma metodologia para identificar a margem de estabilidade do sistema na região de segurança devido às bifurcações de Hopf (BH) e Sela-Nó (BSN). A região de segurança devido a BH corresponde ao limite de amortecimento de 5% para todos os autovalores do modelo linear do sistema de potência e a margem de segurança devido a BSN corresponde a 96% no nível de carga da condição onde ocorre a BSN. A metodologia proposta é baseada em modelos lineares. Pré-condicionamento das condições iniciais das variáveis foi utilizado a fim de melhorar a convergência do algoritmo. Além disso, computação paralela e uma abordagem que lida com a esparsidade do modelo linear foram utilizados para melhorar o tempo de convergência. A metodologia proposta foi aplicada no sistema IEEE 39 barras considerando o caso base e o critério N-1 de desconexão de linhas de transmissão.

Palavras-chave— Estabilidade a Pequenos Sinais, Estabilidade de Tensão, Margem de Estabilidade, Métodos Diretos, Avaliação da Segurança Dinâmica.

1 Introdução

A expansão dos sistemas de potência interconectados exige uma infraestrutura com ferramentas e sistemas de segurança mais avançados que podem ser utilizados em operações em tempo real a fim de melhorar a segurança do sistema (Li et al., 2010). É de conhecimento que em estudos de estabilidade, incrementos de carga sucessivos podem levar os sistemas de potência a três bifurcações locais: Bifurcação Sela-Nó (BSN), Bifurcação Induzida por Limites (BIL) e Bifurcação de Hopf (BH) (Cutsem and Vournas, 1998).

A BSN está relacionada ao desaparecimento súbito do ponto de equilíbrio do sistema para um certo nível de carga, e a BH produz ciclos limites levando o sistema a problemas oscilatórios e possíveis instabilidades antes que a máxima transferência de potência seja atingida. Em estudos baseados em modelos lineares, uma condição necessária para a ocorrência de uma BSN é a presença de um único autovalor puramente nulo, e para a BH, a presença de um único par de autovalores puramente imaginários (Taylor, 1994).

Assim, a fim de garantir a operação segura do sistema de potência, é importante determinar a margem de carga, ou margem de estabilidade,

que é definida como a distância do nível de carga do ponto de operação atual e o nível de carga onde ocorre a primeira bifurcação (BSN ou BH) (Cutsem and Vournas, 1998). Além disso, os métodos precisam ser rápidos devido à complexidade dos sistemas de potência não lineares e o elevado número de contingências que devem ser considerados.

Na literatura, as abordagens para determinar a margem de estabilidade podem ser classificadas em diretas e indiretas. Nos métodos indiretos, o nível de carga do sistema é incrementado em passos pequenos, e assim os autovalores são calculados. Se uma das condições da ocorrência de uma BH ou BSN é satisfeita, a margem de estabilidade é definida. Caso contrário, o nível de carga é incrementado novamente e os autovalores são calculados. A principal preocupação desta abordagem é o elevado esforço computacional exigido para o cálculo do fluxo de potência e dos autovalores do sistema para cada incremento de carga. Além disso, o elevado número de contingências a ser analisado e a dimensão do sistema de potência podem aumentar este esforço computacional.

Os métodos diretos calculam o ponto de bifurcação diretamente sem os sucessivos cálculos de fluxos de potência e autovalores do sistema. Es-

tes métodos já vem sendo utilizados na literatura, mas alguns desafios surgiram como problemas de convergência, formulação incompleta do sistema de potência e condições iniciais longe do ponto de bifurcação.

A maioria das abordagens diretas e indiretas procuram determinar o nível de carga onde o ponto de bifurcação ocorre. No entanto, para uma operação em tempo real, é desejável uma margem de segurança devido a BH e BSN. Em avaliação de segurança dinâmica é altamente desejável determinar regiões limite onde o sistema pode operar (Datta and Vittal, 2017). A fim de evitar a BSN, o Operador Nacional do Sistema (ONS) recomenda que o sistema de potência opere a 96% do nível de carga onde esta bifurcação ocorre (ONS, Procedimentos de Rede, 2010). Em estudos de estabilidade a pequenos sinais, um amortecimento mínimo de 5% para todos os autovalores do modelo linear é recomendado para uma operação satisfatória (Gomes et al., 2003). Assim, o limite de 5% de amortecimento dos autovalores poder ser considerado como uma margem de segurança devido a BH.

