

Análise da Estabilidade Transitória utilizando o software PS-Lab.

Janaína Lima e Silva

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.
(Orientador)

Prof. Antonio Carlos S. de Lima, D.Sc.

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2010

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, por tudo que fez e permanece fazendo em minha vida, sem o qual eu jamais terminaria esta importante etapa.

Agradeço especialmente a Minha Querida Mãe, Glória, por todo seu esforço concedido até aqui. Pelos momentos em que fui fortalecida com suas palavras cheias de carinho, amor e afeição, e as minhas irmãs Aline, Carolina e Natália que sempre me ajudaram. E ainda a minha avó, Enedina, que sempre me motivou a perdurar no meu objetivo.

Agradeço ao Bruno, companheiro de todos os momentos, pessoa a qual escolhi para dividir a vida e momentos, como este de grande felicidade.

Agradeço a Camila, a futura farmacêutica e querida amiga, pelas muitas horas de estudo. E a todos os amigos que de alguma forma torceram por mim.

Ao Professor Manzoni por, inicialmente, ter me orientado e ao Professor Glauco por aceitar concluir a orientação deste projeto de graduação. Ao Eng. Sergio de Sousa Silva pelo exemplo de profissional que és.

A todos os professores do departamento de engenharia elétrica da UFRJ, que contribuíram para a minha formação como engenheira.

*In Memoriam, dedico ao Mestre Alessandro
Manzoni por todo aprendizado, a dedicação e a
orientação por ele concedida.*

Resumo

Este trabalho tem por objetivo estudar e analisar o comportamento dinâmico do sistema elétrico, ou seja, possibilitar um maior entendimento no que tange a estabilidade transitória de um sistema.

Para tal análise, buscou-se a utilização do programa PSLab - PowerSysLab. Este software tem como função visualizar, analisar e simular sistemas elétricos de potência, tornando possível uma maior interação com as particularidades dos sistemas elétricos brasileiros. O Programa, atualmente, implementa as seguintes funções: Módulo de Visualização Gráfica da Rede Elétrica; Módulos para Análise Estática da Rede Elétrica; Módulos para Análise Dinâmica da Rede Elétrica; Módulos Adicionais para Aplicações Especiais; Módulo de Integração.

A metodologia aplicada na execução do programa permeia o estudo de seleção e classificação de contingências, com base no método SLEP (Superfície Limite de Energia Potencial) Iterativo e o modelo matemático aplicado baseia-se no segundo método de Liapunov.

Assim, estudou-se a estabilidade transitória a partir de simulações de eventos para diversos casos, sendo estes: nove (9) barras, quarenta e cinco (45) barras. Por fim, conhecidos os comportamentos da estabilidade transitória para os casos mencionados acima, realizou-se uma análise mais refinada correlacionando a análise gráfica do ângulo e da derivada direcional à resposta direta de saída do programa, ou seja, se o programa detecta a instabilidade ou não para cada caso. Podendo, por fim, detectar casos onde será necessária uma observação mais significativa para realmente detectar a instabilidade ou estabilidade de um sistema.

Sumário

<u>Agradecimentos</u>	ii
<u>Resumo</u>	iv
<u>Índice de Tabelas</u>	ix
<u>1. Introdução</u>	1
<u>1.1. Motivação</u>	1
<u>1.2. Objetivo</u>	2
<u>1.3. Estrutura</u>	3
<u>2. Estabilidade</u>	4
<u>2.1. Introdução</u>	4
<u>2.2. Sistemas Elétricos de Potência</u>	6
<u>2.3. Critérios das Áreas Iguais</u>	7
<u>2.3.1. Cálculo do ângulo crítico de extinção de faltas através do critério das áreas</u>	12
<u>2.3.2. Cálculo do tempo crítico de extinção de faltas através do Critério das Áreas</u>	15
<u>2.3.3. Cálculo do tempo crítico quando o curto-circuito é através de uma reatância</u>	16
<u>3. Função Energia e Método de Liapunov</u>	19
<u>3.1. Introdução</u>	19
<u>3.2. Método de Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP) Iterativo</u>	20
<u>3.2.1. Modelo Matemático</u>	21
<u>3.2.2. O Segundo Método de Liapunov</u>	24
<u>3.2.3. Função Energia</u>	28
<u>3.2.4. Superfície Limite de Energia Potencial – SLEP</u>	28
<u>3.2.5. Processo Iterativo de Cálculo da Energia Crítica e Tempo Crítico</u>	31
<u>3.2.6. Seleção de Contingências</u>	32
<u>4. Sistema Integrado para Simulação e Análise de Redes Elétricas - PS-Lab SEM</u>	35
<u>4.1. Descrição do programa</u>	35
<u>4.2. Visualização dos Dados em Formato Tabular</u>	36

4.3. Visualização dos Dados em Formato Gráfico	37
4.4. Visualização das Ilhas Elétricas Conexas	38
4.5. Estimação de Estados	38
4.5.1. Fluxo de Potências	38
4.6. Tipos de Simulação	40
4.6.1. Simulação Rápida (FastSim)	40
4.6.2. Simulação Completa (Métodos Simultâneo e Alternado)	41
4.7. Configuração da Rede	42
4.8. Registro de Eventos	42
4.9. Registradores Gráficos	43
5. Análise das Simulações da Rede Elétrica utilizando o PS-Lab	44
5.1. Estudo de Casos: 9 Barras	45
5.2. Estudo de Casos: 45 Barras	50
6. Conclusão	59
7. Referências Bibliográficas	60

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Potência Elétrica traçada como uma função de δ com $P_e > P_m$ em δ_{max}, sistema estável.	11
Figura 2.2 – Potência Elétrica traçada como uma função de δ, com $P_e < P_m$ em δ_{max}, sistema instável.	12
Figura 2.3 – Curva $P_e \times \delta$ (ângulo crítico para extinção de um defeito).	13
Figura 2.4 – Curva $P_e \times \delta$ (ângulo crítico para extinção de um defeito).	14
Figura 2.5 – Curva $P \times \delta$ para um caso genérico (a) e fazendo a equivalência de áreas durante o curto-circuito.	17
Figura 3.6 – Modelo de representação da barra.	21
Figura 3.7 - Trajetórias de um sistema hipotético para vários tempos de eliminação do defeito	27
Figura 3.8 - Ilustração do cálculo da energia crítica e do tempo crítico no método SLEP iterativo.	32
Figura 3.9 - Ilustração do processo de seleção de contingências críticas.	34
Figura 4.10 – Visualização dos dados em Formato Tabular	37
Figura 4.11 – Visualização dos dados em Formato Gráfico.	37
Figura 4.12 – Visualização das Ilhas Elétricas Conexas.	38
Figura 4.13– Visualização da Tela do Fluxo de Potência.	39
Figura 4.14 – Visualização das Ilhas Elétricas Conexas.	40
Figura 4.15 – Visualização das Ilhas Elétricas Conexas.	41
Figura 4.16 – Visualização das Ilhas Elétricas Conexas.	42
Figura 4.18 – Visualização das Ilhas Elétricas Conexas.	43
Figura 5.19 – Diagrama Gráfico utilizado no caso 9 barras.	45
Figura 5.20 – Visualização do gerenciamento de eventos para UG 1.	46
Figura 5.21 – Quadro com a simulação Dinâmica – Barra 1 da UG 1.	47

Figura 5.22 – Quadro com a simulação Dinâmica.	47
Figura 5.23 – Simulação Dinâmica Completa no tempo.	48
Figura 5.24 – Quadro com a simulação Dinâmica.	48
Figura 5. 25 – Quadro com o ângulo demonstrando a estabilidade	49
Figura 5.26 – Simulação Dinâmica Completa no tempo.	50
Figura 5.27 – Quadro com a simulação Dinâmica.	50
Figura 5.28 - Gráfico da Derivada direcional.	52
Figura 5.29 – Quadro com a simulação Dinâmica – no momento exato da detecção da instabilidade.	53
Figura 5.30 – Quadro com mensagem da detecção de instabilidade	53
Figura 5.31 - Gráfico da Derivada direcional.	54
Figura 5.32 - Gráfico da Derivada direcional.	55
Figura 5.33 - Gráfico da Derivada direcional.	56
Figura 5.34- Gráfico da Derivada direcional.	57
Figura 5.35 - Gráfico da Derivada direcional.	58

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Principais dados por empreendimentos em operação.	4
Tabela 2.2 - Principais dados por empreendimentos em construção.	5
Tabela 2.3 - Contingências a serem analisadas para o caso de 9 barras..	67
Tabela 2.4 - Contingências a serem analisadas para o caso de 45 barras	73

1. Introdução

1.1. Motivação

Atualmente e nos últimos anos, foi e ainda é perceptível a grande demanda de energia elétrica consumida no Brasil e no mundo. Com isso, o grande paradigma que permeia o assunto é o aumento crescente da complexidade dos Sistemas de Energia Elétrica (SEE). Assim, advindo de faltas ocorridas no sistema se deseja obter uma avaliação qualitativa para a estabilidade do SEE.

O aumento da complexidade do SEE muito está relacionado com o aumento contínuo da carga. Este fator acaba sendo primordial para uma análise coesa do SEE, estes aumentos contínuos favorecem para que a carga, eventualmente, possa levar o sistema a um estado instável, o que possui uma característica de diminuição rápida dos valores da tensão nos barramentos, ocasionando danos ao sistema e reduzindo a confiabilidade deste. Nos anos mais recentes, a instabilidade de tensão foi responsável por vários colapsos de redes.

Entre as principais preocupações das concessionárias de energia elétrica estão a necessidade operar de forma econômica e com elevados níveis de segurança. Assim, os problemas direcionados ao controle e estabilidade de tensão têm suscitado um grande interesse e uma crescente atenção pelos agentes da área, fomentando grande preocupação nas empresas de energia elétrica do mundo inteiro.

1.2. Objetivo

O presente trabalho aborda o assunto de estabilidade transitória do SEE, utilizando como ferramenta o programa PS-Lab. Este software foi desenvolvido pelo D.Sc Alessandro Manzoni, que foi docente da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Esta análise é baseada em simulações de diversos casos do SEE, sendo estes descritos abaixo:

- Simulação para o caso com 9 barras;
- Simulação para o caso com 45 barras;

É desejável estabelecer análises para os comportamentos da estabilidade transitória para todos os casos mencionados acima. Com base nas respostas de saída do PS-Lab, no momento que há uma detecção de instabilidade pode ser feita uma conferência através de uma análise gráfica. E esta análise pode denotar casos onde o PS-Lab será capaz de retornar uma estabilidade quando, na verdade, o sistema será instável.

Assim, com a utilização do método SLEP [4] (Superfície Limite de Energia Potencial) Iterativo, este estudo acaba tendo como premissa à seleção, detecção e análise de contingências críticas. A fim de buscar situações limites que ainda poderão impactar a utilização do software PS-Lab.

1.3. Estrutura

O Capítulo 2 do presente trabalho está dedicado a uma sucinta análise de Sistemas Elétricos de Potência e Estudos de Estabilidade do SEE, conceituando-o e apresentando seus principais aspectos, características e os principais fatores que influenciam a estabilidade de um sistema.

O Capítulo 3 tem por objetivo fornecer base para a metodologia aplicada no programa PS-Lab. Apresentando um estudo para o segundo método de Liapunov, bem como estabelecer uma breve descrição da Função Energia e a Superfície Limite de Energia Potencial – SLEP.

O Capítulo 4 está dedicado a uma breve descrição sobre o programa PS-Lab. Demonstrando as ferramentas básicas do programa, bem como suas funcionalidades.

O objetivo do Capítulo 5 é aplicar os conceitos vistos no Capítulo 2, 3 e 4 através de simulações realizadas com o PS-Lab. No intuito de conhecer o comportamento dinâmico do sistema, neste Capítulo, são aplicados curtos-circuitos em diversos casos (9 barras e 45 barras) variando seu tempo de abertura do disjuntor, aplicação e remoção da falta, ou seja, abrangendo os tipos de eventos que poderão levar o sistema a uma instabilidade. Sendo assim, este capítulo tem como característica, abranger todas as simulações realizadas com o programa PS-Lab. Podendo, assim, ser verificado de que maneira o sistema irá se comportar.

E por fim, o Capítulo 6 apresenta as principais considerações referentes ao trabalho, resumindo, observando e, principalmente, analisando os principais resultados encontrados no Capítulo 5.

2. Estabilidade

2.1. Introdução

Grandes sistemas de geração e transmissão interligados têm sido construídos e projetados para atender à crescente demanda de energia elétrica nas sociedades industrialmente desenvolvidas. Idealmente, as cargas encontram-se constantemente alimentadas com tensões e frequência constantes ou, em termos práticos, dentro de certa tolerância, tais que satisfaçam às exigências dos consumidores. Para que isso se verifique, a estabilidade dos sistemas de potência é indispensável.

Por apresentar uma vasta área territorial, o Brasil possui um dos maiores sistemas interligados de transmissão e distribuição de energia elétrica do mundo. Atualmente, o Brasil já possui uma população de quase 184 milhões de habitantes, segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e já se destaca como a quinta nação mais populosa do mundo. No ano de 2008, cerca de 95% da população possuía acesso à rede elétrica. Segundo dados divulgados no mês de setembro pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), o país conta com mais de 61,5 milhões de unidades consumidoras em 99% dos municípios brasileiros. Destas, a grande maioria, cerca de 85%, é residencial.

Tabela 2.1 - Principais dados por empreendimentos em operação.

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
CGH	316	182.551	180.950	0,17
EOL	37	662.880	659.284	0,62
PCH	357	3.017.339	2.973.182	2,78
SOL	1	20	20	0
UHE	165	75.471.427	75.591.339	70,7
UTE	1.322	28.249.767	25.504.317	23,85
UTN	2	2.007.000	2.007.000	1,88
Total	2.200	109.590.984	106.916.092	100

Fonte: Atlas Brasil – Aneel – 2006.

Assim, com seu crescimento e a expansão de novas linhas integradas a rede, há uma imensa propensão de surtos no sistema, o que dificulta a operação normal deste. Este fato gera, ainda, uma característica limitante para o estudo de estabilidade, a operação do sistema em uma região limitante.

O Brasil possui no total 2.200 empreendimentos em operação, gerando 106.916.092 kW de potência. Existe uma previsão para que nos próximos anos, haja uma adição de 37.615.751 kW na capacidade de geração do país, proveniente dos 155 empreendimentos atualmente em construção e mais 445 outorgadas.

Tabela 2.2 - Principais dados por empreendimentos em construção.

Empreendimentos em Construção			
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	%
CGH	1	848	0
EOL	9	200.150	1,15
PCH	68	948.938	5,46
UHE	18	10.326.500	59,38
UTE	59	5.912.655	34
Total	155	17.389.091	100

Fonte: Atlas Brasil – Aneel – 2006.

Os valores de porcentagem são referentes à Potência Fiscalizada. A Potência Outorgada é igual à considerada no Ato de Outorga. A Potência Fiscalizada é igual à considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora.

