

Construção e Análise de Áreas de Atração de Sistemas Máquina contra Barramento Infinito

Luiza V. B. de Oliveira* Rodrigo A. Ramos**
Daniela A. G. Ferreira*** Jonas R. Pesente****

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

** *Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, (e-mail: rodrigo.ramos@ieee.org).*

*** *Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, (e-mail: danielaaarantes@gmail.com).*

**** *Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, Paraná, (e-mail: jonas.pesente@gmail.com).*

Abstract: This work proposes a new didactic approach to the problem of angular stability to large perturbations of an Electrical Power System (SEP) for undergraduate education. There are two main innovative contributions that differentiate the proposed approach from others commonly employed for the same purpose: a) the construction of the area of attraction of the post-fault system, which allows the student to establish a visual and intuitive connection of the physical problem of SEP with concepts of nonlinear dynamic systems; and b) the use of an approximate equivalent model of the Itaipu Binacional Hydroelectric Power Plant (HPP), which may increase the interest of the undergraduate student for the connection established with a hydroelectric plant of major importance to the Brazilian electricity sector. It is emphasized that the proposed approach can be fully reproduced without the need for commercial programs. In addition, the analysis of the impact of model parameter variations on stability can be easily viewed, as shown by the results of the work.

Resumo: Neste trabalho é proposta uma nova abordagem didática do problema de estabilidade angular a grandes perturbações de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) para o ensino de graduação. São duas as principais contribuições inovadoras que diferenciam a abordagem proposta de outras comumente empregadas para a mesma finalidade: a) a construção da área de atração do sistema pós-falta, a qual permite que o estudante estabeleça uma conexão visual e intuitiva do problema físico de SEP com conceitos de sistemas dinâmicos não lineares; e b) o uso de um modelo equivalente aproximado da Usina Hidrelétrica (UHE) Itaipu Binacional, o que pode aumentar o interesse do estudante de graduação pela conexão estabelecida com uma UHE de grande importância para o setor elétrico brasileiro. Ressalta-se que a abordagem proposta pode ser integralmente reproduzida sem a necessidade de utilização de programas comerciais. Além disso, a análise do impacto de variações de parâmetros do modelo sobre a estabilidade pode ser facilmente visualizada, conforme mostram os resultados do trabalho.

Keywords: Stability; Education; Electric Power System; Attraction area; Single Machine Versus Infinite Bus.

Palavras-chaves: Estabilidade; Ensino; Sistema Elétrico de Potência; Área de Atração; Máquina contra Barramento Infinito.

1. INTRODUÇÃO

O estudo de estabilidade de Sistemas de Potência decorre da necessidade de sua operação segura e confiável, a fim de suprir a crescente demanda por energia elétrica nas condições de um sistema cada vez mais complexo e interligado. O interesse deste estudo reside no comportamento transitório do sistema, ditado por equações diferenciais não lineares, posterior à ocorrência de um distúrbio, uma falta em suas linhas de transmissão.

Um SEP (Sistema Elétrico de Potência) pode sofrer uma série de perturbações de maior ou menor severidade e é importante conhecer suas condições de operação quando da extinção do distúrbio e determinar se, em tais condições, o sistema apresenta capacidade de retornar à condição de equilíbrio (Kundur et al., 1994, p. 17-39).

Nesse contexto, a área de atração é o conjunto de condições iniciais para as quais o SEP converge ao o ponto de equilíbrio estável associado, à medida que $t \rightarrow \infty$. Sua análise tem relevância quando se pretende desenvolver um

estudo sobre sua estabilidade transitória de ângulo e, por consequência, um controle seguro para o mesmo sistema. Para o cálculo ou estimação e análise da área de atração existem tanto métodos analíticos quanto experimentais, escolhidos de acordo com as mais distintas necessidades envolvidas no problema. Métodos analíticos, tais como Métodos Energéticos, são úteis na estimativa da área de atração, como no caso do uso de uma função de Lyapunov. Entretanto, utilizam aproximações, carecem de precisão e apresentam restrições quando se tem em vista aplicações práticas.

Por outro lado, métodos experimentais baseados em simulações computacionais permitem obter informações mais realistas e exatas a respeito das condições de estabilidade de um sistema de potência no plano de fase. Sua principal limitação é o elevado tempo de processamento, uma vez que é necessário simular o comportamento do sistema para cada condição particular, como no caso do presente trabalho, em que se propõe considerar cada condição inicial em um intervalo escolhido.

