



---

## FERRAMENTA PARA ORDENAÇÃO DE PERTURBAÇÕES POR SEVERIDADE SOB A ÓTICA DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA BASEADA NA MARGEM DE ESTABILIDADE DE LYAPUNOV

J. R. Pesente

ITAIPU BINACIONAL

Brasil

### 1.1 *Resumen*

Embora os métodos passo-a-passo para avaliação da estabilidade transitória de sistemas de potência possuam a maior precisão dentre os métodos para esta finalidade, os estudos nem sempre resultam em índices com a mesma base para comparação de diferentes contingências.

Em contraste, métodos diretos de avaliação da estabilidade transitória tendem a apresentar resultados traduzidos à mesma grandeza física, propiciando a comparação entre diferentes perturbações. Dentre tais métodos diretos, destaca-se aquele fundamentado no segundo método de Lyapunov, porque seus resultados são apresentados em termos energéticos, de interpretação intuitiva.

Em complementação, embora numerosas pesquisas acerca da aplicação do segundo método de Lyapunov na avaliação da estabilidade transitória tenham sido realizadas, poucas aplicações práticas são relatadas, dadas restritivas simplificações para aplicação do método. Neste trabalho os resultados obtidos servem de suporte para ordenação de contingências que servem de insumo para seleção de os casos de estudo mais importantes, de forma a serem detalhados e investigados no âmbito dos estudos de planejamento da operação.

Os resultados obtidos deste estudo permitiram comparar diretamente as diferentes perturbações que afetam Itaipu, apresentando boa performance para o objetivo sob o qual foi desenvolvido.

### 1.2 *Palabras clave*

Estabilidade Transitória, Segundo método de Lyapunov.

## 1. INTRODUÇÃO

O problema de estabilidade dos SEEs está relacionado com a capacidade de reação do Sistema de Energia Elétrica diante de fortes desequilíbrios entre geração e demanda causados por perturbações, que se apresentam de forma fortuita e poucas vezes correspondem a eventos para manutenção preventiva (CASAS, 1998).

A força tarefa constituída pelo IEEE e pelo CIGRÉ (2004) define a Estabilidade de Sistemas de Energia Elétrica como a “habilidade de um sistema elétrico, para uma dada condição operacional inicial, de retornar a um estado operacional de equilíbrio após estar sujeito a uma perturbação física, com a maior parte das variáveis dentro dos limites”.



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
06 y 07 de Setiembre de 2018

Denomina-se instabilidade transitória, a modalidade de instabilidade predominantemente angular, que ocorre frente a grandes perturbações, decorridos apenas alguns ciclos após o distúrbio. A estabilidade transitória é um dos mais importantes itens que devem ser investigados no planejamento e na operação dos sistemas de potência, pois é fundamental avaliar se o sistema permanece em sincronismo após grandes perturbações (KAKIMOTO, 1981).

A previsão do impacto de perturbações nos sistemas elétricos é realizada pela simulação passo-a-passo do sistema algébrico-diferencial que descreve os sistemas de potência. Este tópico considera a elaboração de um conjunto previsível de cenários de eventos, que no âmbito da operação dos sistemas elétricos frequentemente resulta na elaboração de normas operacionais, recomendações de restrições operativas e de ações preventivas e corretivas.

Neste processo, nas esferas que reúnem os agentes dos sistemas elétricos, são definidos critérios que estabelecem o conceito de operação segura de determinados sistemas, considerando suas particularidades. A elaboração de tais critérios está sujeita à experiência dos profissionais, baseada na extensa análise de eventos ao longo de vários anos acompanhando expansões, obras e modificações nos sistemas elétricos. Não obstante, esta experiência pode ser complementada por estudos que forneçam dados precisos para ordenação de eventos em uma mesma base para comparação.

Uma dessas ferramentas é o cômputo das margens de estabilidade, produto típico dos *métodos diretos* de avaliação da estabilidade. Os métodos diretos foram desenvolvidos devido ao elevado processamento numérico associado à solução no domínio do tempo. A maioria destes métodos utiliza os conceitos do segundo método de Lyapunov, que consta da determinação de uma função que sintetiza a dinâmica do SEE, e que tem características de convexidade nas proximidades de um ponto de equilíbrio estável (ATHAY et al., 1979).