2.2.Sistemas Elétricos de Potência

A estabilidade de um sistema está ligada ao comportamento dinâmico das máquinas síncronas após a ocorrência de uma perturbação. Se a perturbação não envolver qualquer mudança na configuração do sistema, as máquinas deverão voltar ao mesmo estado de operação inicial, em um tempo finito após a extinção da falta. Porém, se houver qualquer mudança na configuração do sistema, tais como carga, geração, linhas de transmissão, etc... haverá um desequilíbrio entre a geração e a carga. Conseqüentemente, as máquinas deverão estabelecer-se em um novo ponto de operação. Em qualquer caso, todas as máquinas síncronas interligadas deverão permanecer em sincronismo se o sistema for estável, isto é, se estiver operando em paralelo com a mesma velocidade.

O monitoramento da estabilidade da rede é uma característica essencial, tendo por objetivo garantir certas premissas que visam um desempenho elevado do sistema como um todo. Assim tais premissas, são citadas abaixo:

- Garantia da Continuidade do sistema;
- Garantia da Confiabilidade do sistema;
- Garantia da Qualidade do sistema.

As grandezas elétricas em sistemas elétricos objetivam avaliar a confiabilidade do sistema e a qualidade da energia que será distribuída. Ocorrências usuais no sistema elétrico, como energizações de linhas de transmissão e transformadores ou a ocorrência de

curtos-circuitos, originando VTCDs (variações de tensão de curta duração) podem ocasionar a parada de grandes unidades industriais. Soma-se também o fato de que as cargas industriais, comerciais e até residenciais que contêm componentes eletrônicos, contribuem para o aumento da poluição do sistema elétrico, pois injetam harmônicos no sistema.

Alguns exemplos de fenômenos que afetam a qualidade de energia são as variações de tensão de curta duração (interrupções, afundamentos e elevações de tensão), as variações de tensão de longa duração (subtensões e sobretensões), os harmônicos, os desequilíbrios de tensão e a flutuação de tensão.

A preocupação do estudo de estabilidade trata-se de uma relação à resposta dinâmica do sistema frente à perturbação.

2.3. Critérios das Áreas Iguais

Como a análise de estabilidade transitória trata de fenômenos de grandes e súbitas perturbações e, ainda, os sistemas em questão, podem ser simplificados por um modelo máquina-barra infinita ou por um modelo de duas máquinas, e para isto utiliza-se o método gráfico conhecido como critério das áreas iguais. Já no caso de sistemas multimáquinas, a solução encontrada difere do caso anterior por apresentar solução baseada no domínio do tempo.

A análise de estabilidade pode ser feita com base na integração numérica das equações matemáticas que representam as máquinas e os demais componentes do sistema [6]. Em caso de ser verificado o ângulo entre quaisquer duas máquinas do sistema, e este aumentar seus limites após a aplicação da perturbação, pode-se concluir que o sistema é

instável. Se, por outro lado, as diferenças angulares atingirem um valor máximo e depois decaírem conclui-se que o sistema poderá ser estável.

Vale ainda ressaltar que para uma conclusão definitiva sobre a estabilidade, deve-se requerer uma observação das simulações subseqüentes, pois a máquina pode permanecer em sincronismo com as demais máquinas na 1ª oscilação e posteriormente perder esta condição nas demais oscilações, devido à interações dinâmicas com as diversas máquinas.

Já para duas máquinas ou uma conectada a uma barra infinita é possível concluir sobre a estabilidade transitória após a 1ª oscilação, através do método gráfico que propicia uma excelente interpretação física dos fenômenos dinâmicos envolvidos no problema de estabilidade transitória.

O critério de áreas iguais baseia-se em algumas hipóteses [6] no que dizem respeito à representação das máquinas, então as seguintes observações podem ser feitas para justificar a adoção das hipóteses simplificadoras:

- A potência mecânica de entrada das máquinas é suposta constante - As variações de potência mecânica são devidas à ação dos reguladores de velocidade dos geradores. Todavia, esta ação não se faz sentir, em geral, na primeira oscilação, já que as constantes de tempo dos reguladores de velocidade e das turbinas são muito altas para permitir a variação de potência mecânica em tão curto espaço de tempo.
- As máquinas síncronas são representadas por uma tensão constante atrás de sua reatância transitória. - Logo após a ocorrência de um curto-circuito, a corrente de campo do gerador aumenta, para contrabalançar o efeito desmagnetizante da reação da armadura decorrente do curto, ou seja, de modo a garantir que os enlaces de fluxo com o enrolamento do campo permaneçam aproximadamente constantes logo após a falta.

Decorridos alguns instantes, o fluxo tende de fato a cair (o mesmo acontecendo com a tensão atrás da reatância transitória), mas então o regulador de tensão já estará iniciando sua atuação, em resposta à queda da tensão terminal da máquina que se segue ao curto.

A combinação dos dois efeitos (aumento da corrente de campo e ação do regulador de tensão) justifica a hipótese durante os primeiros momentos após a falta. O critério das áreas iguais se aplica portanto à análise da estabilidade transitória baseada no comportamento da primeira oscilação, com as 3 hipóteses simplificadoras acima, para sistemas máquina-barra infinita. O método pode ser estendido para o caso de duas máquinas finitas.

- O amortecimento das máquinas é desconsiderado, assim como outras fontes de amortecimento (resistência da armadura, resistência das linhas de transmissão) são desconsiderados. - Esta é uma hipótese conservadora, já que o amortecimento tende a reduzir a amplitude das oscilações eletromecânicas. Assim, se a aplicação do critério das áreas iguais indicarem que o sistema permanece estável após a primeira oscilação, considera-se que os torques de amortecimento devidos aos enrolamentos amortecedores, sinais estabilizadores, resistências, etc., provocará a redução da amplitude das oscilações subsequentes, favorecendo, portanto a manutenção da estabilidade.

- Assim, em termos de ilustração em um sistema de potência em que uma máquina encontra-se oscilando com relação a uma barra infinita torna-se desnecessário a resolução da equação de oscilação para verificação se o ângulo de torque crescerá indefinidamente ou se oscilará em torno de um ponto de operação, ou seja, se o sistema será estável ou não.

Considere a equação de oscilação para uma máquina ligada a uma barra infinita:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e) \quad (2.1)$$

em que $(P_m - P_e)$ é a potência de aceleração.

Multiplicando ambos os lados de (2.1) por $2\frac{d\delta}{dt}$, vem que:

$$2\frac{d\delta}{dt}\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e)\frac{2d\delta}{dt} \quad (2.2)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \frac{\omega_0}{H}(P_m - P_e)\frac{d\delta}{dt} \quad (2.3)$$

$$d\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \frac{\omega_0}{H}(P_m - P_e)d\delta \quad (2.4)$$

Integrando ambos os lados de (2.4), encontra-se:

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \frac{\omega_0}{H}\int_{\delta_0}^{\delta}(P_m - P_e)d\delta \quad (2.5)$$

Ou

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{\omega_0}{H}\int_{\delta_0}^{\delta}(P_m - P_e)d\delta} \quad (2.6)$$

Esta equação (2.6) imprime a velocidade relativa com relação a uma referência rotativa em sincronismo.

Durante o curto-circuito, o ângulo δ de torque da máquina cresce. Para que possa existir a estabilidade este ângulo de torque precisaria parar de crescer, assim, a velocidade dada pela equação (2.6) deve ser nula e a aceleração deve ser nula (caso limite) ou negativa (caso aonde irá se opor-se ao movimento do rotor). Sendo assim, para a aceleração do rotor é necessário que se tenha um δ_{\max} para uma condição de estabilidade, de tal forma que:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{\max}} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.7)$$

Esta equação advém da consequência da velocidade nula. Onde $(P_m - P_e) \delta_{\max} \leq 0$, isto é, a potência elétrica maior ou igual à potência mecânica.

A equação (2.7) é dita como a área sob a curva da potência entre δ_0 e δ_{\max} .

A figura (2.1) demonstra o caso em que δ_{\max} tem o seu valor para $P_e > P_m$, quando um curto-circuito trifásico é aplicado nos terminais da máquina e logo eliminado posteriormente. Portanto para que a equação (2.1) seja validada, é necessário que a área hachurada A1 seja igual à área hachurada da A2, porém com sinal contrário.

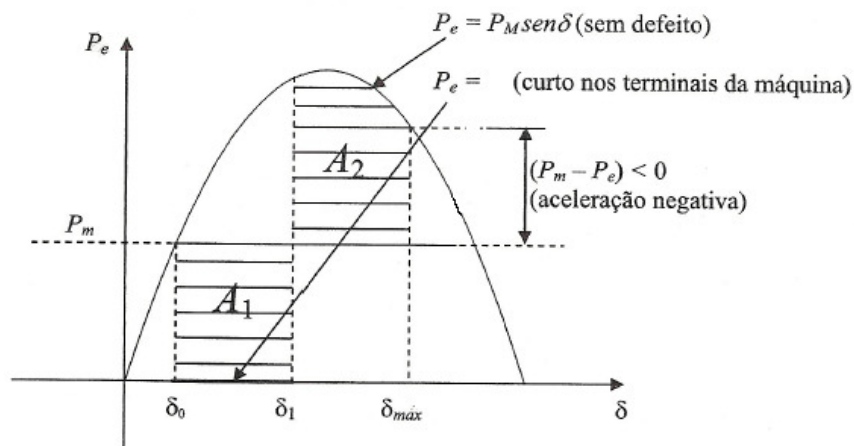


Figura 2.1 – Potência Elétrica traçada como uma função de δ com $P_e > P_m$ em δ_{max} , sistema estável.

Condição de estabilidade através do Critério das Áreas.

1. Em δ_{max} , a potência de aceleração ($P_m - P_e$) deve ser negativa ou nula, isto é, $P_e \geq P_m$. Como consequência disto, o sistema será estável. (ver Figura 2.2)
2. Caso a potência de aceleração mude de sinal, anteriormente, à área hachurada A_2 conseguir ser igual à área hachurada A_1 , ou seja, $P_m > P_e$ em δ_{max} , logo o sistema será instável.

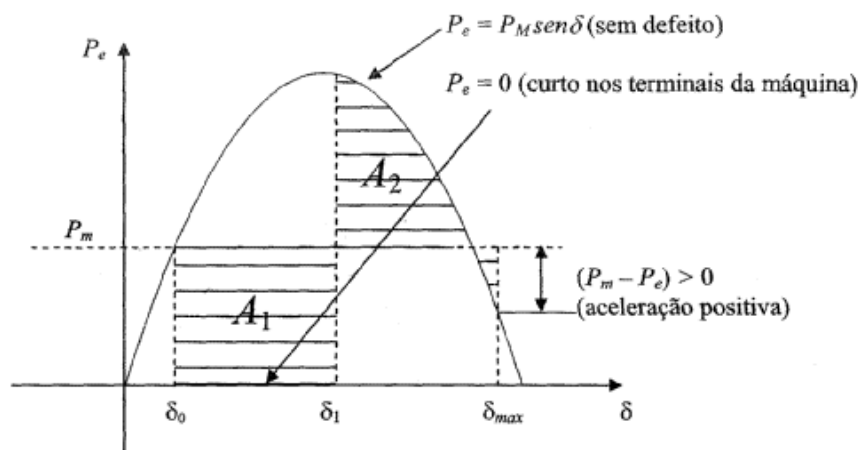


Figura 2.2 – Potência Elétrica traçada como uma função de δ , com $P_e < P_m$ em δ_{max} , sistema instável.

3. A situação, poderá ainda ter uma terceira opção, sendo esta um limite de estabilidade e instabilidade, quando $P_m = P_e$.

2.3.1. Cálculo do ângulo crítico de extinção de faltas através do critério das áreas.

O ângulo crítico é definido como o ângulo que leva o sistema ao limite de estabilidade (potência de aceleração nula). Em um caso geral onde caibam três situações bem distintas: Sistema operando antes do defeito, sistema durante o defeito (curto através de uma impedância) e sistema pós-defeito (com mudança na configuração da rede).

É possível, observar na figura 2.3, de acordo com o critério das áreas para o estudo de estabilidade, o ângulo crítico δ_c para extinguir o defeito deve ser a igualdade entre A_1 e A_2 , ou seja, $A_1 = A_2$, o que conseqüentemente pode ser $P_m = P_e$ em δ_{lim} (ângulo de torque limite para manter a estabilidade da máquina).

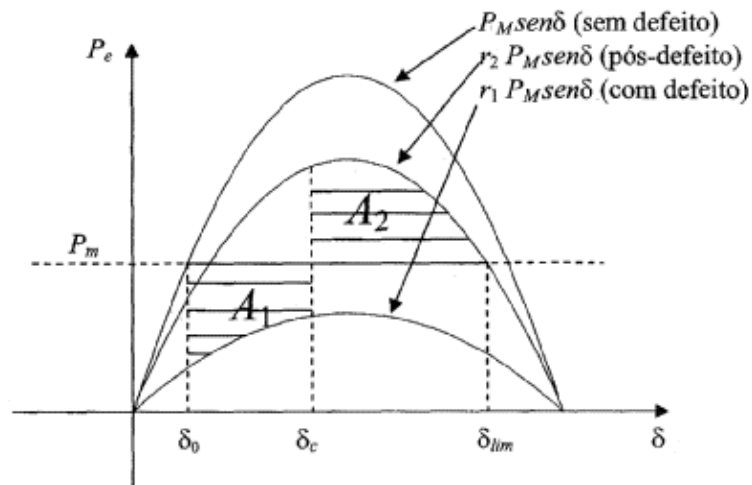


Figura 2.3 – Curva P_e x δ (ângulo crítico para extinção de um defeito).

Cálculo de A_1 :

$$A_1 = P_m (\delta_c - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_c} r_1 P_m \text{sen} \delta d\delta = P_m (\delta_c - \delta_0) + r_1 P_m (\cos \delta_c - \cos \delta_0) \quad (2.8)$$

Cálculo de A_2 :

$$A_2 = \int_{\delta_c}^{\delta_{\text{lim}}} r_2 P_m \sin \delta d\delta - P_m (\delta_{\text{lim}} - \delta_c) = r_2 P_m (\cos \delta_c - \cos \delta_{\text{lim}}) - P_m (\delta_{\text{lim}} - \delta_c) \quad (2.9)$$

Igualando A1 e A2:

$$\delta_c = \arccos \left\{ \frac{\left[\left(\frac{P_m}{P_M} \right) (\delta_{\text{lim}} - \delta_0) + r_2 \cos \delta_{\text{lim}} - r_1 \cos \delta_0 \right]}{r_2 - r_1} \right\} \quad (2.10)$$

Em que

$$\delta_0 = \arcsen \left(\frac{P_m}{P_M} \right) \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.11)$$

$$\delta_{\text{lim}} = \arcsen \left(\frac{P_m}{r_2 P_M} \right) \geq \frac{\pi}{2} \quad (2.12)$$

Sendo r_1 e r_2 , explicitados a seguir:

r_1 = Relação entre o pico da potência elétrica do sistema com defeito e P_{max} .

r_2 = Relação entre o pico da potência elétrica do sistema pós-defeito e P_{max} .