Neste caso, pretende-se determinar os pontos pertencentes à área de atração, ou região de estabilidade, do modelo simplificado do sistema Binacional Itaipu por meio da solução numérica computacional de suas equações diferenciais. A posterior análise das condições de estabilidade do sistema deve ser feita por meio do cálculo de novas áreas de atração, pelo mesmo método, e análise de seu comportamento para variações de parâmetros eletromecânicos.

Espera-se que análise a ser apresentada ofereça contribuições efetivas ao ensino de estabilidade na medida em que procura-se empregar modelos simplificados e tão próximos quanto possível de aplicações práticas.

2. MODELAGEM DO SISTEMA

Adota-se como referência para representação de um gerador síncrono o Modelo Clássico, também conhecido como “*Voltage behind transient reactance*” (Dandeno et al. (2003); Ramos et al. (2000)). Consiste na representação de um gerador síncrono por meio de uma fonte de tensão de valor constante (durante o período de análise) e uma reatância em série, chamada Reatância Transitória e indicada pela variável X'_d .

A adoção do Modelo Clássico reduz o sistema à segunda ordem e, em consequência, o esforço computacional empregado na resolução numérica das equações diferenciais é significativamente menor e o tempo de integração torna-se não somente praticável, mas também possibilita a realização de inúmeras análises. Isso traz grandes vantagens ao estudo e torna-se especialmente aplicável a disciplinas de graduação voltadas para o ensino de estabilidade.

Sendo assim, considera-se o circuito da Figura 1.

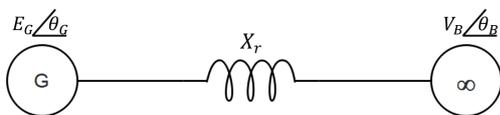


Figura 1. Diagrama unifilar de um sistema simplificado

Sejam \dot{E}_G a tensão gerada na máquina síncrona, em p.u.; \dot{V}_B , a tensão no barramento infinito, em p.u. e X_r , a reatância resultante entre o terminal correspondente à tensão interna do gerador e o barramento infinito, em p.u. A potência elétrica que circula entre o gerador e a barra infinita, p_e , em p.u. (assumindo a referência angular na barra infinita, $\theta_B = 0 \text{ rad}$) é dada pela Equação 1.

$$p_e = E_G V_B \text{sen}(\theta_G) / X_r \quad (1)$$

Considera-se uma máquina síncrona cujas massas rotativas acopladas ao eixo do rotor possuem um momento de inércia J , dado em $kg \cdot m^2$. O torque resultante T_r , dado em $N \cdot m$, relaciona-se à aceleração angular do rotor pela Equação 2, a chamada Equação de *swing*.

$$T_r = J \ddot{\theta}_m(t) \quad (2)$$

Em que θ_m , dado em radianos, é o ângulo mecânico entre o rotor e uma referência girante à velocidade angular mecânica síncrona, ω_s .

Seja T_m o torque mecânico, originário da máquina prima e T_e o torque elétrico, de caráter desacelerador, exercido pelas cargas, o torque resultante pode ser escrito conforme a Equação 3.

$$T_r = T_m - T_e \quad (3)$$

Seja $\omega_m = \dot{\theta}_m$, tem-se que:

$$\begin{aligned} \omega_m \cdot T_r &= P_r \\ \omega_m (T_m - T_e) &= P_m - P_e \end{aligned} \quad (4)$$

Em que:

- P_r é a potência resultante sobre o gerador, em W ;
- P_m é a potência mecânica, em W , fornecida pelo agente motor;
- P_e é a potência elétrica, em W , devida às cargas ligadas ao gerador.

