

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Natalia Bastos de Sousa

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE ANGULAR UTILIZANDO OS
SOFTWARES ANAREDE E ANATEM**

Santa Maria, RS, Brasil

2018

Natalia Bastos de Sousa

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE ANGULAR UTILIZANDO OS SOFTWARES
ANAREDE E ANATEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Engenheiro Eletricista**.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon

Santa Maria, RS, Brasil
2018

Natalia Bastos de Sousa

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE ANGULAR UTILIZANDO OS SOFTWARES
ANAREDE E ANATEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Engenheiro Eletricista**.

Aprovado em 11 de dezembro de 2018:

Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. Eng. (DESP-UFSM)
(Presidente/Orientador)

Bárbara Righi Cenci, Eng (CEESP, UFSM)

William Ismael Schmitz, Me. Eng (CEESP, UFSM)

Santa Maria, 11 de dezembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, meus agradecimentos são destinados aos meus pais, por todo amor, paciência, confiança e direcionamentos me dados, que me trouxeram aonde estou, e continuarão ajudando a trilhar meu caminho no futuro.

Ao meu pai, seu João Gabaia, por ser meu modelo de caráter, profissionalismo e compostura, por sempre me responder: “Você decide o que é melhor para você”, quando me encontro em situações que não sei por onde seguir. Por me ensinar diferença entre o quero, e o, preciso. Além de ser eternamente grata por me transmitir o amor por escutar música, a minha fonte de sossego, não tinha coisa melhor do que acordar cedo nos finais de semana ao som de músicas de estilos variados e ir dormir ouvindo seu radinho tocando as baladas dos anos 80.

À minha mãe, dona Ana Cristina, por deixar que eu tome minhas próprias decisões, mesmo sendo contrárias aos seus desejos e opiniões, por ser meu exemplo de força, bondade, amor e tolerância. Por incentivar as suas filhas a seguir os próprios caminhos, independente para onde ele nos leve, permanecendo unidas. Acima de tudo sou grata pela sua felicidade inabalável, que durante períodos mais escuros, sempre conseguiu arrancar gargalhadas da família, trazendo luz e afastando a tristeza.

À minhas irmãs Natasha, Natali e Natassia, por sermos completamente diferentes, e mesmo assim nos entendermos e aceitarmos, por me incentivarem e acreditarem em mim, quando eu mesma duvido, por me deixarem assistir aos jogos, mesmo quando querem assistir a qualquer outra coisa menos isso. Aos meu gato Fergus, que ao chegar em casa aquece meu coração e me faz esquecer a correria do dia-a-dia, minha cachorrinha Sophie que se foi esse mês, mas que esteve conosco por 8 anos, sempre leal e carinhosa.

Agradeço, também a minha tia, Alice Quinn, e à sua família na Irlanda, pelo apoio e incentivo.

Aos meus colegas de graduação que fizeram com que os intervalos entre as aulas fossem divertidos e momentos de boas gargalhadas. A todos os professores que durante minha vida acadêmica me fizeram amar ainda mais aprender coisas novas.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon, pela orientação, paciência e confiança para realização deste trabalho.

Por último, e, não menos importante, agradeço a Deus, pela família que Ele me deu, por ter nascido com saúde e por ter me dado força durante todo o período de Graduação.

*“Someone said that when feel your
dreams are getting far away You
should take a break...*

*...Even if things are hard It's ok,
it's ok, it's ok. Everything will be
ok. I believe in you...”*

(비투비)

RESUMO

Trabalho de Conclusão de Curso II
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

ANÁLISE DE ESTABILIDADE ANGULAR UTILIZANDO OS SOFTWARES ANAREDE E ANATEM

Autor: Natalia Bastos de Sousa

Orientador: Dr. Daniel Pinheiro Bernardon

Data e Local de Defesa: Santa Maria, 11 de Dezembro de 2018.

Os Sistema Elétricos de Potência (SEP) necessitam manter sua estabilidade para garantir o fornecimento de energia elétrica de forma contínua e dentro dos padrões de qualidade exigidos de níveis mínimos e máximos de tensão e de frequência. A manutenção de estabilidade é uma tarefa bastante complexa envolvendo diferentes categorias de estudos de estabilidade de SEP, como os problemas de estabilidade angular, de tensão e de frequência. Os distúrbios que podem afetar a estabilidade dos sistemas podem ser divididos em perturbações graves e leves, ou ainda, grandes e pequenas, o que as classificam como distúrbios de característica transitória ou dinâmica. São inúmeras as perturbações que podem ocorrer em um SEP, sendo o grau de severidade destes distúrbios ao sistema, susceptíveis à complexidade do arranjo destes e às malhas de controles (uso de reguladores primários de controle e, ou, controles secundários). Devido à essas complexidades de análise: se o sistema é estável ou não para os dados distúrbios na rede; o uso de ferramentas computacionais é de grande ajuda para essa categorização. O presente Trabalho de Conclusão de Curso 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

Final Course Paper
Graduation Course in Electrical Engineering
Federal University of Santa Maria

ANALYSIS OF ANGULAR STABILITY USING ANAREDE AND ANATEM SOFTWARE

Author: Natalia Bastos de Sousa
Adivisor: Daniel Pinheiro Bernardon
Date and Local of Defense: Santa Maria, December 11, 2017.

Electric Power Systems (SEP) need to maintain their stability to ensure the supply of electrical energy continuously and within the required quality standards of minimum and maximum voltage and frequency levels. Stability maintenance is a rather complex task involving different categories of SEP stability studies, such as angular stability, voltage and frequency problems. Disturbances that can affect the stability of systems can be divided into serious and mild disorders, or large and small, which classify them as transient or dynamic characteristic disorders. There are numerous disorders that can occur in a SEP, the degree of severity of these disorders to the system, susceptible to the complexity of the arrangement and the control meshes (use of primary control regulators and / or secondary controls). Due to these analytical complexities: whether the system is stable or not to the data disturbances in the network; the use of computational tools is of great help for this categorization. The present Work of Conclusion of Course 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;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação dos diferentes tipos de estabilidade.....	20
Figura 2: Resposta rotor-ângulo para um distúrbio transiente.....	25
Figura 3: Representação de um rotor de máquina comparando direções de rotações e torques mecânicos e elétricos para (a) um gerador e (b) um rotor.....	26
Figura 4: Sistema gerador síncrono alimentando motor síncrono.....	29
Figura 5: Diagrama Fasorial.....	29
Figura 6: Curva Potência – Ângulo para o sistema gerador-motor.....	30
Figura 7: Pontos de Equilíbrio para vários valores de potência mecânica.....	31
Figura 8: Efeito de faltas desbalanceadas: (a) comparação da característica potência-ângulo; (b) áreas de aceleração e desaceleração durante falta trifásica e monofásica.....	33
Figura 9: Curvas potência – ângulo para ilustrar o critério das áreas iguais.....	36
Figura 10: Curvas potência-ângulo supondo abertura da linha após a falta.....	37
Figura 11: Critério das áreas iguais para cálculo do ângulo crítico para remoção da falta.....	38
Figura 12: Curva potência-ângulo indicando o ângulo crítico de abertura. As áreas A_1 e A_2 são iguais.....	39
Figura 13: Carregar Caso da pasta de exemplos do ANAREDE.....	42
Figura 14: Abrir janela de Gerenciador de Dados.....	43
Figura 15: Janela de Gerenciador de Dados.....	43
Figura 16: Análise do Fluxo de Potência.....	44
Figura 17: Seleção de opções e de controles para o fluxo de potência.....	44
Figura 18: Fluxograma de Dados de entrada e de saída do ANATEM.....	47
Figura 19: Organização dos Dados Dinâmicos.....	48
Figura 20: Diagrama unifilar do sistema IEEE 14 barras.....	49
Figura 21: Sistema IEEE 14 Barras simulado no ANAREDE.....	50
Figura 22: Inativação da barra 5.....	53
Figura 23: Comportamento do sistema para barra 5 inativa.....	54
Figura 24: Comportamento do sistema para barra 5 desabilitada.....	55
Figura 25: Comportamento do sistema para a perda da Barra 5.....	56
Figura 26: Comportamento do sistema para contingência D situação 5.....	57
Figura 27: Restabelecendo caso base 1 do arquivo .sav do ANAREDE.....	58
Figura 28: Aplicação de eventos para A-1 (caso A situação 1).....	58

Figura 29: Resposta do comportamento angular da tensão interna do gerador em graus da máquina da barra 02 do caso A-1.....	59
Figura 30: Relatório de simulação gerado pelo ANTEM para o caso A-1.....	59
Figura 31: Resposta da frequência elétrica do gerador em graus do gerador da barra 02 do caso A-2.....	60
Figura 32: Resposta do ângulo das máquinas síncronas das barras 03, 06 e 08 para o caso A-2.....	60
Figura 33: Código para curto-circuito e remoção na LT 2-3, caso A-3.....	61
Figura 34: Relatório de simulação do ANATEM para o caso A-3.....	61
Figura 35: Resposta da frequência do gerador da barra 2 para o caso A-3.....	62
Figura 36: Instabilidade de tensão no sistema para o caso A-3.....	62
Figura 37: Aplicação de curto-circuito na barra 5.....	63
Figura 38: Resposta do comportamento angular da tensão interna em graus do gerador da barra 02 do caso A-4.....	63
Figura 39: Resposta do comportamento angular da tensão interna em graus das máquinas das barras 3, 6 e 8 do caso A-3.....	64
Figura 40: Aplicação de evento para aplicação e remoção de curto-circuito, seguido de remoção da linha do caso A-5.....	64
Figura 41: Resposta do comportamento angular da tensão interna em graus do gerador da barra 02 do caso A-5.....	65
Figura 42: Resultado do relatório do ANATEM para o caso A-5.....	65
Figura 43: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso A-5 para tempo de abertura igual a 1,26 segundos.....	66
Figura 44: Código do evento de aplicação de curto e remoção da linha para o caso B-1.....	66
Figura 45: Resultado de simulação do ANATEM para o caso B-1.....	67
Figura 46: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso B-2.....	67
Figura 47: Resposta da frequência do gerador da barra 2 para o caso B-2.....	68
Figura 48: Resposta da frequência do gerador da barra 2 para o caso B-3.....	68
Figura 49: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso B-4.....	69
Figura 50: Resposta do comportamento angular dos compensadores síncronos caso B-4.....	70
Figura 51: Instabilidade de tensão caso B-4.....	70
Figura 52: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso B-5.....	71
Figura 53: Resultado do relatório do ANATEM para o caso B-5.....	71
Figura 54: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso C-1.....	72

Figura 55: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso C-1.....	73
Figura 56: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso C-2.	73
Figura 57: Resposta da frequência do gerador da barra 02 para o caso C-2.....	74
Figura 58: Aplicação e remoção de curto-circuito seguido de remoção da LT, caso C-3.	74
Figura 59: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso C-3.	75
Figura 60: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso C-3.....	75
Figura 61: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso C-4.	76
Figura 62: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso C-4.....	76
Figura 63: Aplicação e remoção de curto-circuito seguido de remoção da LT, caso C-5.	77
Figura 64: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso C-5.....	77
Figura 65: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso D-1.	78
Figura 66: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso D-1.	79
Figura 67: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso D-2.	79
Figura 68: Resposta da frequência do gerador da barra 02 do caso D-2.	80
Figura 69: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso D-3.	80
Figura 70: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso D-3.	81
Figura 71: Aplicação e remoção de curto-circuito seguido de remoção de Barra, caso D-4...81	
Figura 72: Resposta da frequência do gerador da barra 02 para o caso D-4.....	82
Figura 73: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso D-4.	82
Figura 74: Aplicação e remoção de curto-circuito seguido de remoção de LT, caso D-5.....	83
Figura 75: Resposta da frequência do gerador da barra 02 para o caso D-5.....	83
Figura 76: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso D-5.	84
Figura 77: Resposta da frequência do gerador da barra 02 para o caso D-5, com tempo de abertura $t=0,23$ s.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados do sistema obtidos pelo fluxo de potência.....	50
Tabela 2: Dados de Geração Mínima e Máxima e Shunt.	51
Tabela 3: Dados das linhas de transmissão.....	51
Tabela 4: Dados dos Transformadores do sistema.	52
Tabela 5: Tempos Críticos de Abertura.....	85

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANAREDE	Análise de Redes Elétricas
ANATEM	Análise de Transitórios Eletromecânicos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIGRE	Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
Plot Cepel	Programa de Visualização de Gráficos do CEPEL
SIN	Sistema Interligado Nacional

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVO GERAL	15
1.3	OBJEIVO ESPECÍFICOS	15
1.4	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	17
2.1.1	Estabilidade de Máquinas Síncronas	18
2.1.2	Classificação de Estabilidade de Sistemas de Potência.....	20
2.2	ESTABILIDADE ROTÓRICA	21
2.3	ESTABILIDADE DE PEQUENA PERTURBAÇÃO.....	22
2.4	ESTABILIDADE TRANSITÓRIA.....	24
2.5	EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO.....	25
2.6	EQUAÇÃO ÂNGULO – POTÊNCIA	28
2.6.1	Limite de Estabilidade Estática	30
2.6.2	Limite de Estabilidade Transitória.....	32
2.7	O CRITÉRIO DAS ÁREAS IGUAS.....	34
2.7.1	Ângulo Crítico de Abertura	37
2.7.2	Tempo Crítico de Abertura.....	38
3	SIMULAÇÃO EM SOFTWARE	41
3.1	SOFTWARE ANAREDE	41
3.2	SOFTWARE ANATEM	45
4	ESTUDO DE CASOS	49
4.1	DADOS DO SISTEMA IEEE14 Barras	49
5	SIMULAÇÃO E RESULTADOS.....	52
5.1.1	Simulação no ANAREDE	53
5.1.1.1	Caso A	53
5.1.1.2	Caso B.....	54
5.1.1.3	Caso C.....	55
5.1.1.4	Caso D	56
5.1.2	Simulação no ANATEM – Estudo de Estabilidade angular rotórica	57
5.1.2.1	Caso A	58
5.1.2.2	Caso B.....	66
5.1.2.3	Caso C.....	72

5.1.2.4	Caso D	78
5.2	Apresentação dos Resultados	84
6	CONCLUSÃO.....	86
	REFERÊNCIAS	88
	ANEXO A	90
	ANEXO B	94

1 INTRODUÇÃO

Com a Revolução Industrial, que ocorreu durante os séculos XVIII e XIX, o modo de produção, até então predominantemente artesanal, é substituído pelo sistema fabril, empregando-se máquinas e o uso de energia motriz. Por volta dos anos 1850 e 1900, entrando na segunda etapa da revolução, surgem novas formas de energia como a hidrelétrica e derivada do petróleo. Em 1882 é construído o primeiro Sistema Elétrico de Potência (SEP) por Thomas Edison, com transmissão DC (*direct current*), o sistema era constituído por gerador, cabos, fusível, medidor e cargas, o que deu início ao desenvolvimento da indústria de energia elétrica. Em 1886, com o sistema DC apresentando limitação quanto a distância do gerador ao centro de carga, e as invenções do transformador e da transmissão AC (*alternating current*), conduz para o SEP em AC. Ainda, em 1888 ocorre a invenção do motor de indução bifásico pelo cientista e inventor Nikola Tesla, cujas patentes de motores ac, geradores, transformadores e sistemas de transmissão, formaram a base para o sistema ac de hoje.

A utilização dos motores AC, o desenvolvimento das máquinas síncronas, e a utilização da luz artificial, contribuíram para a difusão do uso de energia alternada. Desde então, a demanda e o consumo de energia elétrica têm crescido constantemente, atualmente os motores elétricos de indução são usados em diversos equipamentos, seja eletrodomésticos de pequenas dimensões à grandes máquinas de potência mais elevadas.

Com a necessidade de suprimento de energia elétrica sempre crescente, deu-se origem a um sistema de transmissão mais complexo, interligando unidades de geração com centros de cargas distribuídos em largas distâncias, possibilitando o abastecimento de energia elétrica para a comunidade de maneira mais eficiente e econômica. Um exemplo desses sistemas é o Sistema Interligado Nacional (SIN) que temos no Brasil. O SIN é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e maior parte da região Norte.

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.

Como apresentado anteriormente, um SEP consiste de 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 trabalho 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.

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A simulação do comportamento do SEP é uma ferramenta importante para o planejamento, análise de estabilidade e treinamento de operador (MACHOWSKI; BIALEK, BUMBY, 2008).

No planejamento de sistemas de potência, o uso de programas computacionais e estudos detalhados são requeridos para garantir um sistema confiável e seguro. Para isso é necessário fazer análise do Fluxo de carga (cálculo do Fluxo de Potência); Simulações de faltas simétricas e assimétricas; Estudo de estabilidade estática e transitória. A análise de estabilidade é importante também para quando se faz conexão de plantas industriais com geração própria ao sistema de fornecimento público (SCHLABBACH; ROFALSKI, 2008).

Logo após uma perturbação no sistema, o mesmo apresenta um período transitório, durante este período o seu funcionamento é de natureza oscilatória, para um sistema ser estável, essas oscilações devem ser amortecidas, o que depende do correto planejamento das variáveis de controle do sistema. Se em algum momento um gerador perder o sincronismo com o resto do sistema, podem ocorrer significantes flutuações nos valores de corrente e tensão, fazendo com que relés de linhas de transmissão disparem em lugares indesejados (ANDERSON; FOUAD, 2003).

A robustez do SEP é definida pela capacidade do sistema manter o funcionamento em situação de equilíbrio, tanto em condições normais, quanto na ocorrência de perturbação. O sistema é dito estável se após a ocorrência de perturbações o mesmo manter-se em sincronismo. Logo é imprescindível o correto dimensionamento dos elementos constituintes do sistema que operaram na presença de distúrbios, mantendo o sistema em operação e garantindo o sincronismo das máquinas síncronas conectadas ao SEP.

Desse modo ao fazer o estudo de estabilidade dinâmica e transitória do SEP, para os diversos possíveis cenários, podemos verificar se as proteções estão bem dimensionadas, e definir o limite de estabilidade do sistema.

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo analisar o correto funcionamento do SEP quanto aos sincronismos de suas máquinas síncronas através de simulações no ANATEM e ANAREDE, fazendo o comparativo dos resultados nas duas simulações. Desse modo, buscando a falsa operação dessas máquinas.

1.3 OBJEIVO ESPECÍFICOS

São objetivos específicos deste trabalho:

- Revisão bibliográfica sobre estabilidade de sistemas elétricos de potência, estabilidade transitória e estabilidade de pequenas perturbações;
- Apresentar como serão realizadas as modelagens nos *softwares* ANAREDE e ANATEM, apresentando suas funcionalidades resumidamente;
- Apresentar o sistema IEEE 14 Barras objeto de estudo nas simulações;
- Fazer o estudo de casos, aplicando distúrbios no sistema, verificando o comportamento do sistema no ANAREDE;
- Fazer o estudo de casos, verificando o comportamento do sistema no ANATEM;
- Obter conclusões e analisar os resultados com o resultado das simulações.

1.4 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente trabalho é composto de seis capítulos, onde o primeiro designa-se a introdução.

No segundo capítulo é apresentado a revisão bibliográfica do trabalho, apresentando os aspectos teóricos sobre o problema de estabilidade, fazendo estudo da estabilidade de pequenas perturbações (*Small signal*, ou ainda, Dinâmica) e em seguida abordando os

problemas de estabilidade transitória, apontando onde diferem e os tipos de distúrbios que as caracterizam.

No terceiro capítulo é feita uma breve introdução acerca dos *softwares* utilizados para as simulações neste trabalho.

No quarto capítulo são apresentados os estudos de casos para a realização das simulações, apresentando o sistema IEEE 14 Barras e os dados do sistema estudado.

No quinto capítulo são apresentados os resultados das simulações dos casos de estudo.

Por último, no capítulo seis discute-se os resultados obtidos nas simulações, apresentando as conclusões acerca do estudo apresentado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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).

O presente capítulo tem como objetivo fazer a revisão bibliográfica acerca do problema de estabilidade citados, com o intuito de apresentar os diferentes tipos de problemas de estabilidade apresentados nas literaturas.

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).

Essas perturbações que podem ocorrer em um SEP são variadas, podendo ser pequenas ou grandes. Esta classificação é importante para definir a forma matemática de tratar o problema. Usualmente a estabilidade de um SEP é categorizada em Regime Permanente (*Steady state*), transiente, ou dinâmica (também conhecida como Estabilidade a Pequena Perturbação), para os estudos de pequenas mudanças na carga, grandes distúrbios e, pequenos distúrbios, respectivamente. Em outras literaturas pode, ainda, ocorrer apenas duas divisões; Estabilidade a Pequena Perturbação e Estabilidade Transitória (KUNDUR, P. et al., 2004).

Contudo, o termo estabilidade dinâmica além de aparece em literaturas como uma classe de estabilidade de ângulo do rotor, tem sido usado para denominar diferentes fenômenos por diferentes autores, uma vez que o uso do termo pode causar confusão, recomenda-se contra o seu uso (KUNDUR, P. et al., 2004). Neste trabalho serão utilizados os termos estabilidade de pequena perturbação para tratar do estudo de estabilidade em regime permanente e dinâmica, e, estabilidade transitória, para tratar do estudo de grandes perturbações/distúrbios, como já é usualmente utilizada neste caso.

Ainda, no que diz respeito a modelagem matemática do sistema frente à distúrbios, na ocorrência de pequenas perturbações, o sistema irá oscilar em torno do seu ponto de equilíbrio inicial e, se o sistema for estável, voltar às condições iniciais, ou para um ponto próximo. Dessa forma, o sistema permite a linearização de equações em torno desse ponto, resultando em um sistema de equações diferenciais lineares (KUNDUR, P. et al., 2004).

Por outro lado, ao lidarmos com grandes perturbações, se o sistema for estável, o novo ponto de operação estará distante do ponto inicial, não podendo ser feita a linearização das equações que regem as máquinas. É necessário resolver o problema com integração numérica, e o estudo de estabilidade é chamado de estabilidade transitória (CAMARGO; 2003).

2.1.1 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.

Segundo Stevenson (1986), os sistemas de potência atuais são vastos, fortemente interconectados com várias centenas de máquinas que podem interagir através do meio composto das redes com extra alta tensão e ultra alta tensões. Onde, essas máquinas têm associadas a elas, sistemas de excitação e sistemas de controle turbina-governador que, em alguns casos, mas não todos, devem ser modelados em ordem de refletir apropriadamente a resposta dinâmica correta do SEP para certos distúrbios de sistema.

Agora, 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 no decréscimo de potência, ao invés do aumento, o sincronismo é perdido.

2.1.2 Classificação de Estabilidade de Sistemas de Potência

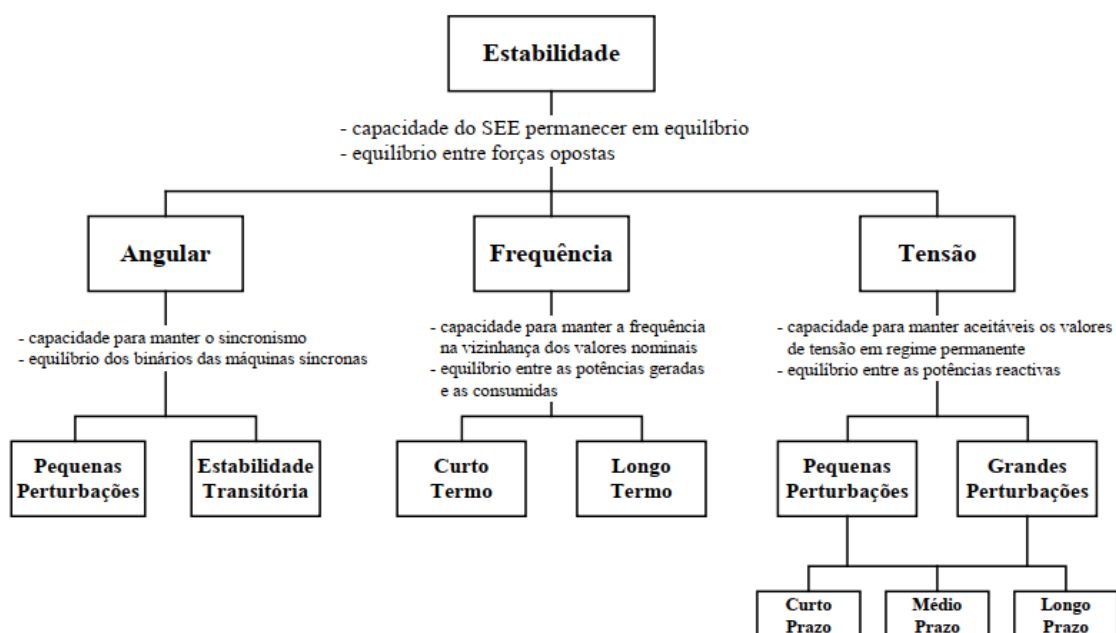
Antes de continuar o estudo sobre estabilidade faz-se necessária o esclarecimento sobre as distintas categorias desse estudo que, devido a sua grande complexidade, se divide em três grandes ramais. Segundo a *task force* IEEE/CIGRE (2004), é dito que a classificação de estabilidade, proposta pelo mesmo, segue as seguintes considerações:

- A natureza física do modo de instabilidade resultante como indicado pelas principais variáveis do sistema nas quais a instabilidade pode ser observada;
- A dimensão da perturbação considerada, que influencia o método de cálculo e previsão da estabilidade;
- Os componentes, processos e a duração que devem ser considerados para verificar a instabilidade.

