

ANÁLISE DE ESTABILIDADE ANGULAR UTILIZANDO OS SOFTWARES ANAREDE E ANATEM

*Natalia Bastos de Sousa*¹
*Orientador: Daniel Pinheiro Bernardon*²

RESUMO

O presente artigo apresenta a utilização dos softwares ANAREDE e ANATEM, visando apontar a falsa operação do sistema, em relação ao sincronismo das máquinas síncronas, que pode ocorrer no ANAREDE, pois apesar de realizar análise dos fluxos de potência, retornando os níveis de reativos do sistema e informando sobrecargas e quedas nos níveis de tensão nas barras, por exemplo, o mesmo não realiza a análise não-linear da estabilidade eletromecânica, realizada pelo ANATEM, frente à perturbações variadas.

Palavras chave: Sistemas de Potência, Estabilidade, ANAREDE, Fluxo de Potência, ANATEM, Estabilidade Angular.

ABSTRACT

The present article presents the use of ANAREDE and ANATEM softwares, aiming to point out the false operation of the system, in relation to the synchronism of the synchronous machines, that can occur in ANAREDE, because despite performing analysis of the power flows, returning the levels of system reactors and reporting overloads and decreases in the voltage levels in the bars, for example, it does not perform the non-linear analysis of the electromechanical stability, performed by ANATEM, in the face of various perturbations.

Keywords: Power Systems, Stability, ANAREDE, Power Flow, ANATEM, Angular Stability.

¹ Discente de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS.

² Professor Associado I da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência variam em tamanho e componentes estruturais, entretanto todos possuem as mesmas características básicas como: serem compostos por sistemas trifásicos operando com tensão constante: utiliza-se equipamentos trifásicos nas instalações de Geração e Transmissão; as cargas industriais são invariavelmente trifásicas; as cargas monofásicas, residenciais e comerciais, são distribuídas igualmente entre as fases, de modo a formar um sistema trifásico efetivamente balanceado; usam máquinas síncronas para geração de eletricidade; Transmitem potência através de distâncias significativas, para consumidores espalhados por grandes áreas, o que requer um sistema de transmissão que compreenda subsistemas operando em diferentes níveis de tensão (KUNDUR, 1994).

Os SEP são projetados visando atender à demanda de energia dentro de certos limites de tensão de frequência, devem ser capazes de operar em regime permanente de forma satisfatória, em outras palavras, devem ser robustos de maneira a manter seu funcionamento numa situação de equilíbrio tanto para condições normais de operação quanto na presença de defeitos ou perturbações, garantindo a continuidade de serviço.

Um SEP consiste em vários elementos individuais conectados que formam um largo e complexo sistema que seja capaz da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica através de uma larga área geográfica. Logo, em consequência dessa interconexão de elementos, o SEP apresenta uma larga variedade de interações dinâmicas possíveis de ocorrer, podendo afetar apenas alguns dos outros elementos, ou afetando fragmentos do sistema, enquanto outras dessas dinâmicas podem afetar o sistema como um todo. Como cada efeito dinâmico exibe algumas características únicas, a dinâmica do SEP pode ser convenientemente dividida em grupos caracterizados por sua causa, consequência, período de tempo, caráter físico ou pelo lugar no sistema em que ocorrem (MACHOWSKI; BIALEK, BUMBY, 2008).

Pode-se dizer que duas das principais causas de dinâmicas em sistemas de potência são mudanças na demanda de potência e ocorrência de distúrbios, como por exemplo: chaveamento de capacitores, curto circuito, descargas atmosféricas, e etc., uma preocupação primordial ao lidar com sistemas de potência é como o SEP irá responder à ambas situações. Com isso, entramos no campo de estudo da

Estabilidade de Sistemas de Potência, entendido como a habilidade do sistema voltar ao seu estado de equilíbrio (ou um estado de equilíbrio aceitável), depois de sujeito à distúrbios físicos (KUNDUR, 2004).

A Instabilidade em sistemas de potência pode se apresentar de diferentes formas dependendo da configuração do sistema e seu modo de operação. Tradicionalmente o problema de estabilidade tem sido em se manter a operação síncrona (KUNDUR, 1994). É de grande importância que as máquinas síncronas permaneçam em sincronismo, uma vez que, os SEP's dependem destas para a geração de potência elétrica. A instabilidade como comentado anteriormente pode ocorrer de diferentes maneiras, podendo ocorrer sem a perda de sincronismo, contudo, neste trabalho é realizado o estudo apenas acerca da perda de sincronismo e falsa operação em sincronismo das máquinas síncronas conectadas ao SEP durante simulações do sistema.

Neste sentido, o objetivo deste artigo é fazer uma análise comportamental de um dado SEP, quanto a perda de sincronismo das máquinas síncronas conectadas ao sistema quando o mesmo é sujeito a distúrbios (saída de uma linha, alterações no diagrama de cargas). Se o distúrbio for de pequena amplitude e de curta duração espera-se que o sistema volte ao seu ponto de operação anterior à ocorrência do mesmo, já para perturbações maiores ou de longa duração, espera-se que as máquinas conectadas ao sistema saiam de operação. Para realizar tal estudo de estabilidade, utiliza-se dos *softwares* Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM) e Análise de Redes Elétricas (ANAREDE). Realizando, assim, um Estudo de Estabilidade, determinando o comportamento das máquinas síncronas após a ocorrência da perturbação.

2. REFERENCIALTEÓRICO

Um SEP é dito estável quando todas as máquinas síncronas ligadas ao sistema em uma determinada condição inicial, voltam ao sincronismo após uma dada perturbação. Pela definição de estabilidade, a mesma está associada aos conceitos de condição inicial e perturbação, ao afirmarmos que um sistema é estável é necessário definirmos para que tipo de falta, por qual duração e em quais condições iniciais o sistema, objeto de estudo, é estável (KUNDUR, 1994).

Em uma configuração de equilíbrio, um SEP pode ser estável para um dado distúrbio físico (grande), e instável para outro. É impraticável e economicamente inviável projetar um SEP para ser estável para cada possível ocorrência de distúrbios (KUNDUR, P. et al. 2004).

2.1 ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

O termo “estabilidade de sistemas de potência” é aplicável a sistemas de potência em corrente alternada para denotar uma condição em que as várias máquinas síncronas do sistema permanecem mutuamente em sincronismo. “Instabilidade”, por outro lado, denota uma condição que envolve perda de sincronismo (COSTA, 2015).

