

AVALIAÇÃO DO SISTEMA WESTERN SYSTEMS COORDINATING COUNCIL EM RELAÇÃO À ESTABILIDADE TRANSITÓRIA NA OCORRÊNCIA DE UM CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA

[\[ver artigo online\]](#)

Higor Oliveira da Cunha¹

RESUMO

O intuito deste trabalho é analisar a estabilidade transitória de um sistema trifásico equilibrado na ocorrência de um curto-circuito utilizando o software Simulight. O sistema escolhido foi o Sistema WSCC (Western Systems Coordinating Council) – 9 barras x 3 máquinas, onde o objetivo foi analisar a estabilidade transitória do Sistema WSCC em duas situações na ocorrência de um curto-circuito fase-terra na barra 5. Na primeira situação, foi analisada a ocorrência de um curto-circuito fase-terra na fase A no instante de tempo $t=1s$, onde o sistema de proteção atuou em $t=1,2s$, removendo o curto-circuito e abrindo os disjuntores 5' e 7', sendo feita a abertura tripolar. Na segunda situação, o Sistema foi submetido às mesmas condições da primeira, sendo que nesta, foi realizada a abertura monopolar. Realizou-se uma pesquisa bibliográfica considerando as contribuições de autores como SILVA (2009), MATA (2005) e SANTOS (2005), buscando enfatizar a importância de analisar a estabilidade transitória de diversos modos. Concluiu-se que na ocorrência de um curto-circuito num determinado sistema elétrico, este pode apresentar respostas diferentes em relação à estabilidade ou instabilidade, dependendo de como a abertura é realizada.

Palavras-chave: Estabilidade transitória. Curto-circuito. Sistema elétrico de potência.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to analyze the transient stability of a balanced three phase system in the event of a short circuit using Simulight software. The system chosen was the WSCC (Western Systems Coordinating Council) System - 9 bars x 3 machines, where the objective was to analyze the transient stability of the WSCC System in two situations in the occurrence of a phase-to-ground short circuit in bar 5. In the first situation, the occurrence was analyzed. phase-to-ground short circuit in phase A at time $t = 1s$, where the protection system acted at $t = 1.2s$, removing the short circuit and opening circuit breakers 5 'and 7' three-pole aperture. In the second situation, the system was subjected to the same conditions as the first, and in this case, the monopolar opening was performed. A bibliographic research was conducted considering the contributions of authors such as SILVA (2009), MATA (2005) and SANTOS (2005), seeking to emphasize the importance of analyzing transient stability in various ways. It was concluded that in the event of a short circuit in a given electrical system, the latter may have different responses regarding stability or instability, depending on how the opening is performed.

Keywords: Transient stability. Short circuit. Electric power system.

¹ Doutorando em Engenharia Elétrica – Mestre em Engenharia Elétrica – Pós-graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Instalações Elétricas Industriais – Pós-graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Automação – Bacharel em Engenharia Elétrica – Técnico em Eletrotécnica – Eletricista Instalador Industrial.
E-mail: higorcunha.eletrica@gmail.com

INTRODUÇÃO

Os sistemas de corrente alternada começaram a ser desenvolvidos nos Estados Unidos no ano de 1886, quando Westinghouse decidiu comprar as patentes americanas que se referia aos sistemas de transmissão em corrente alternada, desenvolvidos por Gibbs e Gaulard. No ano de 1886, Willian Stanley (sócio de Westinghouse), realizou a instalação do primeiro sistema de distribuição experimental em corrente alternada, alimentando 150 lâmpadas na cidade de Great Barrington (Massachusetts).

Em 1890 a primeira linha de transmissão em corrente alternada nos EUA foi colocada em operação para transportar energia elétrica gerada em uma usina hidroelétrica, que ia de Willamette Falls até Portland no Oregon, numa distância de 20 km. A energia era usada à iluminação, sendo as primeiras linhas de transmissão, monofásica. Naturalmente, os primeiros motores também eram monofásicos, mas no ano de 1888, Nikola Tesla apresentou um trabalho descrevendo motores de indução e motores síncronos bifásicos. As vantagens dos motores polifásicos tornaram-se evidentes imediatamente, e em 1893, foi mostrado ao público um sistema de distribuição bifásico em corrente alternada. Após isso, a transmissão em corrente alternada, especialmente trifásica, substituiu gradativamente os sistemas em corrente contínua.

Nos dias atuais, a transmissão de energia elétrica é feita praticamente toda em corrente alternada. Um motivo significativo à aceitação atual de sistemas em corrente alternada foi o transformador, que tornou possível a transmissão de energia elétrica em uma tensão mais elevada que a tensão de geração ou de consumo, com a grande vantagem da capacidade maior de transmissão.

Pouco antes de 1920, os Sistemas Elétricos de Potência eram operados como unidades individuais, porque começaram como sistemas isolados e se expandiram gradativamente, até atender todo o país. A demanda de grande quantidade de potência e a necessidade de maior confiabilidade conduziu à interligação de sistemas adjacentes.

Tratando-se do aspecto econômico, a interligação possui algumas vantagens econômicas, pois precisará de menos máquinas como reserva para operação na ponta do sistema (capacidade de reserva), assim como se necessita de menos máquinas funcionando em vazio para o atendimento de cargas inesperadas e repentinas (reserva girante).

Além disso, a interligação faz com que a empresa possa aproveitar as fontes de energias com maior viabilidade econômica; e em alguns casos, a empresa pode achar mais econômico realizar a compra da energia durante alguns períodos, do que utilizar a sua própria geração. Contudo, a interligação dos sistemas propiciou diversos problemas, como por exemplo, o aumento da corrente que circula quando ocorre um curto-circuito no sistema, conseqüentemente, necessitando realizar a instalação de novos disjuntores com maior capacidade.

Ressalta-se que os sistemas interligados devem possuir a mesma frequência, assim como todos os geradores síncronos devem estar em sincronismo, e que um distúrbio provocado no sistema por um curto-circuito, pode se estender para os sistemas a ele interligados. Além destes problemas relacionados à interligação em corrente alternada, destaca-se de modo relevante, a questão da estabilidade angular das máquinas síncronas (STEVENSON, 1974).