Sendo assim, 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 trabalho será feito o estudo da estabilidade angular, ou ainda, estabilidade angular rotórica.

Figura 1: Classificação dos diferentes tipos de estabilidade.



2.2 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.

2.3 ESTABILIDADE DE PEQUENA PERTURBAÇÃO

O interesse da estabilidade angular de pequena perturbação, ou de pequeno sinal, está na habilidade do SEP em manter o sincronismo sobre pequenos distúrbios. Esses distúrbios ocorrem continuamente no sistema devido à pequenas variações de carga e de geração. Os distúrbios são considerados suficientemente pequenos de modo que a linearização dos sistemas de equações é permitida para propósito de análise (KUNDUR, 1994).

Uma perturbação é considerada suficientemente pequena quando não causa alteração significativa no ponto de operação do SEP, ou seja, ele opera próximo ao ponto de operação de anteriormente à ocorrência da perturbação.

Logo, este tipo de estabilidade depende do estado de operação inicial do sistema e a instabilidade pode ocorrer de duas formas:

- i. Aumento no ângulo do rotor através de um modo não-oscilatório ou aperiódico devido à falta de torque sincronizante;
- ii. Oscilação rotórica de amplitude crescente devido à falta de torque de amortecimento suficiente.

Segundo Kundur (1994) a natureza da resposta do sistema a uma pequena perturbação depende de número de fatores, entre eles, como comentado anteriormente, a operação inicial, assim como a força do sistema de transmissão, o tipo de controle de excitação do gerador utilizado. Na ausência de reguladores de velocidade automáticos (AVR), ou seja, com tensão de campo constante, a instabilidade ocorre devido à falta de torque de sincronização suficiente, resultando em instabilidade através de um modo não-oscilatório. Já com o uso de AVR de ação contínua, o problema de estabilidade de pequena perturbação está em garantir amortecimento suficiente das oscilações do sistema, a instabilidade se dá normalmente através de oscilações de amplitude crescente. Nos SEP's de hoje, o problema de estabilidade angular rotórica de pequenas perturbações é usualmente associada com a insuficiente de amortecimento das oscilações.

Enquanto que o problema de instabilidade aperiódica vem sendo largamente eliminado com de AVR de ação contínua, no entanto, esse problema pode ainda ocorrer quando os geradores operam com excitação constante, quando sujeitos a ação de limitadores de excitação (KUNDUR, P. et al., 2004).

Este tipo de problema de estabilidade pode ser de natureza local ou global. Problemas locais envolvem uma pequena parte do SEP e são normalmente associados com as oscilações do ângulo do rotor de apenas uma planta de potência contra todo o resto do SEP. Problemas globais são causados por interações entre grandes grupos de geração e possui disseminação de efeitos, envolvendo oscilações de um grupo de geradores em uma área balançando contra um grupo de geradores de outra área (KUNDUR, 1994).

O período de tempo de interesse no estudo de estabilidade de pequenas perturbações é na ordem de 10 a 20 segundos seguidos ao distúrbio.

2.4 ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

O estudo de estabilidade transitória está relacionado aos estudos da estabilidade angular rotórica a grandes perturbações, como curtos circuitos e perdas de linha de transmissão, por exemplo.

Quando uma falta ocorre, grandes correntes e torques são produzidos e muitas vezes ações devem ser tomadas rapidamente para ser mantida a estabilidade do sistema (MACHOWSKI; BIALEK, BUMBY, 2008).

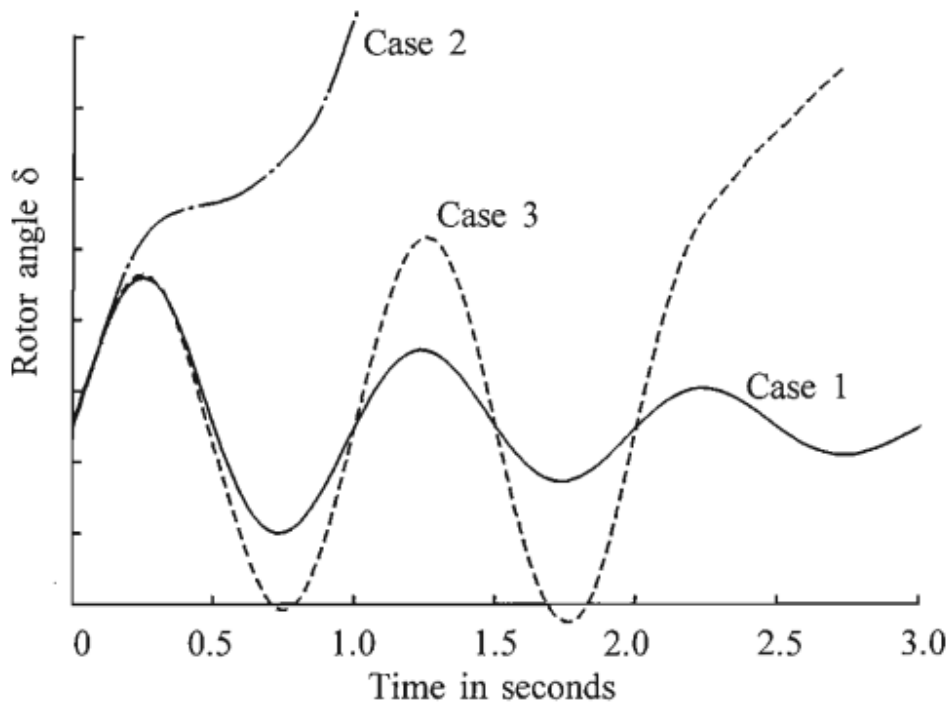
Segundo Kundur (1994) a resposta do sistema perante tais perturbações envolve grandes excursões dos ângulos dos geradores e é influenciado pela relação não linear da relação potência-ângulo. A estabilidade depende tanto do estado inicial de operação quanto da severidade do distúrbio/perturbação.

Então assumindo que antes da ocorrência da falta o SEP está operando em alguma condição de regime permanente estável. O problema de estabilidade transitória do SEP é definido como avaliação de se o sistema irá ou não alcançar um ponto de operação estável após a falta (MACHOWSKI; BIALEK, BUMBY, 2008).

Vários tipos de distúrbios de vários graus de severidade e de probabilidade de ocorrência podem acontecer em um SEP. No entanto, o sistema é projetado e operado de forma que seja estável para uma série de contingências pré-selecionadas. As contingências normalmente consideradas são curtos circuitos de diferentes tipos, como: monofásico-terra, bifásico-terra e trifásico. Esses curtos circuitos ocorrem normalmente em linhas de transmissão, mas ocasionalmente considera-se barras e faltas em transformadores. A falta é eliminada pela abertura do disjuntor apropriado de forma a isolar o elemento em falta, em alguns casos religamento de alta velocidade podem ser considerados (KUNDUR, 1994).

A figura 2 abaixo ilustra o comportamento de uma máquina síncrona para situações estáveis e instáveis. A figura ilustra dois casos instáveis e um caso estável. Para o caso 1, o ângulo do rotor aumenta para um valor máximo e então diminui, oscilando com amplitude decrescente até que alcança um estado de estabilidade. Para o caso 2, o ângulo do rotor continua a aumentar constantemente, até que o sincronismo é perdido. Essa forma de instabilidade é chamada de instabilidade *first-swing*, primeira oscilação, e é causada por torque sincronizante insuficiente. Já para o caso 3, o sistema é estável para a primeira oscilação, mas se torna instável perante oscilações crescentes. Essa forma de instabilidade geralmente ocorre quando a condição de estado estável pós-falta já é instável para pequenas perturbações, e não necessariamente como resultado da grande perturbação.

Figura 2: Resposta rotor-ângulo para um distúrbio transiente.



Fonte: (Kundur, 1994, p.26).

No estudo de estabilidade transitória o período de estudo de interesse é normalmente limitado para 3 a 5 segundos seguidos do distúrbio. Podendo ser estendido para 10-20 segundos para sistemas bem largos com sistemas de oscilações inter-áreas dominantes (KUNDUR, P. et al., 2004).

2.5 EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO

A equação que descreve o movimento do rotor de uma máquina síncrona está baseada no princípio elementar da dinâmica que diz ser o torque de aceleração igual ao produto do momento de inércia do rotor pela sua aceleração angular (STEVENSON, 1996).

A equação de oscilação governa o movimento do rotor da máquina relacionando o torque de inercia com o resultante dos torques mecânicos e elétricos no rotor (ANDERSON; FOUAD, 2003). A equação pode ser escrita para geradores síncronos na forma:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a \quad N.m \quad (2.2)$$

Onde:

1. J é o momento de inercia total das massas do rotor, em Kg.m²;

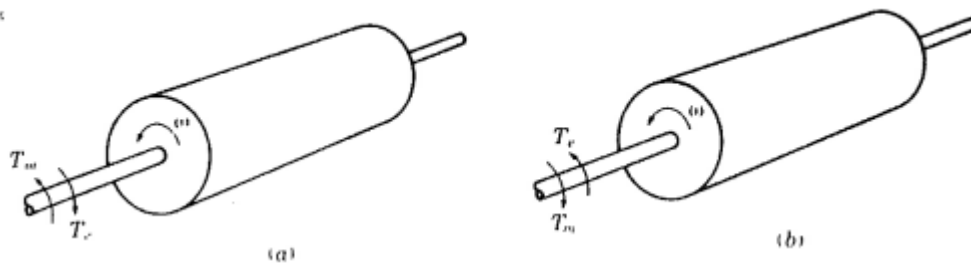
2. θ_m é o deslocamento angular do rotor com respeito a um eixo estacionário, em radianos mecânicos;
3. T_a é o torque de aceleração resultante em newton metros;

Já que a máquina é um gerador, o torque de condução é mecânico, T_m , e o torque de retardo ou de carga é elétrico, T_e . Assim temos:

$$T_a = T_m - T_e \text{ N.m} \quad (2.3)$$

A equação (2.3) estabelece uma convenção de sinal útil, onde T_m positivo acelera o eixo e, T_e positivo refere-se ao torque desacelerante (ANDERSON; FOUAD, 2003). O torque mecânico T_m e o torque elétrico T_e são considerados positivos para o gerador síncrono. O que significa que T_m é o torque resultante no eixo do motor que tende a acelerar o rotor no sentido positivo de rotação de θ_m como indicado na figura 3 a. Nas condições de operação em regime permanente do gerador, T_m e T_e são iguais e o torque de aceleração T_a é zero. Neste caso, não existe aceleração ou desaceleração das massas do rotor e a velocidade constante resultante é a velocidade síncrona (STEVENSON, 1996).

Figura 3: Representação de um rotor de máquina comparando direções de rotações e torques mecânicos e elétricos para (a) um gerador e (b) um motor.



Fonte: (STEVENSON, 1996, p.399).

Dessa forma, as massas rotativas que incluem o rotor do gerador e da máquina primária são ditas estarem em sincronismo com as outras máquinas operando na velocidade síncrona no sistema de potência. O torque elétrico T_e corresponde à potência resultante no entreferro da máquina e leva em conta, então, a potência de saída total do gerador mais perdas, no enrolamento da armadura. Já no motor síncrono, o sentido do fluxo de potência é oposto aquele no gerador. De acordo com isto, para um motor, ambos, T_m e T_e na Equação (2.3), são de sinais inversos como indicado na figura 3 b. Temos então que T_e , corresponde à

potência de entreferro suprida pelo sistema elétrico para acionar o rotor, enquanto que T_m representa o torque de oposição da carga e as perdas rotativas que tendem retardar o rotor.

Segundo Anderson e Fouad (2003) a referência angular pode ser escolhida em relação a uma estrutura de referência em rotação síncrona, com velocidade angular constante ω_{sm} , então

$$\theta_m = (\omega_{sm}t + \alpha) + \delta_m \text{ rad} \quad (2.4)$$

onde α é preciso apenas se o deslocamento angular do rotor δ_m é medido de um eixo diferente da referência angular. Desconsiderando α e aplicando a derivada segunda em (2.4), resulta em

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \text{ rad/s} \quad (2.5)$$

derivando uma segunda vez

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \text{ rad/s}^2 \quad (2.6)$$

logo, temos a equação (2.7), onde os dois pontos indicam a derivada segunda em relação ao tempo

$$J\ddot{\delta}_m = T_a \text{ N.m} \quad (2.7)$$

Segundo Camargo (2003), podemos ainda, considerar o ângulo elétrico da máquina em vez do ângulo mecânico

$$\delta_e = \frac{p}{2}\delta_m \text{ rad} \quad (2.8)$$

onde na equação (2.8) p é o número pólos da máquina. Em termos do ângulo elétrico, a equação de oscilação fica:

$$\frac{2J}{p}\ddot{\delta} = T_a \text{ N.m} \quad (2.9)$$

Segundo Anderson e Fouad (2003), para simplificação é comum abandonar o subscrito e e escrever apenas δ , que sempre é entendido como o ângulo elétrico definido por (2.8).

Segundo Stevenson (1996), é, ainda, interessante, para propósito de notação, introduzir a equação que relaciona a velocidade angular do rotor

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.10)$$

Ou ainda, seguindo a notação usada neste trabalho

$$\omega_m = \dot{\theta}_m \quad (2.11)$$

Lembrando da dinâmica elementar que potência é igual ao torque vezes velocidade angular e, então, multiplicando a Equação (2.10) por ω_s , obtemos

$$J\omega_m\ddot{\delta}_m = P_a = P_m - P_e \text{ W} \quad (2.12)$$

A parcela $J\omega_m$ é chamada de constante de inercia e denotado por M (ANDERSON; FOUAD, 2003). P_m é a potência de entrada no eixo da máquina menos as perdas rotacionárias, P_e é potência elétrica no entreferro.

Então substituindo M na equação (2.12) temos a equação (2.13)

$$M\ddot{\delta}_m = P_a = P_m - P_e \quad W \quad (2.13)$$

onde P_a é a potência de aceleração que leva em conta qualquer desequilíbrio entre as outras duas quantidades. De acordo com Stevenson (1996), usualmente desprezamos as perdas rotacionais e perdas $|I^2|R$ na armadura, e considera-se P_m como potência elétrica suprida pela máquina primária e P_e como potência elétrica na saída.

Relacionando a equação (2.9) com a (2.13) e dividindo ambos os lados por uma potência aparente de base trifásica, temos

$$\frac{2M}{pS_{b3}} \ddot{\delta} = \frac{P_a}{S_{b3}} = P_{au} \quad pu \quad (2.14)$$

Ainda de acordo com Stevenson (1996), quando usamos M na equação (2.13), o coeficiente não é constante no sentido restrito porque ω_m não é igual à velocidade síncrona para todas as condições de operação. Em dados de máquinas fornecidos para estudos de estabilidade, outra constante relacionada à inercia é frequentemente encontrada. Esta é chamada constante H que é definida por

$$H = \frac{\text{energia cinética armazenada em megajoule na velocidade síncrona}}{\text{Potência nominal da máquina em MVA}}$$

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_{sm}^2}{S_{maq}} = \frac{\frac{1}{2}M\omega_{sm}}{S_{maq}} \text{ MJ/MVA} \quad (2.15)$$

Onde o subscrito m é associado a ω , ω_s e δ , significa que são usadas unidades mecânicas; senão unidades elétricas estão implícitas. Em concordância, ω_s é a velocidade síncrona em unidades elétricas (STEVENSON, 1996).

2.6 EQUAÇÃO ÂNGULO – POTÊNCIA

Nesta seção é brevemente discutido a expressão para relação entre a potência de saída da máquina síncrona e o ângulo do rotor. Segundo Costa (2015), consideramos um sistema com um gerador síncrono alimentando um motor síncrono através de um circuito composto de uma reatância indutiva serie X_L , representado pela figura 4. As máquinas são representadas

por tensões constantes atrás de reatâncias, podendo ser reatâncias síncronas ou transitórias, dependendo do estudo em que se tem interesse.

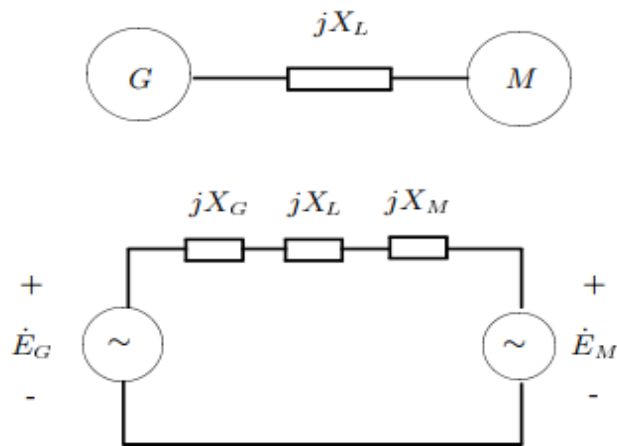
Temos a reatância dada por,

$$X \triangleq X_G + X_L + X_M \quad (2.16)$$

e como

$$\dot{I} = (\dot{E}_G + \dot{E}_M)/jX \quad (2.17)$$

Figura 4: Sistema gerador síncrono alimentando motor síncrono.

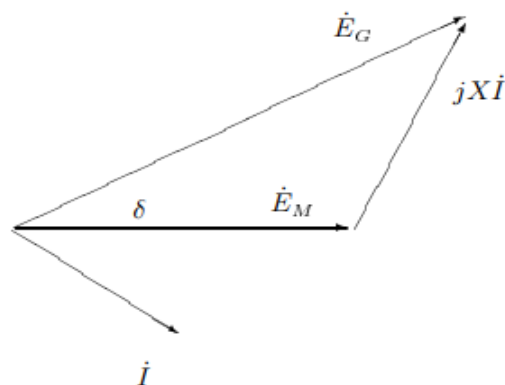


Fonte: (COSTA, 2015, p. 2).

Com a Equação (2.17), e a representação do diagrama fasorial da figura 5, temos que a potência de saída do gerador, é dada pela Equação (2.18). Considera-se que a potência de entrada do motor e de saída do gerador são iguais, já que não consideram as perdas.

$$P = \frac{E_G E_M}{X} \text{sen} \delta \quad (2.18)$$

Figura 5: Diagrama Fasorial.

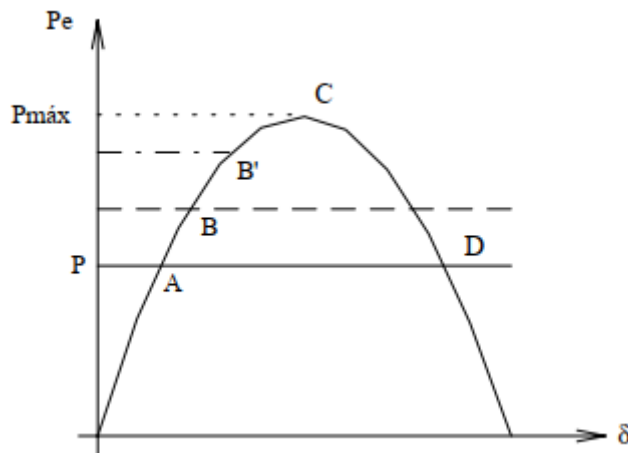


Fonte: (COSTA, 2015, p. 3).

Na equação (2.18) δ é o deslocamento angular entre os dois rotores. A curva potência-ângulo é mostrada na figura 6.

Ainda, segundo Anderson e Fouad (2003), uma vez que as tensões e a reatância são constantes, a relação entre P e δ é uma curva senoidal, como apresentado na figura 6. Os autores ressaltam ainda que a potência entregue pela fonte é a mesma recebida, já que a linha é puramente reativa. E já que as tensões, e X são constantes, podemos escrever $E_G E_M / X$ como uma constante designada por P_M e escrever $P = P_M \sin \delta$; e a potência de saída da máquina é em função somente do ângulo δ associado com E_G .

Figura 6: Curva Potência – Ângulo para o sistema gerador-motor.



Fonte: (COSTA, 2015, p. 4).

A máxima potência que pode ser transmitida em regime com reatância dada X e as tensões internas E_G e E_M é dada pela equação (2.19), que ocorre para $\delta = 90$ graus. Esse valor máximo pode ser aumentado tanto através da elevação das tensões internas quanto reduzindo-se a reatância X .

$$P_{max} = \frac{E_G E_M}{X} \quad (2.19)$$

2.6.1 Limite de Estabilidade Estática

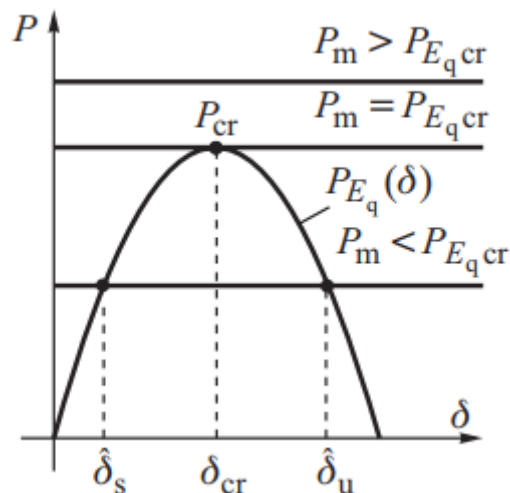
Voltando para a figura 6, no ponto A, supõe-se que o sistema esteja operando em regime. Logo, a potência mecânica de entrada do gerador e a potência de saída do motor,

serão iguais a potência elétrica P . Agora se considerando que houve um pequeno aumento na carga do eixo do motor, haverá um torque líquido no rotor do motor que tende a retardá-lo, de modo que sua velocidade decresce temporariamente. Resultando num aumento no ângulo δ e conseqüentemente, em um aumento na potência de entrada para o motor, esse incremento ocorre até que finalmente seja novamente alcançado o equilíbrio, sendo esse novo ponto de operação representado pelo tracejado B.

Supondo-se, agora, que a carga do motor é aumentada de maneira gradual até que seja atingido o ponto C. Qualquer aumento adicional de carga acarretará um aumento no ângulo δ , assim como no caso B, contudo, agora, não ocorre aumento na potência de entrada como consequência deste aumento. Acontece o inverso, ocorrerá um decréscimo na entrada, o que aumentará ainda mais a diferença entre entrada e saída, retardando o motor mais rapidamente. O motor sai então de sincronismo, e o valor P_{max} é chamado de limite de estabilidade estática do sistema. O sincronismo é perdido se tentarmos transmitir mais potência do que este valor (COSTA; 2015).

A figura 7 apresenta o gráfico da curva potência-ângulo com os respectivos pontos de equilíbrio.

Figura 7: Pontos de Equilíbrio para vários valores de potência mecânica.



Fonte: (MACHOWSKI; BIALEK, BUMBY, 2008, p. 177).

