DOI: 10.48011/asba.v2i1.1428

# Método Prático para a Estimação da Velocidade Angular de Geradores Síncronos a partir da sintonia dos coeficientes da Equação *Swing*

**Thales Pedro S. Esperança** * **Guilherme Luiz da Cunha** *
**Marcelo Augusto C. Morais** * **Tatiane Cristina C. Fernandes** *

* *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São Carlos, SP, (e-mails: thales.esperanca@estudante.ufscar.br, guilhermeldcunha@gmail.com, marceloacmorais96@gmail.com, tatianefernandes@ufscar.br).*

**Abstract:** In the planning of the Electric Power System operation, accurate information about the dynamic behaviour of a system is essential for its effective control and reliable operation. Specifically, in the small-signal stability analysis, an accurate measurement of synchronous machine dynamic states, such as its rotor speed, is very important to mitigate the detrimental effects of poorly damped electromechanical oscillations in electric power systems. However, obtaining an accurate measure of the rotor speed of the generator connected to the system is not an easy task. To overcome this issue, this work proposes a structure to estimate rotor speed from signals that can be easily measured, such as voltage and current at the high voltage side of the step-up transformer of the power plant. The speed signal will be obtained by adjusting the coefficients of the differential equation that describes the dynamic behavior of this variable, the swing equation For this tuning, an optimization method based on sensitivity analysis and genetic algorithm will be applied in the proposed method. The results obtained on 68 bus system show that the proposed approach is efficient even when the presence of noise sampled signals.

**Resumo**: No planejamento e na operação de um sistema elétrico de potência, informações precisas sobre seu comportamento dinâmico são essenciais para garantir uma operação segura da rede elétrica e o seu controle efetivo. Na avaliação dinâmica a pequenos sinais, analisar e monitorar o comportamento dinâmico de determinadas variáveis do gerador síncrono, tal como a velocidade angular do rotor é relevante para mitigar os efeitos nocivos de um tipo específico de oscilação, as oscilações eletromecânicas, quando mal amortecidas. Contudo obter uma medida precisa da velocidade angular do gerador conectado no sistema não é uma tarefa fácil. Neste contexto, este trabalho propõe um método para estimar a velocidade angular do rotor a partir de sinais que podem ser facilmente medidos na barra de alta tensão da subestação que o gerador está conectado. O sinal de velocidade é obtido pelo ajuste dos coeficientes da equação diferencial que descreve o comportamento dessa variável, a equação *swing*. Para sintonia, um método de otimização baseado em sensibilidade de trajetória e algoritmos genéticos é desenvolvido. Os resultados obtidos no sistema 68 barras, mostram a eficiência da técnica em estimar a velocidade do gerador em análise e os coeficientes de interesse, mesmo com a presença de ruído nos sinais amostrados.

*Keywords:* Refined model; Trajectory sensitivity; Genetic algorithm; Small-signal stability.

*Palavras-chaves:* Aprimoramento de modelo; Sensibilidade de Trajetória; Algoritmos Genéticos; Estabilidade a Pequenas Perturbações.

## 1. INTRODUÇÃO

No cenário atual, garantir que um Sistema Elétrico de Potência (SEP) opere de forma segura, atendendo à demanda das cargas e mantendo os fluxos de potência nas linhas, a magnitude da tensão e ângulos das barras dentro de limites aceitáveis, tem sido uma tarefa cada vez mais desafiadora para os centros de operação de sistemas de transmissão. Além dos sistemas operarem próximos ao seus limites de estabilidade, a inserção crescente de fontes de energia renováveis com características intermitentes e de cargas a base de eletrônica de potência, têm aumentado a complexidade de operação das redes (Zhao et al., 2019).

Com objetivo de reduzir falhas e riscos quanto ao suprimento de energia elétrica aos consumidores, estudos para avaliar a estabilidade da rede e definir ações preventivas e corretivas devem ser continuamente realizados. Cenários

⋆ Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) sob o processo: 2019/08106-9.

distintos de operação da rede, situações de contingência são alguns dos aspectos a serem avaliados para subsidiar as decisões do operador e garantir a operação segura da rede (Kundur et al., 2004; ONS, 2020). Para uma análise adequada, é importante que os modelos matemáticos desse sistema, bem como o comportamento dinâmico de suas variáveis, sejam conhecidos com precisão pelos centros de operação (Zhao et al., 2019).

O desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia envolvendo as unidades de medição fasorial (em inglês, *Phasor Measurement Unit*- PMU), tem incentivado e tornado possível o uso de novas metodologias para monitorar e aumentar a segurança operativa do SEP (Aminifar et al., 2014). Os sistemas de medição fasorial sincronizados (SMFSs) possibilitam a amostragem da forma de onda da resposta de determinados elementos do sistema de maneira sincronizada e com uma alta taxa de amostragem, mesmo que esses dispositivos estejam distantes geograficamente.

Por exemplo, em (Huang et al., 2018), os dados amostrados no ponto de conexão do sistema em análise com um gerador síncrono por uma PMU são utilizados para calibração e estimação dos parâmetros do modelo do gerador, por meio de uma das extensões do Filtro de Kalman, o *Ensemble*. Já em (Zaker et al., 2016), os parâmetros de um modelo de gerador síncrono e de seu sistema de excitação são estimados a partir de sinais de PMUs e da aplicação do algoritmo genético em 4 estágios.

No contexto da análise dinâmica da operação do sistema a pequenos sinais, área de atuação desse projeto, tais informações adquiridas podem ser utilizadas para mitigar os efeitos da presença de oscilações eletromecânicas mal amortecidas em um SEP. Essas oscilações ocorrem quando sistema sofre alguma perturbação, levando ao desequilíbrio entre a potência mecânica de entrada e a potência elétrica de cada gerador. Devido a esse desequilíbrio temporário, que pode resultar num excesso ou *déficit* de energia nas máquinas, os rotores da máquinas conectadas no sistema oscilam um contra os outros, trocando energia por meio das linhas de transmissão (Kundur, 1994).

Para analisar essa oscilações, os estudos de estabilidade a pequenas perturbações são realizados com base na análise de modelos matemáticos a partir de simulações *offline* (Kundur, 1994). Essa análise é realizada por meio da linearização das equações que descrevem o comportamento do sistema, em torno de um ponto de equilíbrio, uma vez que pequenos distúrbios são avaliados. Essencialmente, o estudo é realizado a partir do cálculo dos autovalores e autovetores associados a matriz de estados do modelo linearizado. Contudo, um modelo matemático está sujeito a incertezas, o que pode eventualmente restringir a sua capacidade de representar de forma adequada o comportamento dinâmico do SEP (Zhang et al., 2016).