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Estabilidade transitória

A estabilidade transitória compreende-se na habilidade que o sistema de potência tem de permanecer com seu sincronismo após sofrer uma grande perturbação, como por exemplo: perda de geração, curto-circuito ou perda de uma grande carga. A resposta do sistema para estas perturbações envolve grandes variações dos ângulos dos rotores dos geradores, valor das tensões, fluxo de potência, e outras variáveis. A perda de sincronismo devido à instabilidade transitória é usualmente percebida nos primeiros segundos após o distúrbio (KUNDUR, 1994).

Dentre os fatores que influenciam a estabilidade transitória, pode-se citar:

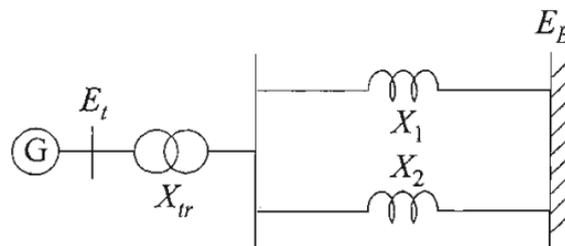
Quão carregados estão os geradores.

- A potência entregue pelo gerador durante a falta (isso depende da localização e do tipo de falta).
- O tempo de eliminação da falta.
- A reatância do sistema de transmissão pós-falta.
- A reatância do gerador. Uma reatância baixa aumenta a potência máxima transmitida e reduz o ângulo inicial.

- A inércia do gerador. Quanto maior a inércia, menor a variação do ângulo. Isso faz reduzir a energia cinética durante a falta. Isto é, a área A1 é reduzida.
- A magnitude da tensão interna (E') do gerador. Isto depende do sistema de excitação.
- A magnitude da tensão da barra infinita (E_b).

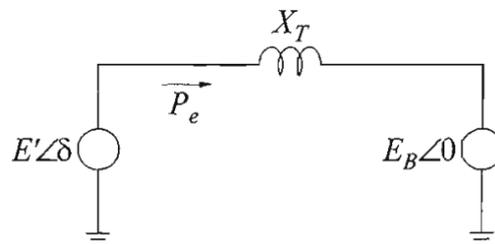
As figuras a seguir mostram respectivamente um Sistema Máquina x Barra Infinita e o Circuito Equivalente Reduzido do Sistema Máquina x Barra Infinita:

Figura 1 – Sistema máquina x Barra infinita



Fonte: adaptado de (KUNDUR, 1994)

Figura 2 – Circuito equivalente reduzido do Sistema máquina x Barra Infinita



Fonte: adaptado de (KUNDUR, 1994)

A equação da potência elétrica ativa que é entregue por um gerador é dada por:

$$(1.1) \quad P_e = \frac{E'E_b}{X_T} \text{sen} \delta = P_{\text{máx.}} \text{sen} \delta$$

Onde:

P_e = potência elétrica ativa entregue pelo gerador E' = tensão interna da máquina

δ = ângulo entre a tensão interna da máquina e a tensão da barra infinita E_b = tensão da barra infinita

X_T = reatância equivalente

2.1.1 Critério das áreas iguais

Tratando-se de grandes perturbações no sistema, é necessário usar modelos não lineares às máquinas e outros equipamentos na análise dos problemas de estabilidade transitória. Para casos de um gerador conectado a barra infinita, há um método derivado da interpretação gráfica do problema de estabilidade transitória, chamado de *Critério das Áreas Iguais* (KUNDUR, 1994). Este método permite uma compreensão sobre os fenômenos físicos envolvidos nos problemas de estabilidade transitória. A Equação de oscilação pode ser escrita por:

$$(1.2) \quad \frac{2H d^2\delta}{\omega_0 dt^2} = P_m - P_{m\acute{a}x. \text{sen}\delta}$$

Manipulando matematicamente temos:

$$(1.3) \quad \left[\frac{d\delta}{dt} \right]^2 = \int \frac{\omega_0 (P_m - P_e)}{H} d\delta$$

$$(1.4) \quad \int_{\delta_0}^{\delta_m} \frac{\omega_0}{H} (P_m - P_e) d\delta = 0$$

$$(1.5) \quad E1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta = A1$$

$$(1.6) \quad E2 = \int_{\delta_1}^{\delta_m} (P_e - P_m) d\delta = A2$$

As Figuras 3 e 4 representam um sistema submetido a um curto-circuito localizado no ponto F:

Figura 3 – Diagrama unifilar

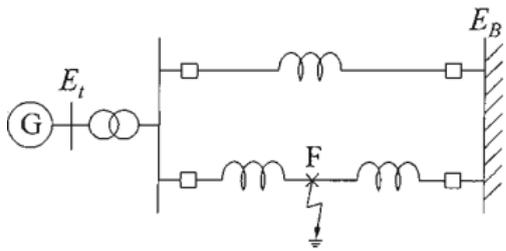
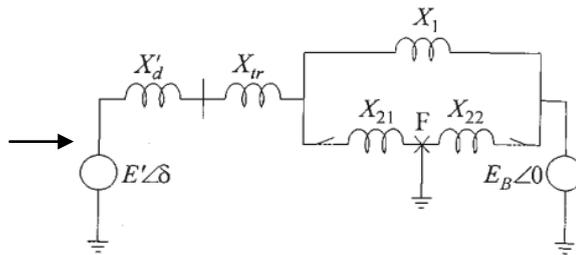