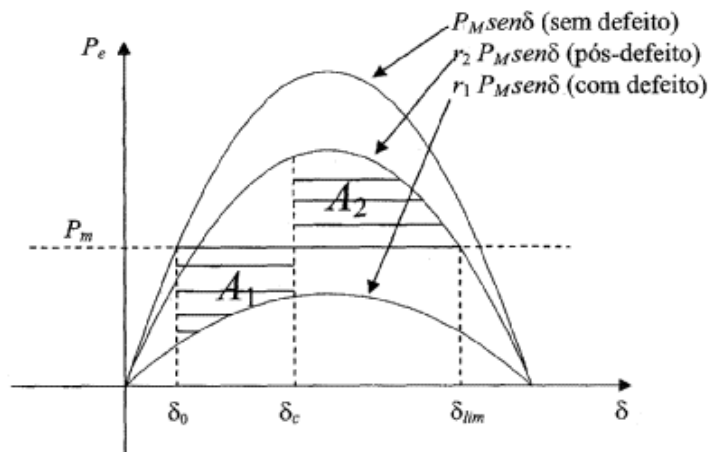


Figura 2.4 – Curva P_e x δ (ângulo crítico para extinção de um defeito).

2.3.2. Cálculo do tempo crítico de extinção de faltas através do Critério das Áreas

Nesta seção é proposta a obtenção do ângulo crítico de extinção de faltas utilizando o critério das áreas.

Inicialmente, a partir da equação de oscilação da máquina síncrona:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \quad (2.13)$$

Integrando-se os dois lados da equação, tem-se a velocidade na referência rotativa:

$$\frac{d\delta}{dt} = \int_0^t \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) dt \quad (2.14)$$

A expressão da equação (2.14) só é válida quando a potência de aceleração ($P_m - P_e$) é constante. Caso seja um curto-circuito, necessariamente, este deve ser franco. Caso contrário, a integral acima não terá solução. Dessa forma,

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) t \quad (2.15)$$

$$d\delta = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) t dt \quad (2.16)$$

Integrando novamente, tem-se o deslocamento angular:

$$\int_{\delta_0}^{\delta} d\delta = \int_0^t \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) t dt \quad (2.17)$$

$$\delta - \delta_0 = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \frac{t^2}{2} \quad (2.18)$$

Sabendo-se que $\delta = \delta_c$ corresponde a $t=t_c$.

Então,

$$t_c = \sqrt{\frac{4H(\delta_c - \delta_0)}{\omega_0(P_m - P_e)}} \quad (2.19)$$

2.3.3. Cálculo do tempo crítico quando o curto-circuito é através de uma reatância.

Para este caso, a potência de aceleração é dada por:

$$(P_m - P_e) = P_m - r_1 P_m \text{sen} \delta \quad (2.20)$$

Conforme figura 2.5a este caso é mais complexo, pois a potência não é constante. Dessa forma, o cálculo não pode ser realizado de maneira similar a já descrita no item anterior. Então neste caso, utiliza-se de uma equivalência de áreas no período de duração do curto como pode ser observado na figura 2.5b. A nova área A' equivale a uma área construída com potência de aceleração constante, o que possibilita a uma solução para a integral do tempo crítico. Este procedimento é adequado porque a área A_I é proporcional ao aumento da energia cinética do rotor que durante o curto-circuito está acelerando. Dessa forma, fazendo a equivalência das áreas A' com A_I , a energia de aceleração é mantida.

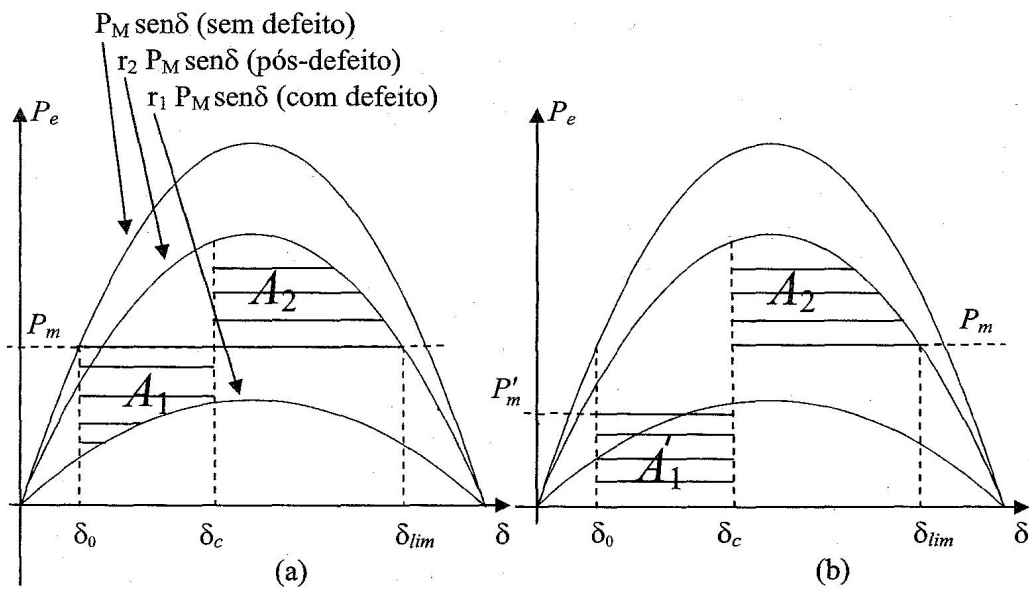


Figura 2.5 – Curva $P \times \delta$ para um caso genérico (a) e fazendo a equivalência de áreas durante o curto-circuito

Igualando as áreas A_I e A'_I , tem-se:

$$A_1 = P_m (\delta_c - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_c} r_1 P_m \sin \delta d\delta = A_1' = P_m' (\delta_c - \delta_0) \quad (2.21)$$

$$P_m (\delta_c - \delta_0) + r_1 P_m (\cos \delta_c - \cos \delta_0) = P_m' (\delta_c - \delta_0) \quad (2.22)$$

$$P_m' = P_m + \frac{r_1 P_m (\cos \delta_c - \cos \delta_0)}{\delta_c - \delta_0} \quad (2.23)$$

Utilizando a mesma equação do tempo crítico, para t_c , com P_m' só substituindo P_m , tem-se:

$$t_c = \sqrt{\frac{4H (\delta_c - \delta_0)}{\omega_0 P_m'}} \quad (2.24)$$

3. Função Energia e Método de Liapunov

3.1.Introdução

Este capítulo tem por objetivo fazer um estudo conciso sobre análise de contingências possíveis em um SEE. Assim, no momento que se faz necessário analisar diversos tipos de contingências, tem-se a facilidade de uma verificação apenas de certos casos que irão realmente figurar em uma análise mais concisa. Neste sentido, a seleção e classificação de contingências são realizadas, como segue abaixo:

- Utilizar métodos rápidos, geralmente com modelagem simplificada, para selecionar as contingências críticas;
- Classificar as contingências críticas selecionadas segundo o grau de severidade.

A escolha da metodologia pondera algumas características que tornar-se-ão requisitos básicos, como segue abaixo:

1. Confiabilidade – Característica primordial para rastrear absolutamente todas as contingências instáveis do sistema. Devido à natureza não-linear do subproblema de seleção de contingências, os métodos com forte base analítica poderão atender este quesito.

2. Eficiência – Elevado rendimento na retirada de contingências estáveis. Esta característica não deve ser afetada para diferentes condições de operação;
3. Computação on-line – Pouca necessidade de computação off-line e/ou ajustes de forma a lidar com constantes mudanças e incertezas nas condições de operação;
4. Velocidade – Alta velocidade de classificação, gerada através de métodos rápidos;
5. Desempenho – Medida da robustez com o respeito a mudanças nas condições de operação do sistema.

3.2.Método de Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP)

Iterativo

O método SLEP [4] iterativo possui como característica primordial ser um método rápido, concomitante a este fator, há ainda a confiabilidade e precisão que este apresenta. O presente método empregado constitui-se de uma ferramenta de análise rápida da estabilidade transitória, que vigorará neste trabalho para a solução do subproblema de seleção e classificação de contingências críticas. Assim, este é um método híbrido, baseado na associação do segundo método de Liapunov e conjuntos invariantes, com o fornecimento de tempos críticos e margens em energia de sistemas multimáquinas. Nesta sucinta apresentação, visando o entendimento do método SLEP iterativo, seguem alguns parâmetros que serão tomados por base para uma maior compreensão do método:

- Fundamentos conceituais e de modelagem nos quais está embasado o método, salientando-se a utilização de modelagem simplificada e a preservação da estrutura original da rede elétrica;
- Definição de uma função de energia transitória como função de Liapunov;
- A utilização do conceito de superfície limite de energia potencial;
- A presença de um processo iterativo de cálculo de margens e tempos críticos;
- O Módulo de seleção e classificação de contingências críticas.

3.2.1. Modelo Matemático

No método SLEP [4] iterativo, a modelagem matemática apresentada para a análise da estabilidade transitória tem como principais características:

- A utilização de modelos simplificados para os geradores (representação por uma fonte de tensão constante em série com a respectiva reatância transitória de eixo direto ($X'd$));
- A representação das cargas por impedâncias constantes;
- Desconsideração dos torques de amortecimento;

- E a preservação da identidade da rede elétrica, não reduzir às barras internas de geração, prática comum nos métodos da TEF. Esta última característica visa uma maior eficiência computacional, além de propiciar a possibilidade de representação das cargas por modelos diferentes de impedância constante. Deste modo, uma barra genérica de geração pode ser representada como na Figura 3.6.

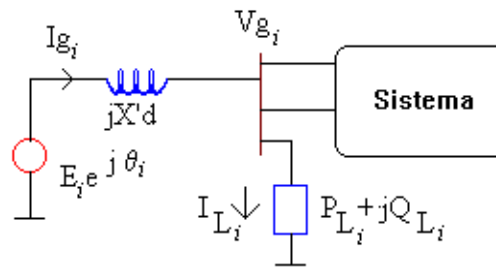


Figura 3.6 – Modelo de representação da barra.

onde:

PL_i, QL_i : potências ativa e reativa da carga na i -ésima barra

$E_i e^{j\theta_i}$: tensão atrás da reatância transitória do i -ésimo gerador

$V_{g_i} = e_i + jf_i$: tensão na i -ésima barra externa de geração

$I_{g_i} = a_i + jb_i$: injeção de corrente do i -ésimo gerador

$I_{L_i} = c_i + jd_i$: corrente fornecida à carga conectada à i -ésima barra

Com as considerações estabelecidas e com o centro de ângulos como referência do movimento, as equações que descrevem a dinâmica dos ng geradores são [7,11]:

$$\begin{cases} M_i \frac{d\omega_i}{dt} = Pm_i - Pg_i - \frac{M_i}{M_T} Pc = g_i(\theta) \\ \frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3.1)$$

onde:

$$Pg_i = E_i B_i (-f_i \cos \theta_i + e_i \sin \theta_i)$$

$$B_i = 1 / X'_{di}$$

$$Pc = \sum_{i=1}^{n_g} (Pm_i - Pg_i)$$

$$M_T = \sum_{i=1}^{n_g} M_i$$

$$Ig_i = E_i B_i (\sin \theta_i - j \cos \theta_i)$$

$$\begin{bmatrix} Vg \\ Vl \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{gg} & Z_{gl} \\ Z_{lg} & Z_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ig \\ 0 \end{bmatrix}$$

t - tempo (seg.);

θ_i - ângulo atrás da reatância transitória da i -ésima máquina em relação ao centro de ângulos (rad.);

ω_i - desvio de velocidade do rotor da i -ésima máquina em relação ao centro de ângulos;

M_i - momento angular da i -ésima máquina (seg./rad.elétricos);

Pm_i - potência mecânica de entrada no i -ésimo gerador (p.u.);

Pg_i - potência elétrica injetada pelo i -ésimo gerador (p.u.);

X'_{di} - reatância transitória de eixo direto da i -ésima máquina;

$\begin{bmatrix} Z_{gg} & Z_{gl} \\ Z_{lg} & Z_{ll} \end{bmatrix}$ - sub-matrizes da matriz de impedâncias nodais incluindo as reatâncias

transitórias das máquinas e as impedâncias das cargas.

Por possuir uma preservação da identidade das cargas e da rede, ocorre uma representação do sistema por dois conjuntos de equações não-lineares, diferenciais ordinárias de primeira ordem:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y) \\ 0 &= g(x, y) \end{aligned} \tag{3.2}$$

A determinação das potências P_{gi} , $i=1,2,\dots,ng$, ao longo do cálculo de trajetórias do sistema, requer a determinação de $V_{gi} = e_i + jf_i$ ($i=1,2,\dots,ng$) e conseqüentemente da submatriz Z_{gg} . Por isto, os elementos da Z_{gg} serão obtidos explicitamente a fim de permitir que as tensões e suas derivadas empregadas no cálculo das trajetórias do sistema usando série de Taylor, possam ser representadas por funções analíticas. O método da compensação e a técnica de fatoração triangular de matrizes esparsas são usados no cálculo dos elementos da Z_{gg} , para as configurações do sistema durante e pós-falta [7, 11]. Abaixo segue a definição do segundo método de Liapunov.

3.2.2. O Segundo Método de Liapunov

A modelagem matemática para análise da estabilidade transitória pode ser definida pela seguinte equação:

$$\dot{X} = f(X); f(0) = 0 \tag{3.3}$$

onde:

0 : estado de equilíbrio do sistema

X : vetor de estados de dimensão n ($X \in \mathfrak{R}^n$)

t : variável independente (tempo)

$f(X)$: função vetorial não-linear ($f(\cdot) : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n$)

A análise da estabilidade de sistemas descrita pela equação acima, com a utilização do segundo método de Liapunov, deve assegurar uma função escalar $V(X)$ com as determinadas propriedades, descritas a seguir:

i. $V(X) > 0 ; X \neq 0 , X \in D$

ii. $V(X) = 0 ; X = 0 , 0 \in D$

iii. $V(X) < 0 ; X \neq 0 , X \in D$

iv. $\dot{V}(X) = 0 ; X = x = f(x)$

onde:

V - função de Liapunov.

X - Vetor de estados do sistema

D - Subconjunto do \mathfrak{R}^n que contém a origem em seu interior, aberta e conexa.

\dot{V} - Derivada de V ao longo das trajetórias do sistema.

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial X_i} \frac{\partial X_i}{\partial t} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial X_i} f_i(X) \quad (3.4)$$

As condições i. e ii. indicam que a função $V(X)$ deve ser positiva definida em um conjunto $D \hat{=} \hat{\mathfrak{A}}^n$, e as condições iii. e iv. que sua derivada $\dot{V}(X)$ seja negativa definida neste conjunto [7].