Uma outra forma de monitorar e identificar os principais componentes dessas oscilações é a partir da aplicação de técnicas de processamento digital de sinais. Informações precisas sobre o comportamento dinâmico associado as variáveis mecânicas do gerador, tais como velocidade e ângulo do rotor, permitem monitorar os parâmetros dessa oscilação e, consequentemente, prever a estabilidade angular do sistema (Zhao et al., 2019). Contudo, uma medição direta (uso de sensores ao longo do eixo) do sinal de velocidade não é uma tarefa simples, além dos dados amostrados não serem de fácil acesso pelos operadores, as medidas estão sujeitas ao ruído e a movimentação lateral do próprio eixo, não se mostrando muitas vezes confiáveis, ao longo da história (Kundur et al., 2003).

Face ao exposto, esse trabalho propõe um método para a estimação dessa variável a partir de grandezas elétricas que podem ser facilmente mensuradas pelas PMUs, para ser aplicado no estudo da estabilidade a pequenas perturbações. No método proposto, os coeficientes da equação de *swing* do modelo linear são ajustados a partir do sinal de erro entre a comparação da resposta do sistema real a um evento registrado com a saída do modelo quando submetido a mesma perturbação. Para que os coeficientes sejam ajustados, resultando em uma sobreposição das respostas, a técnica de sensibilidade de trajetória em conjunto com o algoritmo genético é aplicado neste trabalho.

Diferente de outros trabalhos na área (Fernandes et al., 2016), neste trabalho, os cinco principais coeficientes da equação *swing* são estimados pelo método mesmo quando o ruído proveniente da operação do sistema em condição ambiente está presente nos dados medidos.

O artigo está organizado da seguinte forma. o modelo linearizado adotado no estudo da estabilidade a pequenas perturbações é apresentado na seção 2. Na seção 3, o método proposto e operadores genéticos utilizados são descritos. O sistema teste e os resultados obtidos são apresentados na seção 4. Por fim, as conclusões são detalhadas na seção 5.

## 2. MODELO LINEARIZADO E A EQUAÇÃO *SWING*

Considere que o SEP seja representado pelo seguinte modelo não linear (Kundur, 1994):

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \tag{1}$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \tag{2}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \tag{3}$$

em que $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ é um vetor constituído pelas variáveis de estados do sistema, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^p$ são as entradas de controle, $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^m$ é um vetor de variáveis algébricas, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^q$ é um vetor formado pelas saídas do sistema.

Aplicando a expansão em série de Taylor em (1), (2) e (3) e desprezando os termos de segunda ordem ou superior, é possível obter o modelo linearizado em torno de um ponto de equilíbrio. Supondo um ponto de operação, $\alpha_e = (x_e, z_e, u_e)$, este modelo resultante pode ser representado em espaços de estados a partir das equações (4)-(6) Kundur (1994):

$$\mathbf{\Delta\dot{x}} = \mathbf{J_1\Delta x} + \mathbf{J_2\Delta z} + \mathbf{B_1\Delta u} \tag{4}$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{J_3\Delta x} + \mathbf{J_4\Delta z} + \mathbf{B_2\Delta u} \tag{5}$$

$$\mathbf{\Delta y} = \mathbf{C_1\Delta x} + \mathbf{C_2\Delta z} + \mathbf{D\Delta u} \tag{6}$$

em que $\mathbf{J_1}$ $(n \times n)$, $\mathbf{J_2}$ $(n \times m)$ , $\mathbf{J_3}$ $(m \times n)$ e $\mathbf{J_4}$ $(m \times m)$ formam a matriz de estados aumentada, do sistema. As matrizes $\mathbf{B_1}$ $(n \times p)$ e $\mathbf{B_2}$ $(m \times p)$ são as matrizes de entrada. $\mathbf{C_1}$ $(q \times n)$, $\mathbf{C_2}$ $(q \times m)$ são as matrizes de saída e $\mathbf{D}$ $(q \times p)$ é a matriz de transmissão direta. A representação aumentada é utilizada pois fornece um maior nível de desacoplamento entre as variáveis, quando comparada à

representação compacta, o que simplifica a estimação de parâmetros. O símbolo $\Delta$ representa uma variação, a qual é pequena o suficiente para que o sistema permaneça próximo ao ponto de equilíbrio e, assim, a linearização continue válida.

Na abordagem descentralizada adotada neste trabalho, apenas as equações do gerador de interesse e de sua interface com a rede são necessárias para aplicação da técnica, conforme ilustrado na Figura 1. Portanto, considerando um modelo de $6^a$ ordem de um gerador síncrono, os vetores $\mathbf{x}$, $\mathbf{z}$ e $\mathbf{u}$, são compostos pelos seguintes elementos:

$$\begin{aligned}
\mathbf{\Delta x} &= \left[\Delta E_q^{''}\ \Delta E_d^{''}\ \Delta E_q^{'}\ \Delta E_d^{'}\ \Delta\omega\ \Delta\delta\right]^T, \\
\mathbf{\Delta z} &= \left[\Delta I_d\ \Delta I_q\ \Delta E_{fd}\ \Delta V_{ref}\ \Delta V_{rt}\ \Delta V_{mt}\right]^T, \\
\mathbf{\Delta u} &= \left[\Delta V_{ra}\ \Delta V_{ma}\right]^T
\end{aligned}$$

em que $E_q^{''}$, $E_d^{''}$, $E_q^{'}$, $E_d^{'}$, $\omega$, $\delta$ a tensão subtransitória do eixo em quadratura, tensão subtransitória do eixo direto, tensão transitória do eixo em quadratura, tensão transitória do eixo direto, velocidade angular do rotor e ângulo do rotor, respectivamente. No vetor de variáveis algébricas, tem-se $I_d$, $I_q$, $E_{fd}$, $V_{ref}$, $V_{rt}$ e $V_{mt}$ que representam corrente do eixo direto, corrente em quadratura, tensão de campo, tensão de referência, componente real da tensão na barra do gerador, componente imaginária da tensão na barra do gerador.