A definição de estabilidade de SEP se aplica para o sistema interconectado como um todo. Muitas vezes, no entanto, a estabilidade de um gerador em particular ou grupo de geradores é igualmente de interesse. Um gerador remoto pode perder o sincronismo sem causar instabilidade em cascata do sistema principal. Similarmente, a estabilidade de cargas em particular ou regiões de carga podem ser de interesse; motores podem perder estabilidade sem causar instabilidade em cascata do sistema principal (KUNDUR, P. et al., 2004).

Um SEP está sempre operando com mudanças em seu meio, uma vez que cargas, saídas de geradores e outros parâmetros chave estão sempre mudando. Logo, sua estabilidade, quando sujeito à um distúrbio, depende das condições de operação iniciais e também da natureza do distúrbio.

Na situação de regime permanente, após a perturbação, todas as máquinas síncronas possuem a mesma velocidade, e o total das potências elétricas geradas nas máquinas é exatamente igual à soma das potências absorvidas nas cargas mais as perdas nas linhas, diz-se que o sistema está em um ponto de operação estável. No exemplo de uma grande perturbação, um novo ponto de operação é excursionado, e dependendo das condições do SEP ou da magnitude da perturbação, este ponto de operação não será atingido, levando o sistema à instabilidade (DA MATA; 2005).

2.2 Estabilidade de Máquinas Síncronas

Uma falta em uma linha de transmissão de alta tensão ou a perda de uma importante unidade geradora são exemplos de grandes impactos. Se algum desses

grandes impactos acontecerem, a máquina síncrona pode perder o sincronismo. Esse problema é estudado com problema de estabilidade transitória. Em primeiro lugar, esses impactos tem uma probabilidade finita de ocorrer, sendo assim, certos grandes impactos que o sistema deve suportar são selecionados a priori, antes do projeto do SEP. Em segundo lugar, a habilidade do sistema de subsistir a certos distúrbios depende da sua precisa condição de operação no momento da ocorrência do distúrbio, como comentado anteriormente. Uma mudança no carregamento do sistema, cronograma de geração, interconexão de linhas, pode gerar resultados completamente diferentes no estudo de estabilidade para o mesmo distúrbio. Por isso, o estudo de estabilidade transitória é um estudo bastante específico, onde o engenheiro conclui para dada condição do sistema e para dado impacto se a máquina síncrona irá ou não manter o sincronismo (ANDERSON; FOUAD, 2003). Os estudos de estabilidade transitória analisam o como o sistema irá se comportar no primeiro segundo, após a ocorrência dessas grandes perturbações.

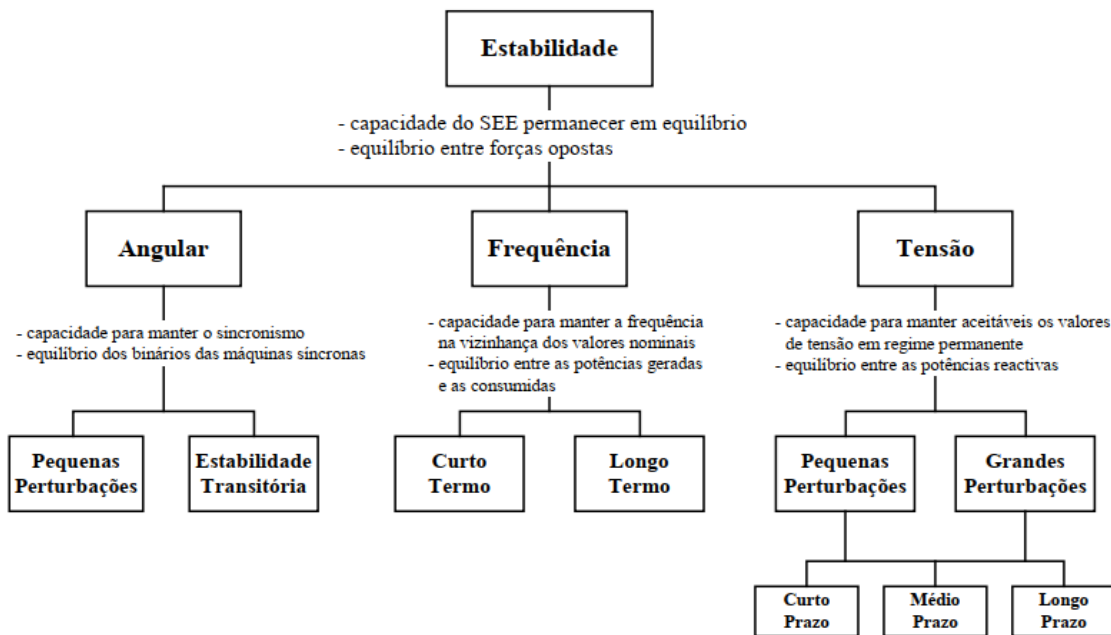
Considerando aleatórias ocorrências de pequenas mudanças no carregamento do sistema, o esperando para essa situação é que o operador tenha programado capacidade maquinária suficiente para atender a carga. É, também, esperado que cada máquina síncrona esteja operando na porção estável da sua curva potência-ângulo, a porção em que a potência aumenta juntamente com o acréscimo do ângulo (ANDERSON; FOUAD, 2003). Atingindo um novo ponto de equilíbrio, isso supondo que a velocidade do gerador permanece constante, contudo, na realidade ele desacelerará momentaneamente, até que o seu regulador de velocidade atue no sentido de aumentar a potência mecânica de entrada, de modo a equilibrar o aumento da potência elétrica de saída (COSTA, 2015). Ao ser atingido um ponto limite de operação, qualquer aumento adicional de carga resultará em um aumento no deslocamento angular, que acarretará o decréscimo de potência, ao invés do aumento, o sincronismo é perdido.

2.3 Classificação de Estabilidade de Sistemas de Potência

O estudo da estabilidade de um SEP divide-se em três grandes categorias, como comentado anteriormente: Estabilidade angular; Estabilidade de Frequência e Estabilidade de Tensão. Essas categorias, juntamente com suas subcategorias são apresentadas na Figura 1.

Como apresentado na Figura 1 a estabilidade angular estuda a capacidade para manter o sincronismo e o equilíbrio binário das máquinas síncronas. Logo, neste artigo será feito o estudo da estabilidade angular, ou ainda, estabilidade angular rotórica.

Figura 1: Classificação dos diferentes tipos de estabilidade.



Fonte: (Barbosa, 2013, p. 7).

2.4 ESTABILIDADE ROTÓRICA

A estabilidade angular rotórica refere-se à habilidade da máquina síncrona de um sistema de potência interconectado em permanecer em sincronismo após ser sujeito a um distúrbio (KUNDUR, 1994). Isso depende da capacidade de manter ou restaurar o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o torque mecânico de cada máquina síncrona do sistema. As instabilidades que podem acontecer, ocorrem na forma de oscilações crescentes angulares de alguns geradores, levando a perda de sincronismo com outros geradores (KUNDUR, P. et al., 2004). Em operação normal, o torque eletromagnético de uma máquina síncrona contrabalança o torque mecânico aplicado ao eixo da máquina, gerando assim potência elétrica útil para gerar trabalho (FITZGERALD, 2006).