Os principais métodos diretos são o da Função de Energia Transitória (TEF – *Transient Energy Function*) e da Superfície Limite de Energia Potencial (PEBS – *Potential Energy Boundary Surface*). O objetivo do TEF é computar a energia transitória total do SEE no final do período “sob falta”, e compará-la com a energia potencial crítica do sistema, no Ponto de Equilíbrio Instável (PEI) próximo à trajetória do sistema (VU, TURITSYN, 2015). O PEBS utiliza como energia crítica o valor da energia potencial no instante que a trajetória com a falta sustentada atravessa o perímetro limite da área de atração (região onde o SEE mantém a estabilidade) (CHIANG, WU, VARAIYA, 1988).

Devido à própria formulação estes métodos auxiliam a interpretação do sentido físico dos distúrbios em termos da energia envolvida durante um distúrbio em um Sistema de Energia Elétrica. Assim, no momento que ocorre uma falta em um SEE, a energia que deixa de ser consumida pelas cargas é injetada no sistema, na forma de energia cinética nas máquinas girantes, afastando-as do seu ponto de equilíbrio.

Quando esta falta é retirada pela abertura das linhas de transmissão onde ocorreu o curto-circuito, esta energia cinética se transforma em energia potencial estressando os limites de transmissão das linhas remanescentes. Através dessa interpretação, um sistema é estável se é capaz de absorver a energia cinética excedente, em forma de energia potencial (KHEDKAR; DHOLE; NEVE, 2004).

Historicamente, os métodos diretos apresentam desafios na representação de sistemas reais. Recentes progressos obtidos pela extensão do princípio da invariância (BRETAS, ALBERTO, 2000), e pela segmentação dos modelos em diferentes escalas de tempo (ALBERTO, CHIANG, 2008) continuam avançando a aplicação dos métodos diretos.

Os principais conceitos dos fundamentos deste trabalho são apresentados como segue.

## 2. SEGUNDO MÉTODO DE LYAPUNOV

De uma maneira intuitiva, a estabilidade pode ser apresentada como a capacidade de um sistema dinâmico em recuperar um estado de equilíbrio, definido pela Equação 1.

$$E\{\underline{x}^e \mid \underline{f}(\underline{x}^e)\} = 0 \quad \text{Equação 1}$$

Sistemas físicos não lineares como os sistemas de potência podem possuir infinitos, finitos ou mesmo não possuir pontos de equilíbrio, e que, podem ser isolados ou não. O conhecimento da existência de um ponto de equilíbrio é uma parte importante do estudo da estabilidade.

Matematicamente, os sistemas que são bem representados por sistemas dinâmicos autônomos (Equação 2), que possuem a origem estável no sentido de Lyapunov se após um movimento em relação à referência (estado de equilíbrio) retorna a alcançar um estado de equilíbrio. Essa estabilidade é assintótica se todo movimento converge à origem (Equação 3).

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}) \quad \text{Equação 2}$$

$$\underline{x} \in D \subset \mathfrak{R}^n, \underline{f} : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n, \underline{f}(\underline{0}) = \underline{0}, \underline{0} \in D \quad \text{Equação 3}$$

Assim, é garantida estabilidade a origem do sistema se existe uma função  $V: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ , chamada função de Lyapunov (FL), que satisfaça as condições apresentadas na Equação 4.

$$\begin{aligned} V(\underline{x}) &> 0; \quad \forall \underline{x} \neq \underline{0}, \quad \underline{x} \in D \\ V(\underline{0}) &= 0; \\ \dot{V}(\underline{x}) &\leq 0 \quad \forall \underline{x} \neq \underline{0}, \quad \underline{x} \in D \\ \dot{V}(\underline{0}) &= 0; \end{aligned} \quad \text{Equação 4}$$

Se, ainda, a condição apresentada na Equação 5 for atendida, a origem de  $\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x})$  é assintoticamente estável.

$$\dot{V}(\underline{x}) < 0 \quad \forall \underline{x} \neq \underline{0}, \quad \underline{x} \in D \quad \text{Equação 5}$$

Caso a condição dada pela Equação 5 não for atendida, a origem ainda é assintoticamente estável se  $\dot{V}(\underline{x}) = 0$  não é trajetória possível do sistema<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Teorema conhecido como “Teorema de LaSalle”.