Para que o método não fique restrito às medições na barra terminal do gerador, que é de média tensão, utiliza-se as medidas da magnitude e ângulo da barra de alta tensão que interfaceia o gerador analisado, com a rede, para solucionar as equações relativas a $V_{rt}, V_{mt}$. Tais medidas compõe o vetor de entrada $\mathbf{\Delta u}$, em que $V_{ra}$ e $V_{ma}$, são a componente real e imaginária da tensão na barra de alta tensão.

As equações de interface são descritas por (7) e (8):

$$\begin{aligned}
\Delta V_{rt} = &\frac{1}{B_{t-a}}[\frac{I_{d0}}{I_{t0}}sen(\delta_0-\alpha_0)- \\
&\frac{I_{t0}}{I_{q0}(1+(I_{d0}/I_{q0})^2)}cos(\delta_o-\alpha_0)]\Delta I_{dt}+ \\
&\frac{1}{B_{t-a}}[\frac{I_{q0}}{I_{t0}}sen(\delta_0-\alpha_0)+\frac{I_{t0}I_{d0}}{I_{q0}^2(1+(I_{d0}/I_{q0}))^2}cos(\delta_0-\alpha_0)]\Delta I_{qt}+ \\
&\frac{1}{B_{t-a}}[I_{t0}cos(\delta_0-\alpha_0)]\Delta\delta_t-[\frac{G_{t-a}}{B_{t-a}}]\Delta V_{mt}+[\frac{G_{t-a}}{B_{t-a}}]\Delta V_{ma}+\Delta V_{ra}
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
\Delta V_{mt} = &\frac{-1}{B_{t-a}}[\frac{I_{d0}}{I_{t0}}cos(\delta_0-\alpha_0)+ \\
&\frac{I_{t0}}{I_{q0}(1+(I_{d0}/I_{q0})^2)}sen(\delta_o-\alpha_0)]\Delta I_{dt}+ \\
&\frac{-1}{B_{t-a}}[\frac{I_{q0}}{I_{t0}}cos(\delta_0-\alpha_0)+\frac{I_{t0}I_{d0}}{I_{q0}^2(1+(I_{d0}/I_{q0}))^2}sen(\delta_0-\alpha_0)]\Delta I_{qt}+ \\
&\frac{1}{B_{t-a}}[I_{t0}sen(\delta_0-\alpha_0)]\Delta\delta_t+[\frac{G_{t-a}}{B_{t-a}}]\Delta V_{mt}-[\frac{G_{t-a}}{B_{t-a}}]\Delta V_{ra}+\Delta V_{ma}
\end{aligned} \tag{8}$$

Nas expressões acima, $V_{rt}$, $V_{mt}$, $V_{ra}$ e $V_{ma}$ são as componentes real e imaginária, da barra terminal do gerador e da barra de alta tensão, respectivamente. $B_{t-a}$ e $G_{t-a}$ são as susceptância e a condutância na linha $t-a$. O ângulo entre a corrente terminal do gerador e o eixo em quadratura é representado por $\alpha_0$. As variáveis com o subscrito 0 representam valores absolutos, no ponto de equilíbrio.

A equação diferencial da velocidade angular do rotor *swing*, cujo coeficientes serão sintonizados pelo método é definida em sequência:

$$\Delta\dot{\omega} = K_1\Delta\delta + K_2\Delta I_d + K_3\Delta I_q + K_4\Delta V_r + K_5\Delta V_m + K_6\Delta P_m \tag{9}$$

Os coeficientes desta equação são definidos pela linha $iw$ das matrizes $J_1$ e $J_2$:

$$\begin{aligned}
K_1 &= -\frac{I_{d0}V_{t0}}{2H}cos(\delta_0-\theta_0)+\frac{I_{q0}V_{t0}}{2H}sen(\delta_0-\theta_0) \\
K_2 &= -\frac{V_{do}+2R_aI_{d0}}{2H}; \qquad K_3 = -\frac{V_{q0}+2R_aI_{q0}}{2H} \\
K_4 &= -\frac{I_{d0}}{2H}[\frac{V_{r0}}{V_{t0}}sen(\delta_0-\theta_0)+\frac{V_{t0}V_{m0}cos(\delta_0-\theta_0)}{V_{r0}^2(1+(V_{m0}/V_{r0}))^2}] \\
&\quad -\frac{I_{q0}}{2H}[\frac{V_{r0}}{V_{t0}}cos(\delta_0-\theta_0)-\frac{V_{t0}V_{m0}sen(\delta_0-\theta_0)}{V_{r0}^2(1+(V_{m0}/V_{r0}))^2}] \\
K_5 &= -\frac{I_{d0}}{2H}[\frac{V_{m0}}{V_{t0}}sen(\delta_0-\theta_0)+\frac{V_{t0}cos(\delta_0-\theta_0)}{V_{r0}(1+(V_{m0}/V_{r0}))^2}] \\
&\quad -\frac{I_{q0}}{2H}[\frac{V_{m0}}{V_{t0}}cos(\delta_0-\theta_0)-\frac{V_{t0}sen(\delta_0-\theta_0)}{V_{r0}(1+(V_{m0}/V_{r0}))^2}] \\
K_6 &= \frac{1}{2H}
\end{aligned}$$

sendo $R_a$ a resistência do estator, $\theta_0$ o ângulo de tensão da barra do gerador e $H$ a constante de inércia da máquina.

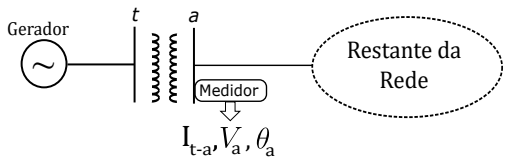


Figura 1. Diagrama esquemático ilustrando o ponto de medição das grandezas da rede elétrica.

## 3. MÉTODO PROPOSTO

Para que o método proposto seja aplicado, duas condições importantes devem ser respeitadas: o modelo linearizado do sistema em análise em torno de um ponto de operação deve ser conhecido e os sinais medidos na subestação em que o gerador em análise está conectado devem estar disponíveis, possibilitando uma abordagem descentralizada.

Essa descentralização proporciona duas características importantes ao método: I) A estimação da velocidade de um gerador em particular é independente do conhecimento do modelo completo do restante do sistema e consequentemente, o método proposto deve lidar apenas com os parâmetros do gerador de interesse e dos seus controladores. II) Pode ser aplicada em qualquer sistema, independente do seu tamanho, uma vez que o método requer apenas as equações do gerador em análise e os sinais medidos.