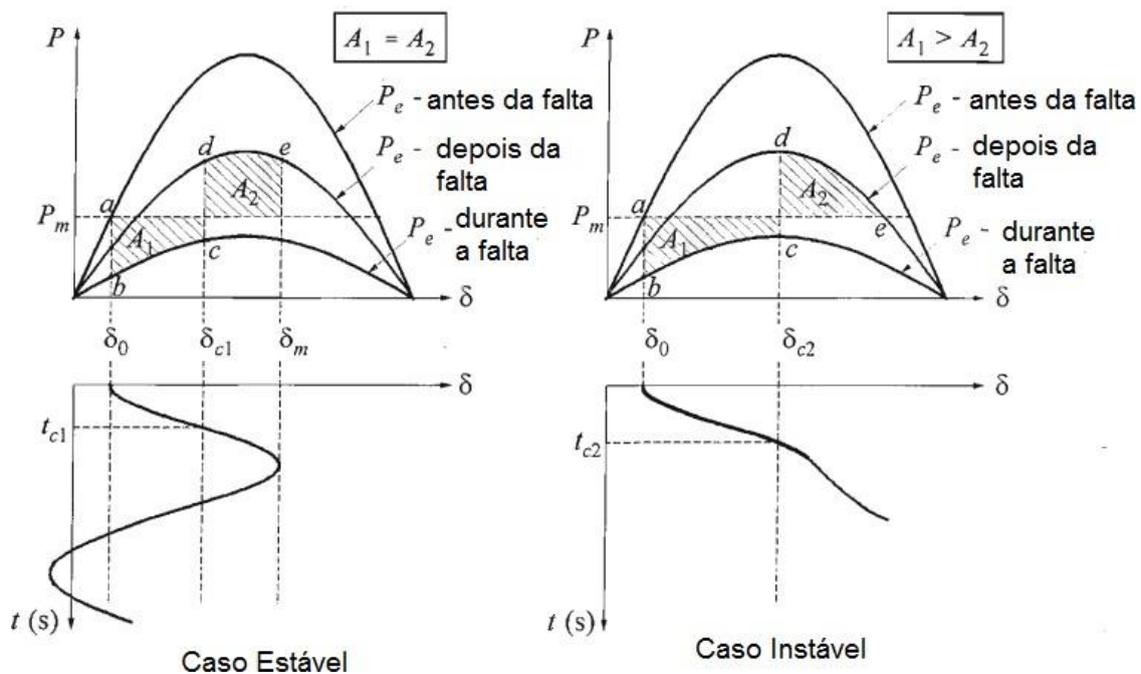
Figura 4 – Circuito Equivalente



Fonte: adaptado de (KUNDUR, 1994)

A Figura 5 detalha graficamente o caso de estabilidade e instabilidade do sistema perante a resposta a um curto-circuito.

Figura 5 – Caso Estável e Caso Instável



Fonte: adaptado de (KUNDUR, 1994)

2.1.2 Sistema trifásico equilibrado e desequilibrado

Define-se como sistema equilibrado, aquele que possui a amplitude das 3 fases idênticas, assim como o defasamento entre elas. De modo contrário, diz-se que o sistema é desequilibrado.

Figura 6 – Sistema 3 Φ Equilibrado

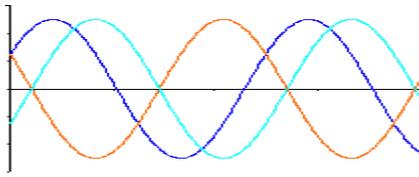
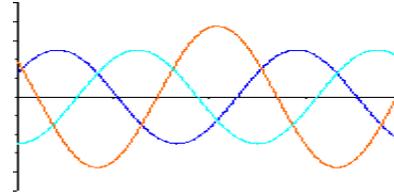


Figura 7 – Sistema 3 Φ Desequilibrado



Fonte: adaptado de (RESENDE, 2019)

2.1.3 **Sistemas Elétricos de Potência e a estabilidade**

Segundo Stevenson (1974), o Sistema Elétrico de Potência (SEP) se divide em 3 seguimentos, que são eles: geração, transmissão e distribuição. Na geração, os geradores síncronos operam com velocidade constante, a qual se converte determinada energia em energia elétrica. Na transmissão, a eletricidade obtida é transportada para os centros de consumo, onde por fim, é distribuída aos consumidores de várias classes, através das redes de distribuição. Ou seja, o Sistema Elétrico de Potência tem o objetivo de fornecer energia elétrica com qualidade ao consumidor. Qualidade, no sentido de entregar a energia respeitando determinados valores limites de tensão e frequência; pois quando estes limites não estão adequados, o sistema pode entrar em colapso, provocando graves problemas.

No quesito estabilidade, um sistema é considerado estável quando possui a capacidade de suportar pequenas e/ou grandes perturbações, em que haja a interrupção no fornecimento de energia elétrica (KUNDUR, 1994). De acordo com Bretas e Alberto (2000), a estabilidade pode ser definida como a capacidade de qualquer sistema, para uma dada condição de operação inicial, recuperar um estado de equilíbrio operacional após ter sido submetido a uma perturbação física; inclusive, esse conceito é bastante usado em análises de sistemas elétricos para descrever seu funcionamento. Por conseguinte, diz-se que o sistema elétrico perde sua condição de estabilidade elétrica quando um gerador síncrono que o compõe perde sua capacidade de manter o sincronismo girante com o sistema, de modo que o sistema instável opera em condições diferentes das nominais, podendo estas serem inadequadas e/ou proibitivas, por ocorrência de uma falta em suas proximidades.

Normalmente os Sistemas Elétricos de Potência são submetidos diariamente a diversos tipos de contingências. Para que se mantenha a transmissão estável de um sistema, é necessário que os dispositivos de proteção isolem em tempo hábil o

local de ocorrência de uma contingência. A habilidade de inúmeras máquinas síncronas manterem o sincronismo em condições transitórias, propiciadas por diferentes distúrbios, determinará o comportamento dinâmico de um Sistema Elétrico de Potência. Ou seja, entende-se que o desempenho de um sistema elétrico depende do quão estável o sistema é, em diferentes situações. Ao sofrer um distúrbio de pequena magnitude e curta duração, o sistema tende a voltar ao seu ponto de funcionamento. No entanto, caso a perturbação seja de grande amplitude e de longa duração, o mesmo não irá ocorrer, deixando assim o sistema comprometido. No período transitório que se segue à ocorrência de uma perturbação, o funcionamento do sistema é oscilatório por natureza, o que influencia nas potências que circulam nas linhas. Caso o sistema seja instável, estas oscilações são fortemente amortecidas, mas se o sistema for instável, as oscilações não recuperam o estado de equilíbrio operacional.

Baseando-se neste conceito, pode-se dizer que os estudos de estabilidade procuram determinar o comportamento das máquinas síncronas após a ocorrência de uma determinada perturbação. Por conta da complexidade, geralmente os estudos de estabilidade são divididos quanto aos fenômenos de instabilidade nos seguintes parâmetros: frequência, tensão e ângulo do rotor. A estabilidade do ângulo do rotor é subdividida em estabilidade à pequena perturbação (ou dinâmica) e estabilidade à grande perturbação (ou transitória). Como finalidade do artigo, a análise feita terá foco à estabilidade transitória.

O torque eletromagnético de uma máquina síncrona em operação normal contrabalança o torque mecânico aplicado ao eixo da máquina, gerando assim potência elétrica útil para gerar trabalho (FITZGERALD et al., 2006).