Substituindo 2 em 4, tem-se a Equação 5.

$$J \omega_m \ddot{\theta}_m = P_m - P_e \quad (5)$$

Convém abordar o equacionamento analisando o ângulo elétrico da máquina, θ_e , formado entre o campo magnético do rotor e a referência girante. Pode-se relacioná-lo ao ângulo mecânico, θ_m , por meio da Equação 6, em que p é número de polos do gerador.

$$\theta_e = p \theta_m / 2 \quad (6)$$

A constante de inércia, H , relaciona-se à energia cinética das massas rotativas do sistema e à dificuldade que o conjunto oferece à mudança de estado, de velocidade, sendo definida como a razão entre a energia cinética, E_C , armazenada nas massas e a potência base trifásica, S_B , quando a máquina encontra-se girando à velocidade síncrona mecânica, ω_s .

$$H = E_C / S_B = J \omega_s^2 / 2 S_B \quad (7)$$

Se $\omega_m \approx \omega_s$ e $(P_m - P_e) / S_B = p_m - p_e$:

$$4H \ddot{\theta}_e / (p \omega_s) = p_m - p_e \quad (8)$$

Se $M = 4H / (p \omega_s)$, então:

$$M \ddot{\theta}_e = p_m - p_e \quad (9)$$

Por fim, sabe-se da existência de forças responsáveis por amortecimentos dissipadores de potência e proporcionais

à sua velocidade angular. Podem-se sintetizar esses efeitos amortecedores por meio de um único coeficiente, D , tornando-se, a equação de balanço da máquina, a Equação 10.

$$M\ddot{\theta}_e + D\dot{\theta}_e = p_m - p_e \quad (10)$$

A constante de amortecimento, D , configura-se como uma grandeza sintética responsável por agregar os efeitos amortecedores pertinentes, a saber, a característica torque *versus* velocidade da turbina do gerador, as cargas ligadas ao sistema e as correntes no enrolamento do amortecedor do rotor (Agrawal et al. (1999)).

Considerando o ângulo elétrico $\theta_e = \theta_G$ e substituindo a Equação 1 em 10, obtém-se a equação diferencial que descreve o comportamento do sistema, apresentada na Equação 11.

$$M\ddot{\theta}_G + D\dot{\theta}_G = p_m - E_G V_B \text{sen}(\theta_G)/X_r \quad (11)$$

3. CONSTRUÇÃO DA ÁREA DE ATRAÇÃO

O sistema em questão consiste de um grupo de 10 geradores síncronos conectados a seus respectivos transformadores elevadores de tensão. Seu secundário liga-se ao barramento do qual partem as linhas de transmissão: 3 circuitos de 3 linhas em paralelo, representando o tronco de 765 KV de Itaipu 60 Hz à subestação de Tijuco-Preto. Uma visão geral do sistema é ilustrada na Figura 2, baseada no modelo simplificado (Pesente, 2018).

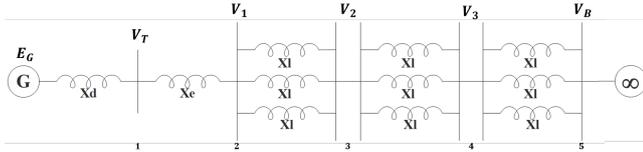


Figura 2. Modelo simplificado do setor de 60 Hz da Usina Hidroelétrica Itaipu Binacional.

Na Figura 2, o grupo de geradores é representado por um único gerador seguido de sua reatância síncrona X'_d , em acordo com o Modelo Clássico; os 10 transformadores elevadores são representados por sua reatância equivalente, X_e ; os 3 segmentos de 3 linhas são representados pelas reatâncias X_l .

Tabela 1. Dados do Sistema Binacional Itaipu - Tijuco Preto

Tensões		
STFI 500 kV	V_1	1.050 p.u.
STFI 765 kV	V_2	0.993 p.u.
STIV	V_3	0.978 p.u.
STIA	V_4	0.981 p.u.
STTP	V_B	1.000 p.u.
Reatâncias		
X'_d		0.0102 p.u.
X_e		0.0041 p.u.
X_l		0.00752 p.u.

O Sistema Máquina contra Barramento Infinito é descrito por uma equação diferencial ordinária de segunda ordem não linear (Equação 11) solucionada pela ferramenta o *solver ode45* do software MATLAB, baseada na fórmula Runge-Kutta (4,5) (Shampine and Reichelt, 1997).

Considere-se um sistema dinâmico autônomo não linear como o que segue:

$$\dot{x} = f(x) \quad (12)$$

com $x \in R^n$ como o vetor de variáveis de estado do sistema. Devemos assumir que f é um campo vetorial de classe C^1 .