O primeiro passo para aplicação do método consiste em identificar, no sinal amostrado disponível, quais coeficientes de interesse afetam a resposta dinâmica da variável dessa saída, com esse intuito a técnica de sensibilidade de trajetória é adotada neste trabalho. De posse do conjunto de coeficiente selecionados, o algoritmo genético é aplicado para estimação desses coeficientes. Os detalhes da técnica de sensibilidade de trajetória e do algoritmo genético implementado são apresentados nas subseções a seguir.

### *3.1 Técnica de Sensibilidade da Trajetória à Variação de Parâmetros*

A técnica de sensibilidade de trajetória permite quantificar a influência de um determinado parâmetro na trajetória de uma variável do sistema, por meio do cálculo da função de sensibilidade. Tal função identifica a dependência da solução de equações diferencias com relação à variação de seus parâmetros, a partir de uma aproximação de primeira ordem (Hiskens and Pai, 2002; Huang et al., 2018).

Supondo um vetor de parâmetros $p = [p_1, ..., p_r]$ e que $y(t, p)$ seja o vetor de soluções de equações diferenciais dependente de $p$, a função de sensibilidade $j$-ésima saída do vetor $y$ com relação ao $i$-ésimo elemento do vetor $p$ é calculada por (Hiskens and Pai, 2002):

$$\lambda_{ji}(t, p_{nom}) = \left.\frac{\partial y_j}{\partial p_i}\right|_{p_{nom}} \tag{10}$$

em que $p_{nom}$ refere-se ao valor nominal do vetor $p$.

A aplicação desse método é fundamental no processo de estimação pois permite identificar quais parâmetros tem influência no formato da curva de uma variável de saída de acordo com seu valor de sensibilidade. Uma curva de sensibilidade de baixa amplitude em relação a um parâmetro indica que este não poder ser observado no sinal medido e portanto, dificilmente será estimado.

### *3.2 Algoritmo Genético*

O Algoritmo Genético (AG) é um método de otimização inspirado nos conceitos da Teoria da Evolução de Charles Darwin (Goldberg, 1989). Devido a sua flexibilidade e robustez, os AGs são amplamente utilizados em problemas de busca (Jiacheng and Lei, 2020).

O processo de busca, geração e avaliação de soluções candidatas do AG pode ser compreendido a partir de uma analogia com o processo de evolução natural. As soluções candidatas para resolver um problema são denominadas indivíduos (outras nomenclaturas também são utilizadas, tal como cromossomos). O conjunto de indivíduos formam a população. Em cada iteração do algoritmo, os indivíduos dessa população são avaliados e as soluções com maior aptidão são selecionadas para a reprodução formando uma nova geração. A medida que o algoritmo itera, as soluções mais adequadas tendem a dominar a população (Goldberg, 1989; Jiacheng and Lei, 2020). As principais funções do AG são apresentadas no Algoritmo 1.

As estratégias utilizadas no algoritmo desenvolvido neste trabalho são detalhados em sequência.

*População Inicial:* Cada indivíduo da população é composto pelos cinco coeficientes da equação *swing*, $K_1, ..., K_5$, ou seja, corresponde a um vetor com 5 posições (denominados genes). Os valores de cada gene são sorteados seguindo uma distribuição uniforme e respeitando o espaço de discurso. A representação decimal é adotada na representação dos parâmetros do indivíduo. O coeficiente $K_6$ não é avaliado pelo método pois no sistema teste estudado neste trabalho a variável $\Delta P_m$ é nula.

*Função Objetivo:* Com o objetivo de quantificar o potencial de cada indivíduo dentro da topologia estudada, a função

**Algoritmo 1** Algoritmo Genético

```
//Inicia o contador de tempo
g ← 1
IniciaPopulação(P_g)
//Avalia o valor de fitness dos indivíduos
Avalia(P_g)
//Verifica o critério de parada
while critério de parada não é atingido do
    //Incrementa a geração
    g ← g + 1
    // Seleciona os indivíduos da geração descendente
    P_g ← Seleciona(P_{g-1})
    // Realiza o cruzamento dos pais selecionados
    Cruzamento(P_g)
    // Realiza a mutação sobre a nova população
    Mutação(P_g)
    // Avalia o valor de fitness dos indivíduos
    Avalia(P_g)
end while
```

*fitness* utilizada tem o intuito de minimizar o erro entre a saída medida no sistema real e a obtida pelo sistema simulado. O sinal de saída usado para compor a função de aptidão é o da corrente na linha $I_{t-a}$, que é um sinal facilmente amostrado por um instrumento de medição. A função custo é defina pelo cálculo do erro quadrático médio, em inglês *Mean Squared Error* (MSE).

As restrições do problema são descritas por inequações, que definem o espaço de busca, ou seja, os valores limites dos parâmetros que se deseja estimar, e pelas equações (4)-(6) que descrevem o comportamento dinâmico do gerador isolado, discretizadas. Para discretização foi utilizado método de Euler, em que $N$ é o número total de amostras, $h$ é o intervalo de tempo entre as amostras e $k$ refere-se a $k$-ésima amostra. Neste modelo, o vetor de estados $x_{i,k}$ é representado elemento à elemento. O índice $iw$ refere-se ao estado $\omega$, tornando possível destacar essa variável na descrição da função objetivo e de suas restrições:

$$fo = min\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(\Delta I_{t-ak} - \Delta I_{calc_{t-a}k})^2; \quad k = 1...N$$

$$\Delta x_{i,k+1} = \Delta x_{i,k} + h(\sum_{j=1}^{n}(J_{1,i,j}\Delta x_{j,k}) + \sum_{j=1}^{m}(J_{2,i,j}\Delta z_{j,k}) +$$

$$\sum_{j=1}^{p}(B_{1,i,j}\Delta u_{j,k})); \quad k = 1...N, i = 1...n, i \neq iw$$

$$0 = J_3\Delta x_k + J_4\Delta z_k + B_2\Delta u_k; \quad k = 1...N$$

$$\Delta\omega_k = \Delta x_{iw,k}; \quad k = 1...N$$

$$\Delta\omega_{k+1} = \Delta\omega_k + h(K_1\Delta\delta_k + K_2\Delta I_{d,k} + K_3\Delta I_{q,k} + K_4\Delta V_{rt,k} +$$

$$K_5\Delta V_{mt,k} + K_6\Delta P_{mec,k}); \quad k = 1...N$$

$$\Delta I_{tk} = \frac{I_{q0}}{\sqrt{I_{q0}^2 + I_{d0}^2}}\Delta I_{q,k} + \frac{I_{d0}}{\sqrt{I_{q0}^2 + I_{d0}^2}}\Delta I_{d,k}; \quad k = 1...N$$

$$K_{1min} \leqslant K_1 \leqslant K_{1max}; \quad K_{2min} \leqslant K_2 \leqslant K_{2max};$$

$$K_{3min} \leqslant K_3 \leqslant K_{3max}; \quad K_{4min} \leqslant K_4 \leqslant K_{4max};$$

$$K_{5min} \leqslant K_5 \leqslant K_{5max}$$

No modelo acima, os limites $K_{imin}$ e $K_{imax}$, com $i \in [1, 5]$, foram definidos respeitando as informações obtidas pela análise de sensibilidade de trajetória. Os coeficientes que

resultarem em uma curva de sensibilidade de trajetória de pequena amplitude, terão seu espaço de busca reduzido.