Na figura 7, a curva de pontos de equilíbrio do gerador nos apresenta três possíveis cenários:

1. $P_m > P_{Eq}$. Não há pontos de equilíbrio existentes e o gerador não pode operar nesta condição;
2. $P_m = P_{Eq}$. Existe apenas um ponto de equilíbrio para $\delta_{cr} (\frac{\pi}{2})$.
3. $P_m < P_{Eq}$. Existem dois pontos de equilíbrio em δ_s e δ_u . Correspondente à operação normal do sistema.

2.6.2 Limite de Estabilidade Transitória

Agora, considera-se que um grande incremento de carga é adicionado subitamente ao motor. Este poderá perder o sincronismo mesmo se a nova carga não exceder o limite estático.

Segundo Costa (2003), neste caso, a saída de potência mecânica do motor torna-se muito maior que a entrada de potência elétrica, e a diferença é suprida pelo decréscimo de energia cinética. O motor desacelera, resultando em um aumento no ângulo δ e um consequente aumento da entrada. Se a nova carga não exceder P_{max} , δ aumenta para o valor em que entrada é igual à saída, para o caso de operação estática. Mas quando isto ocorre, o motor estará girando em velocidade inferior à síncrona, sendo que o seu momento de inercia impede que sua velocidade aumente de imediato para o valor normal.

Ou seja, há um aumento de δ mas o mesmo ultrapassa o valor adequado, além deste ponto, o torque líquido é de aceleração, e a velocidade do motor aumenta, se aproximando do valor normal de operação. Contudo, é possível que o ângulo δ aumente tanto que o ponto de operação ultrapasse o pico da curva potência-ângulo deslocando-se sobre a curva em que a entrada decresce para um valor menor que a saída, além do ponto D na figura 6.

O Limite de Estabilidade Transitória do sistema, para dadas condições, é dito como o limite superior para a carga que o motor suporta sem sair de sincronismo, para um dado incremento de carga. Tal limite é sempre mais baixo do que o limite estático, mas, ao contrário do último, tem valores distintos dependendo da natureza e intensidade da perturbação.

As perturbações que definem o limite de estabilidade transitória de um sistema podem ser:

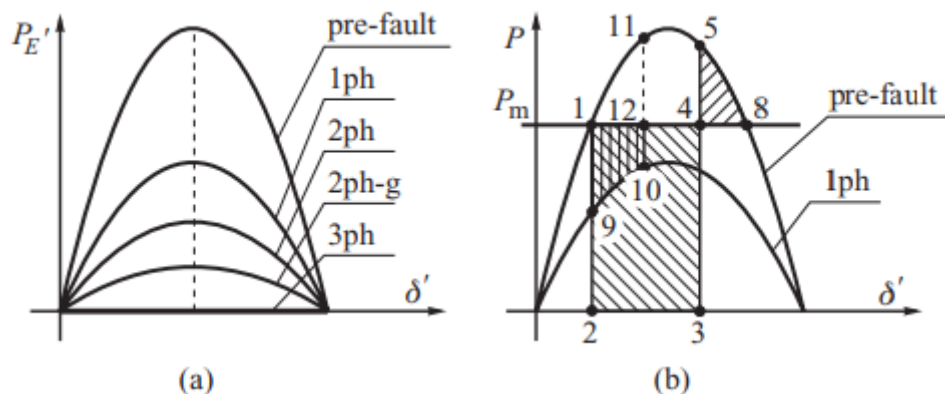
- Súbito incremento de carga;
- Súbito aumento de reatância, causado, por exemplo, pela desconexão de um circuito de linhas paralelas, em decorrência de manobra normal;
- Curtos-circuitos, que são os mais severos.

Em um curto trifásico na linha que conecta o gerador ao motor, por exemplo, surgem torques de aceleração e desaceleração, e se o curto não for rapidamente removido acontecerá a perda de sincronismo.

Já para os curtos monofásicos, bifásicos, bifásicos-terra, em dois circuitos em paralelo, ainda que exista um torque de sincronização, tem-se uma redução da amplitude da curva potência-ângulo em comparação com as condições de pré-falta. Nestas condições a estabilidade do sistema dependerá não só do próprio sistema, mas também do tipo de defeito, posição, tempo de abertura dos disjuntores, religamento, entre outros.

A figura 8 (a), ilustra o comportamento da curva potência-ângulo para os diferentes tipos de faltas apresentados acima. A áreas de aceleração e desaceleração são apresentadas na figura 8 (b). No caso de curto trifásico a área de aceleração é dada pelos pontos 1,2,3 e 4, que é maior do que a área de desaceleração, dada pelos pontos 4, e 8, o sistema é instável. Para um curto monofásico o torque de aceleração, correspondente a linha 1-9 é muito menor do que para o caso trifásico, linha 1-2, o rotor acelera menos rapidamente e no tempo que a falta é removida, o rotor alcança o ponto 10. Neste ponto o ângulo do rotor é menor do que para o caso de curto trifásico, a zona de aceleração dada pelos pontos 1,9,10,12 é muito menor que a área de desaceleração máxima dada pelos pontos, 11, 8 e 12, o sistema neste caso é estável. Contudo se a falta fosse removida em um tempo maior, o gerador iria perder a estabilidade (MACHOWSKI; BIALEK, BUMBY, 2008).

Figura 8: Efeito de faltas desbalanceadas: (a) comparação da característica potência-ângulo; (b) áreas de aceleração e desaceleração durante falta trifásica e monofásica.



Fonte: (MACHOWSKI; BIALEK, BUMBY, 2008, p. 211).

Para qualquer perturbação comentada acima, a perda ou não do sincronismo depende de um valor de potência transmitida anterior à ocorrência da falta, assim o limite de

estabilidade transitória é o valor de potência transmitida especificado para cada distúrbio, acima do qual o sistema é instável (COSTA, 2015).

2.7 O CRITÉRIO DAS ÁREAS IGUAS

Existe uma demanda crescente do setor energético por cálculo de estabilidade mais rápidos, que possam ser efetuados em tempo real, deixando com que a operação do sistema seja mais simples.

A análise da estabilidade transitória, para o caso geral de um sistema multimáquinas é feita com o auxílio de programas computacionais que simulam o modelo matemático do sistema para cada perturbação/distúrbio escolhido. Ou seja, a análise da estabilidade baseia-se na integração numérica de equações matemáticas que representam as máquinas e demais componentes do SEP. Caso seja verificado que o ângulo entre duas máquinas quaisquer do sistema tende a aumentar sem limite após o instante da perturbação, conclui-se que o sistema é instável. No caso de essa diferença angular alcançar o valor máximo e depois decrescer, conclui-se que o sistema possui tendência a manter o sincronismo.

Contudo, de acordo com Costa (2015), a conclusão definitiva sobre a estabilidade requer a observação das oscilações subsequentes à primeira oscilação, já que, em sistemas multimáquinas, é possível que uma máquina permaneça em sincronismo com as demais na primeira oscilação e perca esta condição nas oscilações subsequentes, em razão das interações dinâmicas com as outras máquinas.

Num sistema constituído por uma máquina síncrona ligada a um barramento de potência infinita, é possível estudar a estabilidade em regime transitório, por um critério extremamente simples, sem haver necessidade de recorrer à resolução numéricas da equação de oscilação da máquina síncrona (BARBOSA, 2013).

Ainda segundo Barbosa (2013), este critério simples seria o critério das áreas iguais e, é aplicável a um sistema constituído por uma máquina síncrona, ligada a um barramento de potência infinita, e além de permitir a compreensão de como certos fatores influenciam a estabilidade do sistema, nos permite reduzir, em muitos casos, um sistema a um sistema equivalente constituído por uma máquina síncrona a um barramento de potência infinita.

De acordo com Costa (2015) apesar da simplicidade este método gráfico propicia uma excelente interpretação física dos fenômenos dinâmicos envolvidos no problema de estabilidade transitória. Este método se baseia nas hipóteses apresentadas:

1. A potência mecânica de entrada das máquinas é suposta constante;

2. As máquinas síncronas são apresentadas por uma tensão constante atrás de sua reatância transitória;
3. O amortecimento das máquinas, assim como outras fontes de amortecimento são desconsiderados.

A potência mecânica P_m é considerada constante no período em análise por causa de que os reguladores que controlam a potência de entrada não agem de forma instantânea, sendo necessário que haja uma variação na velocidade do gerador antes de sua atuação (STEVENSON JR, 1978). Já a potência elétrica P_e obedece à curva de potência do gerador em função do ângulo δ .

O critério das áreas iguais parte da equação de oscilação, mostrando que a área sobre a curva $P(\delta)$ é proporcional à velocidade relativa da máquina.

Considerando, então, a equação de oscilação para uma máquina conectada a uma barra infinita derivada anteriormente na forma

$$\frac{2H}{\omega_s} \ddot{\delta} = P_a \quad pu \quad (2.20)$$

onde P_a é a potência de aceleração, de (2.20)

$$\ddot{\delta} = \frac{\omega_s}{2H} P_a \quad (2.21)$$

Multiplicando cada lado por $2 \frac{d\delta}{dt}$,

$$2 \frac{d\delta}{dt} \ddot{\delta} = \frac{\omega_s}{2H} P_a \left(2 \frac{d\delta}{dt} \right) \quad (2.22)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{\omega_s}{H} P_a \frac{d\delta}{dt} \quad (2.23)$$

$$d \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{\omega_s}{H} P_a d\delta \quad (2.24)$$

Integrando os dois lados,

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 = \frac{\omega_s}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta \quad (2.25)$$

ou

$$\frac{d\delta}{dt} = \left(\frac{\omega_s}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta \right)^{1/2} \quad (2.26)$$

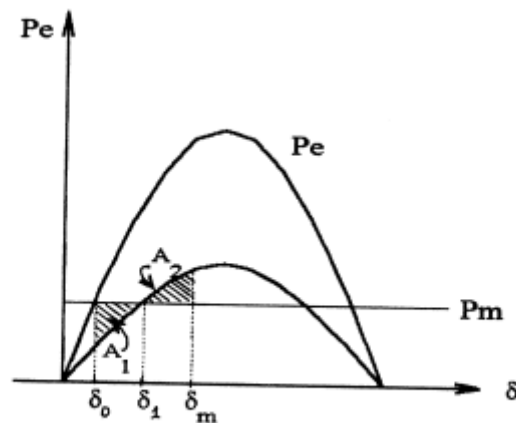
A equação (2.26) representa velocidade relativa da máquina para um eixo de referência se movendo à uma velocidade constante (pela definição do ângulo δ). Para a estabilidade essa velocidade deve ser zero quando a aceleração é zero ou é oposta ao

movimento do rotor. Para isso um rotor que está acelerando, a condição de estabilidade é o valor δ_{max} existente tal que $P_a(\delta_{max}) \leq 0$, e

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{max}} P_a d\delta = 0 = \int_{\delta_0}^{\delta_{max}} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.27)$$

A integral da equação (2.27) pode ser interpretada como a área entre as curvas P_m x δ e P_e x δ . A primeira destas curvas é representada por uma reta horizontal já que a potência mecânica é suposta constante. E a potência elétrica função do seno do ângulo de carga. A figura 9 representa as áreas entre as curvas de P_m e P_e .

Figura 9: Curvas potência – ângulo para ilustrar o critério das áreas iguais.



Fonte: (COSTA, 2015, p. 22).

Na figura 9, a área A_1 corresponde ao intervalo em que a potência elétrica é menor que a potência mecânica, enquanto que A_2 diz respeito à situação inversa. A área A_1 corresponde ao ganho de energia cinética resultante da aceleração da máquina. A partir do ângulo δ_1 , a máquina começa a sofrer desaceleração, com o aumento de energia cinética sendo cedido à barra infinita; quando a área A_1 se torna igual à área A_2 , a derivada do ângulo torna-se nula, significando que todo o ganho de energia cinética inicial foi entregue à barra infinita e que a velocidade da máquina torna-se momentaneamente igual à sua velocidade original.

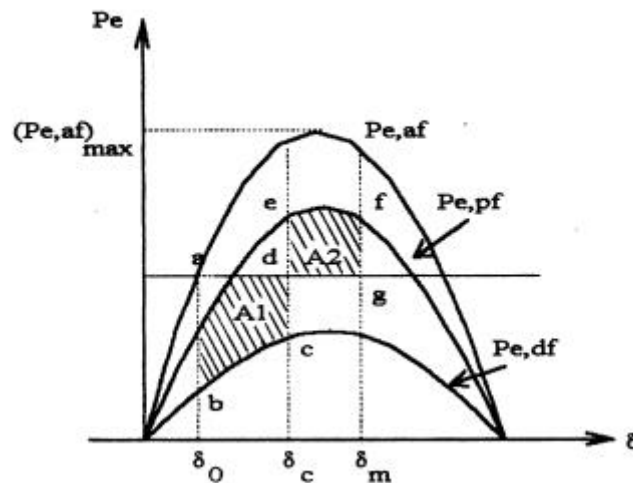
2.7.1 Ângulo Crítico de Abertura

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 10 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 em 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 10: Curvas potência-ângulo supondo abertura da linha após a falta.



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

Considerando agora a figura 11 temos uma situação de limite para estabilidade transitória, uma vez que, não é possível aumentar o ângulo de abertura da linha e ainda ter uma área de desaceleração capaz de compensar a área de aceleração capaz de compensar a área de aceleração indicada na figura, área A_2 . Temos que o máximo ângulo δ_{max} corresponde ao ângulo δ_u , e δ_{crit} é igual à δ_c .

Na situação crítica da Figura 11 temos, para condição de estabilidade $A_{acel} = A_{desac}$, onde

$$A_{acel} = \int_{\delta_0}^{\delta_{crit}} [P_m - P_e, df(\delta)] d\delta \quad (2.28)$$

$$A_{dsace} = \int_{\delta_{crit}}^{\delta_u} [P_e, pf(\delta) - P_m] d\delta \quad (2.29)$$

Resolvendo as integrais definidas e equacionando as duas áreas, obtemos:

$$\delta_{crit} = \cos^{-1}\left\{\left[1/(r_{pf} - r_{df})\right]\left[(P_m/P_{max,af})(\delta_u - \delta_0) + r_{pf}\cos\delta_u - r_{df}\cos\delta_0\right]\right\} \quad (2.30)$$

onde:

$$\delta_0 = \text{sen}^{-1}(P_m/P_{max}) < \pi/2 \quad (2.31)$$

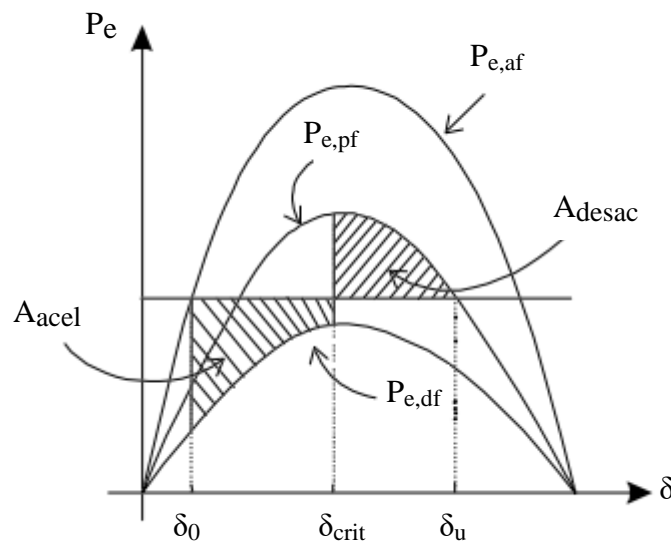
$$\delta_u = \text{sen}^{-1}(P_m/r_{pf}P_{max}) > \pi/2 \quad (2.32)$$

e:

r_{pf} é a relação entre o pico da curva potência-ângulo da linha para situação pré-falta;

r_{df} é a relação entre o pico da curva potência-ângulo da linha para situação depois que a falta é eliminada.

Figura 11: Critério das áreas iguais para cálculo do ângulo crítico para remoção da falta.



Fonte: (COSTA, 2015, p. 33).

2.7.2 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

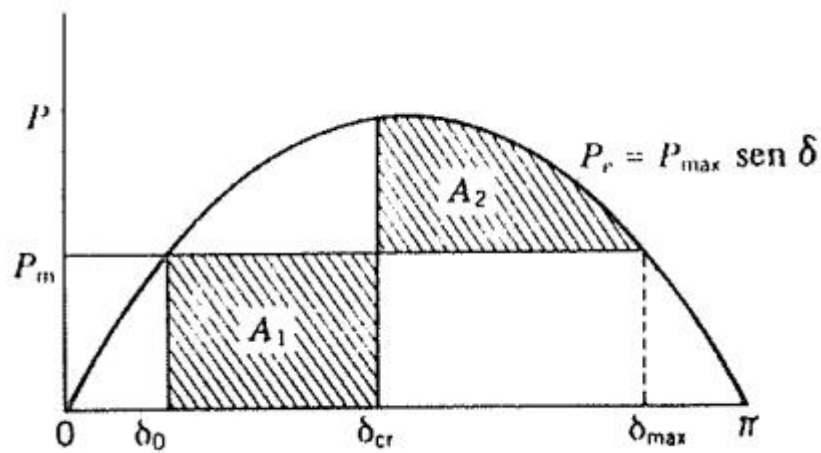
exemplo, pelos engenheiros de proteção para especificação de relés e disjuntores (COSTA, 2015). Neste caso a potência de aceleração não é constante após a abertura da linha sob falta. Em consequência, não é possível a determinação exata do tempo crítico.

Considerando a figura 12, as áreas A_1 e A_2 são dadas respectivamente por:

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{crit}} P_m d\delta = P_m(\delta_{crit} - \delta_0) \quad (2.33)$$

$$A_2 = \int_{\delta_{crit}}^{\delta_{max}} (P_{max} \text{sen} \delta - P_m) d\delta = P_{max}(\cos \delta_{crit} - \cos \delta_{max}) - P_m(\delta_{max} - \delta_{crit}) \quad (2.34)$$

Figura 12: Curva potência-ângulo indicando o ângulo crítico de abertura. As áreas A_1 e A_2 são iguais.



Fonte: (SETEVENSON, 1986, p. 421).

Para continuar com a notação usada na seção anterior, considera-se nessa seção que $\delta_{cr} = \delta_{crit}$.

Equacionando as expressões para A_1 e A_2 , e transpondo os termos, achamos

$$\cos \delta_{crit} = (P_m/P_{max})(\delta_{max} - \delta_0) + \cos \delta_{max} \quad (2.35)$$

Vemos, da curva senoidal do gráfico, que

$$\delta_{max} = \pi - \delta_0 \text{ radianos elétricos} \quad (2.36)$$

e

$$P_m = P_{max} \text{sen} \delta_0 \quad (2.37)$$

Substituindo estes valores de δ_{max} e P_m na equação (2.35), simplificando o resultado e resolvendo para δ_{crit} , obtemos

$$\delta_{crit} = \cos^{-1}[(\pi - 2\delta_0) \text{sen} \delta_0 - \cos \delta_0] \quad (2.38)$$

A equação (2.38) fornece outro meio de calcular o ângulo crítico de abertura.

Continuando o estudo do tempo crítico de abertura, de acordo com Stevenson (1986), considerando que originalmente o gerador está operando na velocidade síncrona com um ângulo de rotor δ_0 e a potência mecânica de entrada P_m igual à elétrica de saída P_e , quando ocorre uma falta, no tempo $t = 0$, a potência elétrica de saída torna-se subitamente nula, enquanto a potência mecânica de entrada se mantém inalterada. A diferença em potência deve ser levada em conta pela razão da variação de energia cinética armazenada nas massas do rotor. Isto pode ser obtido bastando apenas um aumento na velocidade, que por sua vez resulta da potência de aceleração constante P_m . Se chamarmos o tempo para eliminação da falta t_c , então, para o tempo t menor que t_c , a aceleração é constante e é dada por

$$\ddot{\delta} = \frac{\omega_s}{2H} P_m \quad (2.39)$$

Quando a falta está presente, a velocidade cresce da velocidade de sincronismo integrando a equação (2.39) para obter

$$\dot{\delta} = \int_0^t \frac{\omega_s}{2H} P_m dt = \frac{\omega_s}{2H} P_m t \quad (2.40)$$

Integrando mais uma vez, em respeito ao tempo temos a equação (2.41) para a posição angular do rotor.

$$\delta = \frac{\omega_s P_m}{4H} t^2 + \delta_0 \quad (2.41)$$

As equações (2.40) e (2.41) indicam que a velocidade do rotor, relativa à velocidade síncrona, aumenta linearmente com o tempo quando o ângulo do rotor avança de δ_0 para o ângulo de abertura δ_c . No instante da eliminação da falta, o aumento na velocidade do rotor e a separação angular entre o gerador e o barramento infinito são dados, respectivamente por

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{t=t_c} = \frac{\omega_s P_m}{2H} t_c \quad (2.42)$$

$$\delta(t)|_{t=t_c} = \frac{\omega_s P_m}{4H} t_c^2 + \delta_0 \quad (2.43)$$

Para obtermos o tempo crítico de abertura, substituímos δ_{crit} da equação (2.38) no lado esquerdo da equação (2.43), resulta em

$$\delta_{crit} = \frac{\omega_s P_m}{4H} t_{crit}^2 + \delta_0 \quad (2.44)$$

do qual é obtido o tempo crítico de abertura dado pela equação (2.45)

$$t_{crit} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{crit} - \delta_0)}{\omega_s P_m}} \quad (2.45)$$

3 SIMULAÇÃO EM SOFTWARE

Neste capítulo serão introduzidos os *softwares* utilizados para simulação dos estudos de caso deste trabalho sendo eles: ANAREDE e ANATEM.

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 trabalho foi a 10.02.03 de 25/09/2017.

- Programa de Fluxo de Potência

O programa de fluxo de potência em como objetivo o cálculo do estado operativo da rede elétrica para definidas condições de carga, geração, topologia e determinadas restrições operacionais.

O cálculo do estado operativo da rede elétrica para as condições impostas se dá por processos iterativos, consistente na obtenção de soluções para o sistema CA e para o sistema CC, até que as variações, entre as iterações consecutivas, das potências injetadas na rede CA pela rede CC sejam menores que uma determinada tolerância. Podem ser utilizados dois métodos para a solução das equações da rede elétrica CA: Método Desacoplado Rápido e Método de Newton. Sendo que o método padrão é o Desacoplado Rápido, para utilizar o de Newton, é necessário ativação do mesmo.

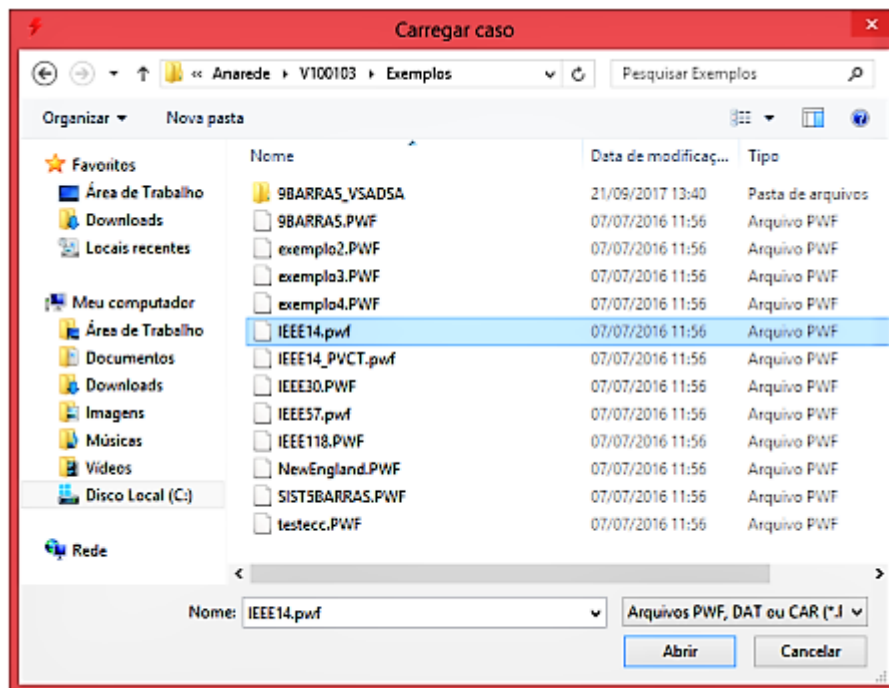
A solução das equações da rede elétrica é considerada convergida quando as soluções das equações do sistema CA, do sistema CC e da interface entre estes sistemas estiverem convergidas.