O sistema da Equação 11 é representado em sua forma de espaço de estados pelas Equações 13 e 14.

$$\begin{aligned} x_1 &= \theta_G \\ x_2 &= \dot{\theta}_G = \dot{x}_1 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= 1/M (p_m - Dx_2 - E_G V_B \text{sen}(x_1)/X_r) \end{aligned} \quad (14)$$

O ponto de equilíbrio deve satisfazer a Equação 15.

$$f(x) = 0 \quad (15)$$

Seja $x_s = (x_{1s}, x_{2s})$ o ponto de equilíbrio da condição pós falta, tem-se que:

$$\begin{aligned} x_{1s} &= \text{acsen}(X_{pos}/(E_G V_B)) \\ x_{2s} &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

A princípio, tem-se o sistema na condição pré falta operando em equilíbrio. Considera-se a ocorrência de um curto circuito trifásico no lado de alta tensão do transformador, barra 2. A falta é extinta com a eliminação de uma das linhas entre as barras 2 e 3. A reatância equivalente na condição de pós falta é X_{pos} . O sistema a ser solucionado é dado pela Equação 17. Este é o sistema genérico cuja área de atração será traçada, com base em sua solução numérica para diferentes valores de (x_{10}, x_{20}) .

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = 1/M (p_m - Dx_2 - E_G V_B \text{sen}(x_1))/X_{pos} \end{cases} \quad (17)$$

3.1 Algoritmo de construção da área de atração

Seja o sistema dinâmico dado pelas Equações 13 e 14. O cálculo da área de atração é realizado por meio da sua solução para um número abrangente de condições iniciais: tomam-se valores iniciais para x_1 entre x_{1min} e x_{1max} e para x_2 entre x_{2min} e x_{2max} .

Define-se, de maneira sistemática, um algoritmo de construção de sua Área de Atração, segundo o conjunto de passos que segue.

- (1) Dadas as variáveis de estado x_1 e x_2 , arbitram-se seus valores mínimos e máximos, de acordo com a área do plano de fases que se deseja abranger: x_{1min} , x_{1max} , x_{2min} , x_{2max} ;
- (2) Define-se o número de pontos (chamado *num*) em que se deseja dividir a área delimitada pelos valores determinados no passo anterior, ou seja, o número valores, em cada eixo, a serem assumidos pelas condições iniciais para as quais pretende-se analisar o comportamento do sistema, de modo que se tenha um conjunto de *num x num* pontos;
- (3) Determina-se o tempo t_i de integração;
- (4) Determina-se o tempo total de simulação, t_{span} , de modo que $t_{span} = n \cdot t_i$, $n \in N$;
- (5) Arbitram-se os raios das superfícies que delimitam as trajetórias do sistema no espaço de estados. Sejam o

raio da “bola maior”, r_M e o raio da “bola menor”, r_m :

- (a) r_M separa as trajetórias que divergem do ponto de equilíbrio das demais;
 - (b) r_m separa as trajetórias que convergem para o ponto de equilíbrio das demais.
- (6) Para cada uma das num^2 condições iniciais tomadas entre $x_{1_{min}}$, $x_{1_{max}}$, $x_{2_{min}}$ e $x_{2_{max}}$ o sistema é solucionado através do *solver ode45*, para o intervalo de tempo $[t_{inicial}, t_{final}]$:
- (a) Inicialmente: $t_{inicial} = 0$ e $t_{final} = t_i$;
 - (b) O sistema é solucionado para a condição inicial escolhida e analisam-se suas variáveis de estado finais, $x(t_{final}) = (x_1(t_{final}), x_2(t_{final}))$:
 - (i) Se $|x(t_{final}) - x_s| < r_m$: O sistema convergiu para o ponto de equilíbrio e a condição inicial pertence à área de atração. (x_{1_0}, x_{2_0}) assumem o valor do próximo ponto a ser analisado;
 - (ii) Se $|x(t_{final}) - x_s| > r_M$: A trajetória do sistema diverge do ponto de equilíbrio, x_s , o que indica que a condição inicial não pertence à área de atração e, nesse caso, é indicada como tal e (x_{1_0}, x_{2_0}) assumem o valor do próximo ponto a ser analisado;
 - (iii) Se $r_m < |x(t_{final}) - x_s| < r_M$: Deve-se avaliar se o tempo máximo de simulação já foi atingido.
 - (A) Se $t_{final} < t_{span}$, então $t_{inicial} = t_{final}$ e $t_{final} = t_{inicial} + t_i$ e o sistema é novamente solucionado e seu estado final analisado;
 - (B) Caso contrário, chega-se ao final da simulação e a condição inicial, nesse caso, pertence à fronteira da área de atração.
- (7) Assim que obtidas as soluções numéricas do sistema de equações diferenciais para cada condição inicial, tem-se um conjunto de pontos indicados como pertencentes à região de estabilidade, um outro grupo de condições iniciais externas à área de atração e um conjunto de pontos de fronteira.