Uma metodologia para identificar a BH foi proposta em (Oliveira et al., 2010). Porém, esta abordagem não considera o critério de 5% de amortecimento para todos os autovalores do modelo linear. Além disso, a metodologia não considera uma formulação para se obter a BSN e foi aplicada somente para ponto nominal de operação do sistema. A fim de identificar qual nível de carga onde o critério de amortecimento de 5% é alcançado, este artigo utiliza uma formulação de matriz aumentada baseada no critério de posicionamento de polos numa região do plano complexo presente em (Chilali and Gahinet, 1996) e comumente utilizada para projeto de controladores de amortecimento.

Este artigo propõe um algoritmo baseado em métodos diretos a fim de determinar a margem de segurança devido a BH e BSN. Diferente de (Oliveira et al., 2010), o algoritmo proposto irá encontrar a margem de segurança para uma operação em tempo real do sistema e considerará dois tipos de bifurcação. Além disso, uma lista de contingências, desconexão de linhas de transmissão, foram consideradas no algoritmo e o resultado é uma lista ordenada pelos menores valores da margem de segurança. Com o objetivo de melhorar a convergência do algoritmo, um pré-condicionamento das condições iniciais das variáveis do sistema foi utilizado e para melhorar o tempo de convergência foram utilizados computação paralela e uma ferramenta que lida com esparsidade de matrizes. A metodologia proposta foi aplicada no sistema IEEE 39 barras (Canizares et al., 2017).

Assim, as contribuições do artigo podem ser resumidas como

- Apresentar uma metodologia unificada que considere tanto Bifurcação Sela-Nó como a Bifurcação de Hopf;
- Método unificado que determina as margens de segurança para ambas as bifurcações, onde a margem de segurança da BH é o nível de carga onde os autovalores do modelo linear atingem o limite de 5% e a margem de segurança da BSN é o nível de carga a 96% do nível de carga onde ocorre a BSN;
- O método proposto é baseado em um modelo algébrico-diferencial do sistema e depende de uma direção de crescimento de carga. Nesta pesquisa, esta direção de crescimento de carga baseia-se em manter o fator de potência das cargas constante, comumente utilizada em estudos de estabilidade de tensão;
- Emprego de um pré-condicionamento das condições iniciais das variáveis do sistema para melhorar a convergência do algoritmo e computação paralela e uma ferramenta que lida com esparsidade de matrizes para melhoria do tempo de convergência da metodologia.

Este artigo é organizado como se segue: Seção 2 apresenta uma revisão teórica de BSN e BH, Seção 3 apresenta a metodologia proposta para identificar a margem de segurança dinâmica, Seção 4 apresenta a aplicação da metodologia proposta e a Seção 5 apresenta as conclusões da pesquisa.

2 Revisão Conceitual de Bifurcações

Seja o sistema algébrico-diferencial do sistema de potência ser definido pelas seguintes equações

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mu) \quad (1)$$

$$\mathbf{0} = g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mu) \quad (2)$$

onde $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estados do sistema, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m$ é o vetor de variáveis algébricas, μ é a parametrização do carregamento do sistema, $f : \mathbb{R}^{n+m+1} \rightarrow \mathbb{R}^n$ e $g : \mathbb{R}^{n+m+1} \rightarrow \mathbb{R}^m$. Se $(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mu_0)$ representa um ponto de equilíbrio de (1)-(2), as condições C1 e C2 são necessárias para a ocorrência de uma BH e as condições C3 e C4 para a BSN (Cutsem and Vournas, 1998).

C1: $D_{\mathbf{x}}f_{\mu_0}(\mathbf{x}_0)$ tem um simples par de autovalores puramente imaginários e não há outros autovalores com parte real nula.