Durante a ocorrência de um distúrbio, essa relação pode ser desequilibrada, afetando a característica de geração do sistema elétrico, podendo tanto diminuir ou eliminá-lo completamente. O estudo da estabilidade rotórica se propõe a analisar as

variáveis que contribuem para manter ou restaurar o equilíbrio entre os torques de geradores síncronos, envolvendo o estudo de oscilações eletromecânicas inerentes ao SEP. Um fator fundamental neste problema é a maneira em que cada saída de potência das máquinas síncronas varia conforme o ângulo do rotor muda.

Em condições de operação em regime permanente, há equilíbrio entre o torque mecânico de entrada e o torque eletromecânico de saída dos geradores, e a velocidade permanece constante. Se o sistema é perturbado, esse equilíbrio é prejudicado, resultando em aceleração ou desaceleração dos rotores das máquinas. Sendo assim, se um gerador temporariamente funciona mais rapidamente que outro, a posição angular do seu rotor irá avançar em relação ao da máquina mais lenta (KUNDUR, P. et al., 2004).

Ainda, segundo Bomfim (2000) o foco de estudo da estabilidade rotórica é o ângulo de carga ou ângulo de potência, que corresponde ao mesmo ângulo entre o campo eletromagnético do rotor e o campo resultante no entreferro de uma máquina síncrona. Dessa forma, esse fenômeno ocorre na forma de oscilações crescentes de ângulo de potência do rotor de alguns geradores, de modo a causar perda de sincronismo entre as máquinas, pois os desvios de posição angular dos rotores alteram o torque eletromagnético, aumentando o desequilíbrio entre torque mecânico e torque eletromagnético.

A mudança no torque eletromagnético de uma máquina síncrona após uma perturbação pode ser resolvida dividindo-se em duas partes: Componente de torque sincronizante, que é em fase com o desvio de ângulo do rotor; e, Componente de torque de amortecimento, em fase com a velocidade de desvio. Os componentes da variação do torque elétrico são dados conforme a equação (2.1).

$$\Delta T_e = T_S \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (2.1)$$

onde:

$T_S \Delta \delta$ é o componente de torque sincronizante, em que $\Delta \delta$ é a perturbação no ângulo do rotor, e T_S é o coeficiente do torque sincronizante.

$T_D \Delta \omega$ é o componente de amortecimento, em que $\Delta \omega$ é o desvio de velocidade, e T_D é o coeficiente de torque de amortecimento.

O sistema de estabilidade depende da existência de ambos componentes de torque para cada máquina síncrona. A falta de torque sincronizante suficiente resulta em instabilidade aperiódica ou não-oscilatória, enquanto a falta de torque de amortecimento resulta em instabilidade oscilatória (KUNDUR, 1994).

De acordo com Bretas e Alberto (2000), fisicamente, na iminência de uma falta, um sistema elétrico de potência opera com potência elétrica e potência mecânica iguais, e, 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, sendo assim ocorre aceleração das máquinas conectadas ao sistema, acarretando em um desvio de velocidade e por fim, no aumento do ângulo de carga. Na atuação dos dispositivos de proteção do sistema visando eliminar o defeito, as máquinas podem desacelerar, o que indica 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.

Um dos parâmetros determinados pela análise de estabilidade rotórica é o ângulo de carga limite, que indica o limite máximo para que após um distúrbio o sistema consiga voltar a operar em um ponto de equilíbrio, permitindo a restauração de um ponto de operação estável.

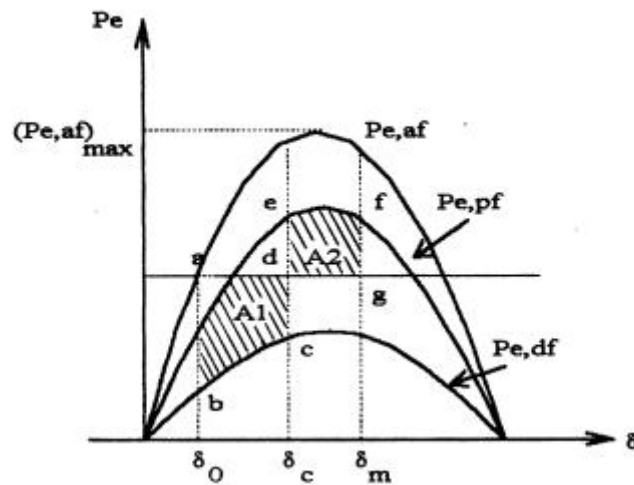
2.5 Ângulo Crítico de Abertura

Para um sistema composto por uma máquina conectada à uma barra infinita e para uma dada falta e combinação de chaveamento, o ângulo crítico de eliminação da falta é o máximo ângulo para eliminação do defeito sem que o sistema perca a estabilidade.

Para continuar a análise considera-se primeiramente a Figura 2 em que são representadas as curvas potência-ângulo de um sistema para as situações de antes, durante e pós-falta, supondo-se que a abertura da falta ocorre no instante em que $\delta = \delta_c$. É possível notar que podemos mover o ponto f para a direita, o que acarretará um ângulo de abertura maior, ou seja, maior tempo de abertura do defeito. O ângulo de abertura deste caso não é crítico.

Com as considerações acima, segundo Costa (2015), para qualquer carregamento inicial dado, existe um ângulo crítico de abertura δ_{crit} além do qual não será mais possível obter uma área A_2 igual à área A_1 . Para ângulos de abertura real do defeito menores que δ_{crit} o sistema será estável. Se, por outro lado $\delta_c > \delta_{crit}$, o sistema é instável.

Figura 2: Curvas potência-ângulo supondo abertura da linha após a falta.



Fonte: (COSTA, 2015, p. 25).

2.6 Tempo Crítico de Abertura

Em geral, não se está interessado diretamente no ângulo crítico de abertura do defeito, mas sim no tempo crítico de abertura do disjuntor. Estes tempos críticos são utilizados, por exemplo, pelos engenheiros de proteção para especificação de relés e disjuntores (COSTA, 2015). Neste caso a potência de aceleração não é constante após a abertura da linha sob falta. Em consequência, não é possível a determinação exata do tempo crítico.

3. METODOLOGIA

Os métodos utilizados após pesquisas bibliográficas, foi o de simulação do sistema clássico de estudos, IEEE14 Barras, primeiramente no software ANAREDE, para e com o arquivo de fluxo de potência da rede gerado pela ANAREDE foi possível realizar a simulação no software ANATEM, aplicando perturbações no sistema, verificando se ocorre instabilidade angular, ou seja, perda de sincronismo das máquinas síncronas.