Os parâmetros para o sistema são adotados de acordo com a Tabela 2, em que f_o é frequência síncrona de operação das máquinas. Os parâmetros do sistema a serem anali-

Tabela 2. Parâmetros base para o sistema.

Parâmetros	
H	357.45 s
D	0.025

sados são: a constante de amortecimento, a constante de inércia, o módulo da tensão na barra infinita e a reatância equivalente X_e . Cada parâmetro deve ser variado e, para cada variação, calcula-se uma nova área de atração, de acordo com o conjunto de passos anteriormente definido.

4. RESULTADOS

A análise dos resultados é feita tomando-se como referência o Caso Base, mostrado na Figura 3. Apresentam-se as Figuras 4, 6 e 8 para ilustrar como o sistema se comporta após a eliminação da falta em 3 situações distintas para o mesmo tempo de eliminação da falta, respectivamente:

- (1) Sistema do caso base;
- (2) Sistema após a eliminação de 3 geradores, resultando em uma constante de inércia $H = 250.22$ s e $X_e = 0.0059$ p.u.;
- (3) Sistema resultante da redução da tensão da barra infinita a $V_B = 0.8$ p.u..

A condição inicial pós falta foi escolhida de modo que esteja dentro da área de atração do sistema base. Enquanto no primeiro caso a trajetória do sistema mostra aproximar-se lentamente do ponto de equilíbrio, as trajetórias das Figuras 6 e 8 afastam-se da área de estabilidade de interesse, uma vez que a condição inicial correspondente já não pertence às novas áreas de atração.

O valor de área percentual, acentuado na Figura 3, não deve ser considerado de maneira absoluta para mensurar a área de atração, mas comparado a outros valores, para os casos em que há alteração de parâmetros. Com isso é possível quantificar as mudanças com uma precisão que a simples averiguação visual não permite.

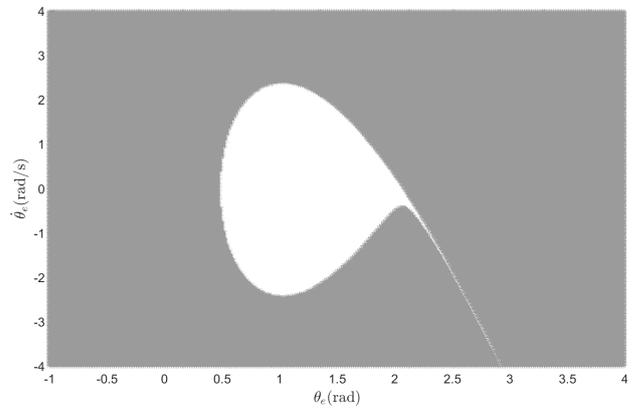


Figura 3. Caso Base de área de atração com $V_B = p.u.$, $H = 357.45s$, $D = 0.025$ e 8.42% do plano de fase

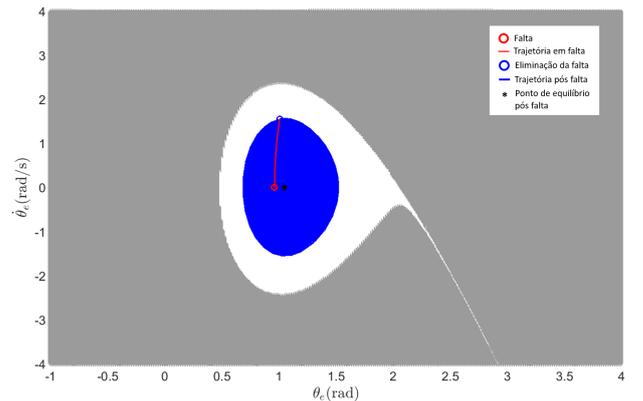


Figura 4. Trajetória pós falta estável

Procura-se estabelecer a complementação das áreas de atração calculadas e das trajetórias no mesmo plano de fase por meio da análise da resposta no tempo do sistema, sob o ponto de vista das oscilações de sua velocidade angular. A princípio, pode ser feito o paralelo entre as Figuras 4 e 5, notando-se a oscilação gradativamente menor da velocidade angular que acompanha a convergência da trajetória no plano de fase.