C2: $\frac{d}{d\mu}\{Re[\lambda(\mu)]\} = d \neq 0$.

C3: $D_{\mathbf{x}}f_{\mu_0}(\mathbf{x}_0)$ tem um único autovalor nulo.

C4: $\frac{d}{d\mu}\{Re[\lambda(\mu)]\}|_{\mu=\mu_0} = \frac{d}{d\mu}\{Im[\lambda(\mu)]\}|_{\mu=\mu_0} = 0$.

Condições **C1** e **C2** dizem que para ocorrer uma BH, o modelo linear deve apresentar um único autovalor puramente imaginário, e para

BSN as condições **C3** e **C4** dizem que o modelo linear deve apresentar um único autovalor nulo (Kuznetsov, 2004).

3 Metodologia Proposta

A formulação apresentada a seguir visa obter dois sistemas determinados de equações e variáveis que satisfaçam a condição de ocorrência das BSN e BH.

Nos pontos de BSN e BH ($\mathbf{x} = \mathbf{x}_0, \mathbf{y} = \mathbf{y}_0, \mu = \mu_0$), as seguintes equações de equilíbrio devem ser satisfeitas.

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mu) = \mathbf{0} \quad (3)$$

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mu) = \mathbf{0} \quad (4)$$

Pode-se linearizar as equações (3)-(4) em torno de um ponto de equilíbrio de interesse ($\mathbf{x} = \mathbf{x}_0, \mathbf{y} = \mathbf{y}_0, \mu = \mu_0$), e assim obter

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0, \Delta \mathbf{y} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_0$ e

$$\mathbf{A} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \quad \mathbf{B} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{y}} \quad \mathbf{C} = \frac{\partial g}{\partial \mathbf{x}} \quad \mathbf{D} = \frac{\partial g}{\partial \mathbf{y}} \quad (6)$$

Se λ é um autovalor de \mathbf{A} e \mathbf{v} o respectivo autovetor, então há um vetor \mathbf{w} tal que a seguinte equação é satisfeita

$$\mathbf{J} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{w} \end{bmatrix} = \lambda \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

No ponto de BH, $\lambda = j \cdot \omega_0$ é puramente imaginário. Decompondo os vetores \mathbf{v} e \mathbf{w} em suas partes reais e imaginárias, $\mathbf{v} = \mathbf{v}_R + j\mathbf{v}_I$ e $\mathbf{w} = \mathbf{w}_R + j\mathbf{w}_I$, tem-se

$$\mathbf{J} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}_R \\ \mathbf{w}_R \end{bmatrix} + \omega_0 \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}_I \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (8)$$

$$\mathbf{J} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}_I \\ \mathbf{w}_I \end{bmatrix} - \omega_0 \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}_R \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (9)$$

No ponto de BSN, $\lambda = 0$ é puramente nulo. Decompondo os vetores \mathbf{v} e \mathbf{w} em suas partes reais e imaginárias, $\mathbf{v} = \mathbf{v}_R + j\mathbf{v}_I$ e $\mathbf{w} = \mathbf{w}_R + j\mathbf{w}_I$, tem-se

$$\mathbf{J} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}_R \\ \mathbf{w}_R \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (10)$$

$$\mathbf{J} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}_I \\ \mathbf{w}_I \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (11)$$

As equações (3), (4), (10) e (11) que definem a BSN formam um conjunto de $3(n+m)$ equações e $3(n+m)+1$ variáveis, a saber $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{v}_R, \mathbf{v}_I, \mathbf{w}_R, \mathbf{w}_I$ e μ . As equações que definem a BH, (3),

(4), (8) e (9), tem o mesmo número de equações e uma variável adicional: ω_0 . Assim, uma equação foi adicionada ao conjunto para a se determinar a BSN e duas equações para se determinar a BH. A equação (12) será utilizada em ambos os conjuntos e a equação (13) somente no conjunto de equações que definem a BH.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_R^T & \mathbf{w}_R^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}_I \\ \mathbf{w}_I \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_R^T & \mathbf{w}_R^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}_R \\ \mathbf{w}_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_I^T & \mathbf{w}_I^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}_I \\ \mathbf{w}_I \end{bmatrix} = 1 \quad (13)$$