*Seleção e Cruzamento:* O tipo de seleção dos indivíduos empregado foi o da amostragem uniforme estocástica. Neste método, constrói-se um gráfico do tipo "torta" com uma fatia associada a cada cromossomo da população. A área das fatias é proporcional ao valor de aptidão do cromossomo representado por ela. Ao redor da parte externa da "torta" são colocados $n$ ponteiros igualmente espaçados. Os cromossomos apontados pelos ponteiros serão selecionados para cruzamento (Baker, 1987). A Figura 2 exibe a estrutura do método de amostragem uniforme estocástica. No exemplo, apenas o cromossomo $P_5$ não é selecionado, já o $P_7$ é selecionado duas vezes.

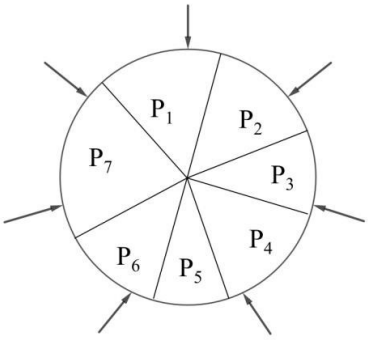


Figura 2. Esquema que representa a estrutura da seleção do tipo amostragem uniforme estocástica.

O operador de cruzamento utilizado foi o uniforme (em inglês é conhecido como *scattered*). Neste tipo de cruzamento, inicialmente, é gerada aleatoriamente uma máscara de bits (vetor de binários). Se o valor sorteado nesta máscara corresponde ao bit um, então, é escolhido um gene da mesma posição do primeiro pai. Por outro lado, caso seja o bit zero, escolhe-se um gene do cromossomo do segundo pai, (Linden, 2008). A Figura 3 exemplifica a operação de um cruzamento uniforme.

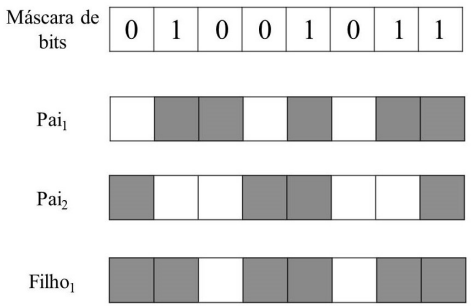


Figura 3. Exemplo de cruzamento uniforme.

Com o propósito de que os indivíduos mais aptos permaneçam na transição de uma geração para outra, o operador genético de elitismo também foi utilizado nesse trabalho. Os melhores indivíduos em uma iteração são preservados para as novas próximas gerações (Linden, 2008). No algoritmo proposto, a taxa de elitismo utilizada foi de 20%.

*Mutação*: A etapa seguinte ao cruzamento de indivíduos é a mutação. Neste estudo, o operador de mutação escolhido foi o adaptativo (em inglês *adaptive feasible*), que é caracterizado pela geração de direções aleatoriamente, mas que se adaptam com o sucesso ou fracasso da última geração. Neste operador, a mutação escolhe uma direção e um comprimento de passo que satisfaçam os limites do espaço de busca (Kumar, 2010).

*Critério de Parada*: O critério de parada é baseado no de número de gerações. Após 150 gerações o algoritmo retorna o indivíduo mais apto.

Os parâmetros utilizados em cada dos operadores desse algoritmo são resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do AG

| **Parâmetro** | **Valor** | **Operador** | **Tipo** |
|---|---|---|---|
| População inicial | 20 | Seleção | Amostragem Uniforme Estocástica |
| Fração de cruzamento | 0.7 | Cruzamento | Uniforme (*scattered*) |
| Número de gerações | 150 | Mutação | Adaptativa (*adaptive feasible*) |
| Elitismo | 0.2 | | |

## 4. TESTES E RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Os resultados obtidos neste trabalho são descritos nesta seção. Inicialmente, o sistema teste é apresentado e um estudo sobre a sensibilidade do sinal de saída com relação aos coeficientes de equação *swing* para um determinado ponto de operação é efetuado.

Os resultados obtidos para testar a eficácia do método são organizados em três conjuntos: I) Simulações sem a presença da variação aleatória de carga; II) Simulações em condição de ruído ambiente; III) Validação.

### *4.1 Análise do Sistema Teste e das Curvas de Sensibilidade de Trajetória*

O sistema teste adotado neste trabalho é composto por 16 geradores e 68 barras, conforme ilustrado na Figura 4. O sistema é formado por 5 regiões geográficas, em que as duas primeiras são equivalentes reduzidos do sistema *New England* (NETS) e *New York* (NYPS). As regiões 3, 4 e 5 são equivalentes de área. Cada gerador é descrito por um modelo de $6^a$ ordem conforme mencionado na seção 2. Os geradores 1 a 12 são equipados com regulador de tensão e estabilizador de potência, cujo modelo e parâmetros são detalhados em (Canizares et al., 2017).

O sistema teste é implementado no *software* ANATEM, o qual permite realizar simulações não lineares no domínio do tempo. Neste trabalho, os dados amostrados nessa simulação, representam a resposta obtida por uma PMU, ou seja, a resposta "real" do sistema. O modelo matemático linearizado do sistema teste (em torno do ponto de operação em estudo) é obtido com auxílio do software PacDyn. Ambos *softwares* são desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas em Engenharia Elétrica (CEPEL) e são de amplo uso no setor energético brasileiro.