- Execução via Interface Gráfica

Na janela principal é possível o acesso aos diversos menus de execução e gerenciamento de dados contidos na memória do programa. Entre esses elementos no estão os campos de Caso, Diagrama, Análise e Histórico.

Ao instalar o ANAREDE, cria-se uma pasta de diretório de instalação CEPTEL, onde dentro da mesma, encontra-se a pasta de instalação do ANAREDE, contendo uma pasta de Exemplos. Ao se clicar em “Caso”, e em seguida “Carregar”, é possível abrir modelos da pasta Exemplo com extensão .pwf, entre eles está o modelo IEEE 14 barras, utilizado como objeto de estudo na seção posterior. A figura 13 apresenta como carregar um caso da pasta de modelos.

Figura 13: Carregar Caso da pasta de exemplos do ANAREDE.



Fonte: ANAREDE.

Após aberto o modelo, na barra de ferramentas, encontra-se diversos elementos que possibilitam a manipulação do circuito, como desenhar novos elementos, apagar elementos existentes, ocultar, e modificar os valores de diferentes parâmetros do circuito. Ressalta-se que ao apagar um elemento os dados do mesmo ainda continuam salvos, de maneira que, ao rodar o fluxo de potência esses dados serão utilizados. Abaixo são apresentados os comandos utilizados para as simulações apresentadas no capítulo 4.

- Modificação de parâmetros das variáveis do circuito

Para inserir os valores de tensão, ângulo, geração ativa, geração reativa, mínimos e máximos de reativos e de shunt do caso base de estudo, foi utilizado a janela de Gerenciador de Dados, aberta ao se clicar no elemento indicado na figura 14.

Figura 14: Abrir janela de Gerenciador de Dados.



Fonte: ANAREDE

A janela apresentada na figura 15 será aberta, onde tem-se acesso á todos os dados do circuito aberto. Podendo serem feitas alterações nos campos, as modificações devem ser validadas clicando-se no campo indicado pela seta. Através dessa janela, é possível também, desligar linhas e barras, corretamente, sem que seus dados sejam utilizados na resolução do fluxo de potência.

Figura 15: Janela de Gerenciador de Dados.

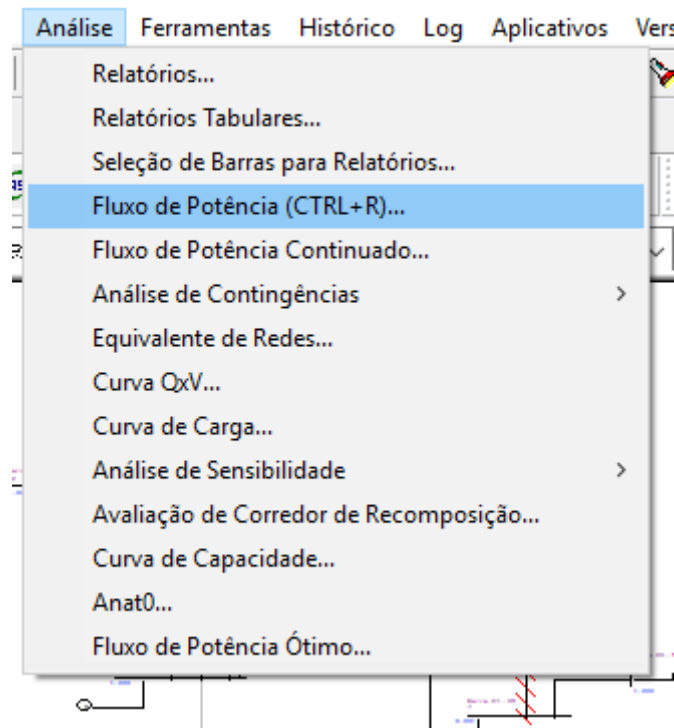
Número	Tipo	Grupo Base	Tensão Base (kV)	Nome Barra	Grupo Limite
1	2 - Referência	0	138.0	Barra-01--HV	0
2	1- PV	0	138.0	Barra-02--HV	0
3	1- PV	0	138.0	Barra-03--HV	0
14	0- PQ	1	23.1	Barra-14--LV	0
13	0- PQ	1	23.1	Barra-13--LV	0
4	0- PQ	0	138.0	Barra-04--HV	0
7	0- PQ	1	23.1	Barra-07--ZV	0
8	1- PV	1	23.1	Barra-08--TV	0
9	0- PQ	1	23.1	Barra-09--LV	0
10	0- PQ	1	23.1	Barra-10--LV	0
11	0- PQ	1	23.1	Barra-11--LV	0
12	0- PQ	1	23.1	Barra-12--LV	0
6	1- PV	1	23.1	Barra-06--LV	0
5	0- PQ	0	138.0	Barra-05--HV	0

Fonte: ANAREDE

- Rodando o Fluxo de Potência

Para rodar o fluxo de potência e obter o despacho de potência do sistema, deve-se clicar em Análise em seguida na opção Fluxo de Potência, indicado na figura 16.

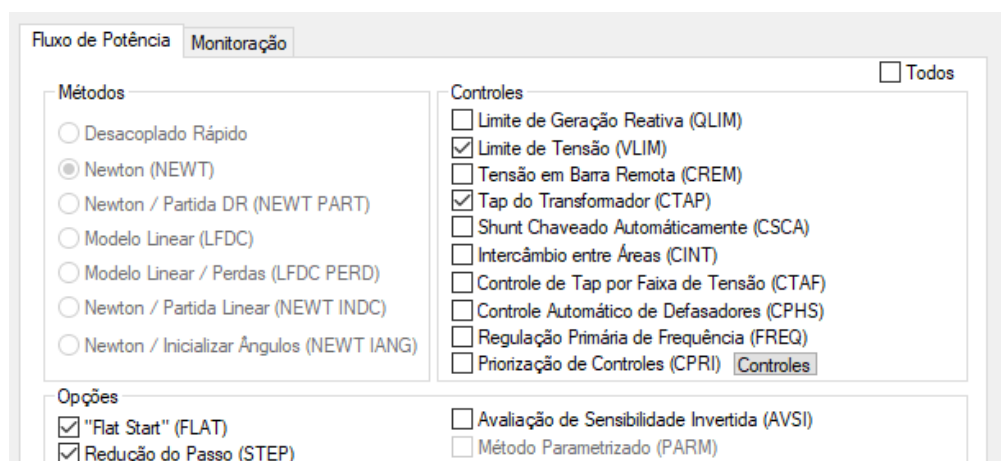
Figura 16: Análise do Fluxo de Potência.



Fonte: ANAREDE.

Ao clicar na opção indicada na figura 16, a janela da figura 17 é aberta onde deve-se selecionar as opções marcadas na figura.

Figura 17: Seleção de opções e de controles para o fluxo de potência.



Fonte: ANAREDE.

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. A seguir são apresentados os códigos de execução utilizados no arquivo de simulação do sistema IEEE 14 barras no ANATEM, o arquivo simulado é apresentado no ANEXO A.

- TITU

Faz a leitura do Título do caso, que é impressa pelo programa em todos os relatórios de saída, se não for utilizado o caso em estudo não terá identificação.

- ULOG

Faz a associação de unidades lógicas aos arquivos utilizados no programa. Foram utilizadas as unidades lógicas 4, 2, 8, 9 e 3. Essa unidades tem como função: associação do arquivo de impressão de relatório (.out); associação do arquivo ANAREDE de casos armazenados de fluxo de potência (.sav); associação do arquivo de saída de dados para a plotagem (.plt); associação do arquivo para armazenamento de mensagens de eventos durante a simulação (.log); e, associação do arquivo de dados de modelos armazenados para estabilidade, os reguladores (.blt).

- DOPC IMPR CONT

Faz a leitura de dados de padrão para Opções de Controle de Execução. Neste trabalho é utilizado o comando padrão que por *default* faz a impressão de dados em todos os códigos (IMPR), enviando todas as impressões de saída para o arquivo associado na ULOG 4 (FILE),

os relatórios são emitidos em formato 80 colunas (80CO) e que em caso de impressão no vídeo não seja interrompida a impressão após cada tela e não seja emitido um *prompt* para o usuário liberar a continuação de impressão (CONT).

- DCTE

Tem como função a leitura e modificação dos dados de constantes utilizadas no programa. A especificação da constante a ser modificada é realizada por uso de mnemônico e novo valor associado para uma constante. Foi utilizado o mnemônico TEPQ, que diz respeito a tolerância para verificação de convergência de fluxo de potência, com valor 0,1, ou seja, 1% de tolerância.

- ARQV REST

Os códigos associados reestabelecem para a memória todas as informações e dados relativos ao sistema contidos em um caso gravado no arquivo ANAREDE de casos armazenados de fluxo de potência, o que facilita na realização das simulações para diferentes cenários de um mesmo sistema.

- ARQM

Faz a leitura dos dados de modelos dos sistemas de controle armazenados em um arquivo de unidade lógica 3 (ULOG 3).

- DMAQ

Faz a leitura de dados de associação de geração ao modelo de máquina síncrona e respectivos sistemas de controle. Se gerações não forem associadas, estas terão seus modelos automaticamente convertidos em impedância constante.

- DPLT

Faz a leitura de dados das variáveis a serem armazenados no arquivo de plotagem, por meio do software Plot Cepel. Foram utilizados: DELT, FMAQ, PELE, QELE, e VOLT, para: plotagem do ângulo do eixo do gerador, em graus, relativo à referência; frequência do gerador em Hz; potência elétrica ativa interna do gerador em MW; potência elétrica reativa terminal do gerador, em Mvar; e, módulo da tensão na barra CA especificada. Ainda seria possível a plotagem de diversas outras variáveis apresentadas no manual no ANATEM, p. 201.

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 trabalho, são provenientes do Plot.

- DEVT

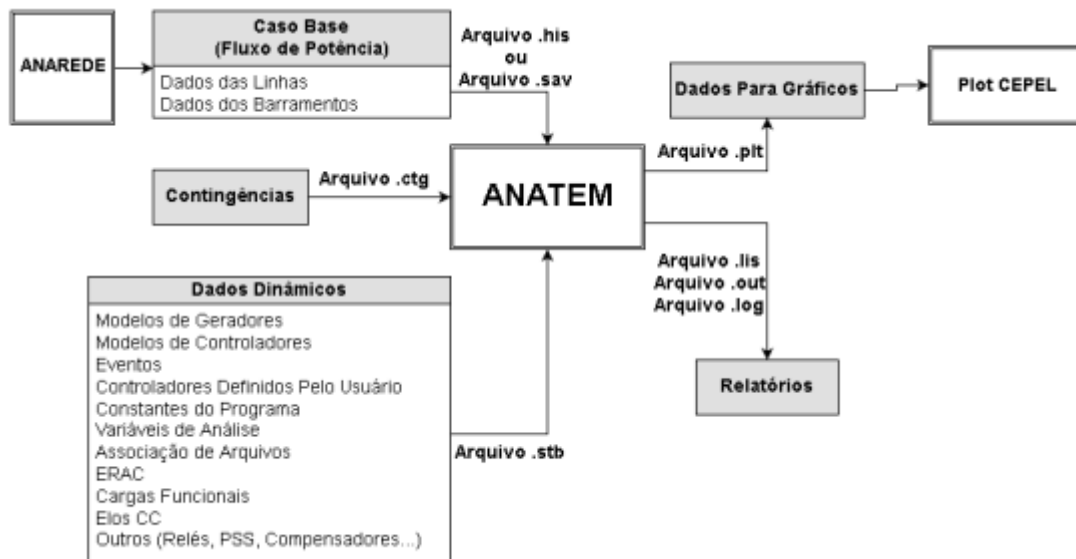
Os elementos do Sistema de Circuito CA podem ser ligados ou desligados pelo usuário, através de códigos de execução DEVT ou automaticamente por relés de impedância, de sobrecorrente ou de sobretensão, pelo código de execução DREL. Aconselha-se a consulta do manual para conhecimento dos diversos eventos que podem ser aplicados.

- DSIM

Esse código é responsável pela leitura de dados de simulação. É utilizado Tmax, que é o tempo máximo de simulação, igual a 30; Stp utilizado, igual a 0.005, ou seja, são realizadas integrações com passo de 0,005 segundos; e saída de Plotagem (P = 1) de 1 em 1 pontos.

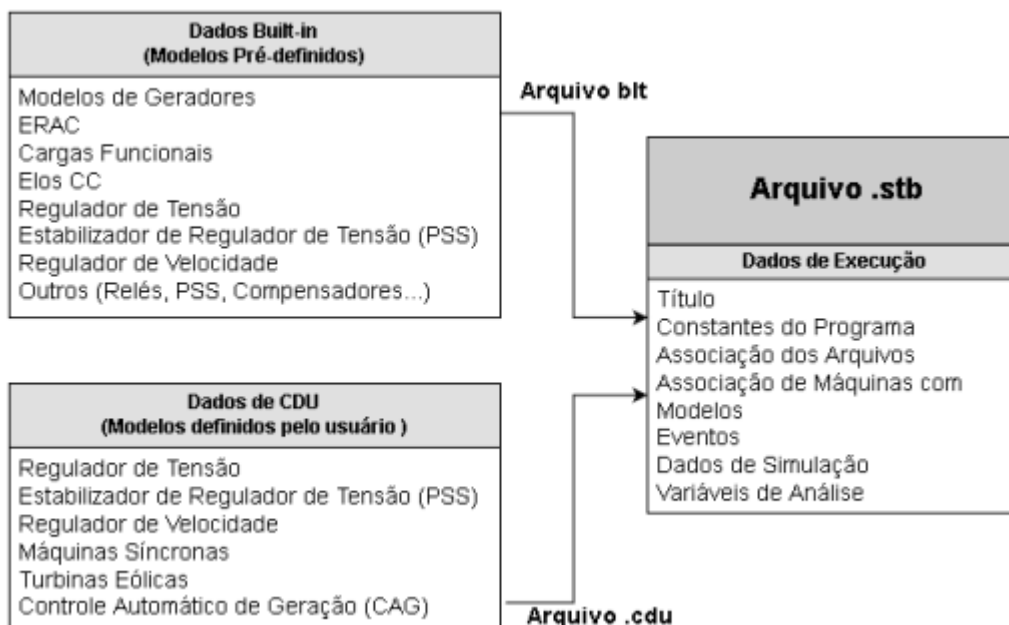
As figuras 18 e 19 ilustram os diferentes dados inseridos no ANATEM, alguns dos quais foram comentados anteriormente, os tipos dos arquivos inseridos, as saídas geradas e programas auxiliares, utilizados pelo mesmo.

Figura 18: Fluxograma de Dados de entrada e de saída do ANATEM



Fonte: (CEPEL, 2007).

Figura 19: Organização dos Dados Dinâmicos.

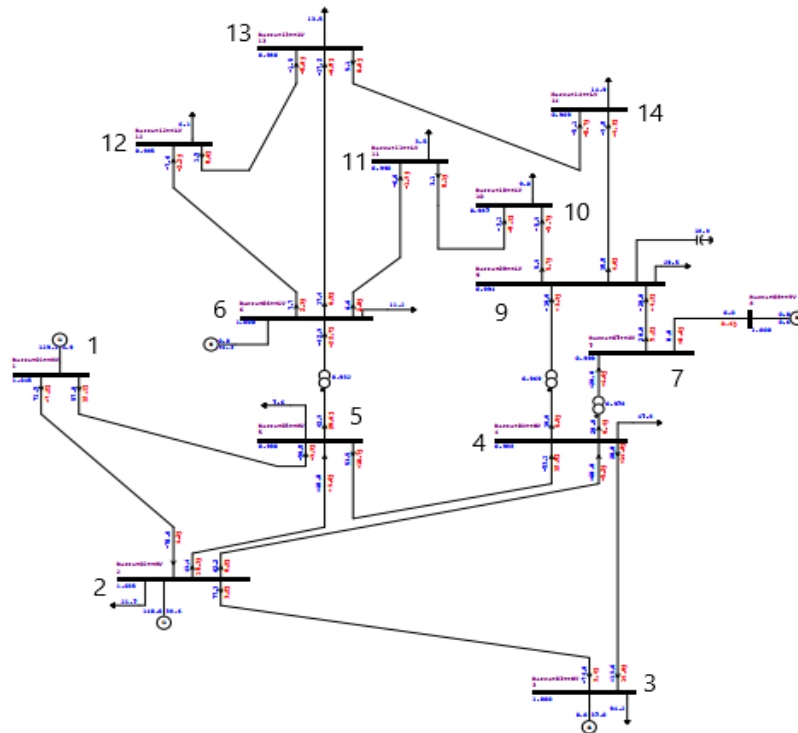


Fonte: (CEPEL,2007)

Para simulação de arquivos no ANATEM deve-se ter no mesmo diretório todos os arquivos apresentados no diagrama da figura 18. Após a criação do arquivo com extensão .stb, podemos executá-lo, neste trabalho utilizou-se da simulação por meio da interface gráfica do programa. De maneira semelhante ao ANAREDE, deve-se abrir o caso .stb, ir no elemento simulação na janela de comando e executar a simulação do arquivo. Serão gerados arquivos de saída, como o relatório de simulação que pode ser acessado clicando no elemento exibir, seguido de arquivos, seleciona-se então a opção relatórios. O programa PLOT CEPEL deve abris para exibir os gráficos pedidos para serem gerados.

Os Códigos dos arquivos stb e .blt, dos dados de execução e modelos pré-definido, são apresentados nos anexos A e B, respectivamente.

Figura 21: Sistema IEEE 14 Barras simulado no ANAREDE.



Fonte: *Software ANAREDE*, Versão 10.02.03.

O estudo do fluxo de potência retorna os dados do sistema apresentados na Tabela 1, na Tabela 2 são apresentados os dados de Geração Mínima e Máxima, bem como de shunt do sistema.

Tabela 1: Dados do sistema obtidos pelo fluxo de potência

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (°)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)
1	referência	1,0450	0	-	-	129,2	4,891
2	PV	1,0350	-2,3	21,7	12,7	140	38,6
3	PV	1,0000	-11	94,2	19	0	25,08
4	PQ	0,9880	-8,1	47,8	-3,9	-	-
5	PQ	0,9900	-6,7	7,6	1,6	-	-
6	PV	1,0000	-13	11,2	7,5	0	-4,31
7	PQ	0,9990	-12	-	-	-	-
8	PV	1,0000	-12	-	-	0	0,6419
9	PQ	0,9940	-13	29,5	16,6	-	-
10	PQ	0,9870	-14	9	5,8	-	-
11	PQ	0,9900	-13	3,5	1,8	-	-
12	PQ	0,9850	-14	6,1	1,6	-	-
13	PQ	0,9800	-14	13,5	5,8	-	-
14	PQ	0,9690	-15	14,9	5	-	-

Fonte: Autoria própria

Tabela 2: Dados de Geração Mínima e Máxima e Shunt.

Barra	Geração Reativa Mínima (Mvar)	Geração Reativa Máxima (Mvar)	Shunt (Mvar)
1	-9999	9999	-
2	-40	50	-
3	0	40	-
6	-6	24	-
8	-6	24	-
9	-	-	19

Fonte: Autoria própria.

Na tabela 3 são apresentados os dados das linhas do sistema. Para objetivo de simulação com contingências, foi escolhido o valor de 100 MVA para os parâmetros de capacidade normal (CAP) e de emergência (EME). Já na tabela 4 são apresentados os dados dos transformadores do sistema.

Tabela 3: Dados das linhas de transmissão.

Linhas	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (Mvar)	CAP (MVA)	EME (MVA)
1--2	1,938	5,917	5,28	100	100
1--5	5,403	22,304	4,92	100	100
2--3	4,699	19,797	4,38	100	100
2--4	5,811	17,632	3,4	100	100
2--5	5,695	17,388	3,46	100	100
3--4	6,701	17,103	1,28	100	100
4--5	1,335	4,211	-	100	100
6--11	9,498	19,890	-	100	100
6--12	12,291	25,581	-	100	100
6--13	6,615	13,027	-	100	100
7--8	0	17,615	-	100	100
7--9	0	11,001	-	100	100
9--10	3,181	8,450	-	100	100
9--14	12,711	27,038	-	100	100
10--11	8,205	19,207	-	100	100
12--13	22,092	19,988	-	100	100
13--14	17,093	34,802	-	100	100

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4: Dados dos Transformadores do sistema.

Linhas	Reatância (%)	Tap	CAP	EME
4--7	20,912	0,9780	100	100
4--9	55,618	0,9690	100	100
5--6	25,202	0,9320	100	100

Fonte: Autoria própria.

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

- Caso A – Valores nominais do sistema, apresentados nas tabelas acima;
- Caso B – Situação de sobrecarga do sistema para aumento de 20% dos valores nominais;
- Caso C – Situação de sobrecarga do sistema para aumento de 60% dos valores nominais;
- Caso D – Situação de sobrecarga do sistema para aumento de 95% 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;
- Situação 4 - Simulação com curto-circuito na Barra CA 5 com remoção da barra;
- Situação 5 – Simulação do sistema com perda da linha 2-5.

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, como mencionado na seção 3. Para as simulações no ANATEM não foram alterados os dados dos reguladores do arquivo ULOG 3.

5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

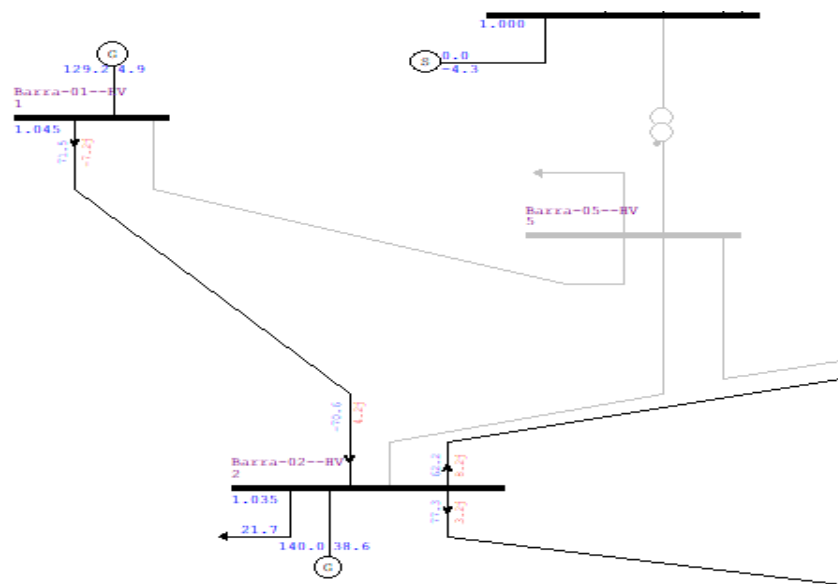
Neste capítulo é apresentado as simulações e resultados para os casos e situações listados anteriormente.