3.1 Margem de Segurança Dinâmica

Se definirmos $\theta = \arccos(\zeta_0)$, onde ζ_0 é o amortecimento mínimo para todos os autovalores de \mathbf{J} , podemos definir $\bar{\mathbf{J}}$ como (Chilali and Gahinet, 1996; Bento et al., 2015)

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{J}} &= \mathbf{J} \otimes \begin{bmatrix} \sin(\theta) & \cos(\theta) \\ -\cos(\theta) & \sin(\theta) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}\sin(\theta) & \mathbf{J}\cos(\theta) \\ -\mathbf{J}\cos(\theta) & \mathbf{J}\sin(\theta) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

Se \mathbf{J} tem um par de autovalores $\lambda_{1,2} = \sigma \pm i\omega_0$ com amortecimento igual a ζ_0 , então $\bar{\mathbf{J}}$ tem um par de autovalores puramente imaginários dados por $\bar{\lambda}_{1,2} = \pm i\bar{\omega}_0$, onde $\bar{\omega}_0 = \sqrt{\sigma^2 + \omega_0^2}$. Assim, a formulação matemática proposta em (Oliveira et al., 2010) que procura identificar o autovalor da BH poder ser reformulada para a matriz $\bar{\mathbf{J}}$ a fim de encontrar os autovalores $\bar{\lambda}_{1,2}$ com na matriz $\bar{\mathbf{J}}$ corresponde aos autovalores com amortecimento igual a ζ_0 . O objetivo da metodologia proposta agora é identificar a margem de carga para um amortecimento pré-especificado ζ_0 , e esta margem será chamada MSD-BH (margem de segurança dinâmica devido a bifurcação de Hopf). Em estudos de estabilidade a pequenos sinais um amortecimento mínimo de 5% é considerado satisfatório para a operação do sistema e será considerado também nesta pesquisa como margem, ou seja, $\zeta_0 = 0,05$ (Gomes et al., 2003).

Para uma operação em tempo real, também pode-se definir uma margem de segurança devido a BSN (MSD-BSN). Usualmente, no sistema de potência brasileiro, uma margem de estabilidade de tensão de 4% é considerada para a operação em tempo real (ONS, Procedimentos de Rede, 2010). Assim sendo, neste trabalho, pode-se encontrar o nível de carga onde ocorre a BSN e então a margem de segurança dinâmica será definida como MSD-BSN (p.u.) = $0,96 \times \text{SNB}$ (p.u.).

O objetivo é garantir uma margem de segurança devido às duas bifurcações, e então a margem de segurança dinâmica (MSD) do sistema de

potência será definida como $MSD = \min (MSD-BH, MSD-BSN)$.

3.2 Conjunto Completo de Equações

Assim, baseando-se na formulação da matriz aumentada apresentada na subseção 3.1, o conjunto de equações do sistema determinado ($F(\mathbf{s})^{BH} = 0$) que definem a condição necessária para a ocorrência de uma BH pode ser definida como

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mu) = \mathbf{0} \quad (15)$$

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mu) = \mathbf{0} \quad (16)$$

$$\bar{\mathbf{J}} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_R \\ \bar{\mathbf{w}}_R \end{bmatrix} + \bar{\omega}_0 \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_I \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (17)$$

$$\bar{\mathbf{J}} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_I \\ \bar{\mathbf{w}}_I \end{bmatrix} - \bar{\omega}_0 \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_R \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_R^T & \bar{\mathbf{w}}_R^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_I \\ \bar{\mathbf{w}}_I \end{bmatrix} = 0 \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_R^T & \bar{\mathbf{w}}_R^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_R \\ \bar{\mathbf{w}}_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_I^T & \bar{\mathbf{w}}_I^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_I \\ \bar{\mathbf{w}}_I \end{bmatrix} - 1 = 0 \quad (20)$$

e o conjunto completo de equações que define a BSN ($F(\mathbf{s})^{BSN} = 0$) pode ser definido como