Os testes para verificar a eficiência do método proposto são realizados com o objetivo de estimar a velocidade angular do rotor do gerador 16 ($\omega_{16}$), o qual é um equivalente reduzido de uma das áreas vizinhas ao sistema NYPS. As

medidas de magnitude e o ângulo da tensão na barra 18 ($V_{18}, \theta_{18}$) são utilizadas para isolar as equações de interesse do modelo completo, ou seja, a partir dessas duas variáveis os sinais de entrada do modelo descrito pelas equações (4)-(6) são calculados, ($V_{r18}$, $V_{m18}$) . O sinal de saída corresponde a corrente injetada na linha 16-18 ($I_{16-18}$). Para estimular a resposta transitória do sistema teste, um degrau com amplitude de 0.02 p.u. e duração de 530 ms é aplicado na tensão de referência do gerador 9. O passo de integração utilizado é de 1 ms.

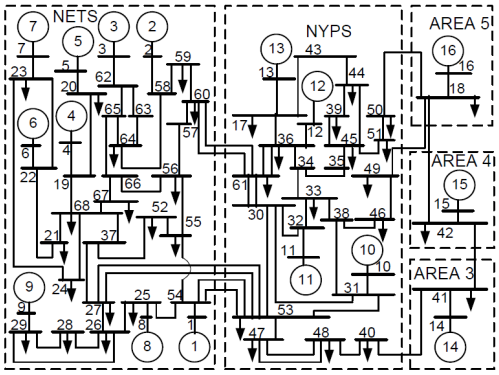


Figura 4. Sistema 68 barras.

As curvas de sensibilidade de $I_{16-18}$ com relação aos coeficientes $K_1, .., K_5$ podem ser observados na Figura 5, levando em conta o ponto de operação e o distúrbio aplicado. Note que os coeficientes $K_2$, $K_3$ são os que possuem maior sensibilidade, ou seja, alterações nesses coeficientes levam a uma maior modificação no formato da curva da corrente na linha. As curvas de sensibilidade de $K_1$ e $K_5$ são similares, portanto, alterações em qualquer um desses coeficientes irão resultar em modificações semelhantes na forma de onda da corrente, o que dificulta a estimação de ambos os coeficientes pelo método.

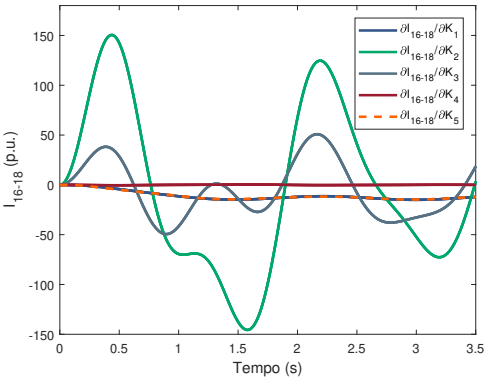


Figura 5. Curvas de sensibilidade de trajetória da Corrente terminal com relação a cada coeficiente de interesse.

### *4.2 Cenário I) Estimação dos Coeficientes em Sinais sem Ruído*

O algoritmo detalhado na subseção 3.2 é aplicado na resposta transitória do sistema teste, em uma janela com duração de 3 segundos no período pós-falta.

O espaço de busca do algoritmo foi definido de acordo com a análise de sensibilidade da Figura 5. As soluções candidatas aos coeficientes $K_1$, $K_2$ e $K_3$ podem assumir valores entre $\pm 20\%$ com relação ao seu respectivo valor nominal. Para contornar a dificuldade apontada pela análise das curvas de sensibilidade, o espaço de busca dos coeficientes $K_4$ e $K_5$ foi limitado. Para esses coeficientes, o espaço de busca é restrito a $\pm 5\%$. A redução do espaço de $K_4$ justifica-se pela menor amplitude de sua curva de sensibilidade, já de $K_5$ é decorrente da sua similaridade com relação a curva de sensibilidade de $K_1$.

A estrutura proposta é aplicada, o indivíduo encontrado pelo AG com menor valor de *fitness* é apresentado na Tabela 2. O valor nominal do coeficiente ($K_{nom}$), o valor estimado para cada coeficiente pelo método ($K_I$), e o desvio do coeficiente em relação ao valor nominal em porcentagem ($\Delta K_I(\%)$), são apresentados nesta Tabela.

Tabela 2. Resultados obtidos no cenário I.

| **Coeficientes** | $K_{nom}$ | V. Estimado $K_I$ | $\Delta K_I(\%)$ |
|---|---|---|---|
| $K_1$ | -1,044e-3 | -1,054e-3 | 1,010 |
| $K_2$ | -5,397e-4 | -5,338e-4 | -1,089 |
| $K_3$ | -9,712e-4 | -9,7951e-4 | 0,8522 |
| $K_4$ | -3,755e-2 | -3,578e-2 | -4,721 |
| $K_5$ | 1,044e-3 | 1,054e-3 | 1,031 |

A velocidade angular do rotor obtida a partir do modelo linearizado ajustado, ou seja, atualizado com coeficientes estimados pelo AG, e a curva de velocidade obtida pelo modelo não linear são comparadas na Figura 6. Observe que as curvas estão aproximadamente sobrepostas, evidenciando a eficiência da técnica, o MSE entre as curvas é de apenas $7,964e{-}15$.

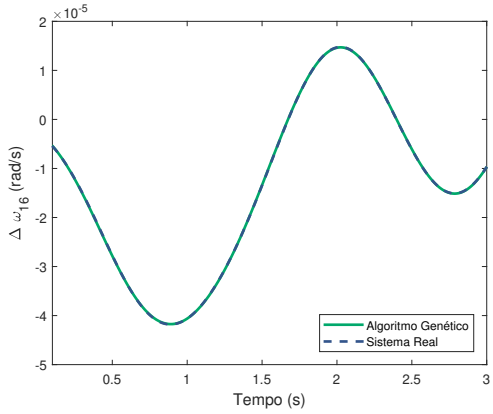


Figura 6. Comparação da resposta da velocidade $\omega_{16}$ obtida pelo sistema real com a fornecida pelo modelo linearizado atualizado com os coeficientes estimados pelo AG, no cenário I.

Com relação a precisão dos coeficientes identificados pelo método proposto, note pela Tabela 2 que $K_1$, $K_2$, $K_3$, $K_4$ foram estimados com precisão, com um desvio em torno de apenas 1%. O coeficiente $K_4$ é o que apresenta o maior desvio porcentual em relação ao seu valor nominal, de aproximadamente $4,8\%$. Tal dificuldade, já era prevista pela análise de sensibilidade.