5.1.1 Simulação no ANAREDE

5.1.1.1 Caso A

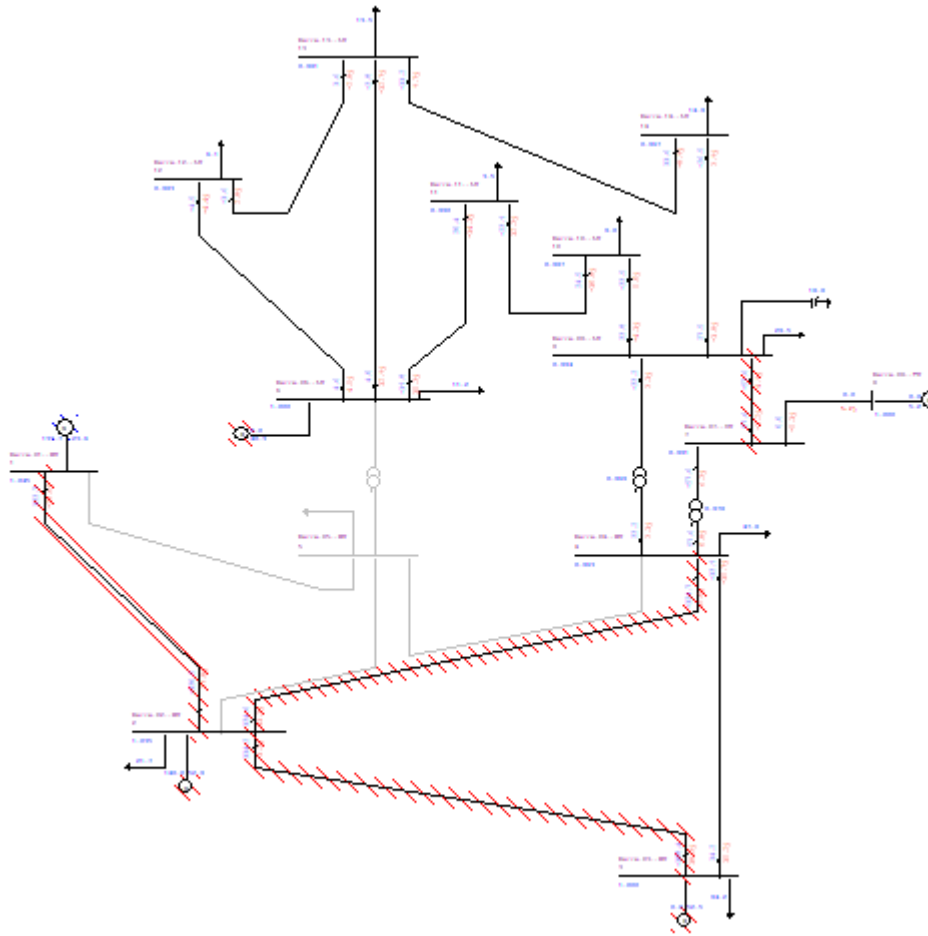
Para simulação do caso A no ANAREDE para situação 1, é removida a LT 1-2. Com auxílio do Gerenciador de Dados, podemos desabilitar a linha, como mostrado na seção 3. Fazendo o mesmo procedimento para a situação 2, desabilitando a LT 1-5 ocorre sobrecarga dos geradores das barras 1, 2, do compensador da barra 3, além de sobrecarga da LT 1-2. Para a situação 3, ocorre sobrecarga do compensador conectado à barra 3 e das LT's 2-4 e 3-4. A simulação de perda da barra 5 apresenta sobrecarga nas LT's 1-2, 2-3, 2-4, 7-9, no gerador da barra 2, nos compensadores síncronos 3 e 6, além de contingência no gerador da barra 1 de referência, a figura 22 ilustra a desativação da barra 5, e a figura 23 ilustra o comportamento do sistema após a simulação do fluxo de potência. Por outro lado, se for perdida a LT 2-5, ocorre sobrecarga no compensador da barra 3.

Figura 22: Inativação da barra 5.



Fonte: Autoria própria.

Figura 23: Comportamento do sistema para barra 5 inativa.



Fonte: Autoria própria.

5.1.1.2 Caso B

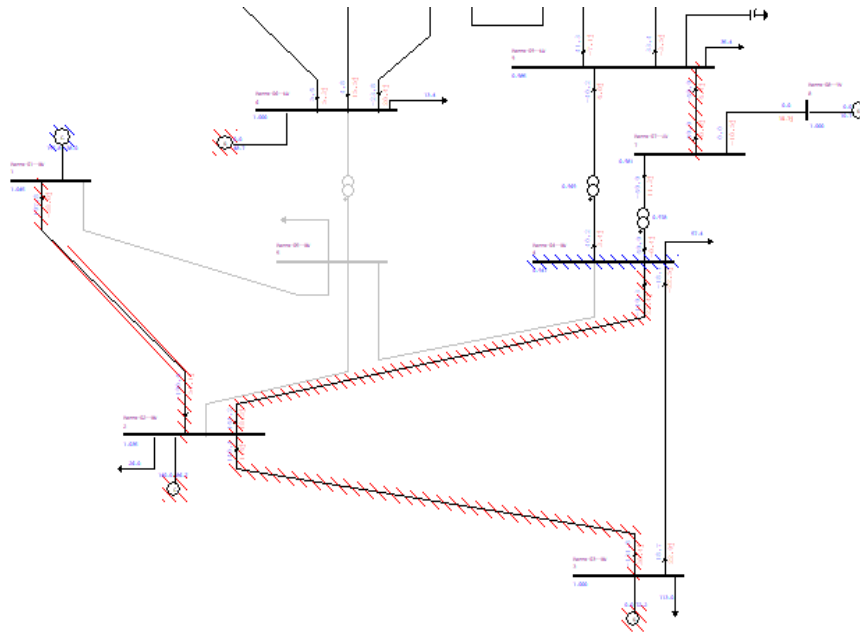
Na simulação do caso B para situação 1, ocorre sobrecarga da LT 1-5 e LT 5-4, gerador da barra 2, gerador da barra 1 e compensador da barra 3.

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.

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.

Para situação 4 foi desligado a barra 5 que causou sobrecargas em ambos geradores, nos compensadores das barras 3 e 6, LT's 1-2, 2-4, 2-3, 7-9, e queda de tensão na barra 4. A figura 24 apresenta essa situação. Já para a situação 5 ocorre sobrecarga na LT 2-3 e no compensador da barra 3.

Figura 24: Comportamento do sistema para barra 5 desabilitada.



Fonte: Autoria própria.

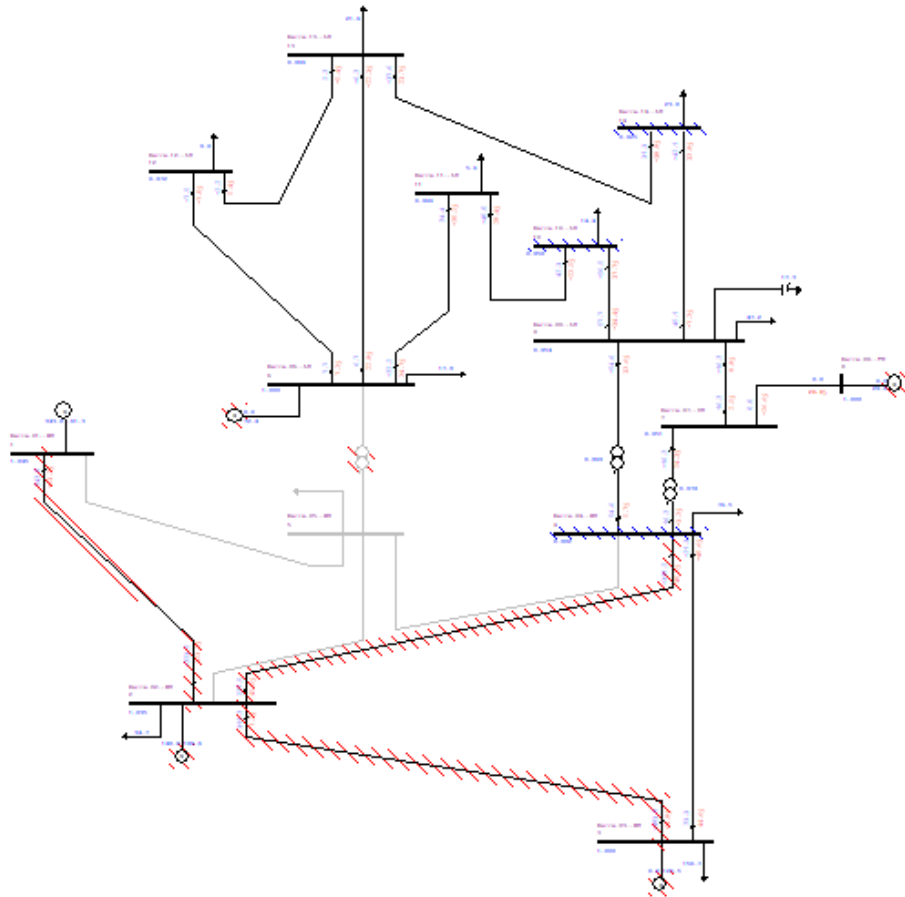
5.1.1.3 Caso C

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

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.

Para o desligamento da barra 5 ocorre sobrecarga nas LT's 1-2, 2-4, 2-3, no gerador 2, compensadores 3, 6 e 8, além de contingências nas barras 4, 10 e 14. A figura 25 ilustra esta situação.

Figura 25: Comportamento do sistema para a perda da Barra 5.



Fonte: Autoria própria.

Destaca-se que para o redespacho de potência do sistema sem contingências, o mesmo opera com as LT's 1-2, 1-5 e 2-3 já sobrecarregadas, isso devido aos limites inseridos.

5.1.1.4 Caso D

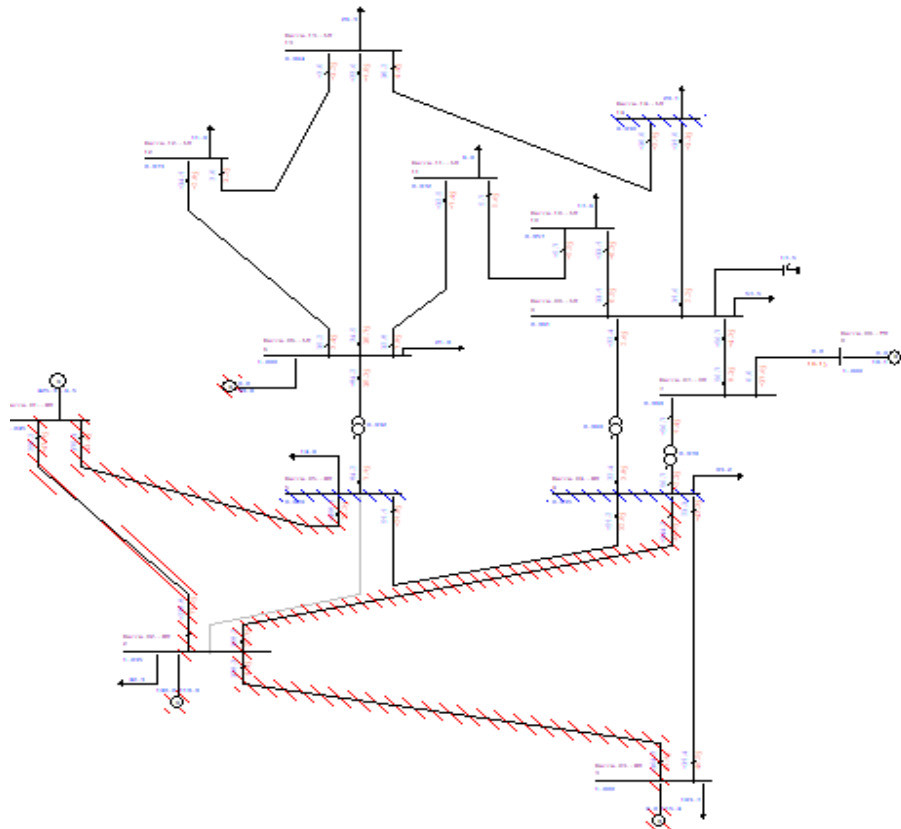
Para simulação do caso D no ANAREDE, é inserido aumento de 95% de carga no sistema, como realizado anteriormente. Para a situação 1 ocorre sobrecarga nas LT's 1-5, 2-5, 5-4, 2-4, 3-4, 7-8, nos compensadores 3, 6 e 8, no gerador da barra 2, e contingências nas barras 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13 e 14.

Para situação 2, ocorreu contingências nas LT's 1-2, 2-5, 2-4, 2-3, nos compensadores 3 e 6, no gerador 2 e nas barras 4, 5 e 14. Para situação 3, ocorreu sobrecarga nas LT's 1-2, 1-5, 2-5, 5-4, 2-4, 3-4, nos compensadores 3, 6 e 8, no gerador 2 e nas barras 4, 5, 7, 9, 10 e 14.

Para situação 4, com a perda da barra 5 ocorre contingência nos compensadores síncronos, nas barras 4, 7, 9, 10, 11, e 14, nas LT's 1-2, 2-4, 2-3, 7-9, transformador da LT 4-

7, além de sobrecarga no gerador da barra 2. Para situação 5, tem-se a sobrecarga das LT's 1-2, 1-5, 2-4, 2-3, contingências nas barras 4, 5, 14, compensadores 3 e 6. A figura 26 ilustra esta situação.

Figura 26: Comportamento do sistema para contingência D situação 5.



Fonte: Autoria própria.

5.1.2 Simulação no ANATEM – Estudo de Estabilidade angular rotórica

Foram simulados os mesmos casos do ANAREDE, apresentados anteriormente no ANATEM, utilizando de 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;

5.1.2.1 Caso A

- Caso A-1 (valores nominais e perda da linha 1-2)

Restabelecendo o caso 1 através da linha de código ARQV REST, como apresentado na figura 27, as informações do fluxo de potência e do sistema simulado no ANAREDE como caso base são repassadas para o ANATEM, e pode-se aplicar as contingências apresentadas nas situações de 1 a 5. Para situação 1 é feito o desligamento da linha 1-2 após ocorrência de curto-circuito na mesma, como apresentado na figura 28.

Figura 27: Restabelecendo caso base 1 do arquivo .sav do ANAREDE.

```

050 (
051 (=====
052 ( RESTABELECIMENTO DO CASO DE FLUXO DE POTENCIA
053 (=====
054  ARQV REST
055    1
056 (

```

Fonte: Autoria própria.

Figura 28: Aplicação de eventos para A-1 (caso A situação 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  15.0  05
186 (dbca  15.0  05
187 (dbca  1.79  05
188 

|      |      |    |    |    |    |
|------|------|----|----|----|----|
| apcl | 1.0  | 01 | 02 | 02 | 20 |
| rmcl | 1.15 | 01 | 02 |    |    |
| abci | 1.15 | 01 | 02 |    |    |


189
190
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

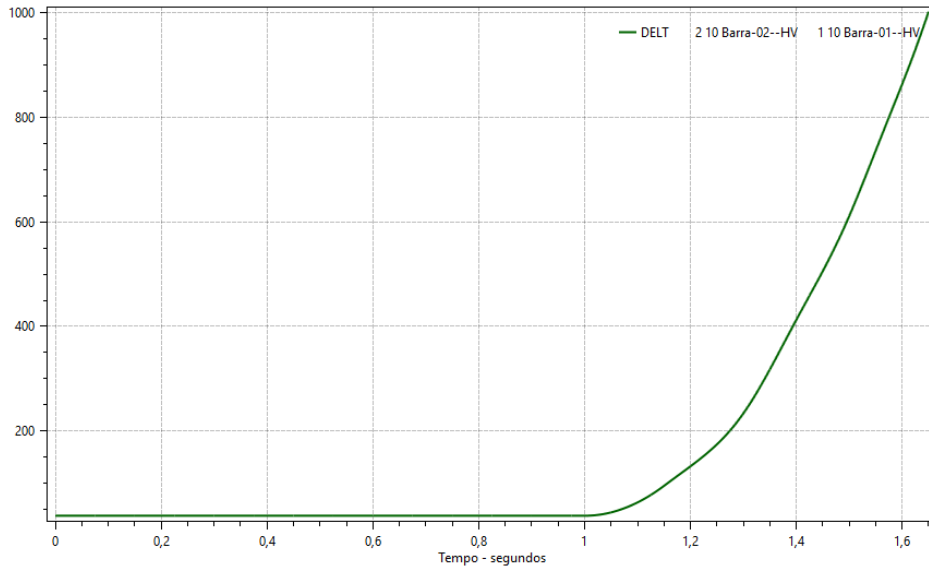
```

Fonte: Autoria própria.

Indicado no retângulo está a linha de comando para realização de curto à 20% da extremidade da barra 02 em $t = 1$ s, remoção do curto em $t = 1,15$ s, e desligamento da LT, respectivamente. A resposta angular da máquina 10 (gerador da barra 02) para este distúrbio é

apresentada na figura 29, o relatório de simulação gerada pelo ANATEM para a simulação é apresentado na figura 30. Na figura 29 verifica-se que ocorre perda de sincronismo.

Figura 29: Resposta do comportamento angular da tensão interna do gerador em graus da máquina da barra 02 do caso A-1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 30: Relatório de simulação gerado pelo ANATEM para o caso A-1.

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

Redespacho Potência

* 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= 1.1500s RMCL - Removeu curto de 1 Barra-01--HV 2 Barra-02--HV 1

T= 1.1500s ABCI - Abrir circuito 1 Barra-01--HV 2 Barra-02--HV 1

T= 1.1500s Abriu circuito 1 Barra-01--HV 2 Barra-02--HV 1

T= 1.3750s - 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 : 365.3 graus

T= 1.6500s - 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 : 1001.6 graus

Fonte: Relatório de simulação.

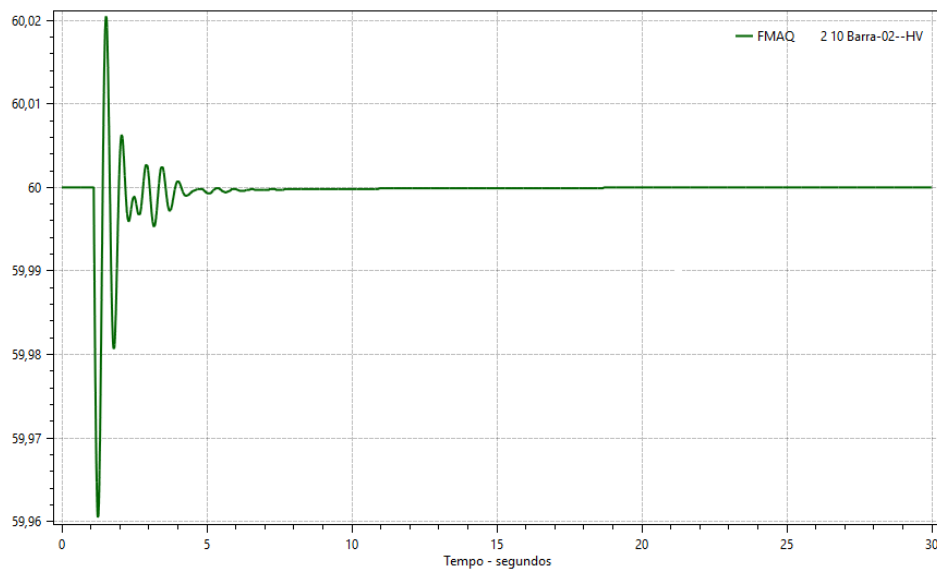
A figura 30 informa a perda de sincronismo, logo o sistema se torna instável para tal evento. Inserindo novos valores no tempo de remoção do curto e da LT, verificando o

comportamento da máquina 10, é possível encontrar o tempo crítico de abertura para a perturbação simulada, o valor encontrado é de $t = 1,1$ segundos após ocorrência da falta.

- Caso A-2 (valores nominais e perda da linha 1-5)

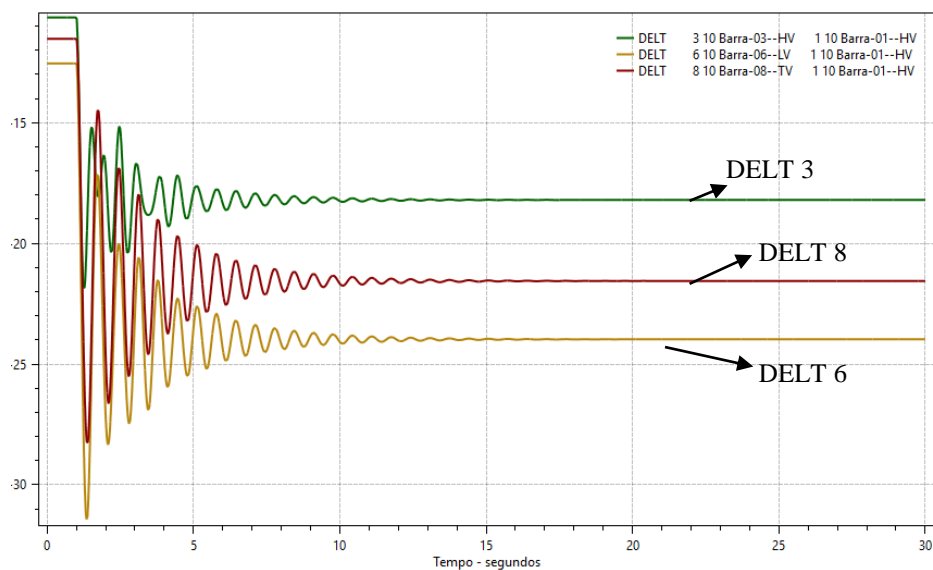
Para a situação 2, é aplicado curto-circuito e o desligamento da LT 1-5, sem removê-lo. A resposta da frequência do gerador ligado à barra 02, e da variação angular dos compensadores síncronos, são apresentados nas figuras 31 e figura 32, respectivamente.

Figura 31: Resposta da frequência elétrica do gerador em graus do gerador da barra 02 do caso A-2.



Fonte: Autoria própria.

Figura 32: Resposta do ângulo das máquinas síncronas das barras 3, 6 e 8 para o caso A-2.



Fonte: Autoria própria.

Na figura 32 nota-se que os ângulos dos compensadores decrescem apresentando comportamento oscilatório, contudo, são amortecidos até estabilizarem, mantendo o sincronismo com o sistema. Verificou-se, com auxílio do Plot Cepel, que ocorre decréscimo no ângulo da máquina 10, e redução nas tensões para níveis abaixo do permitido pela ANEEL, entre 0.95 e 1.05 pu, sendo assim, a frequência é mantida em seu valor nominal devido à presença de reguladores, que foram adicionados junto ao código do ANATEM.

- Caso A-3 (valores nominais e perda da linha 2-3)

Para o caso A-3 é aplicado um curto-circuito na LT 2-3 em $t = 1 \text{ s}$, removendo a LT em $t = 1.4 \text{ s}$. O código é apresentado na figura 33, indicado no retângulo. das situações anteriores, apenas trocando as extremidades da LT. O relatório de simulação para o caso A-3 é apresentado na figura 34.

Figura 33: Código para curto-circuito e remoção na LT 2-3, caso A-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 15.0 05
186 (dbca 15.0 05
187 (dbca 1.79 05
188 apcl 1.0 02 03 02 20
189 rmcl 1.4 02 03
190 abci 1.4 02 03
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 34: Relatório de simulação do ANATEM para o caso A-3.