Durante a ocorrência de um distúrbio, essa compensação pode ser desequilibrada a ponto de diminuir, ou até mesmo eliminar a característica de geração do sistema. O estudo da estabilidade do ângulo do rotor, portanto, se propõe a analisar as variáveis que contribuem para manter ou restaurar o equilíbrio entre torque eletromagnético e torque mecânico de geradores síncronos.

Segundo Kundur (1994), as alterações no torque elétrico de uma máquina síncrona, após a ocorrência de um distúrbio, são classificadas em dois tipos: torque sincronizante, proporcional e em fase no tempo com a variação angular; e torque de

amortecimento, correlacionado com velocidades crescentes no rotor. A inexistência do primeiro resulta numa desestabilização aperiódica do sistema. Já a inexistência do segundo, resulta em instabilidade oscilatória. Fisicamente, na iminência de uma falta, um Sistema Elétrico de Potência opera com potência elétrica e potência mecânica iguais. Durante a ocorrência de um curto-circuito, a transferência de potência no sistema diminui, de forma que a potência mecânica do sistema se torna maior que a potência elétrica. Nessa situação, as máquinas que constituem o sistema aceleram, acarretando em um desvio de velocidade e, por fim, no aumento do ângulo de carga (BRETAS e ALBERTO, 2000).

Quando os dispositivos de proteção do sistema atuam com o intuito de eliminar o defeito, as máquinas podem desacelerar, indicando que o sistema voltará a um ponto de equilíbrio estável, ou continuar a acelerar, indicando que o sistema não operará num ponto de equilíbrio estável. Para garantir que o sistema volte a operar em um ponto de equilíbrio após a ocorrência de uma falta, é necessário determinar um ângulo de carga limite, tal que quando não atingido permite a restauração de um ponto de operação estável. Esse ângulo, também denominado ângulo crítico.

2.1.4 Estabilidade (pequenas perturbações)

Constantemente um Sistema Elétrico de Potência está submetido às pequenas perturbações. Um dos exemplos mais comuns destacam-se as variações de velocidade e de carga, que por sinal, não ocasionam grandes problemas ao sistema de modo geral. Ou seja, são problemas que normalmente não são suficientes para desencadear a perda de sincronismo (BOMFIM, 2000). Algumas literaturas citam que o termo estabilidade dinâmica é utilizado como sinônimo de estabilidade a pequena perturbação e é empregado para descrever a resposta de um sistema dinâmico a pequenas perturbações (KUNDUR et al., 2004). Quando o sistema elétrico sofre uma perturbação, e esta não provoca alterações relevantes ao ponto de operação do sistema, significa que essa perturbação é considerada pequena, ou seja, o sistema continua operando bem próximo ao ponto de operação de pré-perturbação.

Segundo Bomfim (2000), o comportamento de um sistema devido a uma pequena perturbação depende de diversos fatores, como por exemplo, a condição

inicial do sistema, o sistema de transmissão e o tipo dos sistemas de excitação utilizados. Deste modo, dependendo de suas características, a instabilidade resultante em um sistema pode ser de duas formas: aumento monotônico (aperiódico) no ângulo do rotor devido à insuficiência do torque sincronizante, ou oscilações angulares de amplitudes crescentes devido à insuficiência do torque de amortecimento. Como exemplo, Bomfim (2000) afirma que em um gerador sem sistema de excitação e conectado radialmente a um grande sistema de potência, a instabilidade acontece devido à insuficiência de torque de sincronismo, o que faz com que o sistema perca a estabilidade aperiodicamente. Já no caso em que o gerador possui um sistema de excitação, o que acontece em geral, é uma perda de sincronismo oscilatória devido à insuficiência de torque de amortecimento.

2.1.5 Estabilidade (grandes perturbações)

Encontra-se na literatura, correlação do termo estabilidade transitória aos estudos de estabilidade rotórica a grandes perturbações. Perdas de linhas de transmissão e curtos-circuitos trifásicos são exemplos de grandes perturbações em um Sistema Elétrico de Potência.

Um sistema é considerado transitoriamente estável se, após a ocorrência de uma contingência importante, se mantiver em sincronismo, evoluindo para um ponto de funcionamento estável (BRETAS e ALBERTO, 2000).

A análise do comportamento dos estudos da estabilidade transitória é feita durante os segundos iniciais após a ocorrência de grandes perturbações. Devido ao conjunto de simplificações que são válidas para os segundos iniciais após a ocorrência da perturbação, normalmente, nesses estudos os modelos dos componentes são mais simples. Nestes casos, a resposta do sistema envolve grandes excursões dos ângulos dos rotores, sendo então altamente influenciados pela relação não linear da potência elétrica com o ângulo do rotor.

2.1.6 *Análise da estabilidade em Sistemas Elétricos de Potência (períodos)*

É imprescindível definir os períodos de análise do sistema, a fim realizar estudos sobre o comportamento transitório dos Sistemas Elétricos de Potência, visto que a dinâmica deste se modifica de acordo com a alteração da configuração da rede durante a falta e após a atuação da proteção. Desse modo, a análise divide-se em três períodos: antes da falta, durante a falta e depois da falta. O período antes da falta é definido como o instante de operação do sistema imediatamente antes da ocorrência de uma grande perturbação; nesse momento o sistema opera em sua condição nominal. Durante o período em falta, que compreende desde a ocorrência de uma falta até a atuação dos equipamentos de proteção que a isolam, as características do sistema se alteram de suas nominais. Por fim, no período depois da falta, a falta é eliminada com a atuação dos dispositivos de proteção e o sistema passa a operar com novas características.

O tempo que os equipamentos de proteção levam para extinguir uma falta é primordial para manter um estado estável de operação de um sistema. Esse tempo é definido como tempo crítico de abertura e constitui-se no tempo máximo para eliminar uma falta sem que haja perda de estabilidade. (BRETAS e ALBERTO, 2000).

Sendo assim, a eliminação de uma falta antes do tempo crítico tem como resultado um sistema estável, e após o tempo crítico, um sistema instável.