O segundo método de Liapunov para sistemas lineares, na análise da estabilidade assintótica do estado de equilíbrio, representa uma implicação de que todos os movimentos acabam sempre por conduzir para o estado de equilíbrio, independentemente da condição inicial. Assim, esta afirmação torna-se não verdadeira para a dinâmica de sistemas não-lineares, e resultados conservativos são obtidos, quando é utilizado o segundo método de Liapunov na análise de estabilidade transitória em SEE, devido à consideração apenas da configuração do sistema pós-defeito.

Foi proposto em ATHAY [7], o uso do conceito de conjuntos invariantes em junção com a teoria de Liapunov, onde foi considerado a dinâmica do sistema sob - falta no intuito de obter resultados menos conservativos, para assim, facilitar a definição de domínios práticos de estabilidade. Abaixo segue a definição de conjuntos invariantes e o teorema que fundamenta o conceito de um domínio de estabilidade transitória.

Conjunto Invariante: Seja o sistema definido por:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= f(X), & X(0) &= X_0 \\ X(t) &\in \mathbb{R}^n \end{aligned} \tag{3.5}$$

O conjunto Ω é chamado invariante em relação ao sistema (3.1), se para qualquer X_0 em Ω , existe um t_0 tal que o movimento $X(t; X_0, t_0)$ pertence a Ω para todo $t \geq t_0$. Desta forma, toda trajetória (movimento) do sistema, é um conjunto invariante, assim como também o seu estado de equilíbrio X_0 .

Teorema 3.2.1: Seja Ω um conjunto invariante para o sistema (3.1) Considere $X^e \in \Omega$ e $V(X - X^e)$ uma função de valor real, definida em Ω com $V(0)=0$.

Seja $S(k)$ o conjunto definido como:

$$S(k) = \left\{ X \in \Omega \mid V(X - X^e) < k \right\}$$

Supõe-se para algum $k_0 > 0$ que

i. $V(X-X^e)$ é positiva definida e crescente em $S(k_0)$, e

ii. $V(X-X^e)$ é negativa definida em $S(k_0)$.

Então, X^e é um estado de equilíbrio do sistema (3.1) e o conjunto $S(k_0)$ está no domínio de atração de X^e .

Em termos de ilustração a aplicação conceitual do teorema citado acima (3.2.1), pode ser observada na figura 3.7. Onde são demonstradas as trajetórias de um sistema hipotético para vários tempos de eliminação do defeito [4]. A linha cheia representa a trajetória do sistema com o defeito mantido. O ponto assinalado por t_{cr}^* é denominado de tempo crítico de eliminação do defeito. As trajetórias S_1, S_2, \dots, S_n são estáveis, enquanto que as trajetórias U_1, U_2 são instáveis. O ponto X^u pode ser considerado o ponto mais próximo da superfície limite de energia, ou seja, identifica o estado de equilíbrio instável pós-defeito mais próximo do ponto de cruzamento com a superfície SLEP [4].

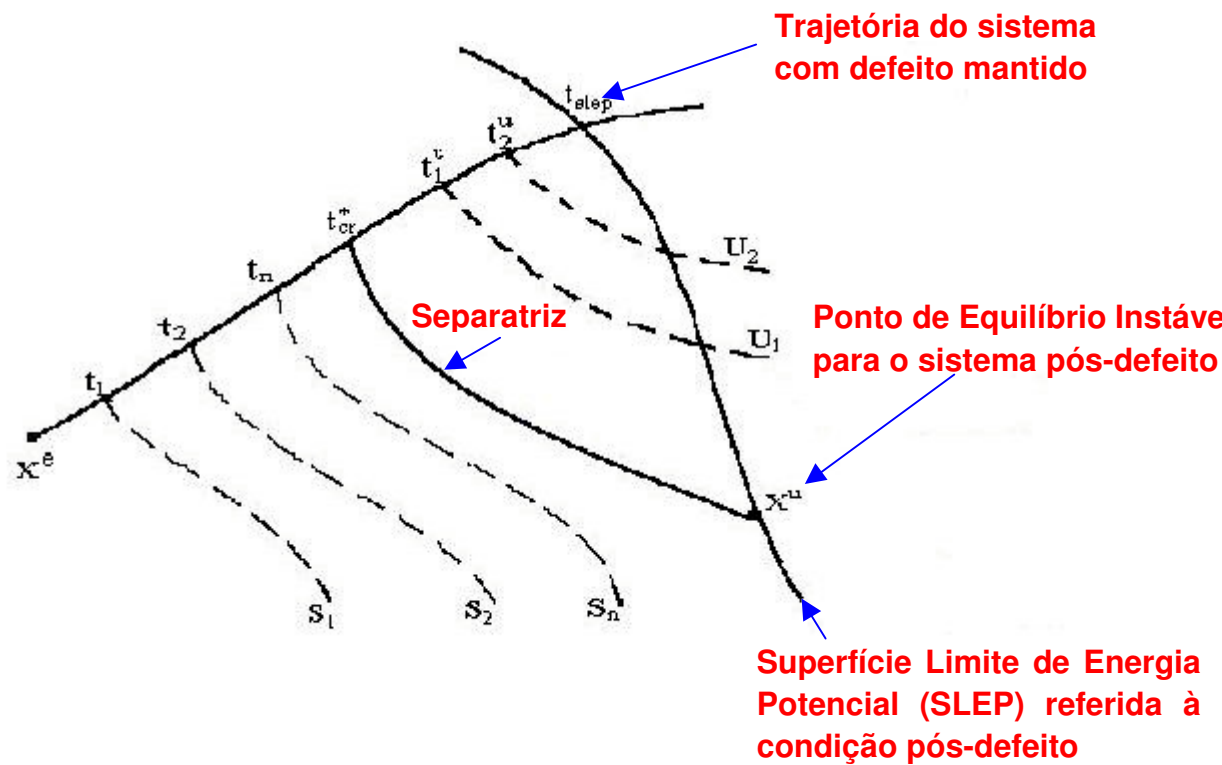


Figura 3.7 - Trajetórias de um sistema hipotético para vários tempos de eliminação do defeito

Definindo-se Ω como a união de todas as trajetórias pós-defeito, mais o ponto de equilíbrio estável pós-defeito (X^e), e considerando-se $V(X-X^e)$ ser a função energia, o ponto k_0 no teorema (3.2.1) corresponde ao maior valor de $V(X-X^e)$ adquirido pelo sistema sob-defeito, capaz de permitir que as condições *i* e *ii* sejam satisfeitas.

Com este valor de k_0 pode-se determinar o tempo crítico de eliminação do defeito (t_{cr}^*). Então, o cálculo do valor de k_0 (energia potencial crítica), para uma determinada contingência, torna-se a questão central do problema.

3.2.3. Função Energia

No método SLEP iterativo [4] emprega-se como uma função de Liapunov, a função que representa a energia total do sistema, definida como:

$$V(\theta, \omega) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_g} M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^{n_g} \int_{\theta_i^2}^{\theta_i} g_i(\theta) d\theta_i \quad (3.6)$$

Podendo ser representada por:

$$V(\theta, \omega) = Ec(\omega) + Ep(\theta) \quad (3.7)$$

Onde Ec e Ep representam, respectivamente, a energia cinética e a energia potencial do sistema.

3.2.4. Superfície Limite de Energia Potencial – SLEP

A maneira aproximada para determinar k_0 (Energia potencial crítica para a contingência) foi inicialmente proposta por Athay [7], e faz uso do conceito da Superfície Limite de Energia Potencial, definida a seguir:

Seja θ^e o estado de equilíbrio pós-falta do sistema definido pela equação (3.1), estável no sentido de Liapunov e θ um vetor do subespaço de estados dos ângulos. Considerando os raios tirados de θ^e

$$\begin{aligned} \theta^1 - \theta^e + \lambda\mu, \lambda \in \mathfrak{R}, \lambda \geq 0 \\ \mu = \frac{\theta^1 - \theta^e}{\|\theta^1 - \theta^e\|} \end{aligned} \quad (3.8)$$

A SLEP [4] é definida como sendo o conjunto $S: \{\theta / \theta = \theta^e + \lambda^* \mu\}$, onde [4, 11].

$$\lambda^* = \min \left\{ \lambda / \frac{\partial E_p(\theta^e + \lambda\mu)}{\partial \lambda} = 0 \right\} \quad (3.9)$$

E $\frac{\partial E_p(\cdot)}{\partial \lambda}$: Derivada Direcional da energia potencial definida para a configuração pós-defeito do sistema.

Considerando-se todos os raios emanados de θ^e , a superfície SLEP pode ser caracterizada por [4,11]:

$$\nabla E_p(\theta)(\theta^1 - \theta^e) = -\sum_{i=1}^{n_g} g_i(\theta)(\theta^1 - \theta^e) = 0 \quad (3.10)$$

ou na forma vetorial

$$g^T(\theta) \bullet (\theta^1 - \theta^e) = 0 \quad (3.11)$$

Onde:

$$g^T(\theta) = -\frac{\partial E_p}{\partial \theta} = -\nabla E_p \quad (3.12)$$

Na equação acima (3.12) o produto escalar ao longo da trajetória, partindo de θ^e (estado de equilíbrio), apresenta três regiões bem distintas, sendo estas: Região interna à SLEP onde o produto escalar será negativo. Na região onde há o cruzamento, o produto escalar é nulo. E por ultimo, o produto escalar será positivo após o cruzamento.

O vetor Gradiente ∇E_p é ortogonal às superfícies equipotenciais de E_p e aponta na direção de crescimento dos contornos da E_p . A identificação do cruzamento de uma trajetória do sistema com a SLEP, pode ser realizada monitorando-se o produto escalar e observando-se a troca de sinal o mesmo.

Estas propriedades foram inicialmente empregadas na determinação de tempos críticos de eliminação do defeito [7], utilizando-se apenas uma avaliação de energia crítica calculada no instante de cruzamento com a SLEP da trajetória com defeito mantido. Este procedimento, em geral, fornece resultados muito otimistas ou conservativos, principalmente nos casos em que a trajetória do sistema com o defeito mantido difere bastante da trajetória crítica do sistema [4,11].

No método SLEP iterativo, também são utilizados as propriedades da SLEP na identificação de trajetórias estáveis e instáveis, dentro de um processo iterativo de cálculo de tempos críticos, descrito brevemente no próximo item.

3.2.5. Processo Iterativo de Cálculo da Energia Crítica e Tempo Crítico

O algoritmo proposto por DECKER [4,11], basicamente consiste em um monitoramento da derivada direcional da função energia potencial, definida na equação (3.12), ao longo das trajetórias de estados do sistema sob-defeito e pós defeito, calculadas utilizando-se os métodos da expansão em Série de Taylor ou Trapezoidal Implícito, para detectar a instabilidade do sistema (momento de cruzamento com a SLEP).

O processo iterativo na determinação do tempo crítico e energia crítica, objetivando obter resultados mais precisos, pode ser ilustrado na Figura 3.11 e, é descrito da seguinte maneira: Calcula-se a trajetória do sistema sob-defeito até o cruzamento com a SLEP (θ^{slep}). A energia potencial obtida neste ponto é usada como primeira estimativa de energia crítica. Em seguida, considerando-se ainda o estado do sistema durante o defeito, determina-se o instante de tempo no qual a energia total iguala-se à energia crítica

inicialmente estimada. O tempo assim calculado é a primeira estimativa de tempo crítico (t_{cr1}^e).

Posteriormente, é simulada e monitorada a trajetória do sistema pós-defeito a partir de t_{cr1}^e . Se a trajetória pós-defeito não alcançar a SLEP, aumenta-se de um percentual a energia crítica anteriormente estimada e calcula-se um novo tempo crítico estimado (t_{cr2}^e). Caso haja cruzamento, atua-se de forma oposta. Assim, são definidas duas estimativas para a energia crítica uma otimista e outra pessimista.

A partir destas duas estimativas segue-se um processo do tipo de bissecção de cálculo de novas estimativas otimistas e pessimistas para a energia crítica e correspondentes tempos críticos, conforme se ilustra na Figura 3.8.

Neste processo são calculados t_{cr1}^e , t_{cr2}^e , ..., t_{cr7}^e até se obter uma aproximação da trajetória que tangencia a SLEP. A convergência é definida em termos de energia, entre duas estimativas no processo iterativo, ou quando um número máximo de estimativas de energia crítica for realizado. Na ilustração da Figura 3.8, o tempo crítico corresponde a $t_{cr7}^e = t_{cr}^*$. Um aprofundamento maior do assunto podem ser encontrados em [4,11].

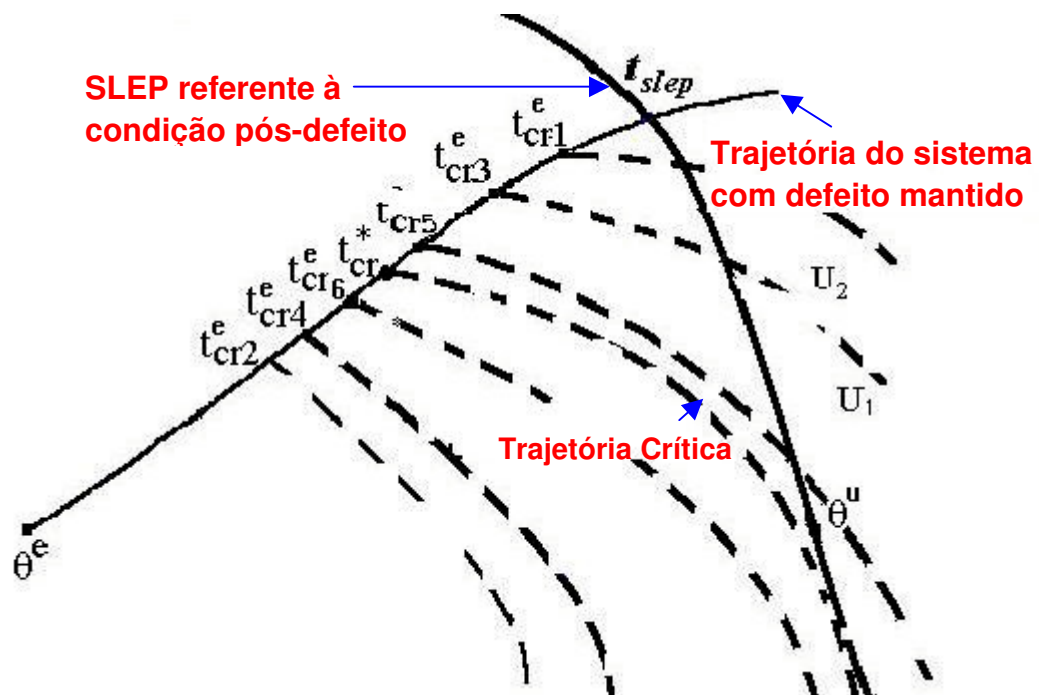


Figura 3.8 - Ilustração do cálculo da energia crítica e do tempo crítico no método SLEP iterativo.