```

Redespacho Potência
* 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= 1.4000s RMCL - Removeu curto de 2 Barra-02--HV 3 Barra-03--HV 1

T= 1.4000s ABCI - Abrir circuito 2 Barra-02--HV 3 Barra-03--HV 1

T= 1.4000s Abriu circuito 2 Barra-02--HV 3 Barra-03--HV 1

T= 1.5250s - 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 : 362.1 graus

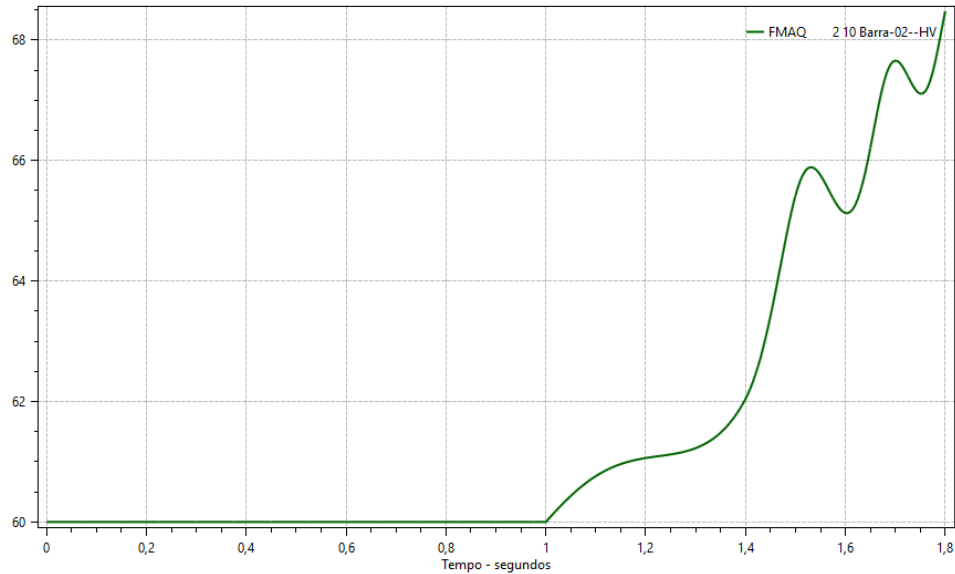
T= 1.8000s - Ângulo da máquina 10 da barra 2 Barra-02--HV ultrapassou o
limite de 1000.0 graus. O caso será encerrado.
Ângulo em relação ao centro de massa : 1008.4 graus

```

Fonte: Relatório de simulação.

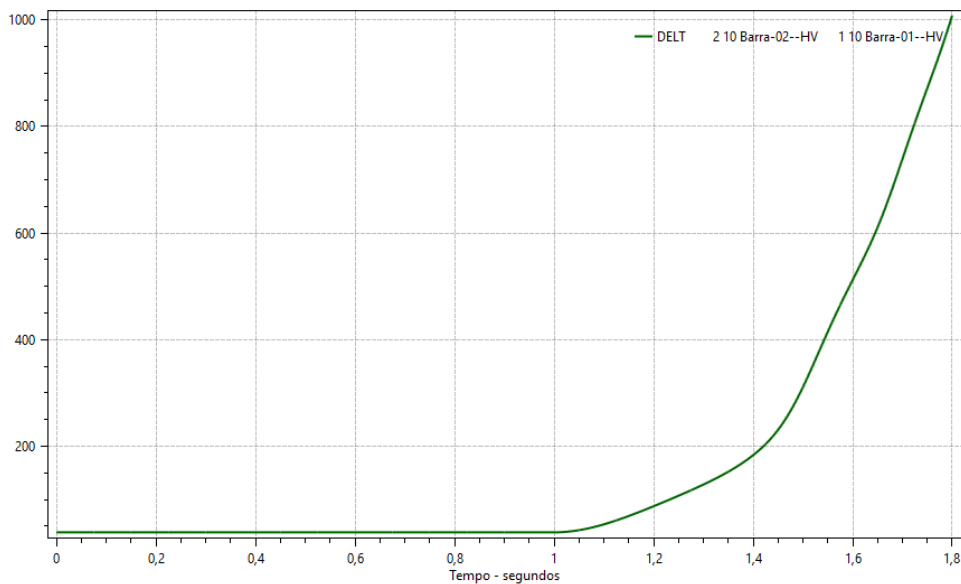
A figura 34 informa a perda de sincronismo da máquina 10 (gerador conectado à barra 02), com sistema ficando instável para tal ocorrência. Esta situação pode ser vista pelas respostas da frequência e comportamento angular, apresentados nas figuras 35 e 36, respectivamente.

Figura 35: Resposta da frequência do gerador da barra 2 para o caso A-3.



Fonte: Autoria própria.

Figura 36: Instabilidade de tensão no sistema para o caso A-3.



Fonte: Autoria própria.

O tempo crítico de abertura da LT para evitar a perda de sincronismo é encontrado por meio de tentativa e erro, sendo $t = 1,28 \text{ s}$.

- Caso A-4 (valores nominais e curto na barra 5)

Para o caso A-4 foi primeiramente aplicado um curto-circuito na barra 5 sem removê-lo, com objetivo de verificar se ocorre instabilidade na presença do distúrbio. A linha de código para aplicação do evento é apresentada na figura 37 e o comportamento angular do gerador conectado à barra 2 é apresentado na figura 38.

Figura 37: Aplicação de curto-circuito na barra 5.

```

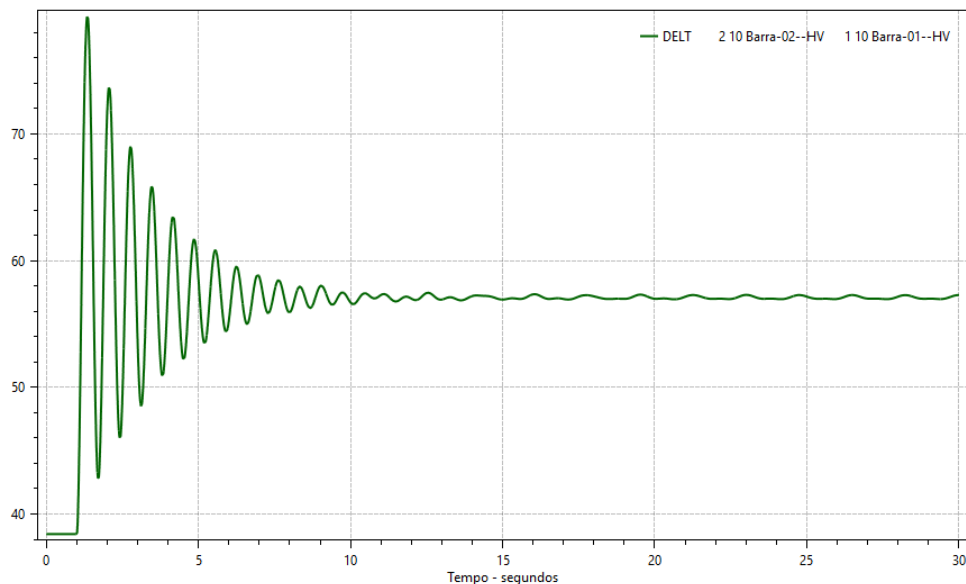
182  DEVT
183 (Tp) ( Tempo)( El )( Pa)Nc( Ex) ( % ) (ABS ) Gr Und      (Bl)P ( Rc ) ( Xc ) ( Bc ) (Defas)
184 | apcb      1.0  05

```

Fonte: Autoria própria.

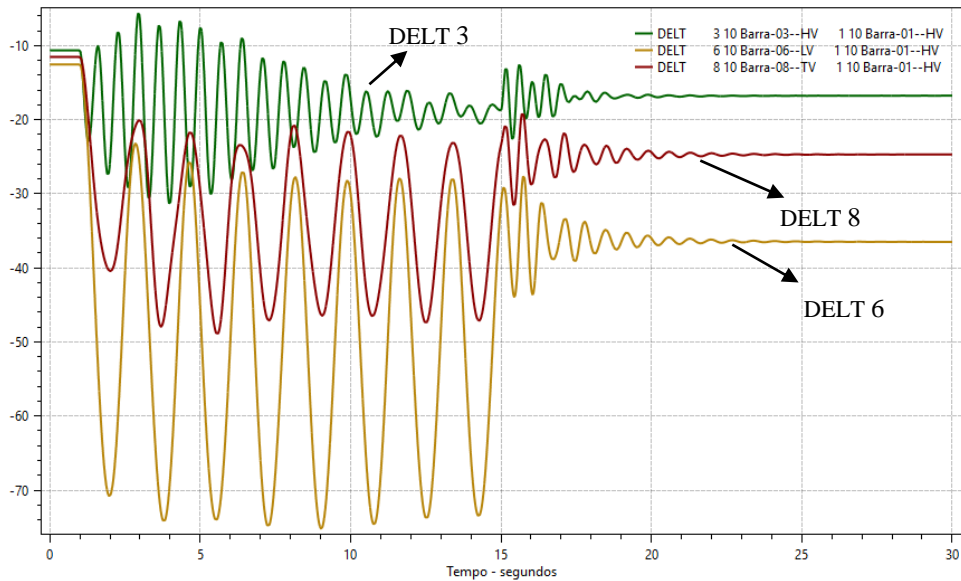
Com a figura 38 percebe-se que gerador da barra 2 não perde o sincronismo para um curto na barra 5, contudo, novamente os compensadores saem de sincronização com o sistema, figura 39, ao não ser retirada barra faltosa.

Figura 38: Resposta do comportamento angular da tensão interna em graus do gerador da barra 02 do caso A-4.



Fonte: Autoria própria.

Figura 39: Resposta do comportamento angular da tensão interna em graus das máquinas das barras 3, 6 e 8 do caso A-3.



Fonte: Autoria própria.

- Caso A-5 (valores nominais e perda da linha 2-5)

Simulando o caso A-5 utilizando as linhas de código apresentadas na figura 40 para aplicar o curto-circuito na LT 2-5 à 20% da barra 2, seguido de remoção e desligamento. O curto é aplicado em $t = 1 \text{ s}$ removido em $t = 1.27 \text{ s}$. O ângulo de tensão do gerador da barra 2 teve o comportamento apresentado na figura 41.

Figura 40: Aplicação de evento para aplicação e remoção de curto-circuito, seguido de remoção da linha do caso A-5.

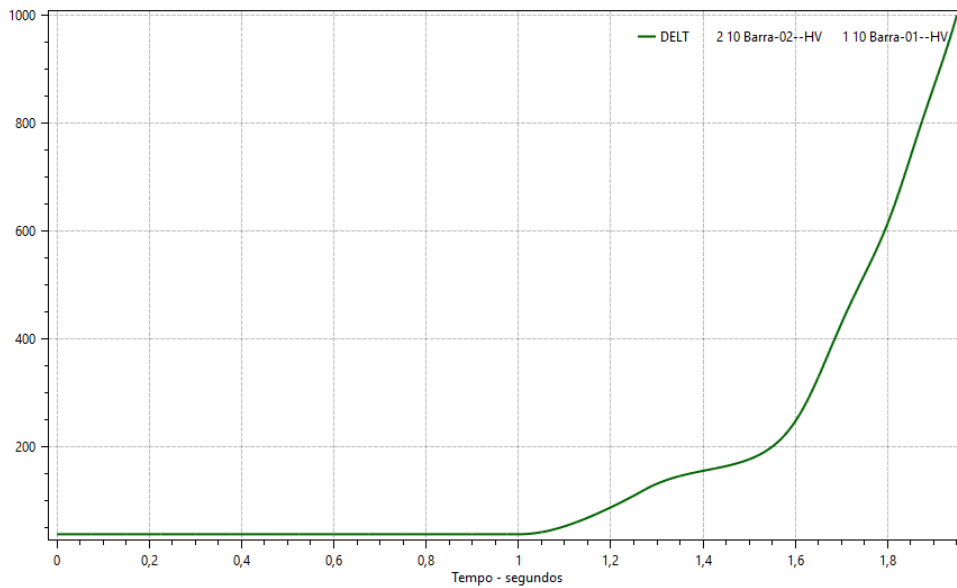
```

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 apc1 1.0 02 05 02 20
187 rmcl 1.27 02 05
188 abci 1.27 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 (abci 1.27 02 05
195 (abci 1.0 05 04
196 (abci 1.0 02 04
197 999999

```

Fonte: Autoria própria.

Figura 41: Resposta do comportamento angular da tensão interna em graus do gerador da barra 02 do caso A-5.



Fonte: Autoria própria.

Verifica-se então que o sincronismo é perdido para a situação A-5, o que é exibido no relatório gerado pelo programa para a simulação, figura 42.

Figura 42: Resultado do relatório do ANATEM para o caso A-5.

```

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

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

T= 1.0000s APCL - Aplicou curto em      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1
                   a 20.0% a partir da barra      2 Barra-02--HV

T= 1.2700s RMCL - Removeu curto de      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1

T= 1.2700s ABCI - Abrir circuito      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1

T= 1.2700s Abriu circuito      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1

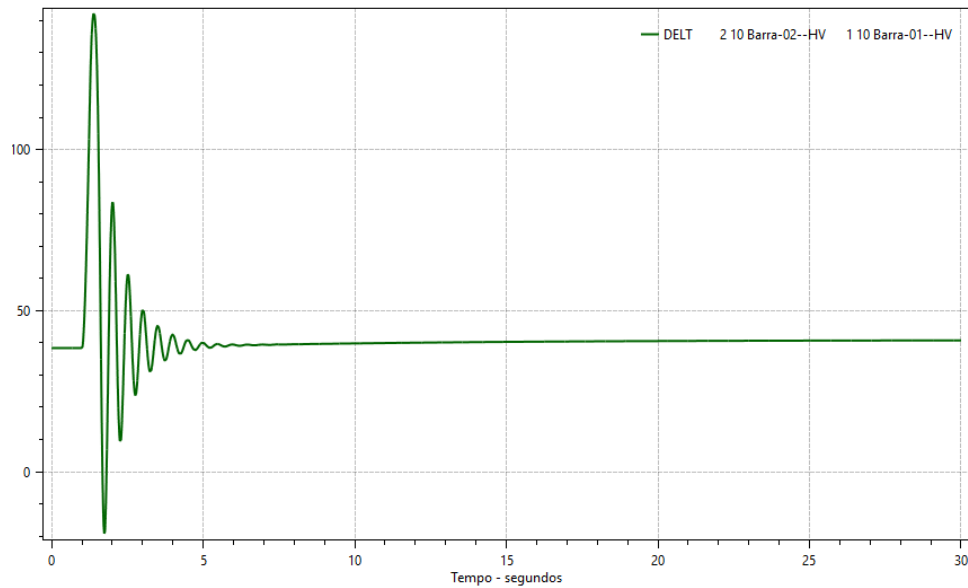
T= 1.6700s - Ângulo da máquina 10 da barra      2 Barra-02--HV ultrapassou o
                   limite de 360.0 graus. Possível perda de sincronismo.
                   Ângulo em relação ao centro de massa : 369.9 graus

T= 1.9500s - 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 : 1000.4 graus
  
```

Fonte: Relatório da Simulação.

Por meio de tentativa e erros foi encontrado o tempo crítico de abertura para o caso corrente de modo a evitar a perda do sincronismo e por consequência a instabilidade, tal tempo foi de 0,26 segundos ocorrido a perturbação. Ao ser removido o curto no tempo $t = 1,26 s$ o gerador continua operando em condição de estabilidade, figura 43.

Figura 43: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso A-5 para tempo de abertura igual a 1,26 segundos.



Fonte: Autoria própria.

5.1.2.2 Caso B

- Caso B-1 (20% de sobrecarga e perda da linha 1-2)

Para simulação do caso B-1, primeiramente é restabelecido o caso 5 do arquivo do ANAREDE no ANATEM. Então, 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 44, o relatório de simulação é apresentado na figura 45.

Figura 44: Código do evento de aplicação de curto e remoção da linha para o caso B-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 45: Resultado de simulação do ANATEM para o caso B-1.

```

CEPEL - 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
  
```

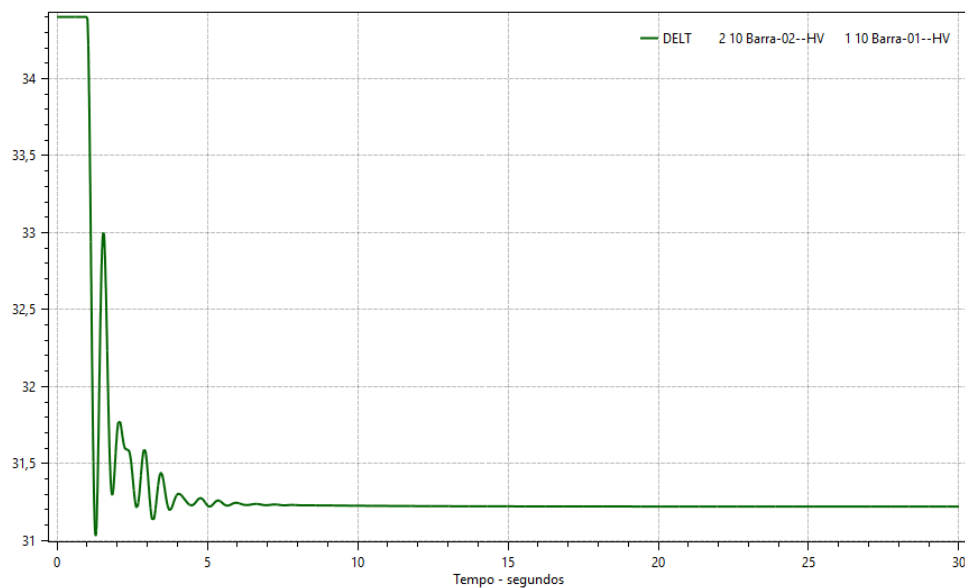
Fonte: Relatório de simulação.

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 B-1.

- Caso B-2 (20% de sobrecarga e perda da linha 1-5)

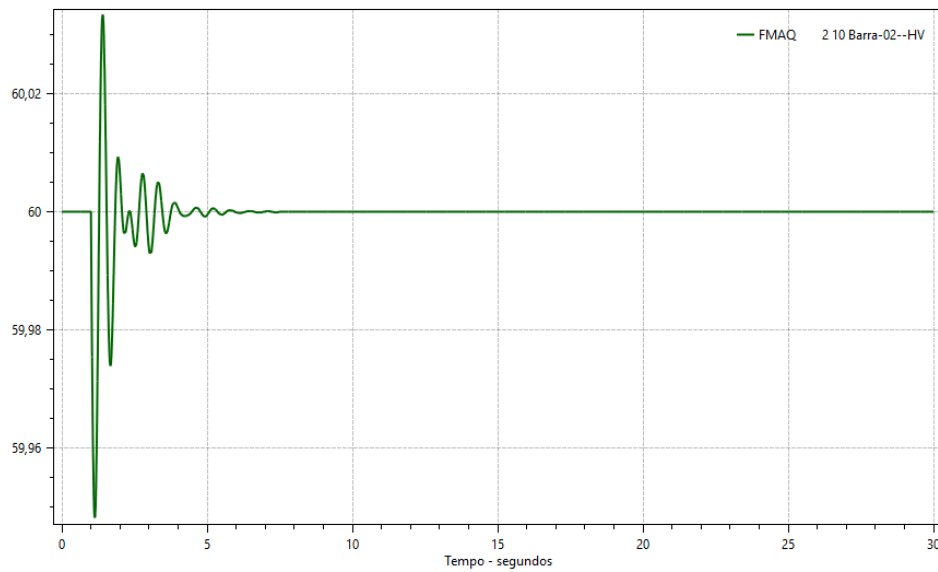
Para o caso B-2, foram obtidos os resultados apresentados nas figuras 46 e 47.

Figura 46: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso B-2.



Fonte: Autoria própria.

Figura 47: Resposta da frequência do gerador da barra 2 para o caso B-2.



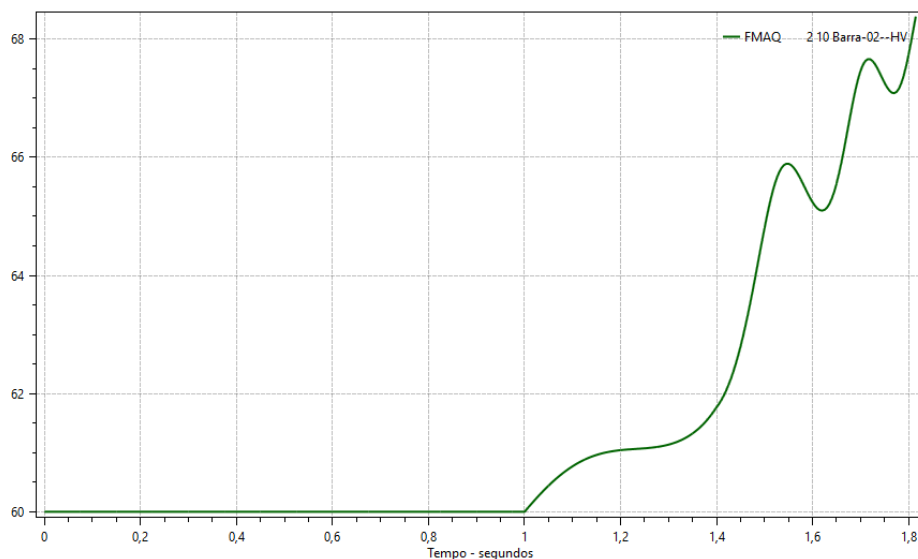
Fonte: Autoria própria.

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

- Caso B-3 (20% de sobrecarga e perda da linha 2-3)

Aplicando curto-circuito em $t = 1 \text{ s}$ e removendo a LT 2-3 em $t = 1.4 \text{ s}$ o sistema apresenta perda de sincronismo, e, portanto, é instável, como pode ser visto pela figura 48, que apresenta a frequência elétrica da máquina 10.

Figura 48: Resposta da frequência do gerador da barra 2 para o caso B-3.



Fonte: Autoria própria.

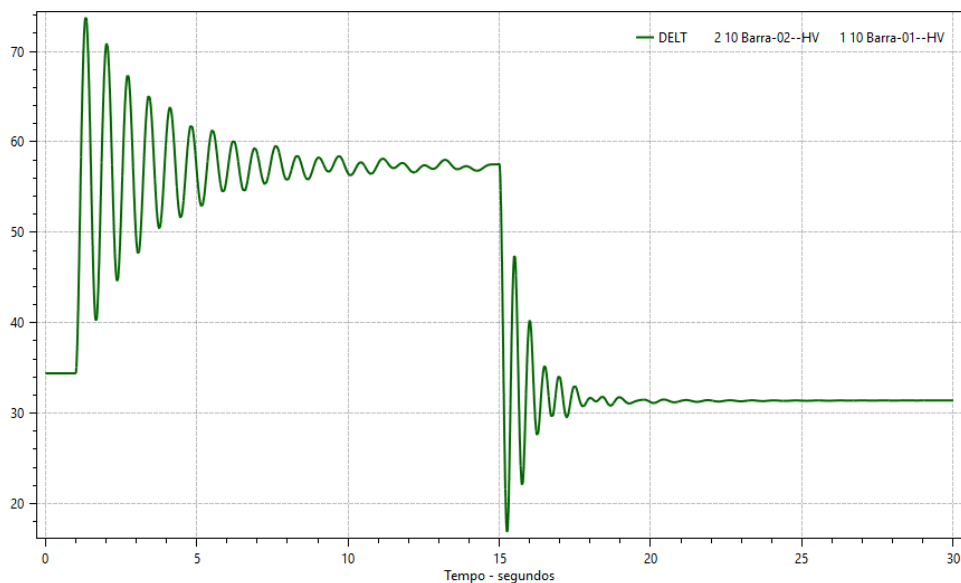
O tempo crítico para abertura da LT encontrado foi de $t = 1,3$ segundos.

- Caso B-4 (20% de sobrecarga e perda da barra 5)

A resposta angular para a máquina 10, é apresentada na figura 49. Na figura 50 são apresentados os ângulos dos compensadores síncronos, e na figura 51 é apresentado a instabilidade de tensão que ocorre em certas barras, quando aplica-se um curto-circuito na barra 5 em seguida, à desligando.

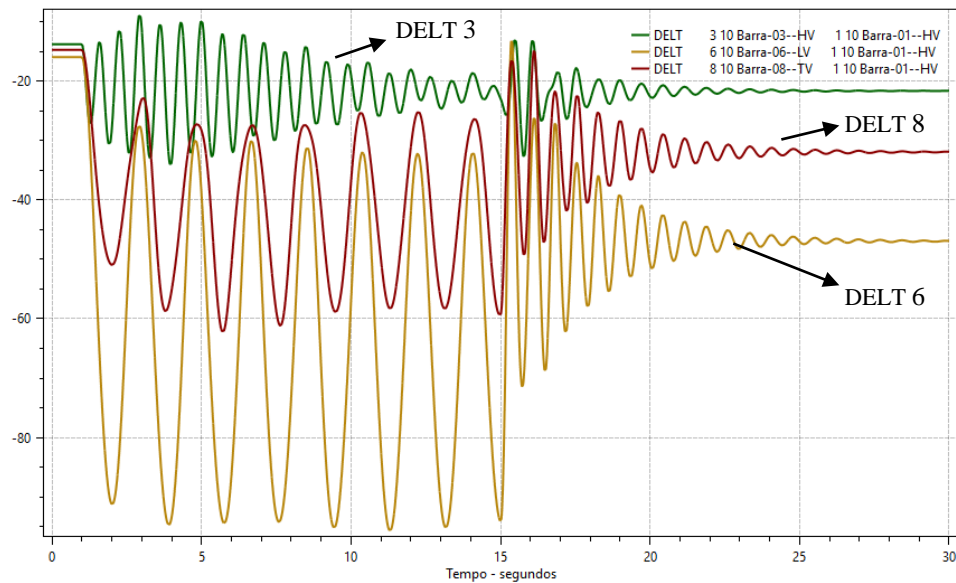
Na figura 49, após período oscilatório, seguido do distúrbio, o ângulo da máquina 10 sofre um acréscimo e tende a se estabilizar. Não entrando em instabilidade. Na figura 50, nota-se que os ângulos dos compensadores entram em comportamento oscilatório por um período mais longo do que a máquina 10, apresentando risco de perda de sincronismo com o sistema, após removido a barra em $t = 15$ s, os mesmos encontram estabilidade.

Figura 49: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso B-4.



Fonte: Autoria própria.

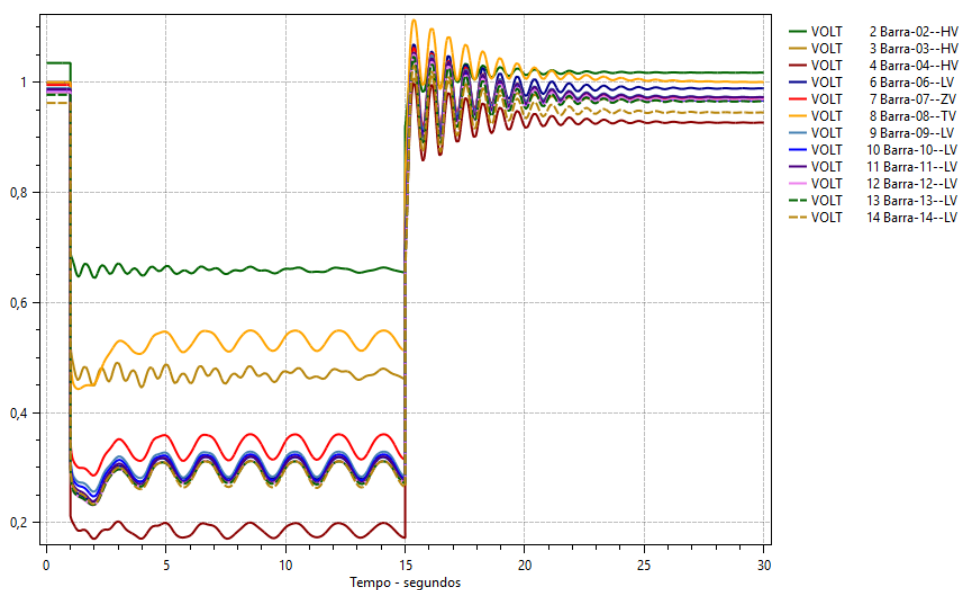
Figura 50: Resposta do comportamento angular dos compensadores síncronos caso B-4.



Fonte: Autoria própria.

As tensões nas barras 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14 atingem níveis abaixo do permitido pela ANEEL, de 0,95 pu, no período em que antecede a retirada da barra 05. Após retirada de operação da barra 05, os níveis de tensão das barras, exceto barra 04, voltam aos níveis aceitáveis dentro dos limites de mínimo e máximo aceitáveis entre 0,95 e 1,05 pu. Como pode ser visto na figura 51.

Figura 51: Instabilidade de tensão caso B-4.

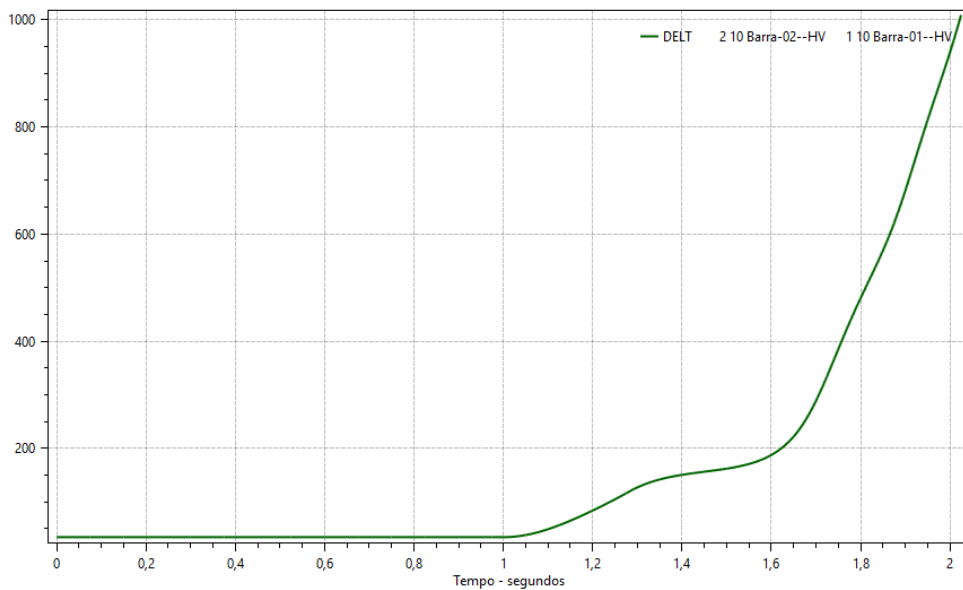


Fonte: Autoria própria.

- Caso B-5 (20% de sobrecarga e perda da linha 2-5)

Ao aplicar o curto na LT 2-5, com os mesmos parâmetros do caso A-5, ocorre instabilidade angular. A figura 52 apresenta tal instabilidade, onde o ângulo da máquina 10 cresce infinitamente, até o instante $t = 2$ s, quando se encerra a simulação. A figura 53 apresenta o relatório, onde é informado a ocorrência da perda de sincronismo.

Figura 52: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso B-5.



Fonte: Autoria própria.

Figura 53: Resultado do relatório do ANATEM para o caso B-5.