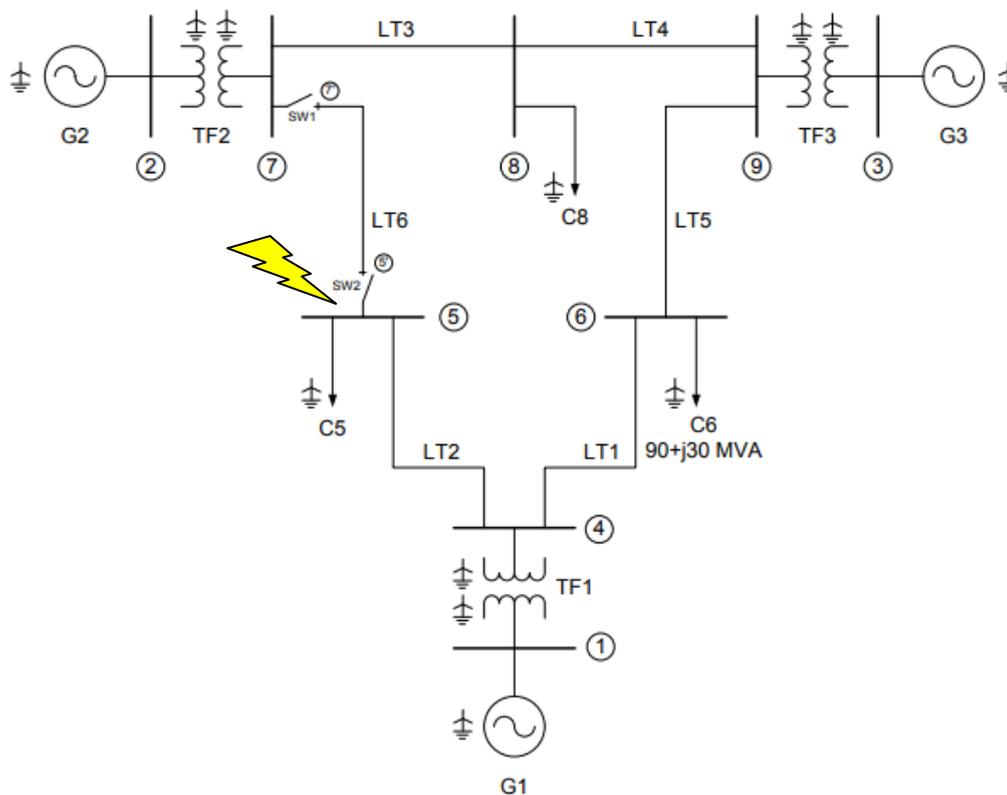
2.2 Simulações e resultados

Mediante alguns conceitos sobre estabilidade transitória, sistema equilibrado e desequilibrado, neste capítulo será feita a análise da estabilidade transitória em duas situações de um sistema trifásico (Sistema WSCC – 9 barras x 3 máquinas) equilibrado na ocorrência de um curto-circuito fase-terra na barra 5, utilizando o software Simulight.

- Situação 1: ocorre um curto-circuito fase-terra na fase A no instante de tempo $t=1s$; o sistema de proteção atua em $t=1,2s$ removendo o curto e abrindo os disjuntores 5' e 7', sendo feita a **abertura tripolar**.
- Situação 2: ocorre um curto-circuito fase-terra na fase A no instante de

tempo $t=1s$; o sistema de proteção atua em $t=1,2s$ removendo o curto e abrindo os disjuntores 5' e 7', sendo feita a **abertura monopolar**.

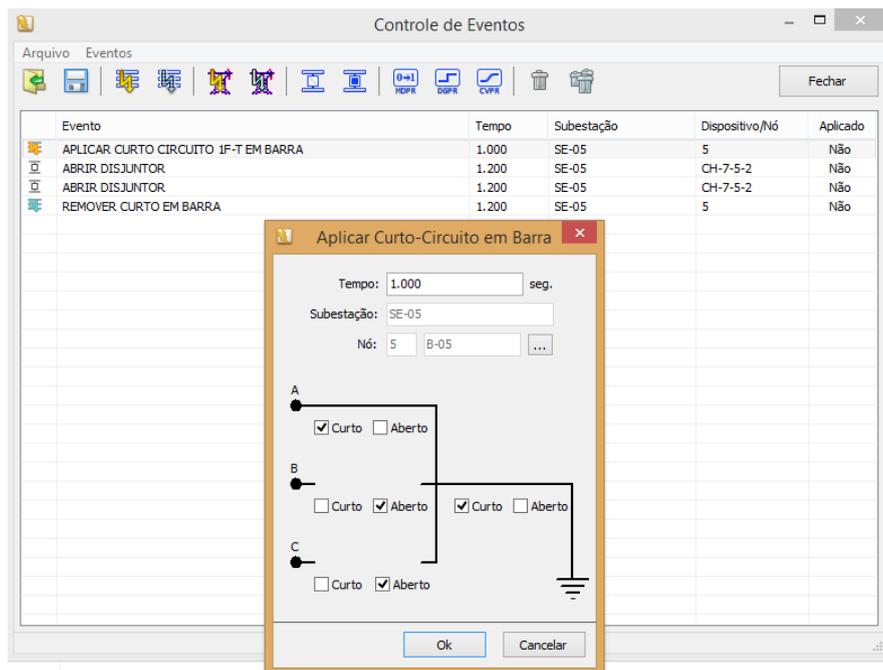
Figura 8 – Sistema WSCC (9 barras x 3 máquinas)



Fonte: adaptado de <http://doczz.com.br/doc/600640/sistema-wsc--9-barras-x-3-m%C3%A1quinas->

A Figura abaixo representa o curto-circuito fase-terra na fase A para ambas as situações (já que a análise está na questão do tipo de abertura tripolar e monopolar) aplicado na barra 5 com a sequência dinâmica do evento criado. Onde se pode verificar sequencialmente no tempo: aplicação do curto-circuito, abertura dos disjuntores 5' e 7' e a remoção do curto na barra.