3.1 SOFTWARE ANAREDE

O CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) apresenta algumas técnicas e métodos, desenvolvidos para a análise de redes elétricas, integradas em um conjunto de aplicações computacionais denominados Programa de Análise de

Redes, o ANAREDE, que consiste dos seguintes programas: fluxo de potência, equivalente de redes, análise de contingências, análise de sensibilidade de tensão, despacho de potência ativa e fluxo de potência continuado. A versão utilizada neste artigo foi a 10.02.03 de 25/09/2017.

3.2 SOFTWARE ANATEM

O programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM) tem como objetivo simular o comportamento dinâmico de sistemas de potência quando submetido a perturbações (CEPEL,2018).

Com o ANATEM é possível realizar simulações no domínio do tempo de SEP's de grande porte, realizando a análise não linear da estabilidade eletromecânica. Com seu uso é possível determinar a estabilidade dos sistemas modelados, conhecendo sua resposta dinâmica após ocorrência de perturbações.

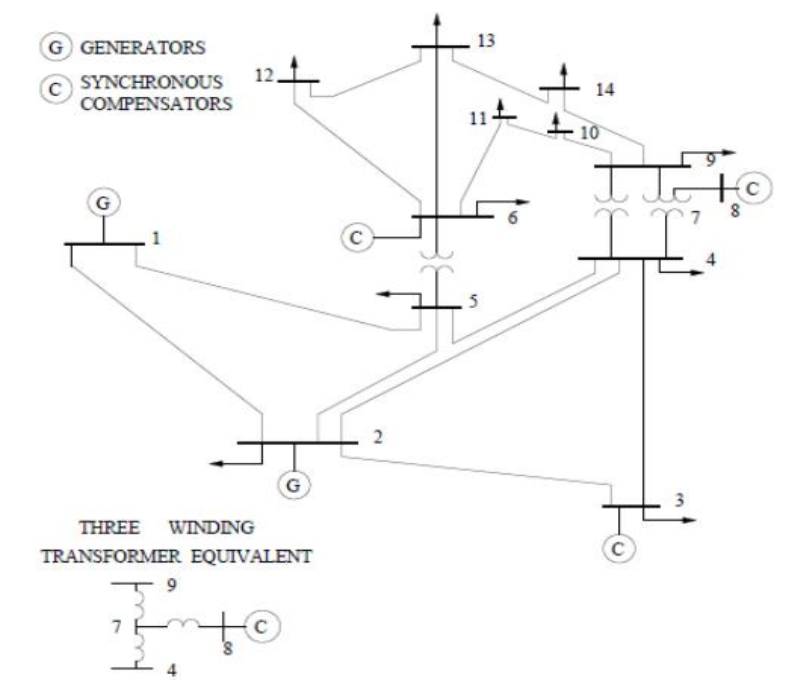
Segundo o manual fornecido pelo CEPEL, as informações de carregamento do sistema e da topologia da rede são obtidas através do restabelecimento de um caso convergido de fluxo de potência gravado com o programa ANAREDE. Os dados de entrada relativos às máquinas e seus respectivos controles, bem como os demais elementos do sistema, são definidos através de códigos de execução.

Ao ser instalado o ANATEM, é possível instalar o programa auxiliar Plot do CEPEL, o mesmo apresenta os dados de plotagem especificados no arquivo de simulação logo após a execução da simulação, abrindo automaticamente. Os gráficos apresentados nas figuras deste artigo são provenientes do Plot.

3.3 DADOS DO SISTEMA IEEE14 Barras

O sistema é apresentado na figura 20. É formado por 14 barras, 5 unidades geradoras, 3 unidades de transformadores, 11 unidades de cargas e 3 unidades de linhas de transmissão.

Figura 3: Diagrama unifilar do sistema IEEE 14 barras.



Fonte: (ABIDIN; MOHAMAD; MUSIRIN, 2015, p. 2).

Sendo que, as unidades geradoras conectadas as barras 3,6 e 8, são compensadores síncronos. Para obter os valores de operação do sistema e conhecer seu comportamento, utilizou-se primeiramente do *software* ANAREDE para rodar o cálculo do fluxo de potência no sistema, aplicando posteriormente algumas perturbações ao mesmo, observando seu comportamento para tais eventos.

Para comparação do comportamento do sistema diante de perturbações entre os *softwares* ANAREDE e ANATEM, foram simulados os seguintes casos:

- Caso A – Situação de sobrecarga do sistema para aumento de 20% dos valores nominais;
- Caso B – Situação de sobrecarga do sistema para aumento de 60% dos valores nominais;

As seguintes situações para os casos de análise:

- Situação 1 - Simulação do sistema com perda da linha 1-2;
- Situação 2 - Simulação do sistema com perda da linha 1-5;
- Situação 3 - Simulação do sistema com perda da linha 2-3;

Os casos de sobrecarga para as situações de curto-circuito seguido de perda da LT, são considerados perturbações graves utilizadas neste trabalho para motivos exemplificativos de simulação com instabilidade e perda de sincronismo.

As simulações no ANATEM retornam os gráficos de variáveis para o comportamento do sistema pelo *software* PLOT CEPEL. Para as simulações no ANATEM não foram alterados os dados dos reguladores.

Para as simulações no ANATEM foram inseridos códigos de execução nas linhas de comando. Para realização destes casos foi utilizado o código de execução DEVT aplicando eventos, sendo eles:

- APCB: aplica um curto-circuito em barra CA;
- RMCB: remoção de curto-circuito em barra CA;
- ABCI: abertura total de circuito CA ou na extremidade especificada;
- APCL: aplica curto-circuito na linha CA especificada.
- RMCL: remove o curto-circuito na linha CA especificada;
- DBCA: desligamento de barra CA;
- LBCA: religamento de barra CA;

4.0 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

• RESULTADOS NO ANAREDE CASO A

- I. Na simulação do caso A para situação 1, ocorre sobrecarga da LT 1-5 e LT 5-4, gerador da barra 2, gerador da barra 1 e compensador da barra 3.
- II. Para a situação 2, ocorre sobrecarga das LT's 1-2, 2-4, 2-3, nos geradores conectados às barras 1 e 2, e sobrecarga do compensador conectado à barra 3.
- III. Para situação 3 ocorre sobrecarga das LT's 1-2, 1-5, 2-4, 5-4 e 3-4, além de sobrecarga no compensador conectado à barra 3.

• RESULTADOS NO ANAREDE CASO B

Para simulação do caso B, ocorre sobrecarga de 60% dos valores nominais do SEP.