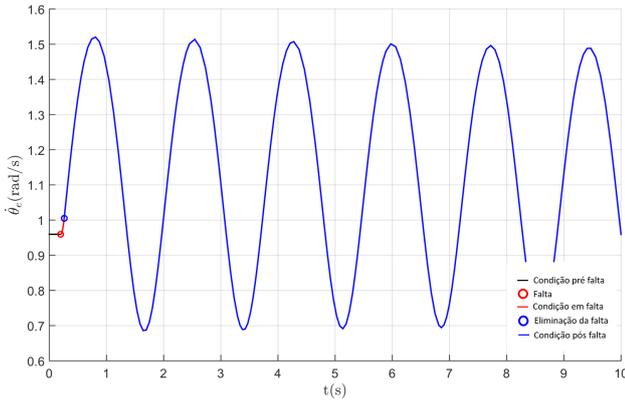


Figura 5. Resposta no tempo da velocidade angular correspondente ao caso da Figura 4

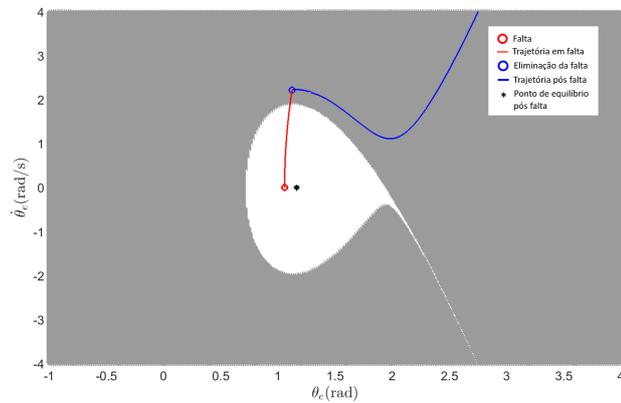


Figura 6. Trajetória pós falta instável do sistema resultante da eliminação de 3 geradores

O Figura 6 apresenta uma redução no tamanho da área de atração em função da eliminação de 3 geradores do conjunto em operação, de modo que a mesma condição inicial do sistema pós-falta encontre-se fora da região de estabilidade e resulte em uma trajetória instável. Nesse caso, ficam evidentes os instantes de ocorrência, eliminação da falta e o comportamento subsequente do sistema, em função da nova configuração de geradores. Compreende-se que a alteração extrema no número de geradores em operação não representa um aplicação prática plausível, mas extrapolar as mudanças no sistema tem seu valor didático. Por essa razão, aplica-se a exclusão hipotética de máquinas.

A reatância, X_{pos} , resultante a eliminação da falta, é diretamente proporcional ao valor de X_e e, por consequência, tratar da eliminação de um gerador na operação do sistema significa gerar uma correspondente elevação na reatância equivalente na condição de pós falta. Da Equação 11, em que $X_r = X_{pos}$, infere-se a relação entre X_r e a transferência de potência entre os terminais dos geradores e a barra infinita: valores mais elevados de reatância reduzem o fluxo de potência entre os terminais. A energia que deixa de ser transferida para a rede é injetada nas máquinas supera a capacidade das forças amortecedoras em desacelerá-las (Pesente, 2018). Como resultado, a drástica diminuição na área de atração.

A resposta da velocidade no tempo apresentada na Figura 7 corresponde à trajetória da Figura 6 e sua apresentação contribui para a compreensão a respeito do comportamento do sistema em uma condição pós-falta instável e sua relação com a área de atração: o crescimento progressivo da velocidade angular ocorre em paralelo ao afastamento da trajetória do ponto de equilíbrio.