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
 06 y 07 de Setiembre de 2018

A avaliação da estabilidade transitória de sistemas elétricos por funções de energia demandam a existência de funções que descrevam a perda de sincronismo de geradores (1994 Chiang). No caso descritivo pelas suas equações de oscilação (Equação 6), a Equação 7 é uma Função de Lypunov válida.

$$\frac{2H}{\omega_0} \dot{\omega} = P_M - P_E - D \cdot \omega \quad \text{Equação 6}$$

$$\dot{\delta} = \omega$$

$$V(\delta, \omega) = E_K(\omega) - E_P(\delta) = \frac{1}{2} \cdot \frac{2H}{\omega_0} \omega^2 - P_{E_{post}} \cdot (\cos(\delta_{pre}) - \cos(\delta_{post})) - P_M \cdot (\delta_{pre} - \delta_{post}) \quad \text{Equação 7}$$

onde

$E_K(\omega)$  Energiacinética;

$E_P(\delta)$  Energiapotencial;

$P_{E_{post}}$  Potência elétrica máxima para a configuração da rede pós-perturbações [p.u.]

$\delta_{post}$  Ponto de equilíbrio estável do sistema para a configuração da rede pós-perturbações [rad]

Em sistemas multimáquinas, esta formulação é agregada em termos do centro de massa do sistema, ao qual o ângulo e velocidade dos geradores são redefinidos como na Equação 8, para os quais a expressão da Equação 9 é válida como função de Lyapunov.

$$\theta_i = \left( \delta_i - \frac{1}{\sum_{i=1}^{ng} H_i} \cdot \sum_{i=1}^{ng} H_i \delta_i \right) \quad \text{Equação 8}$$

$$\omega_i = \frac{\dot{\theta}_i}{\omega_0}$$

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{ng} (2 \cdot H_i \cdot \omega_0) \cdot \omega_i^2 - \sum_{i=1}^{ng} (P_{mi} - E_i^2 \cdot G_{ii} \cdot (\theta_i - \theta_i^s))$$

$$- \sum_{i=1}^{ng-1} \sum_{j=i+1}^{ng} \left[ \left( E_i \cdot E_j \cdot B_{ij} \cdot (\cos\theta_{ij} - \cos\theta_{ij}^s) + \int_{\theta_i^s + \theta_j^s}^{\theta_i + \theta_j} E_i \cdot E_j \cdot G_{ij} \cdot \cos\theta_{ij} \cdot d(\theta_i + \theta_j) \right) \right] \quad \text{Equação 9}$$

Onde  $E$  é a tensão da força eletromotriz do respectivo gerador,  $G$  e  $B$  a condutância e susceptância da rede, e o superscrito indica valor no instante imediatamente posterior à eliminação da falta.

A análise da estabilidade transitória de sistemas elétricos pelas funções de Lyapunov pode ser sintetizada, basicamente, das seguintes três etapas (KUNDUR, 1994):

- 1) Cômputo da energia crítica  $V_{cr}$ , igual à energia potencial do sistema no instante que as condições da Equação 4 deixam de ser atendidas (perda da estabilidade). Este valor serve de referência para avaliação da estabilidade.
- 2) Cálculo da energia total do sistema no instante da eliminação da perturbação,  $V_{cl}$ ;
- 3) Cálculo da margem de estabilidade  $V_{cr} - V_{cl}$  Margens positivas correspondem a sistemas estáveis.

**XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
06 y 07 de Setiembre de 2018

Tais etapas foram então aplicadas na ordenação de perturbações no tronco de 765kV de acordo com a metodologia descrita na próxima seção.

### 3. METODOLOGIA

Neste estudo, a análise foi realizada em duas etapas: inicialmente o sistema Itaipu versus barra infinita, considerando o tronco de 765kV como sistema de transmissão, como ilustrado na Figura 1, foi analisado empregando a Equação 7 e a Equação 9, e comparado à solução numérica do Anatem, de forma a avaliar a qualidade da predição da condição de estabilidade do método de Lyapunov implementado.