```

CEPEL - 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      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1
      a 20.0% a partir da barra      2 Barra-02--HV

T= 1.2800s RMCL - Removeu curto de      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1

T= 1.2800s ABCI - Abrir circuito      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1

T= 1.2800s Abriu circuito      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1

T= 1.7400s - 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 : 364.7 graus

T= 2.0250s - 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 : 1008.9 graus
  
```

Fonte: Relatório da Simulação.

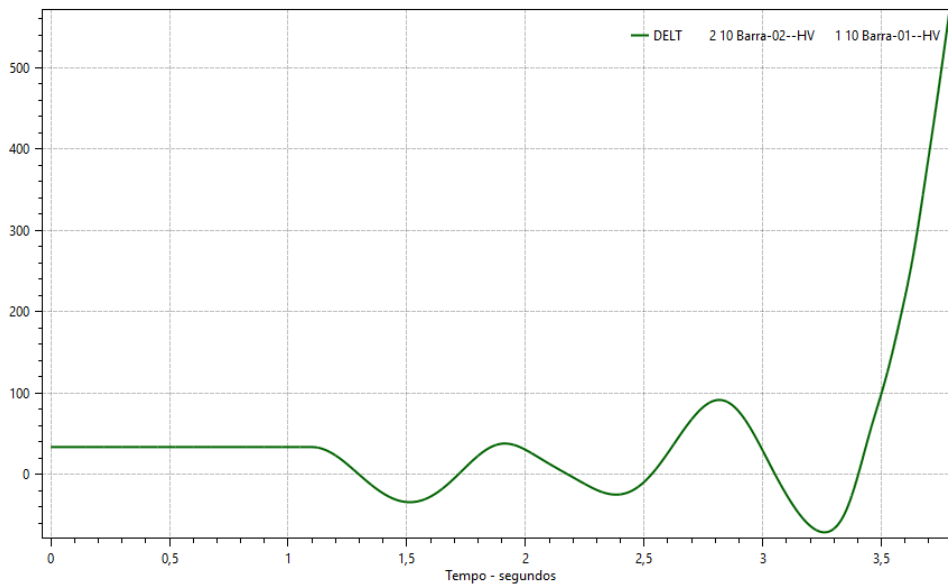
O tempo crítico de abertura para evitar a perda de sincronismo foi de 1,27 segundos, ou seja, o relé da LT deve agir em até 0,27 s após a ocorrência do distúrbio.

5.1.2.3 Caso C

- Caso C-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 54, 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 55, apresenta o relatório de simulação informando o ocorrido.

Figura 54: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso C-1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 55: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso C-1.

```

BCEPEL - 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

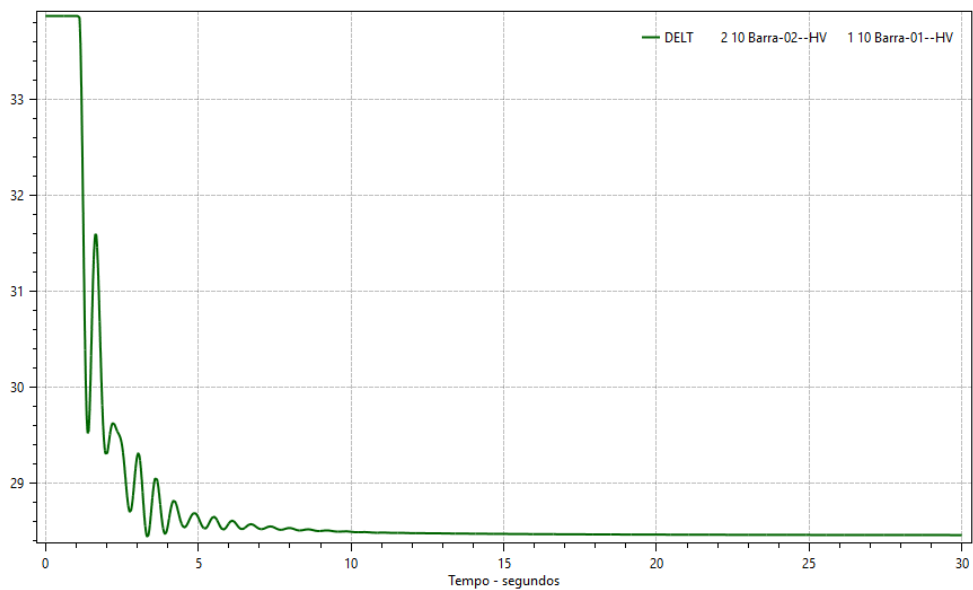
```

Fonte: Relatório da Simulação.

- Caso C-2 (60% de sobrecarga e perda da linha 1-5)

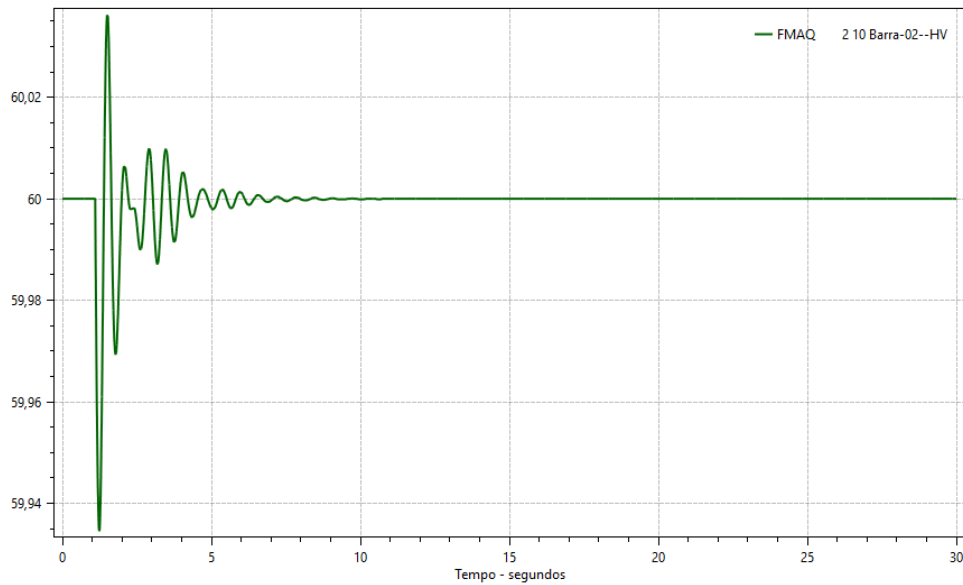
O caso C-2 não apresentou ocorrência de perda de sincronismo ou instabilidade, como pode ser visto pelas figuras 56 e 57, que mostram o ângulo e frequência da máquina 10, respectivamente.

Figura 56: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso C-2.



Fonte: Autoria própria.

Figura 57: Resposta da frequência do gerador da barra 02 para o caso C-2.



Fonte: Autoria própria.

- Caso C-3 (60% de sobrecarga e perda da linha 2-3)

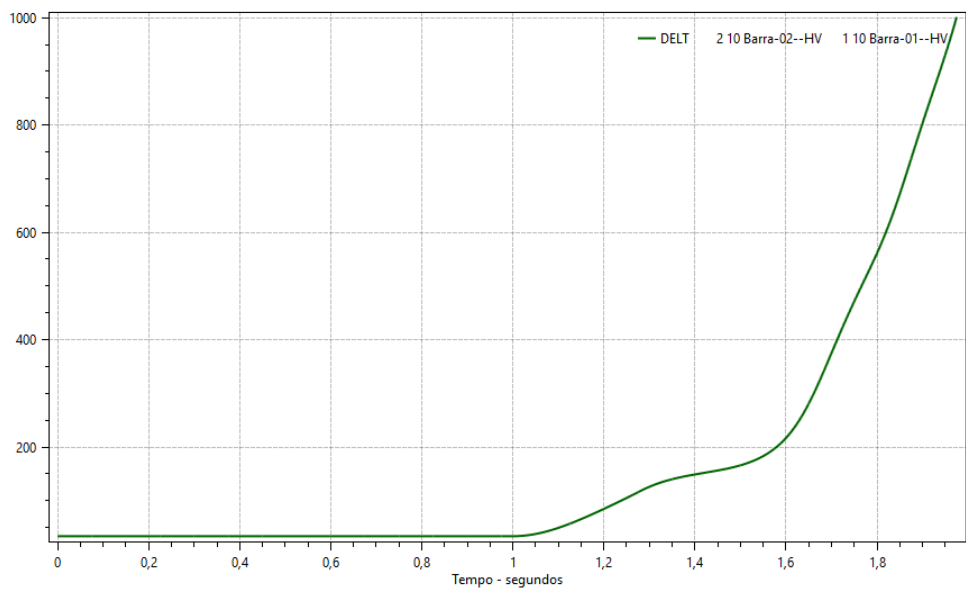
Para a situação 3 do caso C, é aplicado um curto-circuito na LT 2-3 a 20% de distância da barra 2, no tempo $t = 1\text{ s}$, em seguida no tempo $t = 1,28\text{ s}$ é removido o curto com acionamento do relé, e no mesmo instante retira-se a LT de operação, figura 58. O comportamento para tal distúrbio para o caso de 60% de sobrecarga é apresentado na figura 59.

Figura 58: Aplicação e remoção de curto-circuito seguido de remoção da LT, caso C-3.

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

Fonte: Autoria própria.

Figura 59: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso C-3.



Fonte: Autoria própria.

A figura 60 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 60: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso C-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

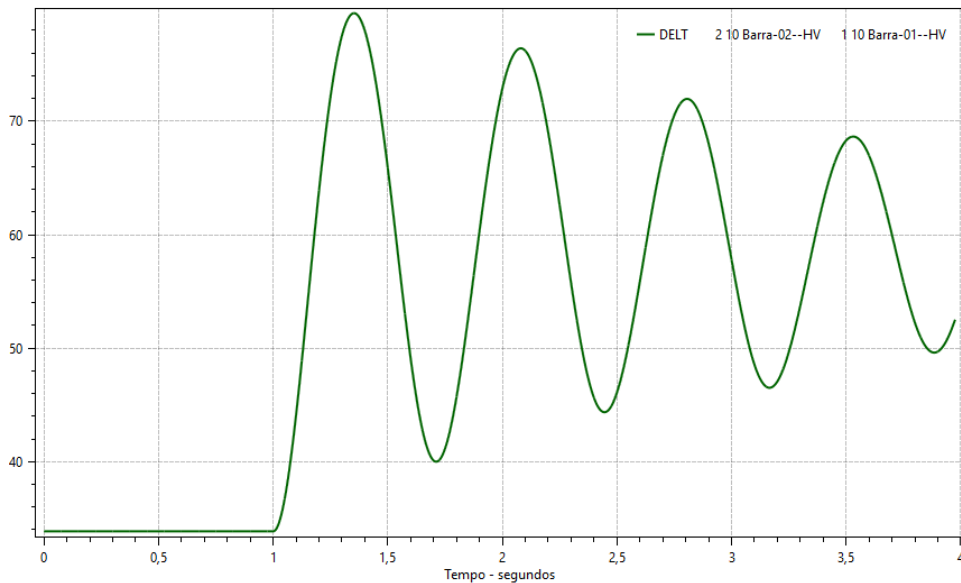
T= 1.9750s - Ângulo da máquina 10 da barra 2 Barra-02--HV ultrapassou o
limite de 1000.0 graus. O caso será encerrado.
Ângulo em relação ao centro de massa : 1001.2 graus

Fonte: Relatório da Simulação.

- Caso C-4 (60% de sobrecarga e perda da barra 5)

Ao aplicar o curto-circuito na barra 5 o ângulo de tensão da máquina 10 apresentou o comportamento ilustrado na figura 61. Novamente, ocorre instabilidade angular diante da perturbação.

Figura 61: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso C-4.



Fonte: Autoria própria.

A figura 62 apresenta o relatório do ANATEM para a simulação, infirmando a perda de sincronismo.

Figura 62: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso C-4.

```

ECEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - ANATEM - V11.03.00
60.0000
* Sistema teste 14 barras - caso com modelos "built-in" *
T= 1.0000s APCB - Aplicou curto-circuito na barra 5 Barra-05--HV
T= 3.2000s - 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 : -362.1 graus
T= 3.9750s - Ângulo da máquina 10 da barra 6 Barra-06--LV ultrapassou o
limite de 1000.0 graus. O caso será encerrado.
Ângulo em relação ao centro de massa : -1000. graus

```

Fonte: Relatório da Simulação.

Com auxílio das figuras 61 e 62 nota-se que o tempo crítico de acionamento do relé para eliminação do curto-circuito, de forma a evitar a perda de sincronismo, é próximo de $t =$

3,97 s, por tentativa e erro conclui-se que o relé deve operar no máximo 2,8 segundos após a ocorrência do distúrbio para evitar a instabilidade do sistema.

- Caso C-5 (60% de sobrecarga e perda da linha 2-5)

Para o caso C-5, utilizando o código indicado da figura 63, temos ocorrência de instabilidade e perda de sincronismo segundo o relatório de simulação, figura 64.

Figura 63: Aplicação e remoção de curto-circuito seguido de remoção da LT, caso C-5.

```

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  3.8  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 64: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso C-5.

```

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      5 Barra-05--HV  1
a 20.0% a partir da barra      2 Barra-02--HV
T= 1.2800s RMCL - Removeu curto de      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1
T= 1.2800s ABCI - Abrir circuito      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1
T= 1.2800s Abriu circuito      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1
T= 1.5400s - 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 : 365.5 graus
T= 1.8200s - 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 : 1011.1 graus

```

Fonte: Relatório da Simulação.

O tempo crítico de abertura do relé é de 0,25 segundos após a ocorrência do curto-circuito.

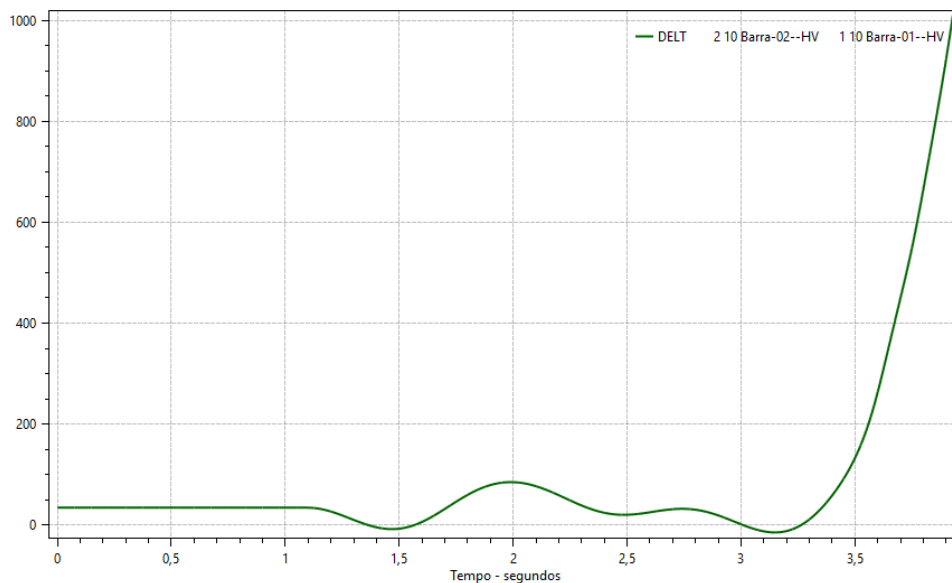
5.1.2.4 Caso D

Ao simular o caso D, com 95% de sobrecarga no ANATEM, verifica-se que a tensão na barra 02, com unidade geradora, é de 0,93 pu, ou seja, abaixo do limite mínimo estabelecidos pela ANEEL de 0.95 pu. Já as tensões nas outras barras, exceto a de referência são de 0,82 pu., aproximadamente, também, abaixo do limite mínimo. Contudo, a frequência das máquinas síncronas permanece em 60 Hz, apresentando sincronismo.

- Caso D-1 (95% de sobrecarga e perda da linha 1-2)

Ao desligar a LT 1-2 com o comando ABCI, ocorre instabilidade angular rotórica e por consequência perda de sincronismo na unidade geradora 02, máquina 10, figura 65, o sistema é instável para tal evento. A figura 66 apresenta o relatório de simulação para o caso D-1.

Figura 65: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso D-1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 66: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso D-1.

```

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

95.0000
* 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= 3.6550s - 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 : 365.9 graus

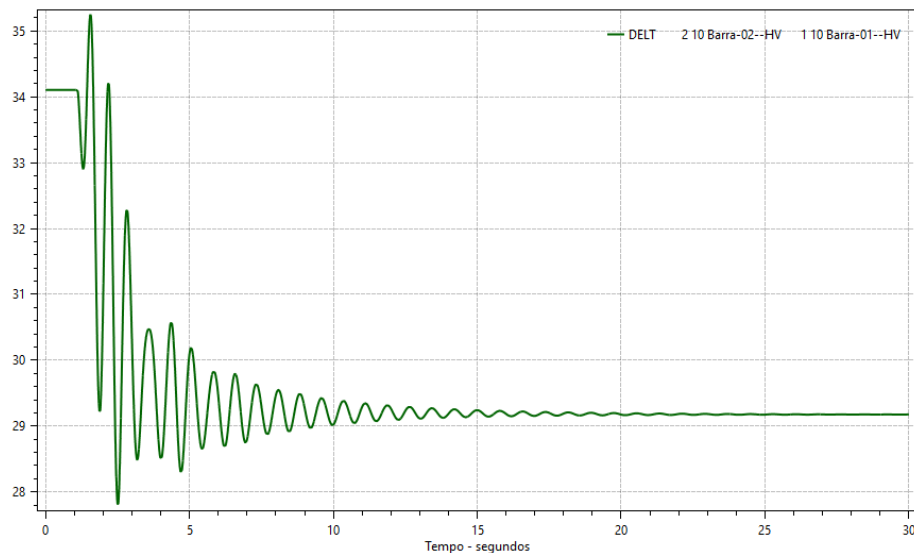
T= 3.9300s - Ângulo da máquina 10 da barra      2 Barra-02--HV ultrapassou o
               limite de 1000.0 graus. O caso será encerrado.
               Ângulo em relação ao centro de massa : 1010.4 graus
  
```

Fonte: Relatório da Simulação.