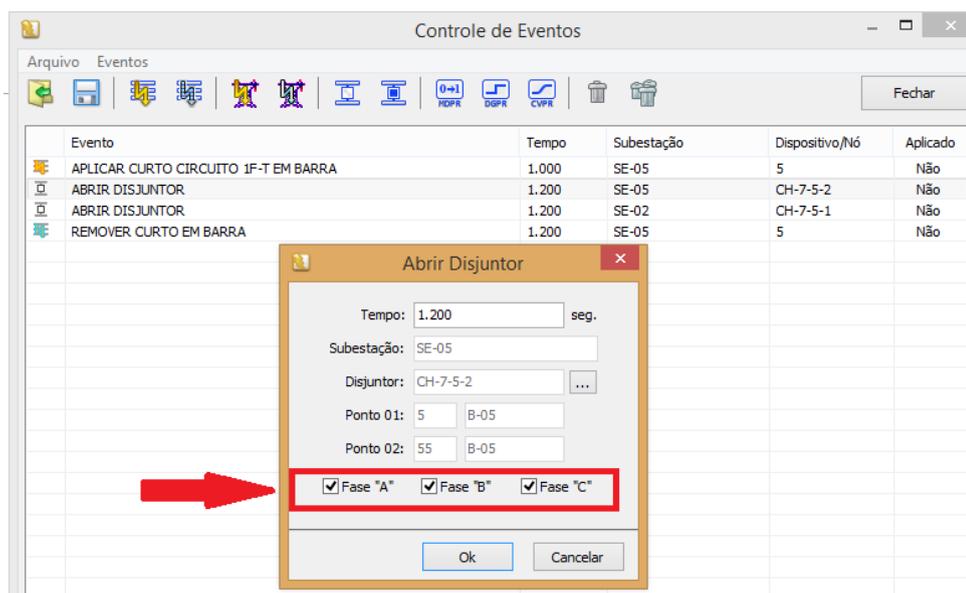
Figura 9 – Aplicação do curto-circuito fase-terra na fase A



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

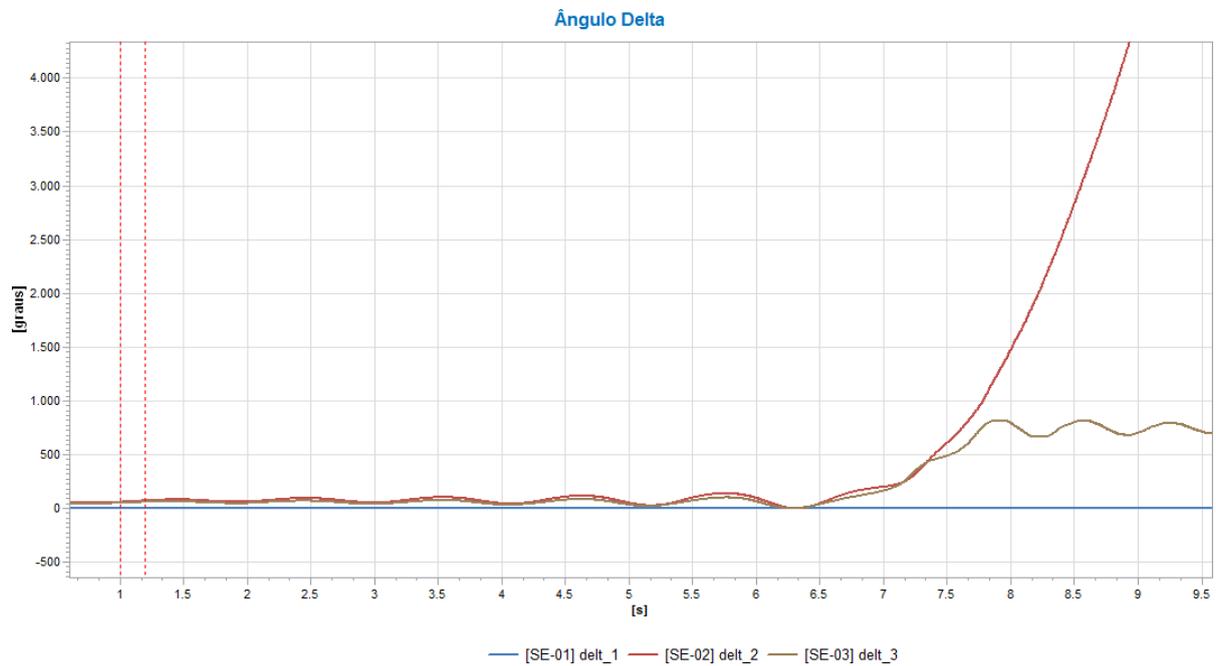
Situação 1 – Ocorre um curto-circuito fase-terra na fase A no instante de tempo $t=1s$; o sistema de proteção atua em $t=1,2s$ removendo o curto e abrindo os disjuntores 5' e 7', sendo feita a **abertura tripolar**. As Figuras abaixo apresentam a abertura tripolar, o Ângulo Delta x tempo e o Módulo da Tensão x tempo referente às SE 1, 2 e 3.

Figura 10 – Abertura tripolar



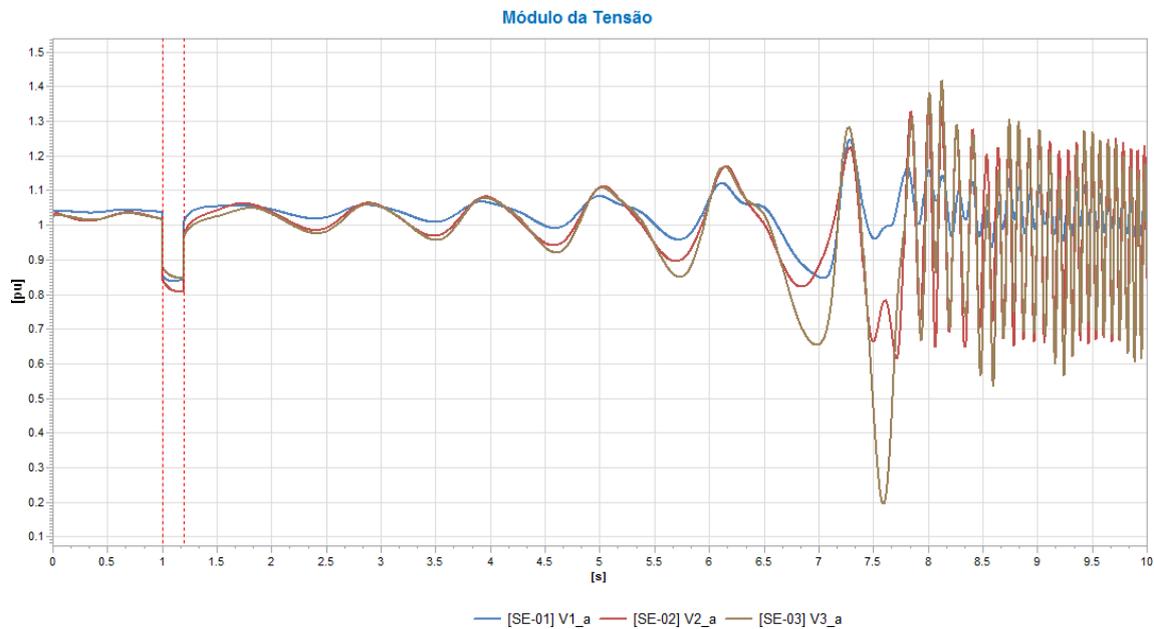
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 11 – Ângulo delta x tempo (abertura tripolar)