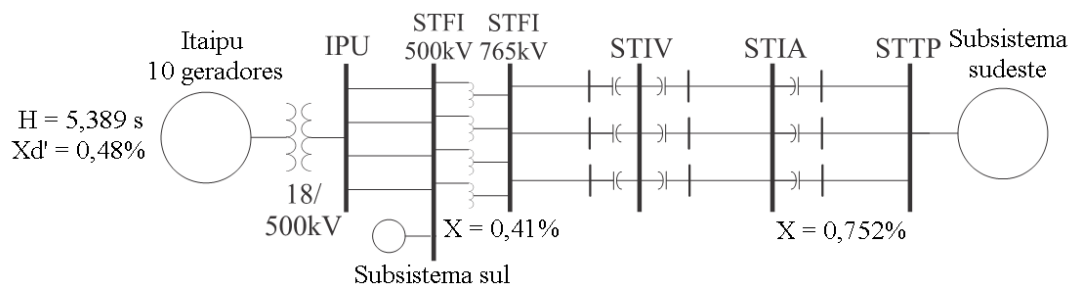


Figura 1 – Sistema simplificado empregado para avaliação do método.

Validado o método, a determinação de  $V_{cr}$  e  $V_{cl}$  a partir da Equação 9 foi realizada sob o sistema elétrico brasileiro ilustrado na Figura 2, considerando as seguintes premissas/aproximações:

- 1) geradores são representados pelos modelos clássicos, com tensão atrás da reatância transitória;
- 2) elementos dinâmicos não são representados (dispositivos como SVC, TCSC, entre outros, são representados por impedâncias estáticas);
- 3) elementos HVDC e fazendas eólicas são representados por injeções de potência equivalentes;
- 4) as impedâncias transitórias dos geradores, cargas e demais elementos em derivação são incorporadas ao sistema de transmissão, que é reduzido às barras internas dos geradores;
- 5) simulações passo-a-passo são utilizadas pra determinação das velocidades e ângulos dos rotores no instante da perda de estabilidade ( $V_{cr}$ ) e no instante da eliminação de faltas ( $V_{cl}$ ) para cada perturbação que se deseja analisar;
- 6) as diferentes perturbações são comparadas segundo a margem de estabilidade  $V_{cr} - V_{cl}$ , sendo considerada de maior gravidade quanto menor for a respectiva margem.

A simulação do sistema multimáquinas considera as seguintes etapas:

- 1) Simulação temporal dos eventos, considerando falta permanente (caso instável) e falta extinguida por abertura de linha de transmissão (caso estável);
- 2) Inicialização dos geradores das usinas de acordo com a condição pré-falta;
- 3) Montagem da matriz admitância de barra e redução para as barras internas dos geradores empregando Kron;
- 4) Referenciamento das grandezas às respectivas grandezas do centro de massa do sistema;
- 5) Cômputo de  $V$ .

Com base nas premissas e aproximações apresentadas, os experimentos computacionais são descritos na próxima seção.

### 4. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Os experimentos foram segmentados na avaliação da estabilidade pelo segundo método de Lyapunov em um sistema máquina-barra infinita, de forma a investigar a capacidade do método em determinar valores críticos

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
06 y 07 de Setiembre de 2018

do ângulo de carga quando comparado às simulações temporais, e, posteriormente em sua aplicação no sistema interligado com as simplificações citadas na seção anterior.

#### 4.1 Sistema máquina barra infinita

Este experimento tem por finalidade validar a estimativa de ângulo crítico determinada pelo método direto de Lyapunov, validando assim a função empregada e os pontos de equilíbrio calculados.

Inicialmente, a solução temporal utilizada no método de Lyapunov foi comparada à solução do software de simulação de estabilidade compatibilizado ao Anatem, software largamente utilizado no sistema elétrico brasileiro. A simulação de curto circuito trifásico na subestação de Foz do Iguaçu 765kV (FI), com duração de 62ms, é apresentada na Figura 3, de onde se percebe que os sistemas se sobrepõem com razoável compatibilidade. Para esta perturbação, a estimativa de tempo crítico para eliminação da falta é de 88ms no Anatem e 91ms no simulador empregado no método de Lyapunov.