### *4.3 Cenário II) Estimação dos Coeficientes a partir de sinais ruidosos*

A condição ambiente de operação diária de um SEP é avaliado neste conjunto de resultados. O comportamento similar a um ruído devido à variação aleatória da carga em torno de um ponto de equilíbrio é modelado no programa ANATEM. Com esse propósito uma porcentagem da potência ativa da carga conectada na barra 18 irá variar aleatoriamente, respeitando uma distribuição uniforme. O bloco implementado no programa ANATEM para simular essa variação é o mesmo desenvolvido em (Pataca, 2015). Dois níveis distintos de ruído são computados, a saber: 0.5% e 1%. O comportamento da potência ativa da carga na barra 18 ($P_{18}$) e da corrente $I_{16-18}$ para as duas porcentagens de ruído avaliadas são exibidos na Figura 7.

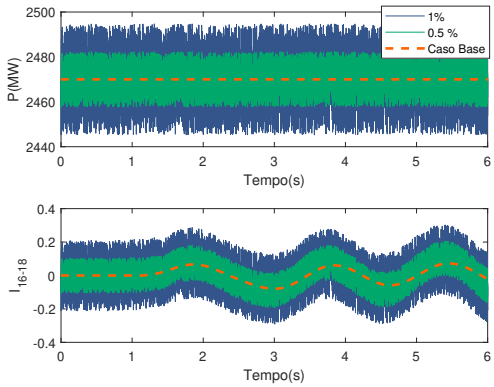


Figura 7. Potência ativa da carga na barra 18 para os diferentes níveis de ruído simulados.

Para cada nível de ruído avaliado, 100 simulações são realizadas no ANATEM (a semente para gerar a sequência de números aleatórios é modificada em cada nova simulação). A janela de análise dos dados e o espaço de busca são os mesmos já utilizados no cenário I. Na Tabela 3, os valores médios dos coeficientes obtidos ($K_{IIM}$) em conjunto com o desvio padrão ($\sigma_K$) para o conjunto de sinais amostrados em cada nível de ruído são exibidos. O módulo da discrepância média em porcentagem entre cada coeficiente e seu valor nominal ($\mid \Delta K_{IIM} \mid$) e o respectivo desvio padrão ($\sigma_{\Delta K}$) também são apresentados na Tabela 3.

Note que o método proposto é capaz de estimar os coeficientes de interesse com eficácia apesar da presença do ruído. Em concordância com o observado pela análise de sensibilidade, a maior precisão é obtida na estimação dos coeficientes $K_2$ e $K_3$ resultando em uma discrepância abaixo de 2%. O coeficiente $K_4$, novamente, apresenta o maior desvio percentual, contudo este é de apenas 3,855%.

A velocidade obtida pelo modelo linearizado atualizado com os valores médios dos coeficientes estimados para o nível de 1% de ruído ($K_{IIM_{1\%}}$) são exibidos na Figura 8. Note pela proximidade entre as curvas, que o modelo resultante representa adequadamente a resposta da velocidade, ou seja, o algoritmo também foi eficiente em estimar os coeficientes de interesse a partir de sinais ruidosos. O MSE com relação ao sinal de velocidade é de $MSE_{\omega_{16}}$= 2,899e-14.

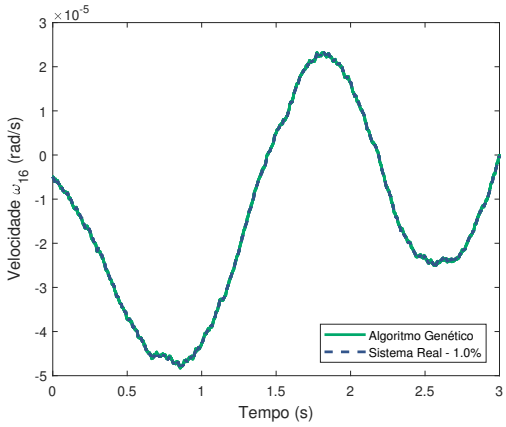


Figura 8. Resposta de $\omega_{16}$ fornecida pelo sistema real e pelo modelo atualizado com os coeficientes estimados pelo AG, em condições ambiente (ruído de 1%).

### *4.4 Validação*

Com o intuito de identificar a qualidade do modelo linearizado atualizado com coeficientes da equação *swing* estimado pelo método proposto, o mesmo deve ser validado. Neste processo, a saída do modelo linearizado resultante deve ser comparada com a fornecida pelo sistema real frente a diferentes perturbações. Duas perturbações são reportadas neste trabalho: 1) Falta trifásica com duração de 5 ms na linha 33-38, 2) Pulso na tensão de referência do AVR conectado no gerador 10, com 20 ms de duração e amplitude de 0.01 p.u. Nas duas faltas, o sistema também está operando em condições ambiente (ruído de 1%).

Na Tabela 4, o índice $MSE_{\omega_{16}}$ obtido em cada uma das condições avaliadas é apresentado. Nessa tabela, $K_I$ corresponde ao conjunto de coeficientes estimados no cenário I. O símbolo $K_{IIM_{1\%}}$ refere-se ao valor médio dos coeficientes estimados utilizando sinais em condição ambiente com 1% de ruído (Cenário II, Tabela 3).

Na Figura 9 é exibida a resposta da velocidade fornecida pelo sistema real em comparação com a obtida pelo modelo linearizado resultante considerando os dois conjuntos de coeficiente estimados, quando o cenário 1 é aplicado. Nas duas condições avaliadas é possível notar a grande proximidade entre as curvas, valiando o modelo resultante.

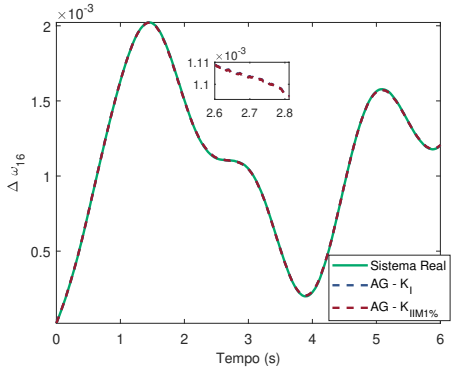


Figura 9. Comparação entre as curvas de saída ($\omega_{16}$) na validação.