- I. Para a primeira situação, ocorre sobrecargas nas LT's 1-5, 2-4, 5-4 e 4-3, queda de tensão nas barras 5, 4, 10, 14, sobrecarga no gerador da barra 2, e nos compensadores conectados às 3 e 6.

- II. Na situação 2, com a LT 1- 5 desabilitada, ocorre sobrecarga nas LT's 1-2, 2-5, 2-4, 2-3, no gerador da barra 2, no compensador da barra 3 e contingência na barra 14.
- III. Na situação 3, com a LT 2-3 desabilitada ocorre sobrecarga nas LT's 1-2, 1-5, 2-5, 5-4, 2-4 e 3-4, no gerador 2, compensadores 3 e 6, e, contingências nas barras 4, 5 e 14.

• RESULTADOS NO ANATEM CASO A

- I. Caso A-situação 1 (20% de sobrecarga e perda da linha 1-2). Para a primeira contingência do sistema com sobrecarga de 20% é realizado um curto-circuito seguido de desligamento da LT 1-2. O código utilizado é apresentado na figura 4, o relatório de simulação é apresentado na figura 5.

Figura 2: Código do evento de aplicação de curto e remoção da linha para o caso A-1.

```

182 DEVT
183 (Tp) ( Tempo)( El )( Pa)Nc( Ex) ( % ) (ABS ) Gr Und      (Bl)P ( Rc ) ( Xc ) ( Bc ) (Defas)
184 (apcb  1.0  05
185 (rmcb  1.79  05
186 (dbca  1.79  05
187 apcl  1.0  01  02  02  20
188 rmcl  1.2  01  02
189 abci  1.2  01  02
190 (dbca  1.0  06
191 (dbca  1.0  05
192 (dbca  1.5  11
193 (lbca  1.5  02
194 (apcl  1.0  02  03  02  20
195 (rmcl  1.25  02  03
196 (abci  1.25  02  03
197 (abci  1.1  01  05
198 (abci  1.1  01  0
199 999999

```

Fonte: Autoria própria.

Figura 3: Resultado de simulação do ANATEM para o caso A-1.

```

BCEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA - ANATEM - V11.03.00

20.0000
* Sistema teste 14 barras - caso com modelos "built-in" *

T= 1.0000s APCL - Aplicou curto em      1 Barra-01--HV      2 Barra-02--HV  1
a 80.0% a partir da barra      1 Barra-01--HV

T= 1.2000s RMCL - Removeu curto de      1 Barra-01--HV      2 Barra-02--HV  1

T= 1.2000s ABCI - Abrir circuito      1 Barra-01--HV      2 Barra-02--HV  1

T= 1.2000s Abriu circuito      1 Barra-01--HV      2 Barra-02--HV  1

T= 1.3450s - Ângulo da máquina 10 da barra      2 Barra-02--HV ultrapassou o
limite de 360.0 graus. Possível perda de sincronismo.
Ângulo em relação ao centro de massa : 360.0 graus

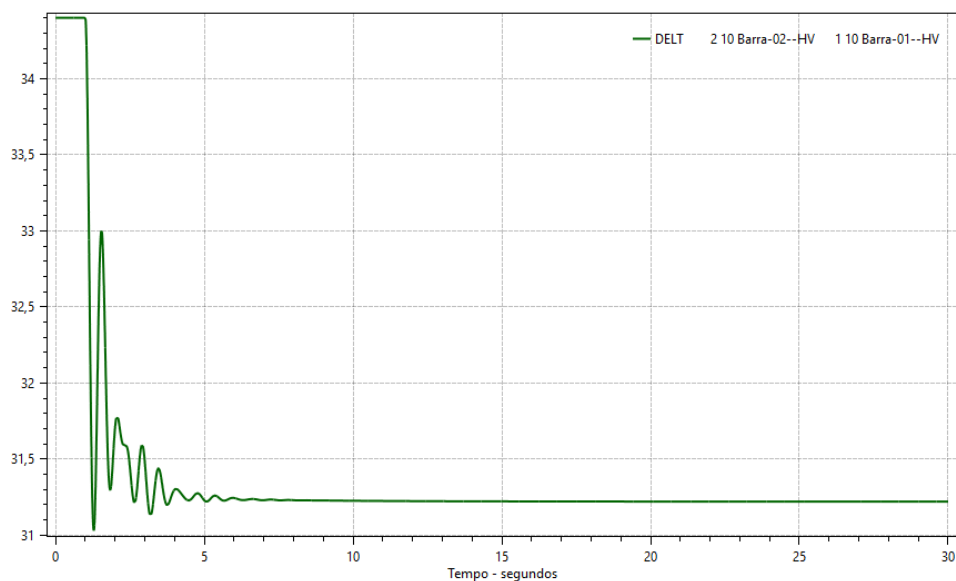
T= 1.6150s - Ângulo da máquina 10 da barra      2 Barra-02--HV ultrapassou o
limite de 1000.0 graus. O caso será encerrado.
Ângulo em relação ao centro de massa : 1006.4 graus
  
```

Fonte: Relatório de simulação.

Por tentativa e erro o tempo crítico de atuação do relé e remoção da LT foi de $t = 1.1$ s. Através da remoção da LT transcorridos 1,1 segundos à falta verificou-se que o sincronismo é mantido para o caso A-1.

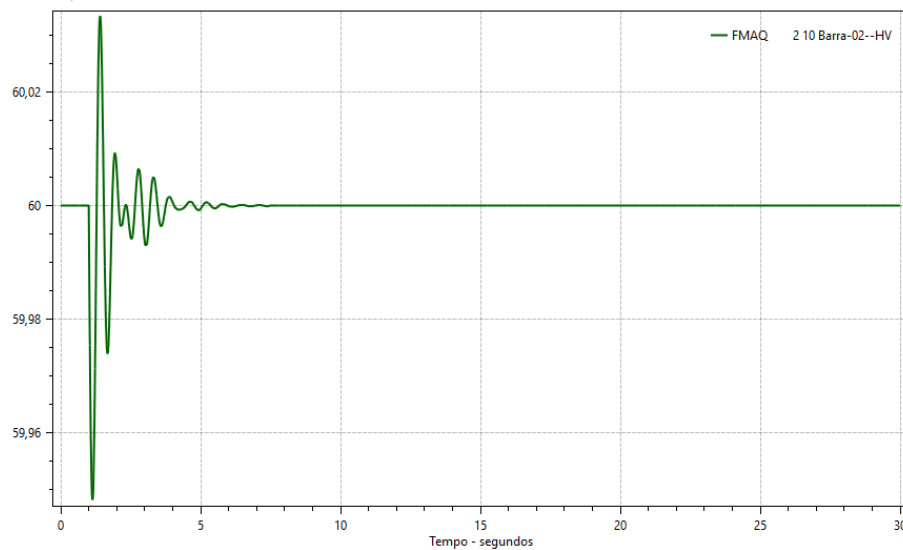
- II. Caso A-2 (20% de sobrecarga e perda da linha 1-5). Para o caso A-2, foram obtidos os resultados apresentados nas figuras 6 e 7.