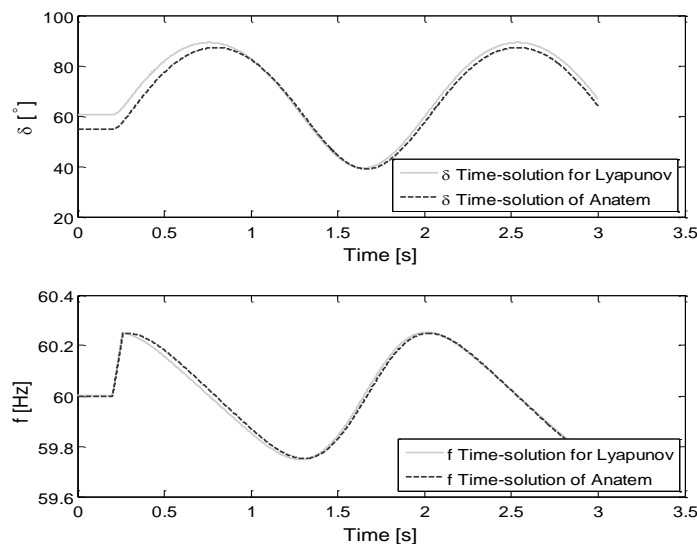


Figura 3 – Compatibilização entre simulação temporal usada no método de Lyapunov e do Anatem.

Posteriormente, a simulação temporal foi sobreposta à função de Lyapunov, buscando comparar a estimativa de instabilidade pela função de Lyapunov. A Figura 4 demonstra que a Função de Lyapunov representa com boa precisão a área de atração do ponto de equilíbrio analisado.

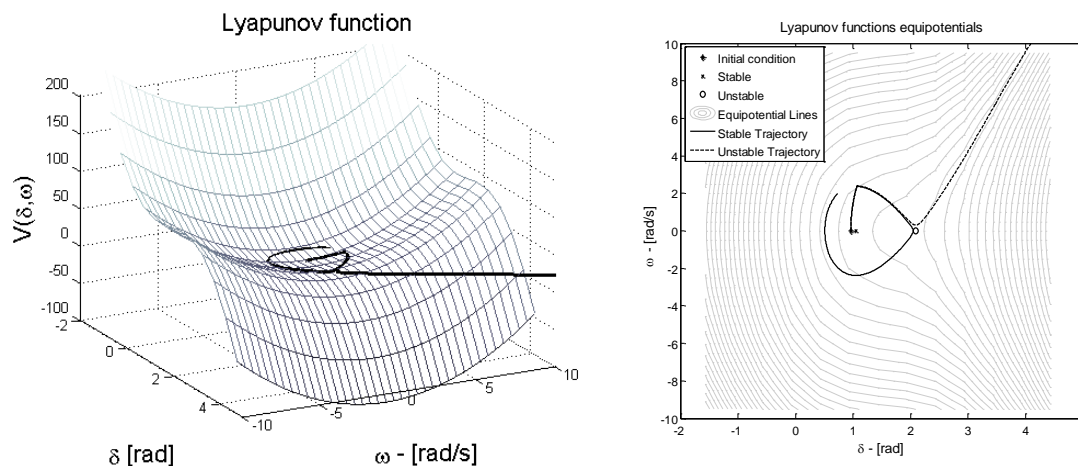


Figura 4 – Determinação do ângulo crítico pela função de Lyapunov.

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
06 y 07 de Setiembre de 2018

Uma vez que a função de Lyapunov empregada apresentou bons resultados, passou-se então para a ordenação proposta, empregando o sistema interligado, como segue.

#### 4.2 Sistema Interligado Nacional

As simulações realizadas tratam da aplicação de um curto circuito monofásico, com magnitudes determinadas segundo relatório de equivalentes de curto circuito distribuído pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), mantidas durante 80ms e eliminadas pelo desligamento de um circuito de 765kV.