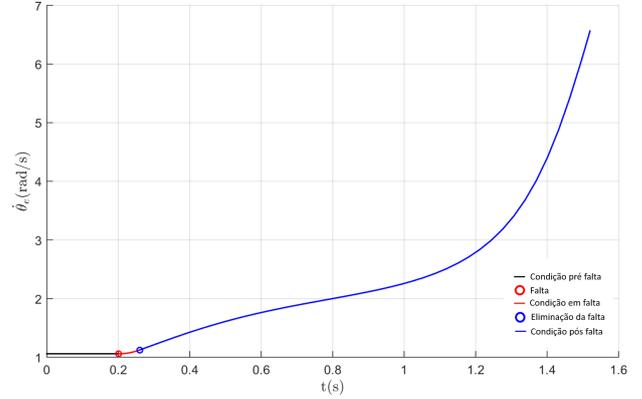


Figura 7. Resposta no tempo da velocidade angular correspondente ao caso da Figura 6

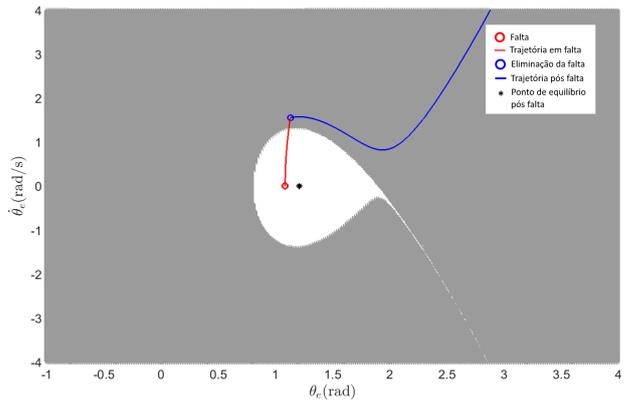


Figura 8. Trajetória pós falta instável do sistema resultante da redução da tensão da barra infinita a $V_B = 0.8 p.u.$

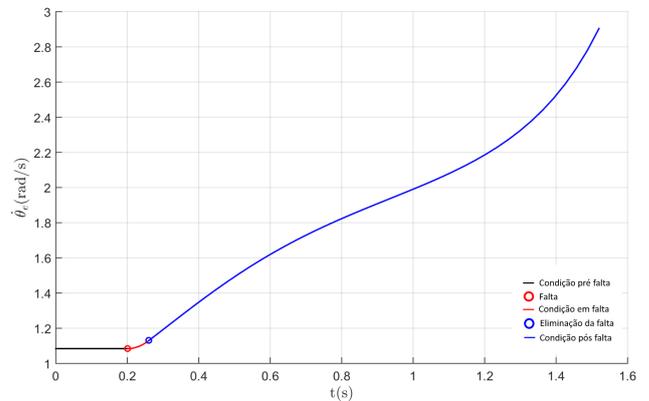


Figura 9. Resposta no tempo da velocidade angular correspondente ao caso da Figura 8

Sob a perspectiva da Equação 5, com a redução de V_B a valores inferiores ao da tensão nos terminais da máquina síncrona, a potência elétrica ativa transferida através das

linhas de transmissão, do gerador até o barramento infinito, é reduzida e, como consequência, há uma piora na estabilidade do sistema à medida em que a potência que deixa de ser transmitida é injetada na forma de energia cinética no grupo de geradores.

Na Figura 8, a mesma condição inicial tomada na situação da Figura 4 já não pertence à região de estabilidade calculada e a trajetória afasta-se do ponto de equilíbrio, como observa-se também pela progressiva elevação da velocidade angular na resposta no tempo da Figura 9.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo foi proposta uma nova abordagem para ensino dos conceitos de estabilidade frente a grandes perturbações em sistemas elétricos de potência. Mostrou-se que, em nível de graduação, é possível associar diversos conceitos de sistemas dinâmicos ao estudo de estabilidade em questão por meio de exercícios práticos envolvendo o cálculo de áreas de atração do modelo do sistema. A visualização da área de atração complementa compreensão adquirida a partir da resposta no tempo, sendo um instrumento importante para dar ao estudante de graduação um entendimento abrangente do problema.