Figura 4: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso A-2.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5: Resposta da frequência do gerador da barra 2 para o caso A-2.

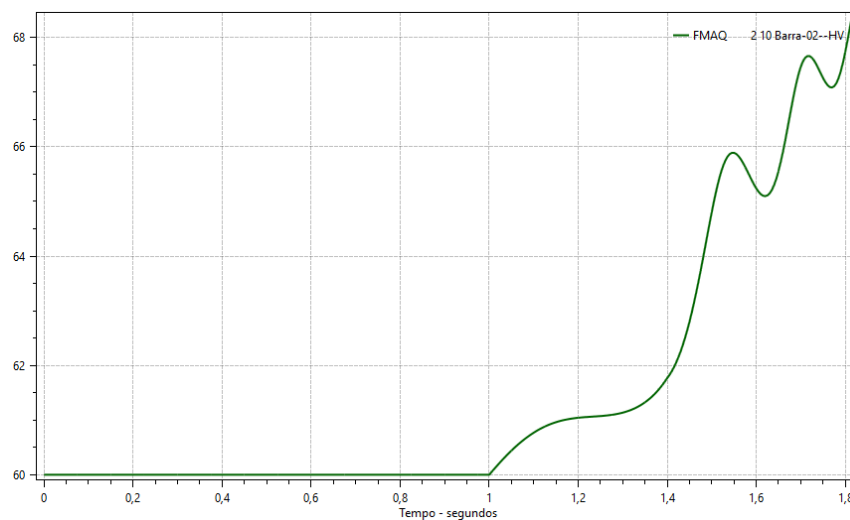


Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o sincronismo é mantido para a situação, o gerador opera normalmente, ocorrendo um decréscimo no módulo do ângulo de sua tensão.

- III. Caso A-3 (20% de sobrecarga e perda da linha 2-3). Aplicando curto-circuito em $t = 1$ s e removendo a LT 2-3 em $t = 1.4$ s o sistema apresenta perda de sincronismo, e, portanto, é instável, como pode ser visto pela figura 8, que apresenta a frequência elétrica da máquina 10. O tempo crítico para abertura da LT encontrado foi de $t = 1,3$ segundos.

Figura 6: Resposta da frequência do gerador da barra 2 para o caso A-3.

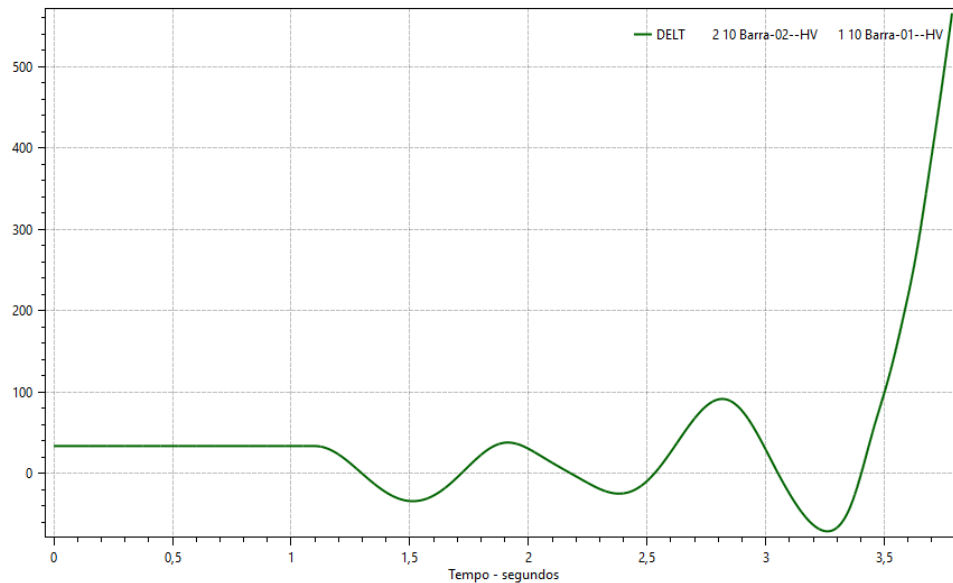


Fonte: Autoria própria.

- **RESULTADOS NO ANATEM CASO B**

- I. Caso B-1 (60% de sobrecarga e perda da linha 1-2). Para o caso presente foi restabelecido o caso 13 do arquivo do ANAREDE. Para a situação 1, desligando a LT 1-2, a máquina 10 apresentou o comportamento da figura 9, quanto ao ângulo de tensão interna. Nota-se que ocorre a perda de sincronismo, ou seja, a potência acelerante foi suficientemente grande para levar a máquina síncrona de sincronismo e por consequência levar o sistema à instabilidade. A figura 10, apresenta o relatório de simulação informando o ocorrido.