Os resultados obtidos do emprego das relações apresentadas na Equação 9 para o sistema interligado empregando modelos simplificados são apresentados na Tabela 1. Todas as grandezas foram normalizadas, de forma que os resultados são apresentados em pu.

Tabela I – Comparação dos valores da função de Lyapunov para os diferentes eventos analisados

<i>Evento</i>	$V_{cr}$	$V_{cl}$	<i>Margem</i>
CC <sub>1φ</sub> -FI, abertura de um circuito entre FI e IV	4,5940pu	3,9139pu	0,6101pu
CC <sub>1φ</sub> -IV, abertura de um circuito entre IV e IA	4,5940pu	3,8572pu	0,7368pu
CC <sub>1φ</sub> -IA, abertura de um circuito entre IA e TP	4,5940pu	3,6681pu	0,9259pu

Da Tabela 1 é possível perceber que a margem de estabilidade aumenta desde curtos circuitos em na subestação de Foz do Iguaçu (FI) na direção da subestação de Tijuco Preto (TP). Esse resultado é esperado por dois aspectos – Itaipu é o conjunto de geradores mais perturbado para curtos circuitos no tronco de 765kV, sendo que FI é a subestação mais próxima e TP a mais distante, e a magnitude dos curtos circuitos tendem a aumentar na direção TP para FI.

Os resultados evidenciam, no entanto, que a margem de estabilidade para eventos em FI é somente 73,45% da margem para eventos em TP, demonstrando uma grande diferença de intensidade entre os dois eventos. Percebe-se, da Tabela 1, que a função de Lyapunov apresenta valor igual para todas as perturbações na condição pré-falta. Este resultado é esperado, já que foi empregado mesmo caso de regime permanente na comparação. Na próxima seção as considerações finais deste estudo são apresentadas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho foram calculadas as margens de estabilidade para eventos no tronco de 765kV a partir do segundo método de Lyapunov. A motivação da realização do trabalho é a ordenação destes eventos por intensidade, de acordo com a margem de estabilidade calculada com relação ao caso instável.

Os experimentos realizados mostraram que curtos-circuitos na subestação de Foz do Iguaçu são 26,55% mais severos que eventos na subestação de Itaberá, e na subestação de Ivaiporã 20,48%, considerando como referência a margem de estabilidade para eventos em Itaberá.

Embora simplificada, esta metodologia foi útil para demonstrar a diferença proporcional em severidade das perturbações considerando índices na mesma base.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] CASAS, V. L. P.; 1998. Métodos computacionais baseados na função de energia para análise direta da estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica. Campinas. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas.
- [2] IEEE/CIGRÉ Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. Definition and classification of power system stability. IEEE Transactions on Power Systems, v. 19, n. 2, 2004.
- [3] Kakimoto N. Hayashy H. Transient stability analysis of multimachine Power System by Lyapunov direct method, 1981.
- [4] ATHAY, T.; PODMORE, R.; VIRMANI, S. A practical Method for Direct Analysis of Transient Stability. Proceeding of IEEE transactions on Power Apparatus and Systems, New York, v. PAS-98, n. 2, pgs. 573-584, 1979.
- [5] G. E. GLESS. Direct method of Lyapunov applied to transient power system stability. IEEE transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-85, pgs.159-168, 1966.
- [6] A. H. EL-ABIAD, K. NAGAPPAN. Transient Stability Regions for multi-machine power systems. IEEE transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-85, pgs.169-179, 1966.
- [7] T. L. VU, K. TURITSYN. Lyapunov functions family approach to transient stability assessment. IEEE Transactions on Power Systems, 2015.
- [8] H. D. CHIANG, F. F. WU, P. P. VARAIYA. Foundations of the Potential Energy Boundary Surface Method for Power System Transient Stability Analysis. IEEE Transactions CAS-35, pp. 712-728, 1988.
- [9] KHEDKAR; M. K.; DHOLE; G. M.; NEVE, V., G. Transient Stability Analysis by Transient Energy Function Method: Closest and Controlling Unstable Equilibrium Point Approach. Institute of Engineers of India Journal, v. 85, 2004.
- [10] KUNDUR, P. Power System Stability and Control, 1994.