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

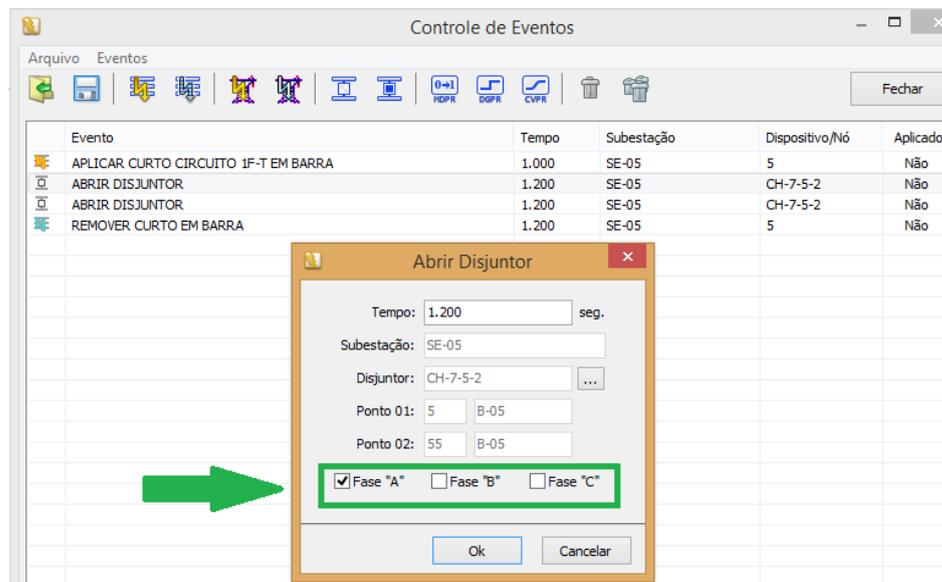
Figura 12 – Módulo da tensão x tempo (abertura tripolar)



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

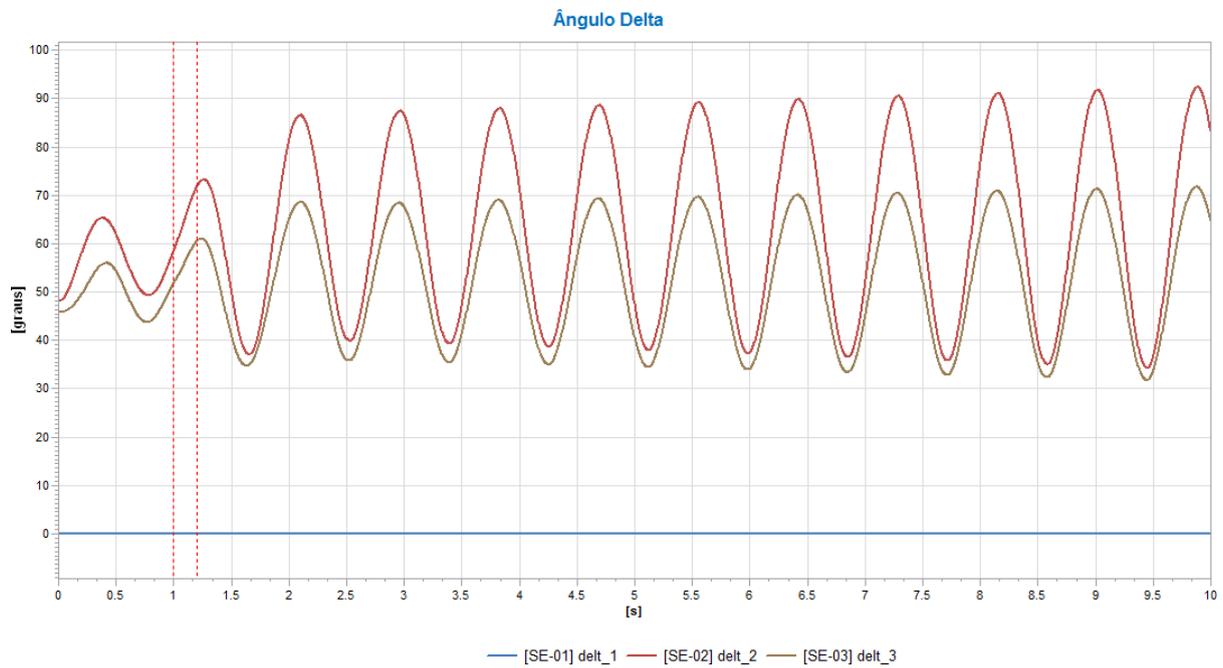
Situação 2 - Ocorre um curto-circuito fase-terra na fase A no instante de tempo $t=1s$; o sistema de proteção atua em $t=1,2s$ removendo o curto e abrindo os disjuntores 5' e 7', sendo feita a **abertura monopolar**. As Figuras abaixo apresentam a abertura monopolar, o Ângulo Delta x tempo e o Módulo da Tensão x tempo referente às SE 1, 2 e 3.