Figura 9: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso B-1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 10: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso B-1.

```

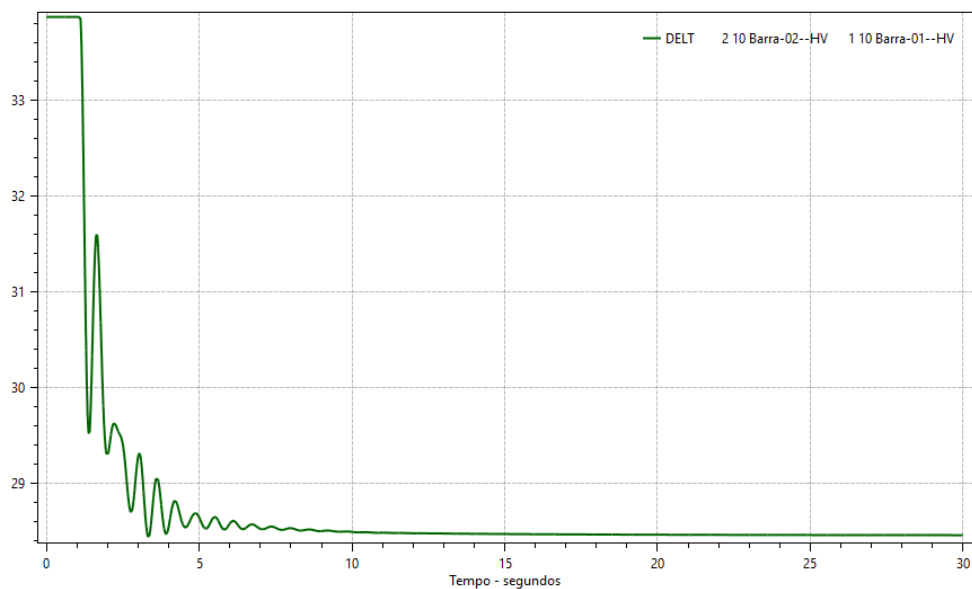
ECEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA - ANATEM - V11.03.00
60.0000
* Sistema teste 14 barras - caso com modelos "built-in" *
T= 1.1000s ABCI - Abrir circuito      1 Barra-01--HV      2 Barra-02--HV 1
T= 1.1000s Abriu circuito      1 Barra-01--HV      2 Barra-02--HV 1
T= 3.4400s - Ângulo da máquina 10 da barra      8 Barra-08--TV ultrapassou o
limite de 360.0 graus. Possível perda de sincronismo.
Ângulo em relação ao centro de massa : -363.6 graus
T= 3.4450s - Ângulo da máquina 10 da barra      6 Barra-06--LV ultrapassou o
limite de 360.0 graus. Possível perda de sincronismo.
Ângulo em relação ao centro de massa : -361.1 graus
T= 3.4500s - Ângulo da máquina 10 da barra      3 Barra-03--HV ultrapassou o
limite de 360.0 graus. Possível perda de sincronismo.
Ângulo em relação ao centro de massa : -361.0 graus
T= 3.6850s - Ângulo da máquina 10 da barra      2 Barra-02--HV ultrapassou o
limite de 360.0 graus. Possível perda de sincronismo.
Ângulo em relação ao centro de massa : 363.1 graus
T= 3.7850s - Ângulo da máquina 10 da barra      3 Barra-03--HV ultrapassou o
limite de 1000.0 graus. O caso será encerrado.
Ângulo em relação ao centro de massa : -1004. graus

```

Fonte: Relatório da Simulação.

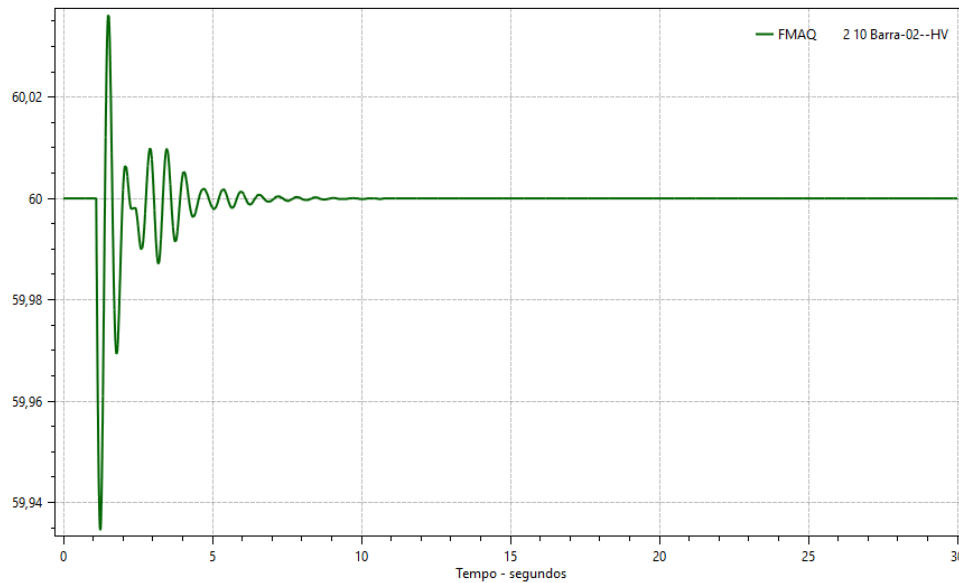
- II. Caso B-2 (60% de sobrecarga e perda da linha 1-5). O caso B-2 não apresentou ocorrência de perda de sincronismo ou instabilidade, como pode ser visto pelas figuras 11 e 12, que mostram o ângulo e frequência da máquina 10, respectivamente.

Figura 11: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso B-2.



Fonte: Autoria própria.

Figura 12: Resposta da frequência do gerador da barra 02 para o caso B-2.



Fonte: Autoria própria.

III. Caso B-3 (60% de sobrecarga e perda da linha 2-3). Para a situação 3 do caso B, é aplicado um curto-circuito na LT 2-3 a 20% de distância da barra 2, no tempo $t = 1$ s, em seguida no tempo $t = 1,28$ s é removido o curto com acionamento do relé, e no mesmo instante retira-se a LT de operação, figura 13. O comportamento para tal distúrbio para o caso de 60% de sobrecarga é apresentado na figura 14.

Figura 13: Aplicação e remoção de curto-circuito seguido de remoção da LT, caso B-3.

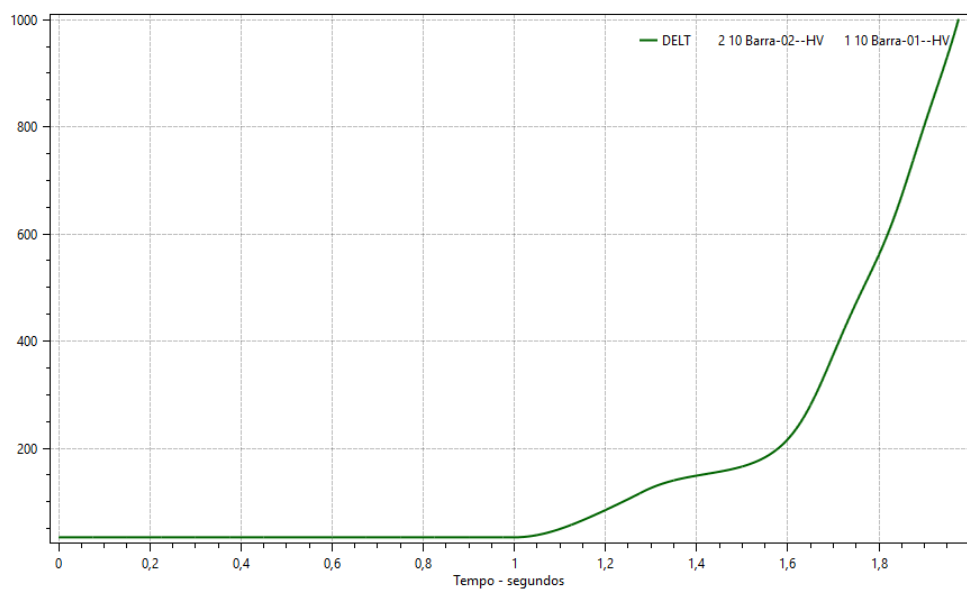
```

182 DEVT
183 (Tp) ( Tempo) ( El ) ( Pa)Nc( Ex) ( % ) (ABS ) Gr Und (B1)P ( Rc ) ( Xc ) ( Bc ) (Defas)
184 (apcb 1.0 05
185 (rmcb 1.1 05
186 (apcl 1.0 02 05 02 20
187 (rmcl 1.28 02 05
188 (abci 1.28 02 05
189 (dbca 1.1 05
190 (dbca 1.0 06
191 (dbca 1.0 05
192 (dbca 1.5 11
193 (lbca 1.5 02
194 apcl 1.0 02 03 02 20
195 rmcl 1.28 02 03
196 abci 1.28 02 03
197 (abci 1.1 01 02
198 (abci 1.1 05 04
199 999999

```

Fonte: Autoria própria.