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mu) = \mathbf{0} \quad (21)$$

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mu) = \mathbf{0} \quad (22)$$

$$\bar{\mathbf{J}} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_R \\ \bar{\mathbf{w}}_R \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (23)$$

$$\bar{\mathbf{J}} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_I \\ \bar{\mathbf{w}}_I \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_R^T & \bar{\mathbf{w}}_R^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_I \\ \bar{\mathbf{w}}_I \end{bmatrix} = 0 \quad (25)$$

onde o vetor de variáveis a determinar (\mathbf{s}) pode ser definido como

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} & \mathbf{y} & \mu & \bar{\mathbf{v}}_R & \bar{\mathbf{v}}_I & \bar{\mathbf{w}}_R & \bar{\mathbf{w}}_I & \bar{\omega}_0 \end{bmatrix}^T \quad (26)$$

É possível observar que os conjuntos de equações (15)-(20) e (21)-(25) apresentam similaridade entre si, e durante o processo de busca estas equações podem ser resolvidas simultaneamente evitando cálculos redundantes.

3.3 Método de Resolução

O método de resolução empregado para resolver os sistema de determinado apresentado na subseção 3.2 foi o método de Newton-Raphson (Franco, 2006). A fim de fornecer boas condições iniciais para o algoritmo apresentar uma melhoria de convergência, foi aplicado um método de homotopia cuja descrição detalhada está presente em (Ajjarapu, 2007)

Figura 1 apresenta um fluxograma completo do algoritmo proposto para se obter a margem de segurança do sistema de potência e é composto pelas seguintes partes:

- **Dados do Sistema:** leitura dos dados de parâmetros do sistema de potência que não sofrem modificação.
- **Cálculo do Fluxo de Potência:** determinar uma condição de equilíbrio do sistema, e assim determinar valores iniciais para as variáveis do sistema.
- **Cálculo das Condições Iniciais:** utilização de homotopia para determinar condições iniciais para as variáveis dinâmicas do sistema.
- **Formulação de Newton:** formulação das matrizes para a aplicação do método de Newton. Os conjuntos de equações que incluem a matriz aumentada e definem as bifurcações são empregadas nesta formulação.
- **Convergiu ?:** verifica se um dos conjuntos de equações convergiu após a aplicação do método de Newton. Se não houve convergência do método, deve-se calcular novas condições iniciais para as variáveis do sistema determinado. Se houve convergência, o próximo passo é verificar qual conjunto de equações foi satisfeito.
- **Equações da BSN?:** se a convergência do método de Newton ocorreu para o conjunto de equações que definem a BSN, então obtém-se a margem de segurança dinâmica do sistema devido a BSN como 96% do nível de carga (μ) obtido na convergência e finaliza o algoritmo pois já foi encontrado uma bifurcação no sistema de potência. Caso a convergência ocorra para o conjunto de equações que definem a BH, então obtém-se a margem de segurança dinâmica devido a BH como o nível de carregamento (μ) encontrado com a convergência do algoritmo. No entanto, caso isto ocorra, ainda deve-se determinar a margem de segurança devido a BSN.
- **Ambas margens definidas?:** verifica se ambas as margens de segurança foram obtidas caso a MSD-BH tenha sido obtido pri-

meiro. Enquanto não se obter MSD-BSN, o algoritmo continua.