3.2.6. Seleção de Contingências

As contingências consideradas críticas, para efeito de avaliação da segurança dinâmica dos SEE, são selecionadas pelo método SLEP iterativo de uma forma diferente do procedimento de cálculo de tempos críticos descrito no item anterior. Essencialmente, a seleção de contingências é traduzida pela identificação de casos instáveis e estáveis para um tempo de eliminação do defeito preestabelecido. Isto implica em calcular a trajetória durante e pós-falta do sistema identificando-se o seu cruzamento ou não com a SLEP. Aquelas trajetórias que cruzam a SLEP são instáveis e consideradas críticas. As demais, que não cruzam a SLEP, são estáveis e estas contingências são descartadas da simulação no domínio do tempo posterior.

O tempo de eliminação do defeito preestabelecido pode ser suficientemente elevado para garantir uma margem de segurança em relação aos tempos reais da proteção, de modo a acomodar imprecisões relativas a modelagem simplificada empregada nesta tarefa.

Em termos de algoritmo, a seleção de contingências é realizada monitorando-se a derivada direcional da função energia potencial definida na equação (3.12). A troca de sinal de o produto escalar da equação (3.12) identifica uma trajetória instável. Este procedimento de seleção de contingências é semelhante, termos computacionais, a apenas uma estimativa do processo iterativo de cálculos de tempos críticos, sendo, portanto mais rápido. Na Figura 3.9 ilustra-se o processo de seleção, onde uma contingência que tenha uma trajetória instável do tipo U_1 , para um tempo de eliminação do defeito especificado, t_1^u , é classificada como crítica; E uma contingência com uma trajetória do tipo S_1 , para um tempo de eliminação do defeito t_1 , é classificada como estável e descartada da análise posterior.

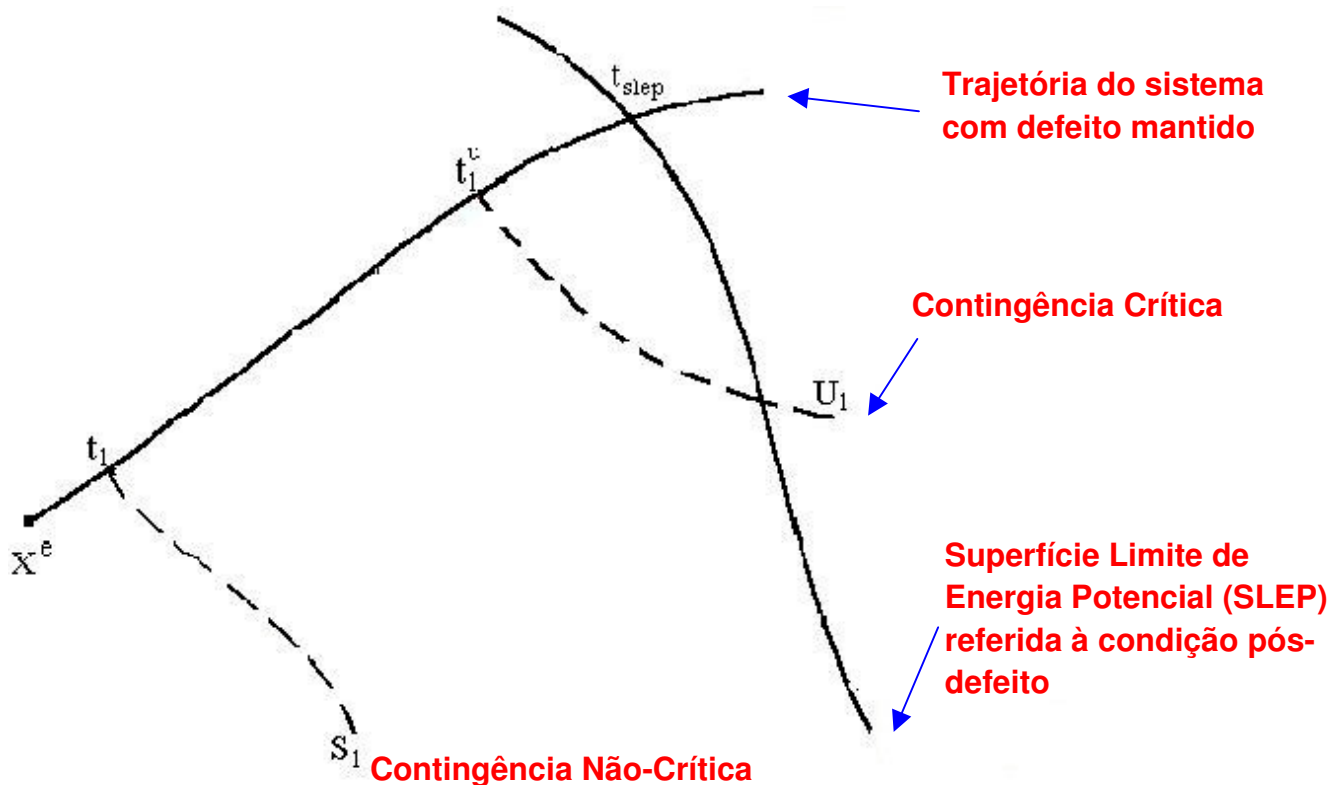


Figura 3.9 - Ilustração do processo de seleção de contingências críticas.

4. Sistema Integrado para Simulação e Análise de Redes Elétricas - PS-Lab.

4.1. Descrição do programa.

Este software tem como funcionalidades a visualização, análise e simulação de sistemas elétricos de potência. Composto por analisar as particularidades dos sistemas elétricos de potência, possui interface gráfica [5] capaz de visualizar e operar um sistema. Tem ainda a característica de permitir que os modelos matemáticos dos dispositivos do sistema possam ser definidos pelo usuário.

- Módulo de Visualização Gráfica da Rede Elétrica: Interface gráfica para visualização e operação do sistema de forma intuitiva e customizada para a realidade dos operadores. Conta com as seguintes funções.

- Representação geo-referenciada e/ou unifilar da rede elétrica;
- Representação esquemática das subestações;
- Representação chave-disjuntor no nível das subestações;
- Telas gráficas para visualização do sistema e resultados customizáveis;

- Módulos para Análise Estática da Rede Elétrica: Os algoritmos de análise estática implementados constituem o estado da arte em termos de métodos computacionais para sistemas elétricos. O módulo de análise estática permite que os modelos matemáticos dos dispositivos do sistema possam ser definidos pelo usuário, adicionando agilidade à inclusão de novos dispositivos. O módulo estático conta com as seguintes funções.

- Estimador de Estados;
- Configurador de Redes;
- Fluxo de Potência;
- Análise de Sensibilidades;
- Gerenciamento de Planos de Manobras.

- Módulos para Análise Dinâmica da Rede Elétrica: Os algoritmos de análise dinâmica implementados constituem o estado da arte em termos de métodos computacionais para sistemas elétricos. O módulo de análise dinâmica também permite que

os modelos matemáticos dos dispositivos do sistema possam ser definidos pelo usuário. O módulo dinâmico conta com as seguintes funções.

- Análise Linearizada (autovalores, fatores de participação, mode shape);
- Simulação Rápida (quase-estática);
- Simulação Completa (estabilidade transitória).

4.2. Visualização dos Dados em Formato Tabular

A visualização dos dados da rede elétrica em forma tabular permite o gerenciamento dos dados do sistema cuja representação gráfica não foi representada. Este tipo de visualização dos dados é útil para sistemas elétricos de grande porte usualmente importados de alguma base de dados sem nenhuma informação gráfica.

The screenshot displays the PSI Lab software interface. The main window shows a tree view on the left with 'EMPRESAS' expanded to 'ELEKTRO'. The central pane shows a table of substations with columns for 'Nome de ID', 'Número', and 'Equipamentos'. A callout 'Organizar por Área/Empresa' points to the tree view. Another callout 'Visualizar Dados' points to the top menu bar. A third callout 'Lista das Subestações' points to the main table. A fourth callout 'Lista dos Equipamento' points to a smaller table below the main one.

Nome de ID	Número	Equipamentos
ACAMPOS-69	3911	1
ACAMPDVS-69	1824	3
ALURIRLAMA-69	3915	1
CARY-ALDX-69	3913	3
GSALGAD0-69	3950	2
INDIAPORA-69	3880	1
JALES-138-69	3951	1
MACAUBAL-69	3902	1
NHANDEARA-69	3979	2
PAULOPARBA-69	3909	1
PIONEIRO-138	3939	1
POPULINA-69	3879	2
RIOLANDIA-69	3908	2
STAFESUL-69	3876	1
VOTU-ALDX-69	1927	2
VOTUP-138-69	3903	1
VOTUPO-2-138	3907	2

Número	Nome de ID	KV nom	KV subest	Log
3902	69	69.0	1.025059	
39021	69KV-B	69.0	1.025059	
39022	13.8KV-P	13.8	1.025059	
39023	13.8KV-T			

Figura 4.10 – Visualização dos dados em Formato Tabular

4.3. Visualização dos Dados em Formato Gráfico

A visualização dos dados da rede elétrica em forma gráfica permite a visualização e o gerenciamento dos dados do sistema diretamente sobre os diagramas unifilares da rede elétrica e diagramas esquemáticos das subestações.

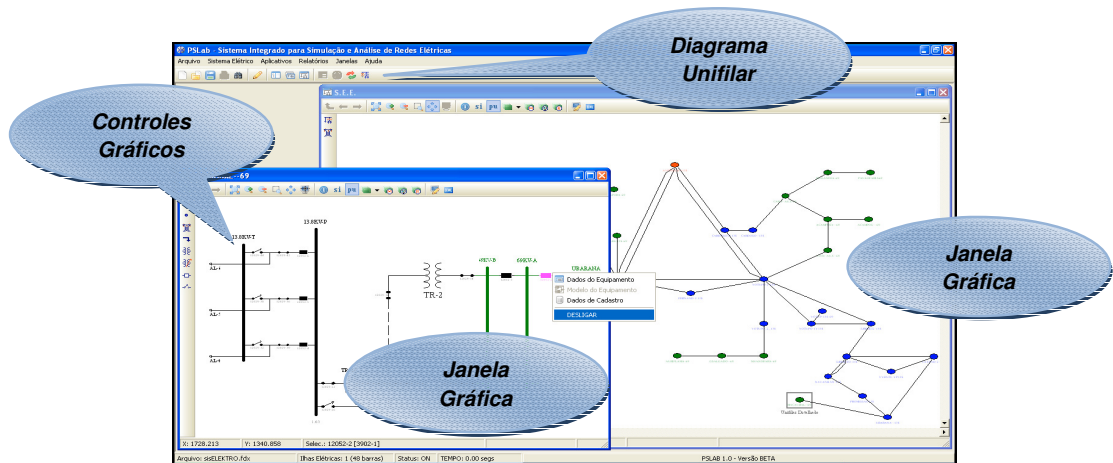


Figura 4.11 – Visualização dos dados em Formato Gráfico.

4.4. Visualização das Ilhas Elétricas Conexas

A visualização dos dados da rede elétrica pelas ilhas elétricas permite a visualização e o gerenciamento dos dados do sistema restringindo por cada subestação, concessionária, ou seja, possibilita uma definição por tipo de ilha, para chegar ao nível de detalhamento requerido.



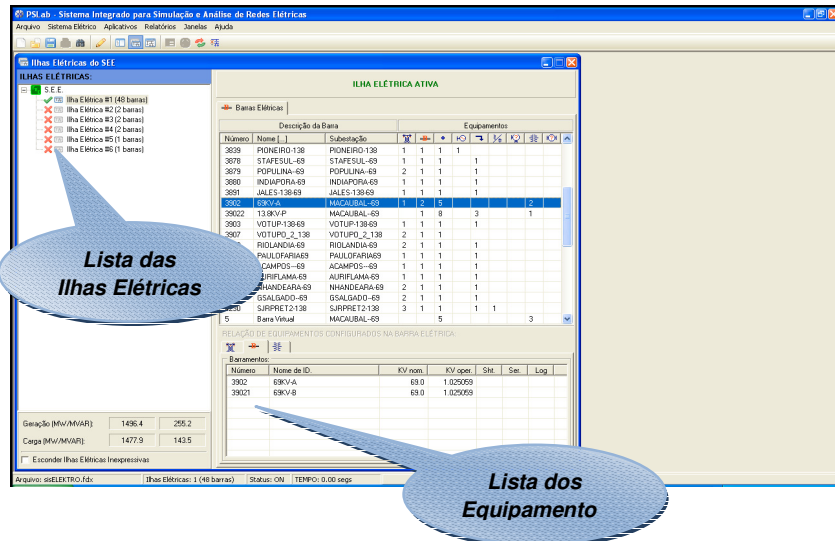


Figura 4.12 – Visualização das Ilhas Elétricas Conexas.

4.5. Estimação de Estados

4.5.1. Fluxo de Potências

A análise de fluxo de potência é a ferramenta utilizada frequentemente em estudos envolvendo sistemas elétricos de potência. Sua solução consiste basicamente no cálculo das tensões nodais, em módulo e ângulo, e dos fluxos de potência (ativa e reativa) em sistemas de transmissão, mais especificamente nos elementos da rede, para uma dada condição de carga e geração. Este tipo de estudo é muito importante para, por exemplo, verificar a proximidade das condições-limite durante a operação. Supondo um sistema equilibrado (logo, só se usa a rede em seqüência positiva). O modelo matemático do fluxo de potência é representado por: sistemas de equações lineares, conjunto de inequações para representar as restrições, conjunto de equações/inequações para representar o controle. Para resolver estes sistemas de equações, é necessário um grande esforço computacional. Esse módulo define o tipo de inicialização a ser constituído na simulação, como: Método Deasacoplado Rápido, Método de Newton-Raphson, Método Linearizado. E ainda permite definir parâmetros, tais como: Escolha da tolerância a ser assumida para cada tipo de estudo, os

tipos de níveis de controle desejáveis demonstrando o número de iterações realizadas, o limite destas iterações.



Figura 4.13– Visualização da Tela do Fluxo de Potência.

4.6. Tipos de Simulação

4.6.1. Simulação Rápida (FastSim)

A utilização da simulação rápida (FastSim) tem como premissa uma característica de possibilitar simulações para sistemas com perturbações menos agressivas, permitindo a obtenção de resultados à estas simulações um pouco mais simplificados. Sem considerar alguns parâmetros que farão parte da simulação Completa.

Os modelos estáticos representam as características da carga num dado instante através das equações de tensão na barra e frequência no mesmo instante, separando a potência ativa da potência reativa.

No presente trabalho, como se tem a intenção de fazer uma análise mais abrangente e com um nível de detalhamento maior, optou-se pela utilização da simulação completa, que será descrita no item a seguir.