Os alunos podem complementar e aperfeiçoar a análise por meio de simulações para diferentes tempos de falta, verificando se a trajetória em falta está contida ou não na área de atração já calculada. Dessa maneira, pode-se concluir sobre a estabilidade sem a necessidade de simulação do sistema pós-falta - como uma introdução ao principal conceito do método PEBS. Pode-se ainda propor variações da resistência de falta, a qual não tem impacto no formato da área de atração do ponto de equilíbrio pós-falta caso a falta seja eliminada completamente.

Destaca-se também a importância de utilizar um caso simples mas que tenha correspondência com a prática, de forma que o estudante possa se motivar a realizar análises para diferentes valores de parâmetros com significado físico e interpretar os efeitos resultantes. No caso deste trabalho, foi usado um modelo equivalente da usina Itaipu Binacional e os parâmetros avaliados foram a inércia das massas rotativas das máquinas, as forças amortecedoras e a transferência de potência ativa entre as máquina e o barramento infinito.

Entre as perspectivas de trabalhos futuros derivados deste artigo está o desenvolvimento de um novo algoritmo para o traçado da fronteira da área de atração a partir das variedades estáveis dos pontos de equilíbrio instáveis existentes nessa fronteira, de forma a acelerar a produção da visualização da respectiva região de estabilidade. Além disso, pretende-se também analisar outras tecnologias de geração, tais como parques eólicos compostos por geradores de indução do tipo gaiola de esquilo, por exemplo.

REFERÊNCIAS

Agrawal, B., Anderson, P., Concordia, C., Farmer, R., Fouad, A., Kundur, P., Price, W., and Taylor, C. (1999). Damping representation for power system stability studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(1), 151–157.

Alberto, L.F.C. and Chiang, H.D. (2011). Characterization of stability region for general autonomous nonlinear dynamical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 57(6), 1564–1569.

Athay, T., Podmore, R., and Virmani, S. (1979). A practical method for the direct analysis of transient stability. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (2), 573–584.

Bretas, N.G. and Alberto, L.F.C. (2000). *Estabilidade transitória em sistema eletroenergéticos*. EESC/USP, São Carlos.

Chiang, H.D. and Thorp, J.S. (1989a). The closest unstable equilibrium point method for power system dynamic security assessment. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 36(9), 1187–1200.

Chiang, H.D. and Thorp, J.S. (1989b). Stability regions of nonlinear dynamical systems: A constructive methodology. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 34(12), 1229–1241.

Chiang, H.D., Wu, F., and Varaiya, P. (1987). Foundations of direct methods for power system transient stability analysis. *IEEE Transactions on Circuits and systems*, 34(2), 160–173.

Chiang, H.D., Wu, F.F., and Varaiya, P.P. (1994). A bcu method for direct analysis of power system transient stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(3), 1194–1208.

Dandeno, P., Kundur, P., Umans, S., Kamwa, I., Karmaker, H., Salon, S., Shah, M., and El-Serafi, A. (2003). Ieee guide for synchronous generator modeling practices and applications in power system stability analyses. *IEEE Std. 1110-2002*, 1–72.

Fouad, A. and Anderson, P. (2003). Power system control and stability. *IEEE Series on Power Engineering*.

Kimbark, E.W. (1995). *Power system stability*, volume 1. John Wiley & Sons.

Kundur, P., Balu, N.J., and Lauby, M.G. (1994). *Power system stability and control*, volume 7. McGraw-Hill, New York.

Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canzales, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., et al. (2004). Definition and classification of power system stability. *IEEE transactions on Power Systems*, 19(2), 1387–1401.

Padiyar, K.R. (2008). *Power System Dynamics: Stability and Control*. BS Publications, 2 edition.

Pai, M. and Sauer, P.W. (1989). Stability analysis of power systems by lyapunov's direct method. *IEEE Control Systems Magazine*, 9(1), 23–27.

Pesente, J.R. (2018). Ferramenta para ordenação de perturbações por severidade sob a ótica da estabilidade transitória baseada na margem de estabilidade de lyapunov. In *Seminario del Sistema Eléctrico Paraguayo, 2018. CIGRE*, 1–8. CIGRE.

Ramos, R.A., Alberto, L.F.C., and Bretas, N.G. (2000). *Modelagem de máquinas síncronas aplicada ao estudo de estabilidade de sistemas elétricos de potência*. EESC/SEL.

Shampine, L.F. and Reichelt, M.W. (1997). The matlab ode suite. *SIAM journal on scientific computing*, 18(1), 1–22.