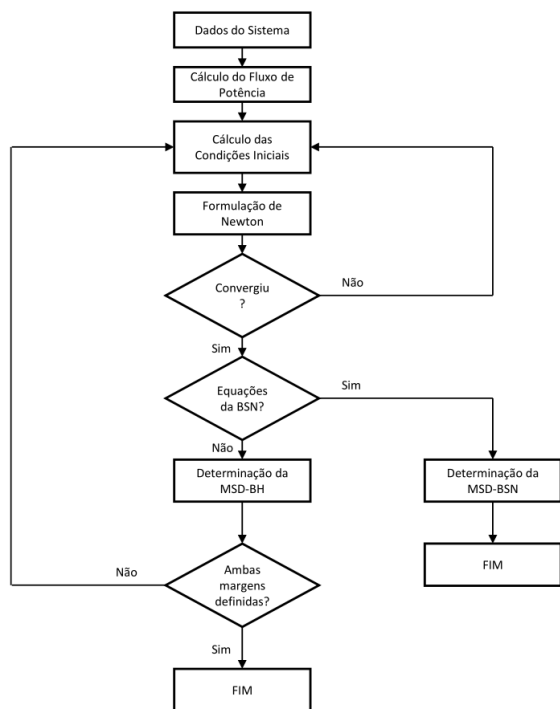


Figura 1: Algoritmo Completo para Determinar a Margem de Segurança.

4 Resultados Numéricos

A metodologia proposta da seção anterior foi aplicada no sistema IEEE New England, Figura 2, composto por 39 barras, 10 geradores síncronos e 35 linhas de transmissão (Canizares et al., 2017). Diferente de (Oliveira et al., 2010), o conjunto algébrico-diferencial empregado nesta pesquisa inclui as variáveis de estado que definem a atuação dos Estabilizadores de Potência. Uma lista de contingências baseada no critério N-1 de desconexão de linhas de transmissão foi aplicada num computador com Intel Xeon 2,40 GHz e 64 GB de RAM. Uma das 35 possíveis desconexões de linhas de transmissão provocou o ilhamento do sistema, e assim esta contingência foi desconsiderada na análise. Para a margem de segurança devido a BH (MSD-BH) foi considerado um amortecimento de 5% e para a margem de segurança devido a BSN (MSD-BSN) foi considerado o nível de carga correspondente a 96% do nível de carga onde ocorre a BSN.

A fim de comparar os resultados da metodologia proposta, o método *Look-Ahead* que é capaz de obter a margem de estabilidade devido somente à Bifurcação Sela-Nó foi empregado (Chiang et al., 1997). Tal abordagem é considerada rápida pois fazendo uso de uma direção de crescimento de carga, dois fluxos de potência con-

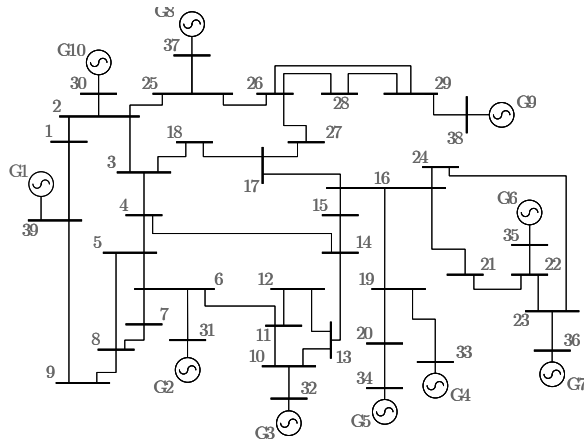


Figura 2: Sistema IEEE 39 barras (New England) (Bento et al., 2018).

vergidos com diferentes níveis de carga do sistema são necessários para a obtenção de uma curva PV do sistema e assim a margem de estabilidade devido à BSN é determinada. No entanto, este método não considera a Bifurcação de Hopf e assim a estimativa da margem de estabilidade pode estar errada.

A Tabela 1 apresenta as margens de segurança encontradas pela metodologia proposta para cada contingência analisada ordenada pelos menores valores de MSD. Os resultados podem ser interpretados da seguinte maneira: se a contingência # 1 (desconexão da linha de transmissão 5 – 6) tem o nível de carga μ_0 para o caso base de operação, então para o nível de carga $1,1244\mu_0$, o modelo linear tem um par de autovalores com 5% de amortecimento e para o nível de carga $1,1891\mu_0$, o sistema está a 96% do nível de carga onde ocorreu uma BSN. Como pode ser observado, as MSD-BH ocorreram antes que as MSD-BSN em todas as contingências, assim como no caso onde não há contingência. Além disso, a Tabela 1 nas duas últimas colunas apresenta os resultados encontrados de margem de estabilidade da BSN na região segurança pelo método *Look-Ahead*. É possível verificar pelos resultados que o método *Look-Ahead* apresentou um tempo de convergência elevado se comparado à metodologia proposta, além de não ser capaz de determinar a margem de segurança devido a bifurcação de Hopf resultando em uma estimativa não confiável da margem de estabilidade do sistema de potência. Os resultados mostram a importância de uma metodologia em identificar ambas as bifurcações, ou mais precisamente ambas as margens de segurança dinâmica para a operação segura do sistema de potência em tempo real.