Simulação Rápida no Tempo

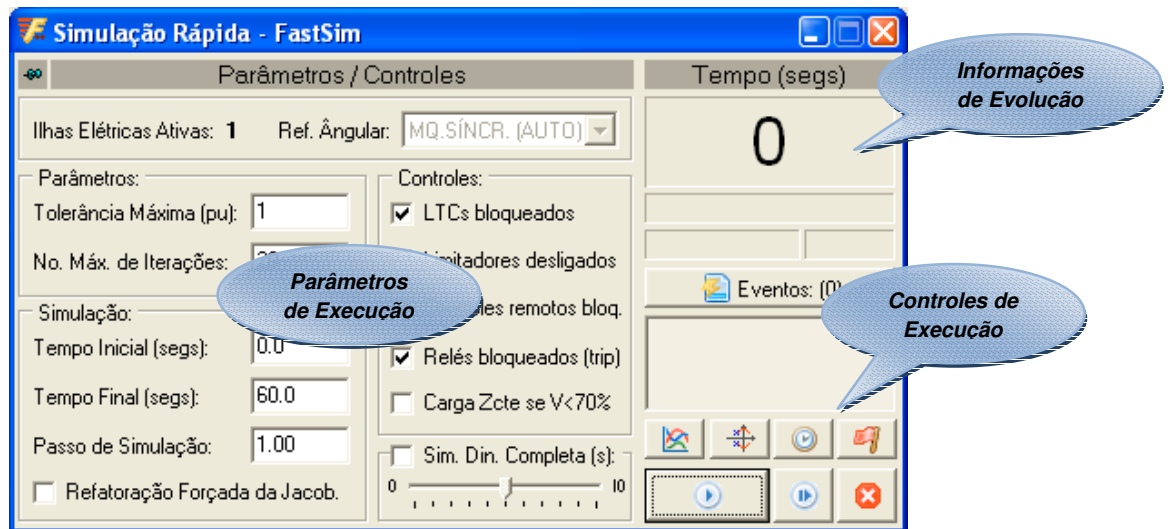


Figura 4.14 – Visualização das Ilhas Elétricas Conexas.

4.6.2. Simulação Completa (Métodos Simultâneo e Alternado)

Por existirem metodologias utilizadas para simulação completa no tempo, há certas limitações inerentes aos programas que podem fornecer informações nem sempre confiáveis. Sendo assim, com o objetivo de retratar melhor as reais condições operacionais e a ação dos equipamentos de controle e proteção, este tipo de simulação tem como função a análise da estabilidade transitória, possibilitando uma abrangência gráfica de alguns fatores como: a derivada direcional, a frequência e uma visualização gráfica de várias

máquinas (geradores). Possibilitando uma melhor visualização de qual será aquela máquina que sofre a contingência e não retorna o seu estado de equilíbrio, ou seja, permanece instável mediante a uma falta.

Simulação Completa no Tempo

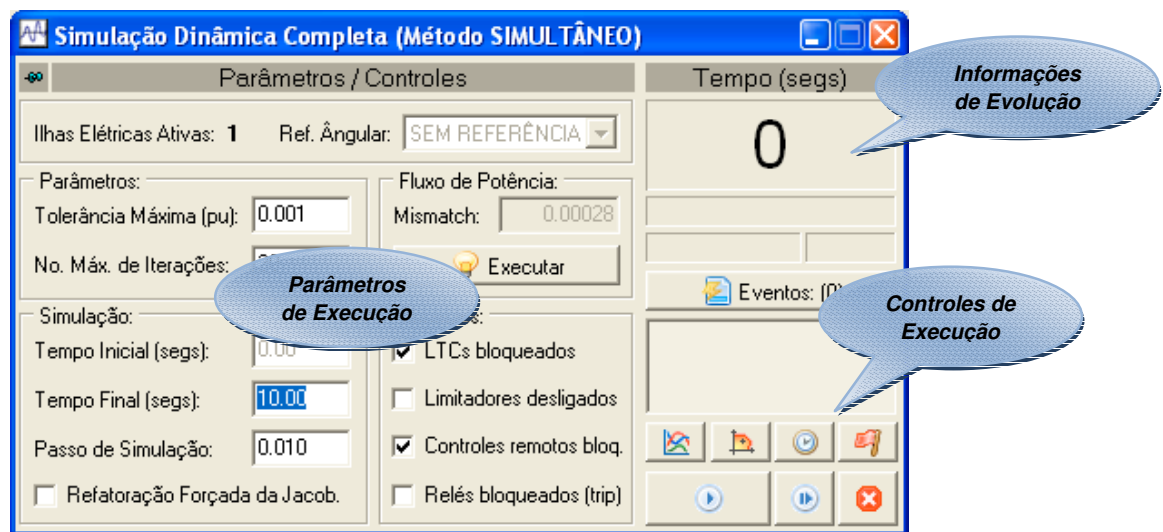


Figura 4.15 – Visualização das Ilhas Elétricas Conexas.

4.7. Configuração da Rede

Esta visualização permite a geração de relatórios restringindo a saída dos resultados de duas maneiras: por áreas ou por empresas, demonstrando as características da rede através dos equipamentos.

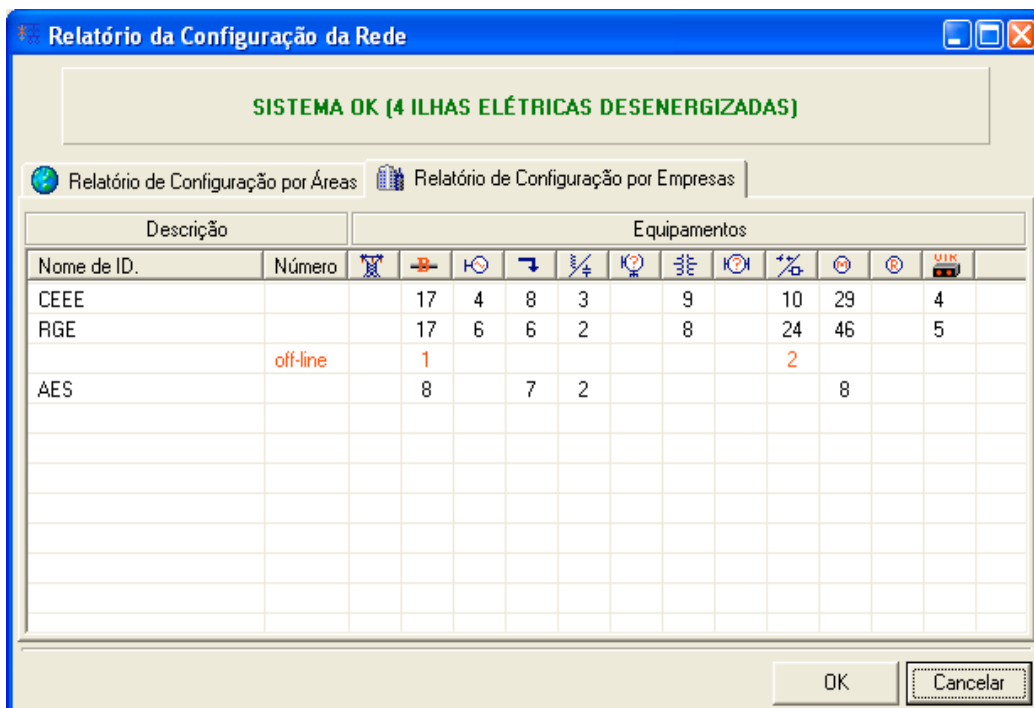


Figura 4.16 – Visualização das Ilhas Elétricas Conexas.

4.8.Registro de Eventos

Este relatório demonstra a configuração do tipo de curto que poderá ser simulado. Com a inserção do tempo de aplicação e de remoção do curto, identificando em qual das barras do sistema houve a falta.

Tempo (secs)	Equipamento	Nome de ID.	Subestação / Área	Evento
1.0000	BARRA	407	ITAUBA	APLICADO CURTO-CIRCUITO EM BARRA
1.1000	BARRA	407	ITAUBA	REMOVIDO CURTO-CIRCUITO DE BARRA

Selecionar Relés de Proteção

Figura 4.17 – Visualização das Ilhas Elétricas Conexas.

4.9.Registradores Gráficos

Esta visualização estabelece uma análise bem peculiar das diversas máquinas ligadas ao sistema, através da visualização gráfica do ângulo dos geradores versus tempo.

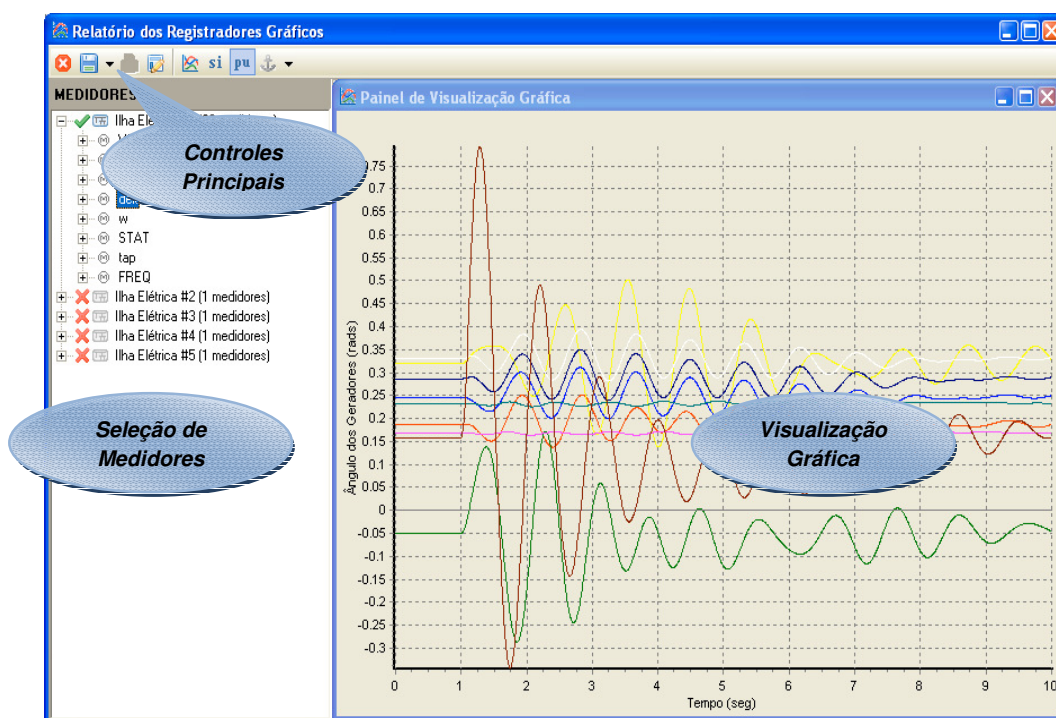


Figura 4.18 – Visualização das Ilhas Elétricas Conexas.

5. Análise das Simulações da Rede Elétrica utilizando o PS-Lab.

Neste capítulo deseja-se analisar os casos de simulações já mencionados (9 barras e 45 barras), com a finalidade, de permitir com o uso da ferramenta (PS-Lab), encontrar resultados satisfatórios com base em casos já pré-determinados para este estudo de estabilidade transitória.

Nos casos de grandes perturbações, a estabilidade de tensão requer uma análise onde o comportamento do sistema pode, em um período de tempo determinado, registrar a interação dos equipamentos de dinâmica rápida, como: Estabilizadores de sistema, reguladores de tensão, etc. E dos equipamentos lentos do sistema, como: Limitadores de corrente de campo dos geradores, comutadores de tapes sob carga.

Para os sistemas que serão analisados, poderão ter três tipos de barras dentro destes dois casos que serão estudados: Barras do tipo swing (barra slack, ou flutuante); Barras de Carga, ou também chamadas de barra PQ; E, por último, a barra do tipo PV (barra de tensão controlada). Na primeira, as variáveis de entrada são: a tensão (V_k), e o ângulo (θ_k), e as variáveis calculadas são as potências ativa (P_k) e reativa (Q_k). Já nas barras PQ, as variáveis de entrada são a potência ativa (P_k) e a potência reativa (Q_k), e as variáveis calculadas são (V_k) e o ângulo (θ_k), e por fim nas barras de tensão controlada, as variáveis de entrada são a potência ativa (P_k) e a tensão (V_k), e as variáveis calculadas são (Q_k) e (θ_k).

A primeira parte das simulações ocorreu para o caso de 9 (nove) barras. Onde se pode observar o diagrama unifilar composto com as barras mencionadas anteriormente. Este Unifilar é representado barramentos de subestações e por UG's – Unidades Geradoras.

5.1. Estudo de Casos: 9 Barras

Primeiramente a simulação foi realizada para o caso de 9 (nove) barras, abaixo na tabela 2.3 seguem em quais subestações será aplicado o curto monofásico. Em seguida, segue uma representação do diagrama gráfico (ver Figura 5.19), este é um dos modos de visualização referentes ao programa PS-Lab. Nas Unidades Geradoras, há a presença de duas barras: uma barra na saída do gerador e a segunda barra ligando o transformador à rede.

Tabela 2.3 - Contingências a serem analisadas para o caso de 9 barras.

Aplicação do Curto-Circuito		Tempo (ms)
UG1	-	100
UG1	SE 8	150
UG1	SE 8	200

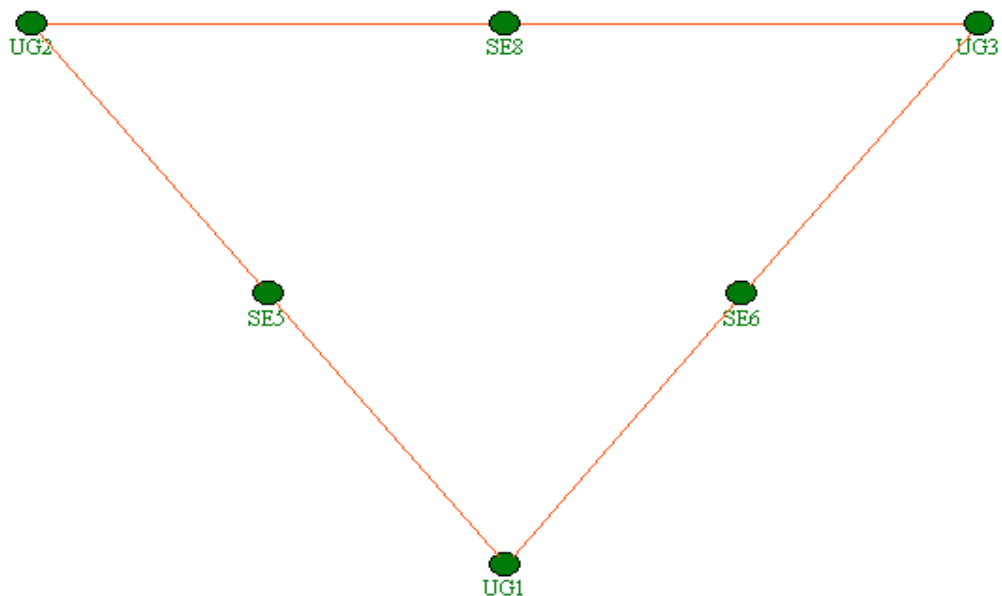
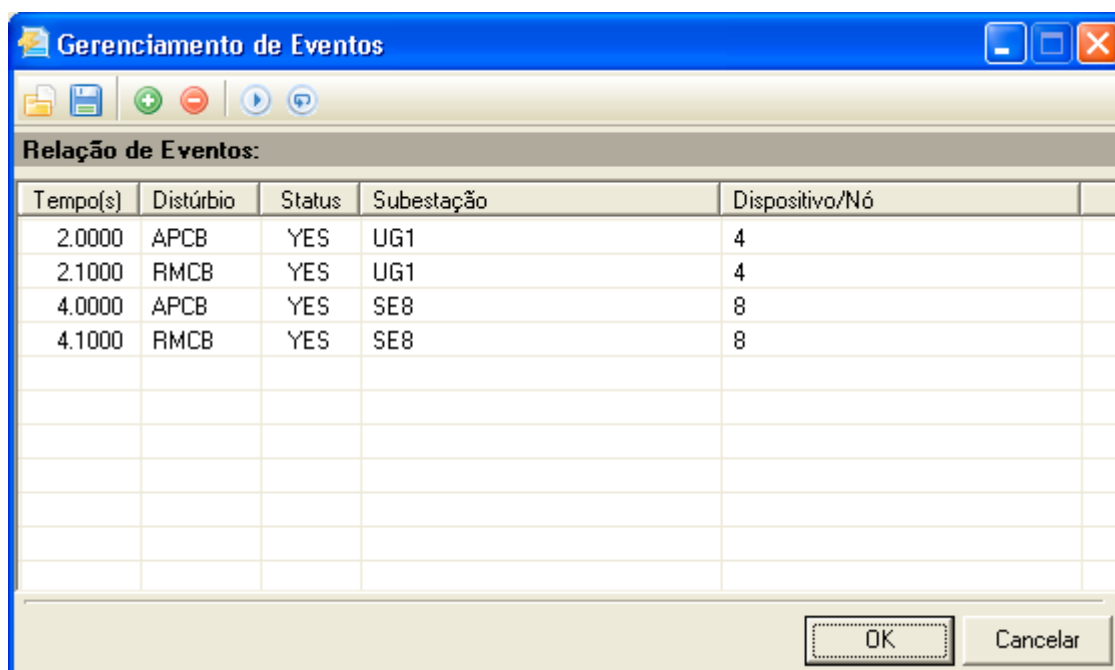


Figura 5.19 – Diagrama Gráfico utilizado no caso 9 barras.