Figura 13 – Abertura monopolar



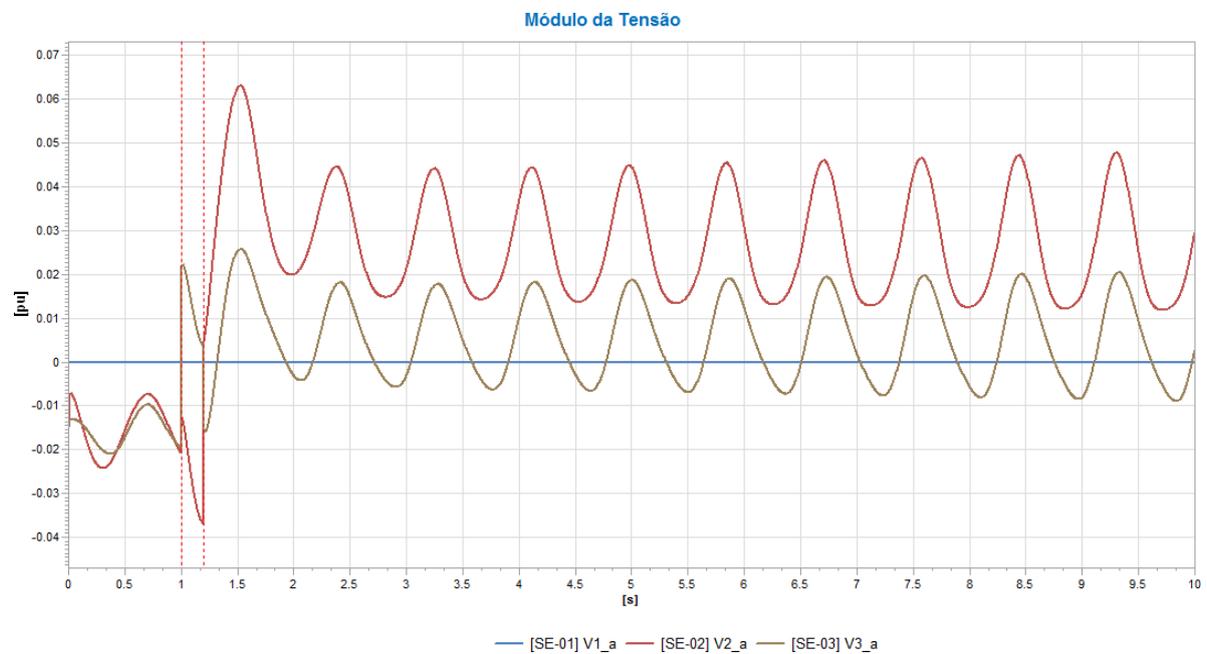
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 14 – Ângulo delta x tempo (abertura monopolar)



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 15 – Módulo da tensão x tempo (abertura monopolar)



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado neste trabalho foi ter feito a análise à estabilidade transitória de um sistema trifásico equilibrado na ocorrência de um curto-circuito utilizando o software Simulight. O sistema escolhido foi o Sistema WSCC (Western Systems Coordinating Council) – 9 barras x 3 máquinas representado pela Figura 8, onde o objetivo foi analisar a estabilidade transitória do Sistema WSCC em duas situações na ocorrência de um curto-circuito fase-terra na barra 5. Na primeira situação, foi analisada a ocorrência de um curto-circuito fase-terra na fase A no instante de tempo $t=1s$, onde o sistema de proteção atuou em $t=1,2s$, removendo o curto-circuito e abrindo os disjuntores 5' e 7', sendo feita a abertura tripolar. Na segunda situação, o Sistema foi submetido às mesmas condições da primeira, sendo que nesta, foi realizada a abertura monopolar.

Mediante todas as simulações computacionais realizadas do Sistema WSCC, avaliando a Figura 11, chega-se na conclusão que para a Situação 1 o sistema é instável, devido a defasagem de sincronismo entre os ângulos delta 1, 2 e 3. A mesma situação de instabilidade pode ser observada através da Figura 12, referente ao módulo da tensão no tempo. Ressalta-se que para a Situação 1 foi feita a análise da perturbação realizando a abertura tripolar. Para a Situação 2, verifica-se por meio da Figura 14 que o sistema é estável, devido a ocorrência de sincronismo entre os ângulos delta 1, 2 e 3. A mesma situação de estabilidade pode ser observada através da Figura 15, referente ao módulo da tensão no tempo.

Por fim, através do Estudo de Caso do Sistema WSCC realizado no software Simulight, concluiu-se que um sistema elétrico ao enfrentar um tipo de perturbação (que no caso deste estudo foi o curto-circuito), pode apresentar respostas diferentes no sentido da análise referente à estabilidade transitória de acordo com o tipo de abertura realizada, onde foi verificado que na ocorrência de falta na barra 5, após a retirada do curto e dos disjuntores, chega-se na conclusão que realizando a abertura das 3 fases, o sistema se comporta de modo instável, e que realizando a abertura em apenas uma fase, o sistema se comporta de modo estável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOMFIM, A. L. B. **Ajuste Coordenado de Estabilizadores de Sistema de Potência Usando Algoritmos Genéticos**. 2000. 181 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000. Disponível em:

<<http://www.eletrica.ufrj.br/teses/textocompleto/2000037001.pdf>>. Acesso em: Janeiro, 2020.

BRETAS, N. G.; ALBERTO, L. F. C. **Estabilidade Transitória em Sistemas Eletroenergéticos**. São Carlos – SP: EESC/USP, 2000.

Divya Asija et al. **Power Flow Study and Contingency status of WSCC 9 Bus Test System using MATLAB**. International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE), Amity University, Noida (UP), 2015.

FITZGERALD, A.E. Máquinas Elétricas - 6.ed.: Com Introdução à Eletrônica de Potência Bookman Companhia Ed, 2006.

KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSON, G.; BOSE, A.; CANIZARES, C.; HATZIARGYRIOU, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; VAN CUTSEM, T.; VITTAL, V. **Definition and Classification of Power System Stability**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, n. 2, p. 1387 – 1401, May 2004. Disponível em:<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1318675>>. Acesso em: Fevereiro, 2020.

MATA, Clayton Guimarães da. **Uma contribuição na análise da estabilidade transitória dos sistemas elétricos de distribuição na presença de geração distribuída**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora: MG. Agosto de 2005.

PHABA KUNDUR. **Power System Stability and Control**. EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, Inc., New York, USA, 1994. Chapter 13, p.827-835.

RESENDE, Maria José. **Sistema Equilibrado**. Disponível em: e-lee.ist.utl.pt/realisations/CircuitsElectriques/SistemasTrifasicos/ConceitosBasicos/2_aula. Acesso em 26 de outubro de 2019.

SANTOS, Fernando M. C. da Silva. **Modelagem e avaliação de estabilidade transitória de aerogeradores síncronos com magneto permanente em sistemas de energia elétrica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Pará. Belém do Pará. Abril de 2005.

SILVA, Roberval Madeira da. **Análise de estabilidade transitória na otimização de sistemas elétricos de potência**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília: DF. Dezembro de 2009.

Sistema WSCC (9 Barras x 3 Máquinas). Disponível em: <http://doczz.com.br/doc/600640/sistema-wsc--9-barras-x-3-m%C3%A1quinas->. Acesso em 16 de novembro de 2019.

W. D. Stevenson Jr. – **“Elementos de Análise de Sistemas de Potência”**. McGraw-Hill, 2ª. Edição em Português, 1974.