Tabela 3. Coeficientes estimados pelo AG a partir do conjunto de sinais com ruído.

| **Ruído** | 0.5% | | 1.0% | |
|---|---|---|---|---|
| **K** | $K_{IIM_{0.5\%}} \pm \sigma_K$ | $\mid \Delta K_{IIM_{0.5\%}} \mid \pm \sigma_{\Delta K}$ | $K_{IIM_{1\%}} \pm \sigma_K$ | $\mid \Delta K_{IIM_{1\%}} \mid \pm \sigma_{\Delta K}$ |
| $K_1$ | -1,057e-3± 4,002e-5 | 3,375 ± 2,182 | -1,055e-3± 3,826e-5 | 3,430 ± 1,694 |
| $K_2$ | -5,367e-4 ± 1,326e-5 | 1,961 ± 1,573 | -5,344e-4± 1,367e-5 | 1,923 ± 1,909 |
| $K_3$ | -9,712e-4± 2,573e-5 | 2,051 ± 1,667 | -9,773e-4± 2,655e-5 | 1,978 ± 1,978 |
| $K_4$ | -3,714e-2 ± 1,537e-3 | 3,920 ± 1,558 | -3,681e-2± 1,367e-2 | 3,855 ± 1,488 |
| $K_5$ | 1,053e-3 ± 3,058e-5 | 2,713 ± 0,139 | 1,056e-3± 3,351e-5 | 3,085 ± 1,549 |

Tabela 4. MSE do sinal de velocidade obtido na validação (janela de 3 s de duração).

| **Coeficientes** | $MSE_{\omega_{16}}$ na Falta 1 | $MSE_{\omega_{16}}$ na Falta 2 |
|---|---|---|
| $K_I$ | 5,171e-12 | 4,195e-14 |
| $K_{IIM_{1\%}}$ | 5,921e-12 | 4,202e-14 |

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um método prático para obter uma representação adequada da velocidade angular do rotor, a partir de sinais amostrados que podem ser facilmente medidos em campo. Nesse método, que utiliza a análise da sensibilidade de trajetória em conjunto com os algoritmos genéticos, o modelo linearizado do sistema é submetido a um procedimento ajuste. Os coeficientes da equação *swing* são sintonizados, resultando em um modelo linear refinado capaz de representar adequadamente o comportamento dinâmico da velocidade angular do rotor mesmo quando sinais ruidosos são utilizados e outras pequenas perturbações são aplicadas a esse sistema.

Os resultados obtidos no sistema 68 barras mostram a eficácia do método, que é capaz de sintonizar os coeficientes de interesse mesmo com a presença de ruído no sinal medido. De acordo com a análise de sensibilidade, os coeficientes $K_2$ e $K_3$ são estimados com precisão, mesmo com a presença do ruído. Perspectivas futuras desse trabalho envolvem investigar se é possível melhorar a precisão de estimativa do coeficiente $K_4$ considerando novos tipos de distúrbios. Testes relacionados com a análise de sensibilidade em outros tipos de distúrbios também podem ser avaliados. Além disso, deve-se mitigar a influência do passo de integração utilizado nos resultados obtidos, verificando quais os valores mínimos que implicam em erros aceitáveis.

## REFERÊNCIAS


Aminifar, F., Fotuhi-Firuzabad, M., Safdarian, A., Davoudi, A., and Shahidehpour, M. (2014). Synchrophasor measurement technology in power systems: Panorama and state-of-the-art. *IEEE Access*, 2, 1607–1628.

Baker, J.E. (1987). Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm.

Canizares, C., Fernandes, T., Geraldi, E., Gerin-Lajoie, L., Gibbard, M., Chair), I.H.T.P., Kersulis, J., Kuiava, R., Lima, L., DeMarco, F., Martins, N., Pal, B.C., Piardi, A., Chair), R.R.T., dos Santos, J., Silva, D., Singh, A.K., Tamimi, B., and Vowles, D. (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.

Fernandes, T., Geraldi Jr, E., Borges, R., and Ramos, R. (2016). Uma Abordagem para o Aprimoramento de Modelos Lineares na Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações Em Sistemas de Potência . In *Congresso Brasileiro de Automática CBA*, 1–6.

Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.* Addison-Wesley, Massachusetts.

Hiskens, I. and Pai, M.A. (2002). Power system applications of trajectory sensitivities. In *Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE*, 1200–1205 vol.2.

Huang, R., Diao, R., Li, Y., Sanchez-Gasca, J., Huang, Z., Thomas, B., Etingov, P., Kincic, S., Wang, S., Fan, R., Matthews, G., Kosterev, D., Yang, S., and Zhao, J. (2018). Calibrating parameters of power system stability models using advanced ensemble kalman filter. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(3), 2895–2905.

Jiacheng, L. and Lei, L. (2020). A Hybrid Genetic Algorithm Based on Information Entropy and Game Theory. *IEEE Access*, 8, 36602–36611.

Kumar, R. (2010). System and method for the use of an adaptive mutation operator in genetic algorithms.

Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control.* McGraw-Hill, New York, NY.

Kundur, P., Berube, G.R., Hajagos, L.M., and Beaulieu, R. (2003). Practical utility experience with and effective use of power system stabilizers. In *Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE*, 1777–1785 Vol. 3.

Kundur, P., Paserba, J., Ajjarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T., and Vittal, V. (2004). Definition and classification of power system stability ieee/cigre joint task force on stability terms and definitions. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 19(3), 1387 – 1401.

Linden, R. (2008). *Algoritmos Genéticos.* BRASPORT, Rio de Janeiro, 2ª ed. edition.

ONS (2020). Planejamento e programação da operação elétrica : visão geral. 1–8.

Pataca, L. (2015). *Identificação Modal a partir de Dados Ambiente em Sistemas com Geração Síncrona Distribuída.* Dissertação, Universidade de São Paulo.

Zaker, B., Gharehpetian, G.B., Karrari, M., and Moaddabi, N. (2016). Simultaneous Parameter Identification of Synchronous Generator and Excitation System Using Online Measurements. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(3), 1230–1238. doi:10.1109/TSG.2015.2478971.

Zhang, J., Chung, C.Y., Wang, Z., and Zheng, X. (2016). Instantaneous electromechanical dynamics monitoring in smart transmission grid. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12(2), 844–852.

Zhao, J., Gomez-Exposito, A., Netto, M., Mili, L., Abur, A., Terzija, V., Kamwa, I., Pal, B.C., Singh, A.K., Qi, J., Huang, Z., and Meliopoulos, A.P.S. (2019). Power System Dynamic State Estimation: Motivations, Definitions, Methodologies and Future Work. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1–1.