- Caso D-2 (95% de sobrecarga e perda da linha 1-5)

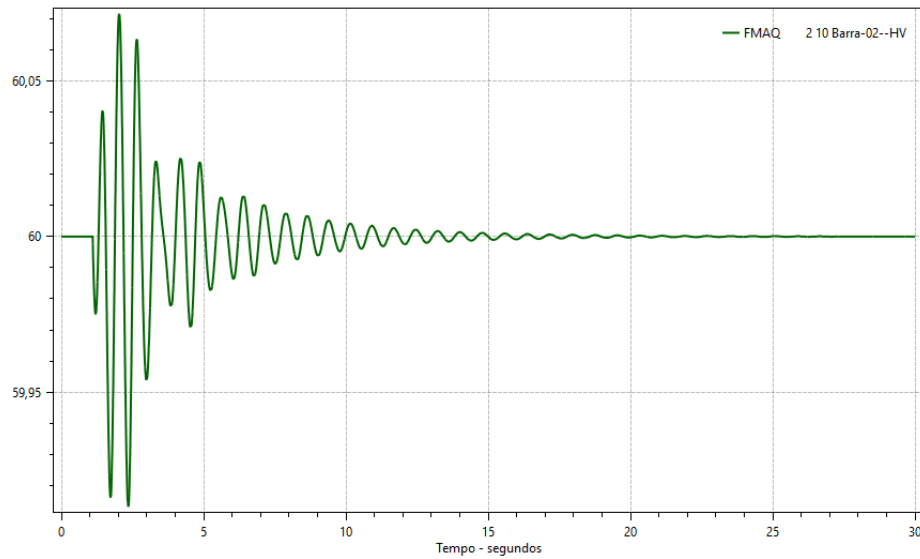
O caso D-2 não apresentou instabilidade, o ângulo decresce e ocorre oscilação, que é amortecida até que a máquina síncrona retorna novamente à estabilidade. A figura 67 ilustra o decréscimo do ângulo da tensão da máquina 10 e a figura 68 apresenta a resposta da frequência.

Figura 67: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso D-2.



Fonte: Autoria própria.

Figura 68: Resposta da frequência do gerador da barra 02 do caso D-2.



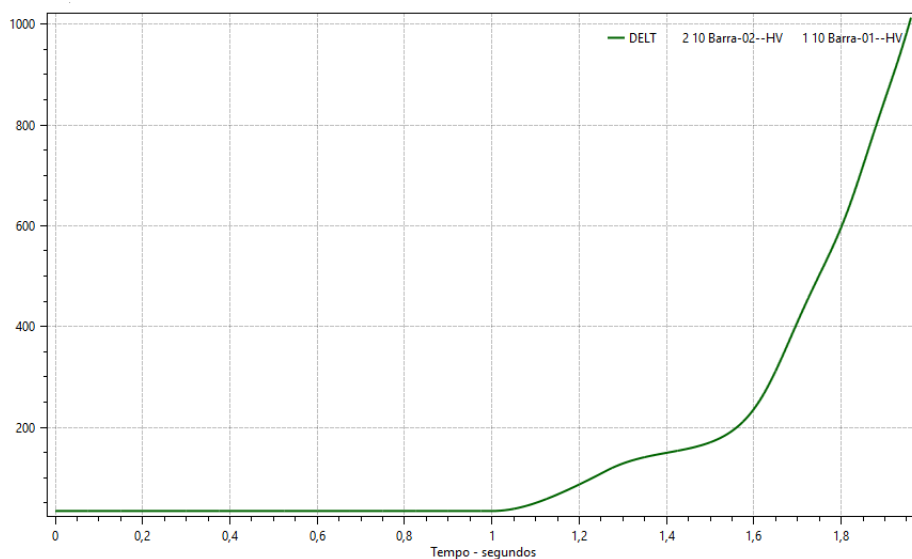
Fonte: Autoria própria.

- Caso D-3 (95% de sobrecarga e perda da linha 2-3)

Aplicando o curto-circuito na LT 2-3 em $t = 1 \text{ s}$ e removendo-o em $t = 1,26 \text{ s}$, o sistema entra em colapso devido da perda de sincronismo da máquina 10, figura 69. O relatório de simulação infirmo o ocorrido é apresentado na figura 70.

O tempo crítico de acionamento do relé e abertura da linha é de $0,25 \text{ s}$ após a ocorrência da falta, de modo a evitar a instabilidade transitória.

Figura 69: Resposta do comportamento angular do gerador da barra 02 do caso D-3.



Fonte: Autoria própria.

Figura 70: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso D-3.

```

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

95.0000
* 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= 1.2600s RMCL - Removeu curto de      2 Barra-02--HV      3 Barra-03--HV 1

T= 1.2600s ABCI - Abrir circuito      2 Barra-02--HV      3 Barra-03--HV 1

T= 1.2600s Abriu circuito      2 Barra-02--HV      3 Barra-03--HV 1

T= 1.6800s - 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 : 369.8 graus

T= 1.9600s - 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 : 1012.8 graus

```

Fonte: Relatório da Simulação.

- Caso D-4 (95% sobrecarga e perda da barra 5)

Neste caso é aplicado um curto-circuito na barra 05 em $t = 1.0$ s, removendo o mesmo e retirando a barra de operação em $t = 1,79$ s, que seria o tempo máximo para remover o curto sem que ocorra instabilidade, figura 71. Pela figura 72 podemos verificar a perda de sincronismo para a retirada da barra 05.

Figura 71: Aplicação e remoção de curto-circuito seguido de remoção de Barra, caso D-4.

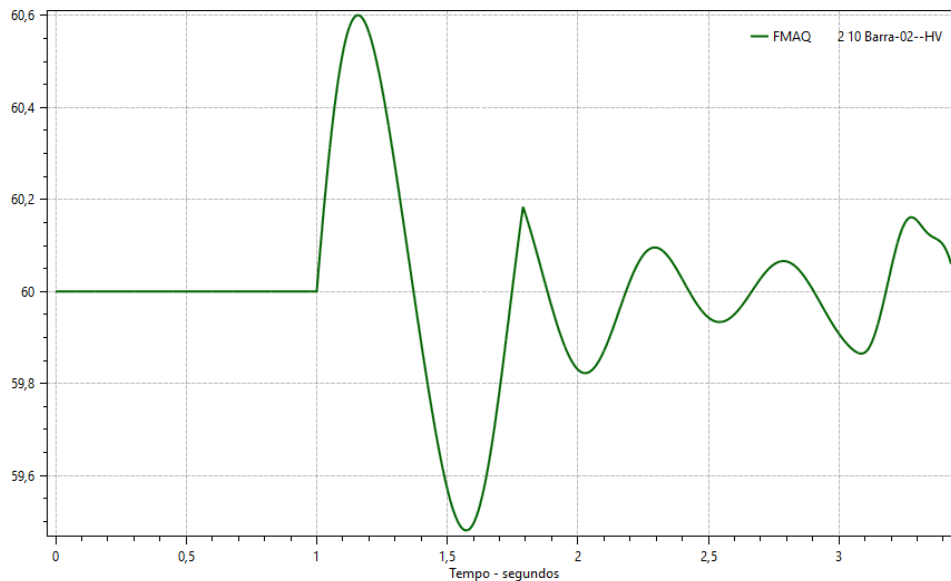
```

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      02 05      02      20
188 (rmcl      1.25     02 05
189 (abci      1.25     02 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      1.25     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 72: Resposta da frequência do gerador da barra 02 para o caso D-4.



Fonte: Autoria própria.

O relatório de simulação para o caso informa a perda de sincronismo com o sistema da máquina 10. Figura 73.

Figura 73: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso D-4.

```

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

95.0000
* Sistema teste 14 barras - caso com modelos "built-in" *

T= 1.0000s APCB - Aplicou curto-circuito na barra      5 Barra-05--HV
T= 1.7900s RMCB - Removeu curto-circuito da barra    5 Barra-05--HV
T= 1.7900s DBCA - Desligou a barra                   5 Barra-05--HV

T= 3.0800s - 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 : -364.6 graus

T= 3.4300s - Ângulo da máquina 10 da barra      6 Barra-06--LV ultrapassou o
             limite de 1000.0 graus. O caso será encerrado.
             Ângulo em relação ao centro de massa : -1007. graus
  
```

Fonte: Relatório da Simulação.

- Caso D-5 (95% de sobrecarga e perda da linha 2-5)

Por fim, no caso D-5 é aplicado um curto-circuito na LT 2-5. O código com os tempos de aplicação e remoção do curto e de desligamento da LT é apresentado na figura 74, indicado no retângulo. O comportamento da frequência da máquina é ilustrado no gráfico da figura 75 e o relatório de simulação é apresentado na figura 76.

Figura 74: Aplicação e remoção de curto-circuito seguido de remoção de LT, caso D-5.

```

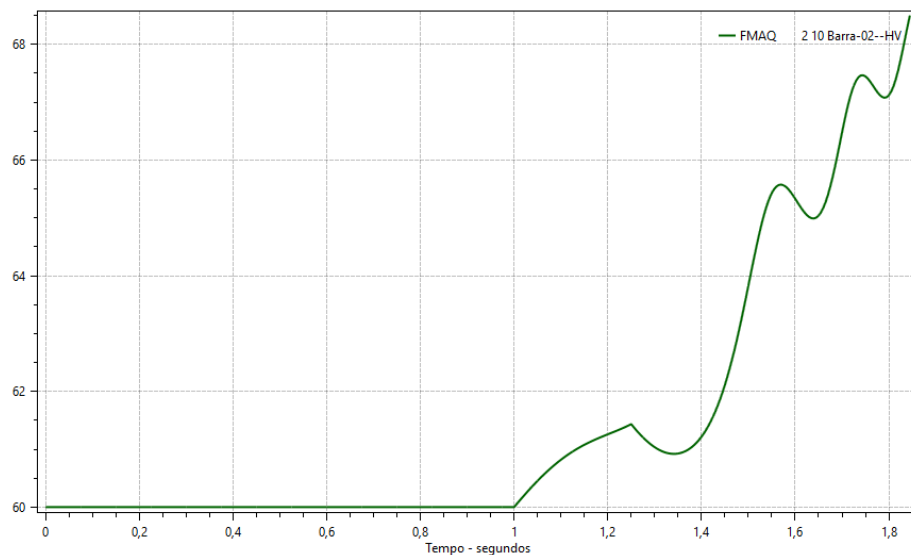
182  DEVT
183  (Tp) ( Tempo)( El )( Pa)Nc( Ex) ( % ) (ABS ) Gr Und      (Bl)P ( Rc ) ( Xc ) ( Bc ) (Defas)
184  (apcb  1.0  05
185  (rmcb  1.79 05
186  (dbca  1.79 05
187  apcl  1.0  02 05  02  20
188  rmcl  1.25 02 05
189  abci  1.25 02 05
190  (dbca  1.0  06
191  (dbca  1.0  05
192  (dbca  1.5  11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

Pelo comportamento da frequência no gráfico da figura 75, abaixo, verifica-se que a máquina 10 perdeu o sincronismo e o sistema se torna instável, como informado no relatório da figura 76. Por tentativa e erro foi encontrado o tempo crítico de abertura para o relé em $t = 1,23 \text{ s}$. A figura 77, apresenta a frequência da máquina 10 para abertura da linha 0,23 segundos após ocorrido o curto-circuito.

Figura 75: Resposta da frequência do gerador da barra 02 para o caso D-5.



Fonte: Autoria própria.

Figura 76: Relatório informando a perda de sincronismo para o caso D-5.

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

```

95.0000
* Sistema teste 14 barras - caso com modelos "built-in" *

T= 1.0000s APCL - Aplicou curto em      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1
a 20.0% a partir da barra      2 Barra-02--HV

T= 1.2500s RMCL - Removeu curto de      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1

T= 1.2500s ABCI - Abrir circuito      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1

T= 1.2500s Abriu circuito      2 Barra-02--HV      5 Barra-05--HV  1

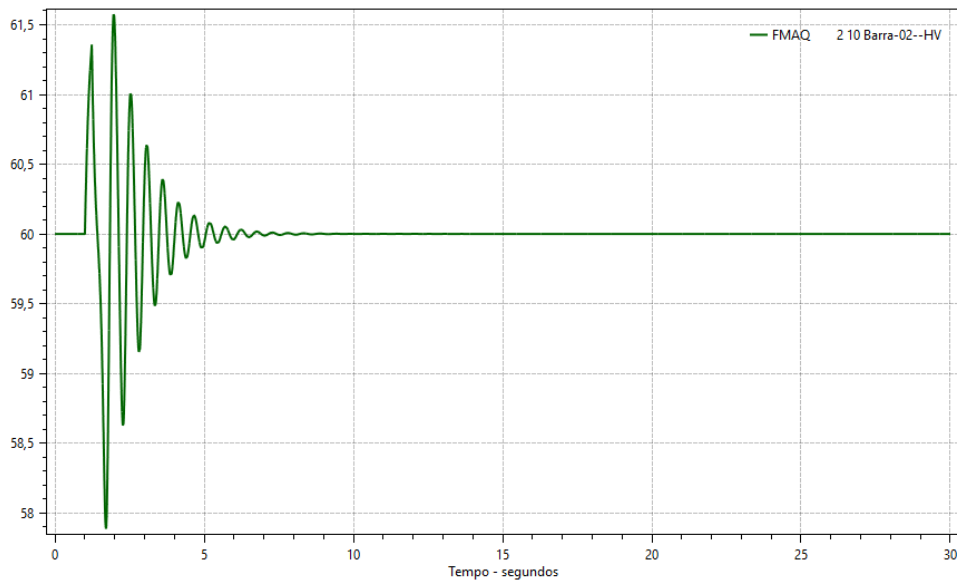
T= 1.5650s - Ângulo da máquina 10 da barra      2 Barra-02--HV ultrapassou o
limite de 360.0 graus. Possível perda de sincronismo.
Ângulo em relação ao centro de massa : 365.9 graus

T= 1.8450s - 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 : 1011.5 graus

```

Fonte: Autoria própria.

Figura 77: Resposta da frequência do gerador da barra 02 para o caso D-5, com tempo de abertura $t=0,23$ s.



Fonte: Autoria própria.

5.2 Apresentação dos Resultados

A tabela 5, abaixo, apresenta os tempos críticos de abertura para evitar a perda de sincronismo para o sistema simulados nos respectivos casos e situações.

Tabela 5: Tempos Críticos de Abertura

Situação	Caso A		Caso B		Caso C		Caso D	
	t_{apli}	t_{ca}	t_{apli}	t_{ca}	t_{apli}	t_{ca}	t_{apli}	t_{ca}
1	1	1,1	1	1,1	1	instável	1	instável
2	1	não se aplica	1	não se aplica	1	não se aplica	1	não se aplica
3	1	1,28	1	1,3	1	1,27	1	1,25
4	1	1,1	1	1,1	1	3,97	1	1,79
5	1	1,26	1	1,27	1	1,25	1	1,23

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que para as os Casos C-4 (60% de sobrecarga e perda da barra 5) e D-5 (95% de sobrecarga e perda da linha 2-5), os tempos foram maiores, e para os casos A-1 (valores nominais e perda da linha 1-2), A-4 (valores nominais e perda da barra 5), B-1 (20% de sobrecarga e perda da linha 1-2), B-4 (20% de sobrecarga e perda da barra 5), os tempos foram os mais rápidos, enquanto que para qualquer caso envolvendo a situação 2, não ocorreu perda de sincronismo. Já para os casos C-3 e D-3 (60% e 95% de sobrecarga, respectivamente, e perda da linha 2-3), ocorre instabilidade independentemente dos tempos aplicados.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho 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. Como consequência do estudo da estabilidade angular é também analisado a estabilidade de frequência dos casos simulados.

Primeiramente, realizou-se o estudo teórico acerca do problema de estabilidade em sistemas elétricos, para melhor familiarização com o assunto e embasamento teórico de modo, a melhor analisar os resultados obtidos. Tal estudo, apresentou as principais divisões, tipos e causas de perda de sincronismo de geradores síncronos.

Apresentou-se, também, os softwares utilizados para as simulações dos estudos de casos, comentando as funcionalidades que foram essenciais para a realização deste trabalho. Com objetivo, apenas, de familiarização com os ambientes computacionais e possibilitar o entendimento de como são adquiridas as respostas das simulações.

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 do capítulo 5, 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.

Com ajuda gráfica e do relatório de simulação fornecidos pelo ANATEM, foram encontrados os tempos críticos de abertura por tentativa e erro. Na análise de estabilidade rotórica, o critério para definição de perda de sincronismo é a ocorrência de uma diferença angular de 360 graus entre o ângulo da tensão interna de qualquer máquina e a média de todos

os ângulos, ponderados pelas respectivas constantes de inércia, pelo informativo de perda de sincronismo gerado pelo programa, percebe-se que o ANATEM permite a diferença angular mínima de 360 graus.

Verifica-se também, com auxílio da tabela 5 que os maiores tempos críticos estão associados aos casos de perturbação em barra de carga ou com o compensador síncrono conectado, ou seja, barras onde não se tem geração de potência ativa.

Ressalta-se que para as simulações com curto-circuito em LT com uma das extremidades sendo a barra 2, quanto menor a impedância de aplicação entre a máquina geradora da barra 2 e o ponto de ocorrência do curto, sendo dado pelo percentual de distância do curto em relação à uma das extremidades, na situação foi utilizado 20%, maior a aceleração recebida, portanto o tempo crítico de abertura é menor.

Desse modo, conclui-se, também, que o *software* ANATEM, apresenta ampla possibilidade de estudos de sistemas elétricos de potência quanto ao seu comportamento dinâmico eletromecânico, sendo de rápida familiarização com os comandos básicos, sendo dependente do correto modelamento dos sistemas e a correta definição das variáveis do circuito no ANAREDE.

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.

ANEXO A

Código do arquivo de execução do ANATEM.

TITU

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

(ASSOCIACAO DE ARQUIVO PARA SAIDA DE RELATORIOS (opcao FILE)

ULOG

4

sis14b_1.out

(ASSOCIACAO DE ARQUIVO COM FLUXO DE POTENCIA (ANAREDE)

ULOG

2

CONT_01.sav

(ASSOCIACAO DE ARQUIVO COM DADOS PARA PLOTAGEM

ULOG

8

sis14b_1.plt

(ASSOCIACAO DE ARQUIVO DE SAIDA DE MENSAGENS DE EVENTOS

ULOG

9

sis14b_1.log

(DADOS DE OPCOES DEFAULT DE EXECUCAO

DOPC IMPR CONT

(Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E

IMPR L FILE L CONT L 80CO L

999999

(TOLERANCIA DE CONVERGENCIA DESEJADA PARA O FLUXO DE POTENCIA

DCTE

(Ct) (Val)

TEPQ .1

999999

(RESTABELECIMENTO DO CASO DE FLUXO DE POTENCIA

ARQV REST

1

(RESTABELECIMENTO DOS MODELOS DOS REGULADORES

ULOG

3

sis14b.blk

ARQM

(DADOS DE MAQUINAS E ASSOCIACAO DAS MAQUINAS AOS CONTROLES

DMAQ

(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)

01	10		101		
02	10	1	202	102	
03	10	1	201	102	
06	10	1	201	102	
08	10	1	201	102	

999999

(DADOS DE CARGAS FUNCIONAIS

DCAR IMPR

(tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) (A) (B) (C) (D) (Vmn)

BARR	1	A	BARR	9998	0	40	0	100	70
(BARR	1	A	BARR	9998	100	0	100	0	70
(BARR	1	A	BARR	9998	0	0	0	0	70

999999

(DADOS DAS VARIAVEIS DE SAIDA

DPLT

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

(angulos

DELT	2	10	1	10
DELT	1	10	1	10
DELT	3	10	1	10
DELT	6	10	1	10
DELT	8	10	1	10

(frequencias

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

FMAQ 2 10

FMAQ	1	10
FMAQ	3	10
FMAQ	6	10
FMAQ	8	10

(potencias ativas

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

PELE	1	10
PELE	2	10
PELE	3	10
PELE	6	10
PELE	8	10
PMEC	1	10
PMEC	2	10
PMEC	3	10
PMEC	6	10
PMEC	8	10

(potencias reativas

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

QELE	1	10
QELE	2	10
QELE	3	10
QELE	6	10
QELE	8	10

(tensoes de barras

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

VOLT	1
VOLT	2
VOLT	3
VOLT	4
VOLT	5
VOLT	6
VOLT	7
VOLT	8
VOLT	9

VOLT 10

VOLT 11

VOLT 12

VOLT 13

VOLT 14

999999

(DADOS DE EVENTOS

DEVT

(Tp) (Tempo)(El)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (Bl)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)

(apcb 1.0 05

(rmcb 15.0 05

(dbca 15.0 05

(dbca 1.79 05

(apcl 1.0 01 02 02 20

(rmcl 1.1 01 02

(abci 1.1 01 02

(dbca 1.0 05

(dbca 1.5 11

apcl 1.0 01 05 05 20

(rmcl 1.15 01 05

(abci 1.15 01 05

(lbca 1.5 02

(apcl 1.0 02 03 02 20

(rmcl 1.28 02 03

(abci 1.28 02 03

999999

(DADOS DE SIMULACAO

DSIM

(Tmax) (Stp) (P) (I)

30.0 .005 1

(EXECUCAO DO CASO

EXSI

(

FIM

ANEXO B

Códigos dos modelos pré-definidos dos modelos dos reguladores e geradores.

(MODELOS DE GERADORES TIPO CLASSICO

DMDG MD01

(No) (L'd)(Ra)(H)(D)(MVA)Fr C

0101 (barra infinita)

(

999999

(

(MODELOS DE GERADORES COM POLOS SALIENTES

DMDG MD02

(..... Modelo 201

(No) (CS) (Ld)(Lq)(L'd) (L''d)(Ll)(T'd) (T''d)(T''q)

0201 1 100.3 59.9 35.7 28.3 19.8 7.28 .050 .100

(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C

0201 2.474 50.

(..... Modelo 202

(No) (CS) (Ld)(Lq)(L'd) (L''d)(Ll)(T'd) (T''d)(T''q)

0202 2 94.6 62.1 31.0 27.4 20.2 8.13 .048 .140

(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C

0202 3.588 72.

(

999999

(

(MODELOS DE REGULADORES DE TENSAO (Pré'-definidos)

DRGT MD01

(..... Modelo 101

(No) (CS) (Ka)(Ke)(Kf)(Tm)(Ta)(Te)(Tf)(Lmn)(Lmx)LS

0101 31 300. 3.00 0.30 0.0 0.0 6.00 3.00 -1.1 8.05ED

(..... Modelo 102

(No) (CS) (Ka)(Ke)(Kf)(Tm)(Ta)(Te)(Tf)(Lmn)(Lmx)LS
 0102 32 408. 1.00.1046 0.0 0.0 1.00 3.17 -1.1 8.05EI

(
 999999

(
 DRGT MD12

(..... Modelo 1201

(No) (CS) (Ka)(Ke)(Kf)(Kp)(Ki)(Kg)(Tq)(Ta)(Te)(Tf1)(Tf2)
 1201 33 25.0 -.05 .080 .0 1.0 1.0 .0 .20 .50 1.0 .0

(No) (Ln1)(Lx1)(Ln2)(Lx2)(Ln3)(Lx3)L
 1201 -1.0 1.0 -4.6 4.6 .0 .0D

(
 999999

(
 (CURVAS DE SATURACAO
 DCST

(..... Curvas de Saturacao de Geradores

(Nc) T (P1) (P2) (P3)

(..... Curva 1

0001 2 0.016 8.198 0.8

(..... Curva 2

0002 2 0.013 7.92 0.8

(..... Curvas de Saturacao das Excitatrizes

((para modelos pre'-definidos)

(Nc) T (P1) (P2) (P3)

(..... Curva 31

0031 2 0.0147 1.206

(..... Curva 32

0032 2 0.024 1.36

(..... Curva 33

0033 2 0.016 1.54

(
 999999

(

(MODELOS DE REGULADORES DE VELOCIDADE (Pre'-definidos)

DRGV MD01

(..... Modelo 0101

(No) (R)(Rp)(At)(Qnl)(Tw)(Tr)(Tf)(Tg)(Lmn)(Lmx)(Dtb)(D)(Pbg)(Pbt)

0101 0.05 0.381.200 0.15 1.5 7.0 0.05 0.5 0.0 .984 0.5 1.0 1.0 1.0

(

999999

(

FIM