O primeiro Caso estudado se compõe de curto-circuito na barra 1 da Unidade Geradora 1 – UG1. A aplicação do curto-circuito foi realizada com o tempo total de 100ms. Na Figura 5.22 é possível observar que o sistema é instável. Abaixo segue a visualização do modo de gerenciamento de eventos, onde foi permitido entrar com o tempo de aplicação dos eventos e o tempo de remoção dos eventos e, ainda definir em que ponto do sistema foi aplicado à falta.



The screenshot shows a software window titled "Gerenciamento de Eventos". It contains a table with the following data:

Tempo(s)	Distúrbio	Status	Subestação	Dispositivo/Nó
2.0000	APCB	YES	UG1	4
2.1000	RMCB	YES	UG1	4
4.0000	APCB	YES	SE8	8
4.1000	RMCB	YES	SE8	8

At the bottom of the window, there are "OK" and "Cancelar" buttons.

Figura 5.20 – Visualização do gerenciamento de eventos para UG 1.



Figura 5.21 – Quadro com a simulação Dinâmica – Barra 1 da UG 1

Visualização da Simulação para caso na UG1, sendo o sistema instável. Este gráfico é composto por uma análise da Derivada Direcional da Energia Potencial

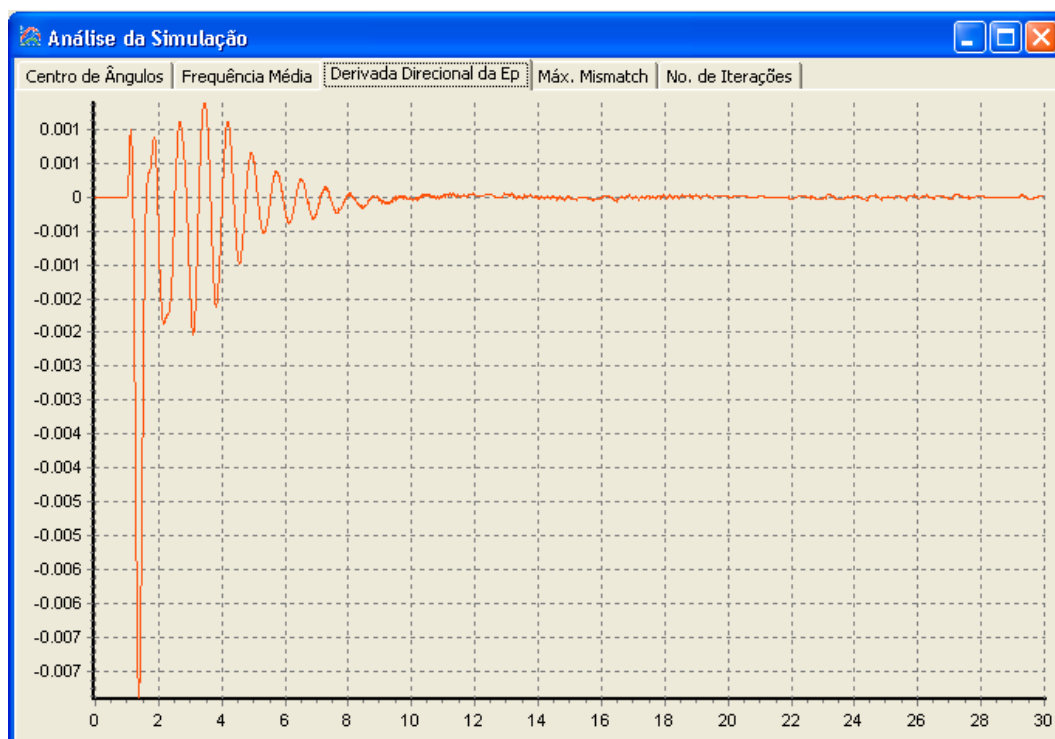


Figura 5.22 – Quadro com a simulação Dinâmica.

O segundo caso estudado se compõe de curto-circuito na barra 1 da Unidade Geradora 1 – UG1 e curto-circuito na SE 8. A aplicação do curto-circuito foi realizada com o tempo total de 150ms. É possível observar que o sistema é estável através da Figura 5.24. Abaixo segue a visualização do quadro com a visualização da simulação dinâmica completa.

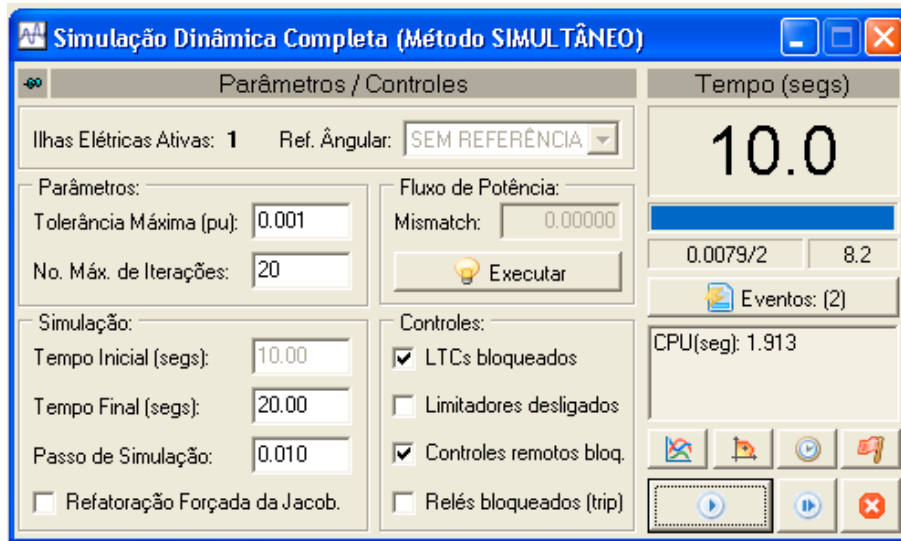


Figura 5.23 – Simulação Dinâmica Completa no tempo.

Visualização da Simulação para UG1 e SE8, sendo o sistema estável. Este gráfico é composto por uma análise da Derivada Direcional da Energia Potencial

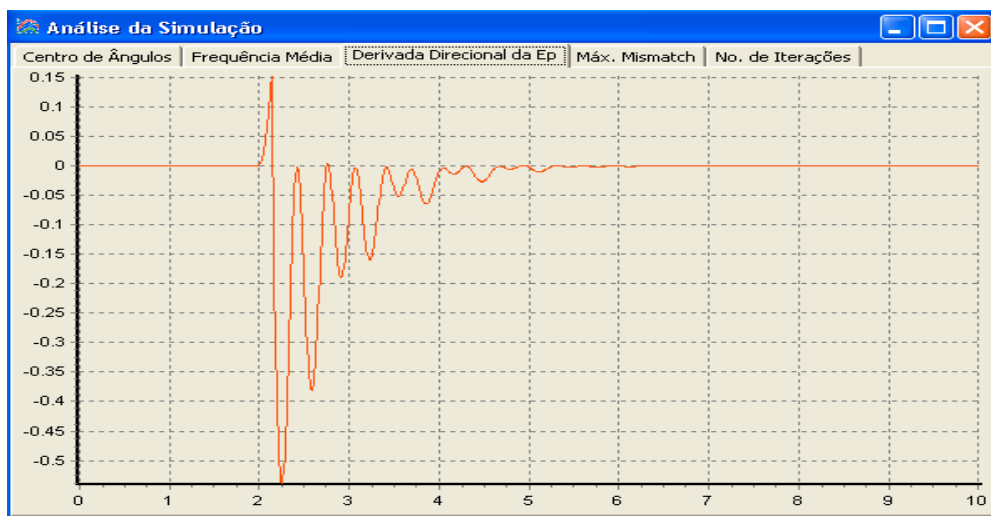


Figura 5.24 – Quadro com a simulação Dinâmica.

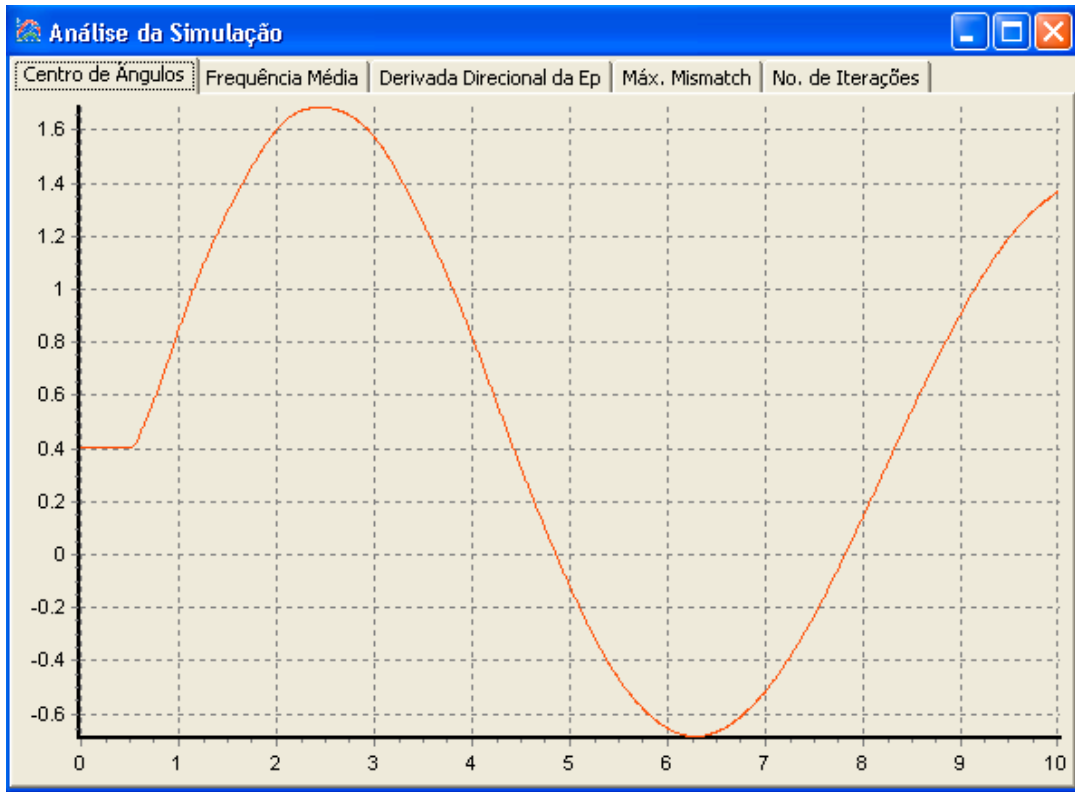


Figura 5. 25 – Quadro com o ângulo demonstrando a estabilidade

O Terceiro caso estudado se compõe de curto-circuito na barra 1 da Unidade Geradora 1 – UG1 e curto-circuito na SE 8. A aplicação do curto-circuito foi realizada com o tempo total de 200ms. É possível observar que o sistema é instável através da Figura 5.26. Abaixo segue a visualização do quadro com a visualização da simulação dinâmica completa.



Figura 5.26 – Simulação Dinâmica Completa no tempo.

Visualização da Simulação para UG1 e SE8, sendo o sistema instável. Este gráfico é composto por uma análise da Derivada Direcional da Energia Potencial

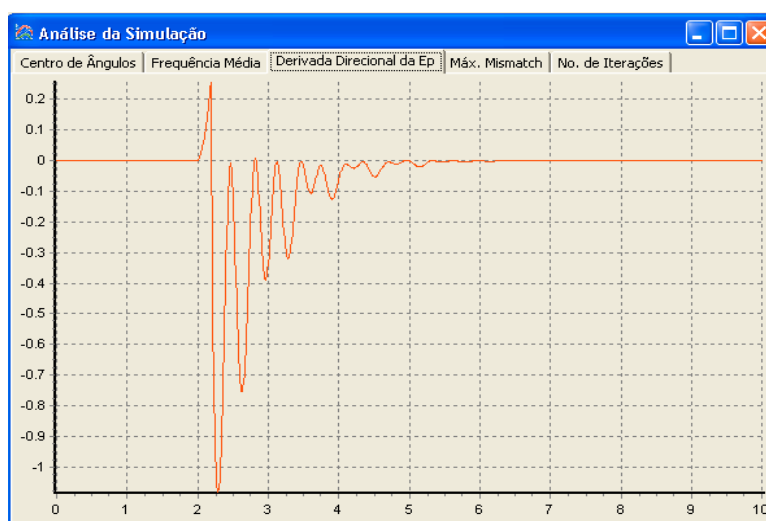


Figura 5.27 – Quadro com a simulação Dinâmica.