Figura 14: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso B-3.



Fonte: Autoria própria.

A figura 15 abaixo, apresenta o relatório da simulação informando a perda de sincronismo. O tempo crítico de abertura para este caso foi de 0,27 segundos.

Figura 15: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso B-3.

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA - ANATEM - V11.03.00

60.0000

* Sistema teste 14 barras - caso com modelos "built-in" *

T= 1.0000s APCL - Aplicou curto em 2 Barra-02--HV 3 Barra-03--HV 1
a 20.0% a partir da barra 2 Barra-02--HV

T= 1.2800s RMCL - Removeu curto de 2 Barra-02--HV 3 Barra-03--HV 1

T= 1.2800s ABCI - Abrir circuito 2 Barra-02--HV 3 Barra-03--HV 1

T= 1.2800s Abriu circuito 2 Barra-02--HV 3 Barra-03--HV 1

T= 1.6950s - Ângulo da máquina 10 da barra 2 Barra-02--HV ultrapassou o
limite de 360.0 graus. Possível perda de sincronismo.
Ângulo em relação ao centro de massa : 365.0 graus

T= 1.9750s - Ângulo da máquina 10 da barra 2 Barra-02--HV ultrapassou o
limite de 1000.0 graus. O caso será encerrado.
Ângulo em relação ao centro de massa : 1001.2 graus

Fonte: Relatório da Simulação.

4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A tabela 1, abaixo, apresenta os tempos críticos de abertura para evitar a perda de sincronismo para o sistema simulados nos respectivos casos e situações. Onde t_{api} é o tempo de aplicação da perturbação e t_{ca} é o tempo crítico de abertura para a remoção da perturbação de maneira a evitar a perda de sincronismo.

Tabela 1: Tempos Críticos de Abertura

Situação	Caso A		Caso B	
	t_{api}	t_{ca}	t_{api}	t_{ca}
1	1	1,1	1	instável
2	1	não se aplica	1	não se aplica
3	1	1,3	1	1,27

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que para os casos A-1 (20% de sobrecarga e perda da linha 1-2), o tempo crítico de abertura do relé deve ser bem rápido, enquanto para qualquer caso envolvendo a situação 2, não ocorreu perda de sincronismo. Já para o caso B-1 (60% de sobrecarga e perda da linha 1-2), ocorre instabilidade independentemente dos tempos de abertura aplicados.

5. CONCLUSÃO

Este artigo aborda o problema de Estabilidade angular rotórica de máquinas síncronas, apresentando simulações de estudos de casos para diferentes pontos de operações e perturbações do sistema elétrico objeto de estudo.

O sistema IEEE 14 barras utilizado para os estudos de caso, mostrou-se bastante robusto, apesar de ser o modelo normal, com apenas duas unidades geradoras e não 4, como é utilizado no modelo modificado, o que pode ser atribuído ao seu arranjo interconectado.

Ao realizar simulações no ANAREDE, verificou-se que para todos os estudos de casos inseridos, foram convergidos os fluxos de potência para todas as situações definidas do estudo de estabilidade realizado, informando em sua interface gráfica as contingências nos elementos do sistema para o despacho de potência analisado, o que auxilia na determinação do limite de

potência reativa das linhas de transmissão, e configuração de outros elementos do circuito. Contudo só a simulação no ANAREDE não é suficiente para dizermos se o sistema é estável para o caso simulado, como foi confirmado pelas simulações no ANATEM.

As simulações no ANATEM, confirmam que é necessária simulação de transitórios eletromecânicos para o operador saber se os geradores síncronos conectados ao circuito permanecem em sincronismo, ou se saíram de operação, pois como pode ser concluído pelas simulações, o ANAREDE retorna o fluxo de potência, contudo as máquinas síncronas podem já ter saído de operação, levando o sistema à instabilidade. Ocorrendo uma falsa operação no ANAREDE.

6. REFERÊNCIAS

ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. **Power System Control and Stability**. 2. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

BARBOSA, F; **Estabilidade de Sistemas Elétricos de Energia**: apostila. Porto: Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, 2013.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Curso Básico de Utilização do Programa ANATEM**, 2016b.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Programa de Análise de Redes 10.01.03**, 2016c.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual do usuário do programa de análise de redes - ANAREDE**: Versão 10.01.03, 2016.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual do usuário do programa de análise de transitórios eletromecânicos - ANATEM**: Versão 10.03.00, 2018.

COSTA, A. J. A. S.; SILVA, A. S. E. **Controle e Estabilidade de Sistemas Elétricos de**

Potência: apostila. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

DA MATA, C. Uma Contribuição na Análise da Estabilidade Transitória dos Sistemas Elétricos de Distribuição na Presença de Geração Distribuída. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2005.

FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO. **Electric Machinery**. 3. ed. McGraw-Hill, 1971.

KIMBARK, E. W. **Power System Stability**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1948.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. Palo Alto, California: McGraw-Hill, 1994.

KUNDUR, P. et al. **Definition and Classification of Power System Stability**
IEEE/CIGRE

Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. **IEEE Transactions on Power Systems**,

v. 19, n. 3, p. 1387–1401, ago. 2004.

MACHOWSKI, J; BIALEK, J. **Power Systems Dynamics and Stability**. 1. ed. New York: Wiley & Sons, 1997.

MOHAMAD, N, Z; ABIDIN, A, F; MUSIRIN, I. **Application of S Transform for Fault Detection during Power Swing**. International review of Modelling and Simulations (I.RE.MO.S). Vol. 6,n.5. ISSN1974-9821. 2013.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos**, 2016a.

STEVENSON, W. D. J. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. [s.l.] McGraw-Hill, 1974.

WOOD, A. J.; WOLLENBERG, B. F. **Power Generation, Operation and Control**. 2. ed.

New York: J. Wiley & Sons, 1996.