Tabela 1: Resultado das Simulações para o sistema IEEE 39 barras (New England).

#	Contingência	Metodologia Proposta				Método <i>Look-Ahead</i>		
		MSD-BH	Tempo	MSD-BSN	Tempo	MSD	MSD-BSN	Tempo
		[p.u.]	[ms]	[p.u.]	[ms]	[p.u.]	[p.u.]	[ms]
1	5 – 6	1,1244	0,81	1,1891	0,91	1,1244	1,1891	1050,66
2	9 – 39	1,1244	0,90	1,1944	0,92	1,1244	1,1945	1009,87
3	8 – 9	1,1249	0,88	1,1914	0,99	1,1249	1,1914	1113,36
4	3 – 4	1,1255	0,87	1,1974	0,99	1,1255	1,1975	1063,31
5	14 – 15	1,1268	0,88	1,2045	0,90	1,1268	1,2045	1011,96
6	4 – 5	1,1316	0,85	1,1985	0,96	1,1316	1,1985	1074,66
7	13 – 14	1,1332	0,86	1,1962	0,98	1,1332	1,1962	1037,09
8	6 – 7	1,1352	0,89	1,2040	0,91	1,1352	1,2040	1044,71
9	15 – 16	1,1363	0,87	1,1784	0,98	1,1363	1,1784	1020,54
10	10 – 13	1,1397	0,90	1,2081	0,99	1,1397	1,2081	1011,08
11	5 – 8	1,1415	0,86	1,2198	0,98	1,1415	1,2198	1087,34
12	7 – 8	1,1416	0,85	1,2253	0,97	1,1416	1,2255	1052,23
13	17 – 27	1,1420	0,89	1,2325	0,90	1,1420	1,2325	1008,68
14	21 – 22	1,1435	0,80	1,2228	0,91	1,1435	1,2228	1021,91
15	4 – 14	1,1471	0,87	1,2264	0,98	1,1471	1,2265	1007,78
16	10 – 11	1,1483	0,80	1,2099	0,92	1,1483	1,2099	1032,05
17	Nenhuma	1,1492	0,87	1,2344	0,99	1,1492	1,2344	1067,98
18	23 – 24	1,1493	0,80	1,2308	0,91	1,1493	1,2310	1044,03
19	22 – 23	1,1493	0,84	1,2344	0,96	1,1493	1,2344	1038,24
20	26 – 27	1,1496	0,80	1,2283	0,92	1,1496	1,2284	1060,41
21	6 – 11	1,1500	0,86	1,1998	0,97	1,1500	1,2000	1045,64
22	2 – 3	1,1501	0,87	1,2149	0,98	1,1501	1,2149	1039,00
23	16 – 24	1,1512	0,88	1,2314	0,90	1,1512	1,2315	1025,77
24	26 – 28	1,1517	0,89	1,2332	0,91	1,1517	1,2333	1031,69
25	16 – 21	1,1524	0,89	1,2314	0,90	1,1524	1,2314	1088,36
26	26 – 29	1,1524	0,87	1,2332	0,99	1,1524	1,2332	1054,74
27	28 – 29	1,1536	0,86	1,2308	0,98	1,1536	1,2309	1004,12
28	2 – 25	1,1589	0,80	1,2338	0,91	1,1589	1,2338	1022,81
29	17 – 18	1,1592	0,87	1,2319	0,99	1,1592	1,2319	1050,64
30	3 – 18	1,1595	0,86	1,2325	0,97	1,1595	1,2325	1074,61
31	25 – 26	1,1602	0,87	1,2319	0,98	1,1602	1,2319	1007,07
32	16 – 17	1,1637	0,88	1,2314	0,91	1,1637	1,2315	1034,26
33	1 – 39	1,1666	0,91	1,2319	0,98	1,1666	1,2320	1054,83
34	1 – 2	1,1667	0,89	1,2308	0,90	1,1667	1,2309	1026,35

5 Conclusões

Este artigo apresentou um método unificado para determinar de maneira simultânea as margens de segurança dinâmica devido às bifurcações de Hopf e Sela-Nó. A metodologia proposta está no conjunto de métodos diretos e é capaz de identificar as duas margens de segurança. Pré-condicionamento das condições iniciais das variáveis melhorou a convergência da metodologia proposta. Além disso, a aplicação de computação paralela e uma abordagem que lida com esparsidade de matrizes melhorou o tempo de convergência do método.

Os resultados apontam a importância de uma metodologia rápida capaz de identificar ambas as bifurcações, ou mais precisamente ambas margens de segurança, para uma operação em tempo real do sistema. Além disso, a metodologia proposta permite utilizar uma lista de contingências e fornece uma lista ordenada pelos menores valores das margens de segurança para cada contingência.

O próximo passo da pesquisa é a inclusão de modelos de geradores eólicos na avaliação da segurança dinâmica do sistema.

Agradecimentos

Este trabalho de pesquisa foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 2015/24245-8 e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) através do Programa de Excelência Acadêmica (Proex).

Referências

- Ajjarapu, V. (2007). *Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control*, Power Electronics and Power Systems, Springer US, Boston, MA.
- Bento, M. E. C., Dotta, D., Kuiava, R. and Ramos, R. A. (2018). Design of Coordinated Decentralized Damping Controllers for Power Systems Considering Uncertainties, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* **29**(1): 22–31.
- Bento, M. E. C., Ramos, R. A. and Castoldi, M. F. (2015). Design of Power Systems Stabilizers for distributed synchronous generators using Linear Matrix Inequality solvers, *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, IEEE, pp. 1–5.
- Canizares, C., Fernandes, T., Geraldi, E. and et al. (2017). Benchmark Models for the Analysis and Control of Small-Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **32**(1): 715–722.
- Chiang, H.-D., Wang, C.-S. and Flueck, A. J. (1997). Look-ahead voltage and load margin contingency selection functions for large-scale power systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **12**(1): 173–180.
- Chilali, M. and Gahinet, P. (1996). H_∞ design with pole placement constraints: an LMI approach, *IEEE Transactions on Automatic Control* **41**(3): 358–367.
- Cutsem, T. and Vournas, C. (1998). *Voltage Stability of Electric Power Systems*, Springer US, Boston, MA.
- Datta, S. and Vittal, V. (2017). Operational Risk Metric for Dynamic Security Assessment of Renewable Generation, *IEEE Transactions on Power Systems* **32**(2): 1389–1399.
- Franco, N. M. B. (2006). *Cálculo numérico*, Pearson.
- Gomes, S., Martins, N. and Portela, C. (2003). Computing small-signal stability boundaries for large-scale power systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **18**(2): 747–752.
- Kuznetsov, Y. A. (2004). *Elements of Applied Bifurcation Theory*, Vol. 112 of *Applied Mathematical Sciences*, Springer New York, New York, NY.
- Li, F., Qiao, W., Sun, H., Wan, H., Wang, J., Xia, Y., Xu, Z. and Zhang, P. (2010). Smart Transmission Grid: Vision and Framework, *IEEE Transactions on Smart Grid* **1**(2): 168–177.
- Oliveira, K. R. C., Alberto, L. F. C. and Bretas, N. G. (2010). A fast methodology for stability margin evaluation of power systems due to Hopf bifurcation, *IEEE PES General Meeting*, IEEE, pp. 1–6.
- ONS, Procedimentos de Rede (2010). Submódulo 23.3–diretrizes e critérios para estudos elétricos.
- Taylor, C. W. (1994). *Power system voltage stability*, McGraw-Hill.