5.2. Estudo de Casos: 45 Barras

derivada direcional da Energia Potencial em nenhum momento ultrapassa o eixo, tornando-se positiva e, conseqüentemente estável. Abaixo segue a visualização do quadro com a visualização da simulação dinâmica completa:

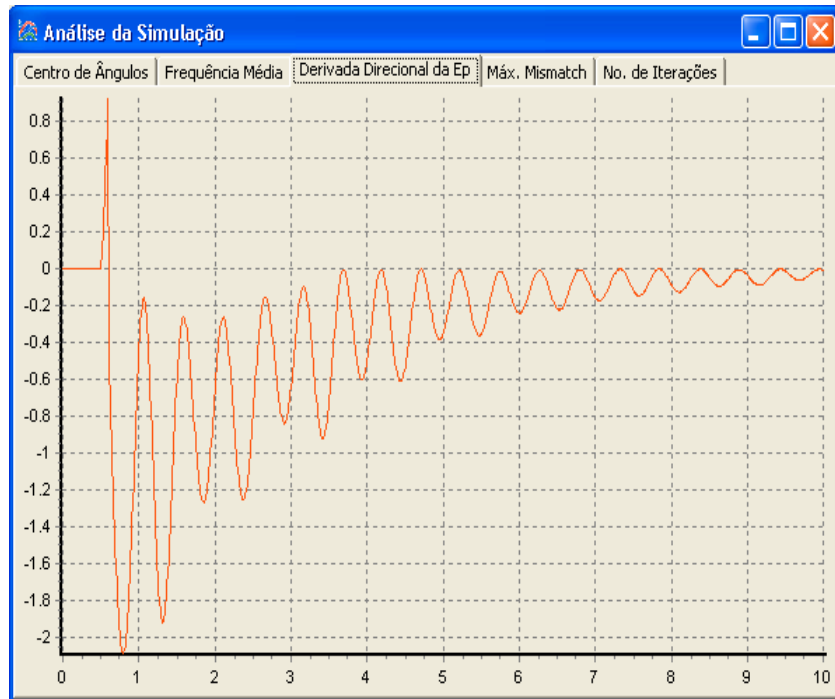


Figura 5.28 - Gráfico da Derivada direcional.

Em seguida foi simulado um curto-circuito na barra 374, tendo como barra de origem a Xanxere 230kV e como barra de destino S.Osório. É possível observar que o sistema é instável através da Figura 5.30. Pois pela análise gráfica, a derivada direcional da Energia Potencial em nenhum momento ultrapassa o eixo, tornando-se positiva e, conseqüentemente estável. Abaixo segue a visualização do quadro com a visualização da simulação dinâmica completa:



Figura 5.29 – Quadro com a simulação Dinâmica – no momento exato da detecção da instabilidade.

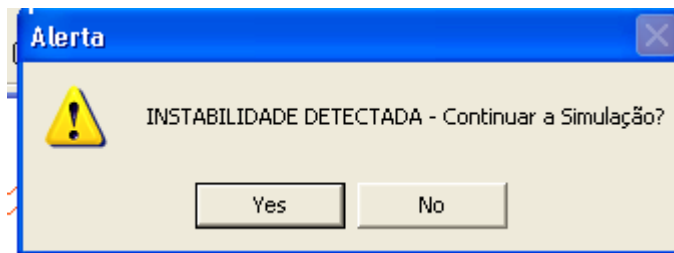


Figura 5.30 – Quadro com mensagem da detecção de instabilidade

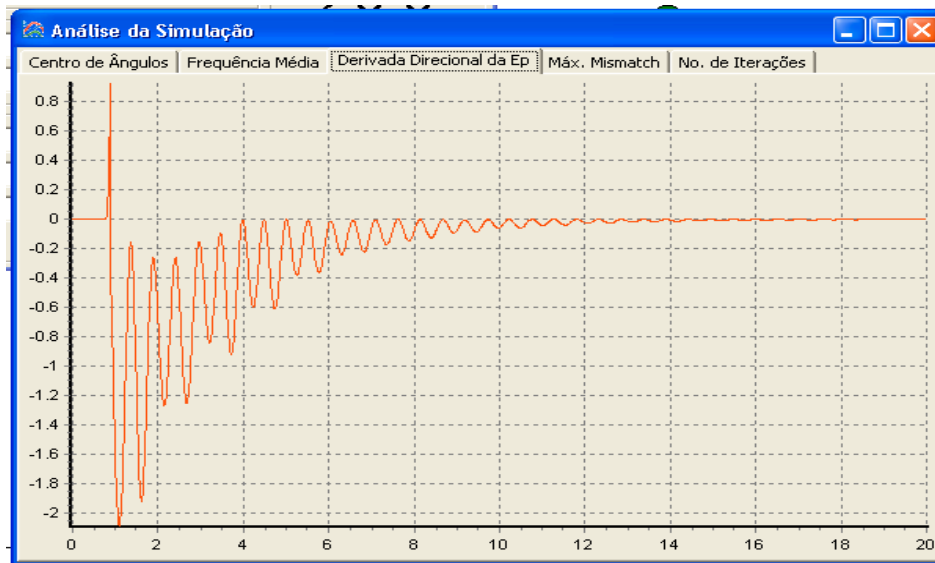


Figura 5.31 - Gráfico da Derivada direcional.

Neste item foi realizado um curto-circuito na barra 374, tendo como barra de origem Pato Branco 230kV e como barra de destino S.Osório. É possível observar que o sistema é instável através da Figura 5.31. Pois pela análise gráfica, a derivada direcional da Energia Potencial em nenhum momento ultrapassa o eixo, tornando-se positiva e, conseqüentemente estável. Abaixo segue a visualização do quadro com a visualização da simulação dinâmica completa:

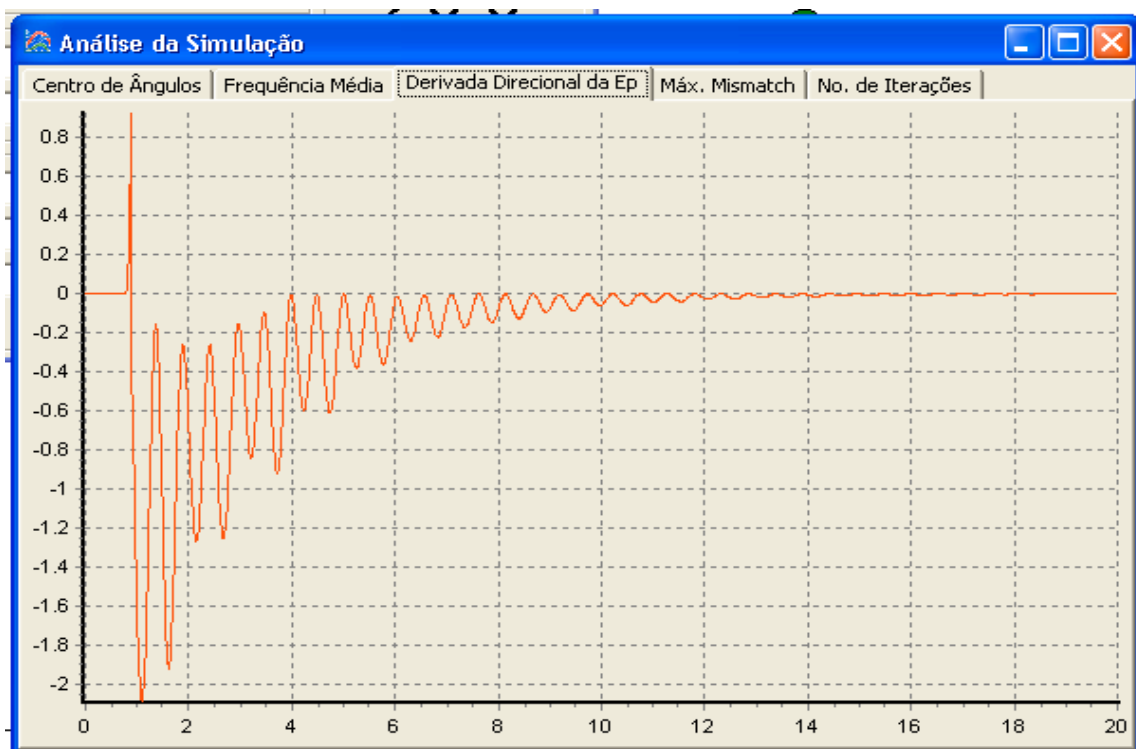


Figura 5.32 - Gráfico da Derivada direcional.

Posteriormente, foi simulado um curto-circuito na barra 382, tendo como barra de origem 382 Areia e como barra de destino Curitiba 383. É possível observar que o sistema é estável através da Figura 5.32. Pois pela análise gráfica, a derivada direcional da Energia Potencial ultrapassa o eixo em questão. Abaixo segue quadro com a visualização da simulação dinâmica completa:

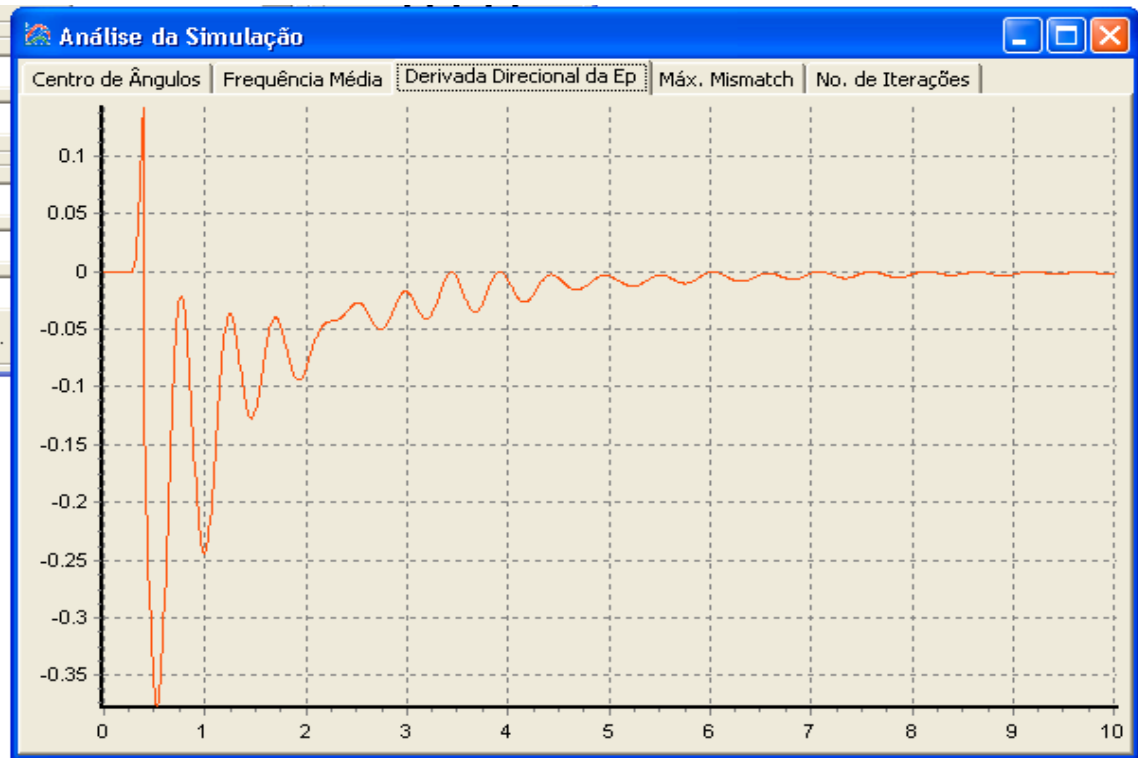


Figura 5.33 - Gráfico da Derivada direcional.

Neste item foi realizado um curto-circuito na barra 386, tendo como barra de origem Barracão 386 e como barra de destino Gravataí 387. Na Figura 5.33 é perceptível que o sistema pode ser considerado instável. Pois pela análise gráfica, a derivada direcional da Energia Potencial em nenhum momento ultrapassa o eixo, tornando-se positiva e, conseqüentemente estável. Abaixo segue a visualização do quadro com a visualização da simulação dinâmica completa:

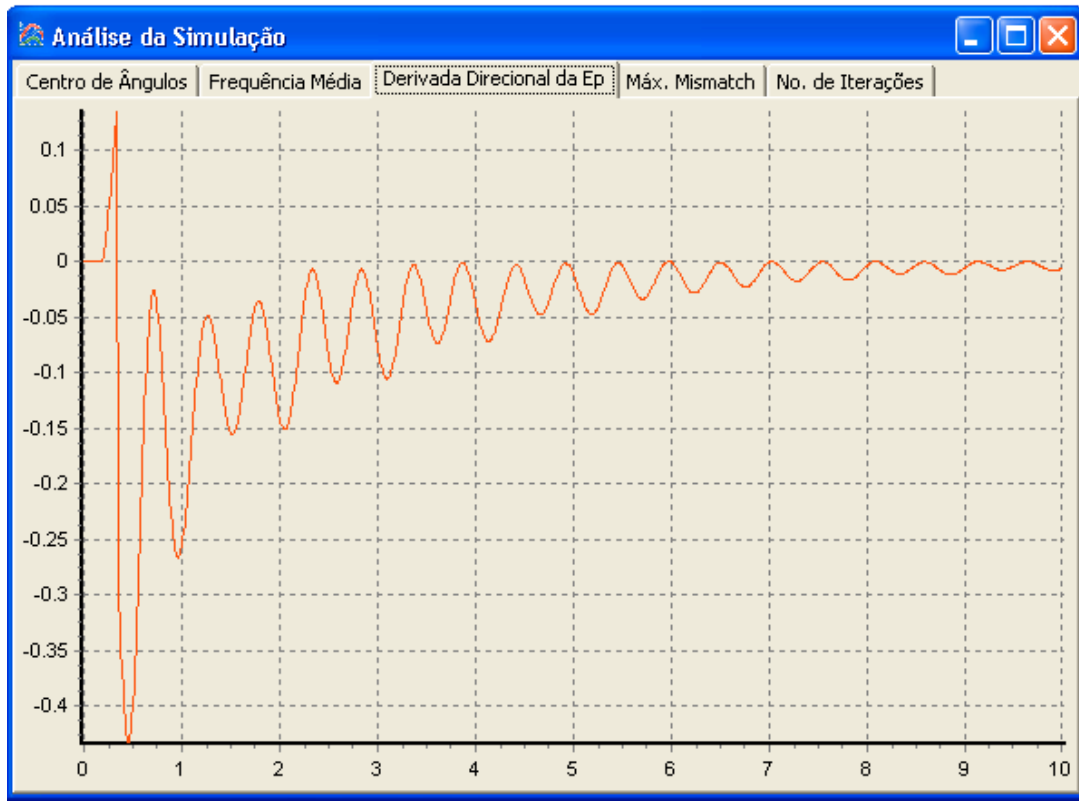


Figura 5.34- Gráfico da Derivada direcional.

Em seguida foi simulado um curto-circuito na barra 343, tendo como barra de origem 343 Ivaipora e como barra de destino Londrina – 344. É possível observar que o sistema é instável através da Figura 5.34. Pois pela análise gráfica, a derivada direcional da Energia Potencial em nenhum momento ultrapassa o eixo, tornando-se positiva e, conseqüentemente estável. Abaixo segue a visualização do quadro com a visualização da simulação dinâmica completa:

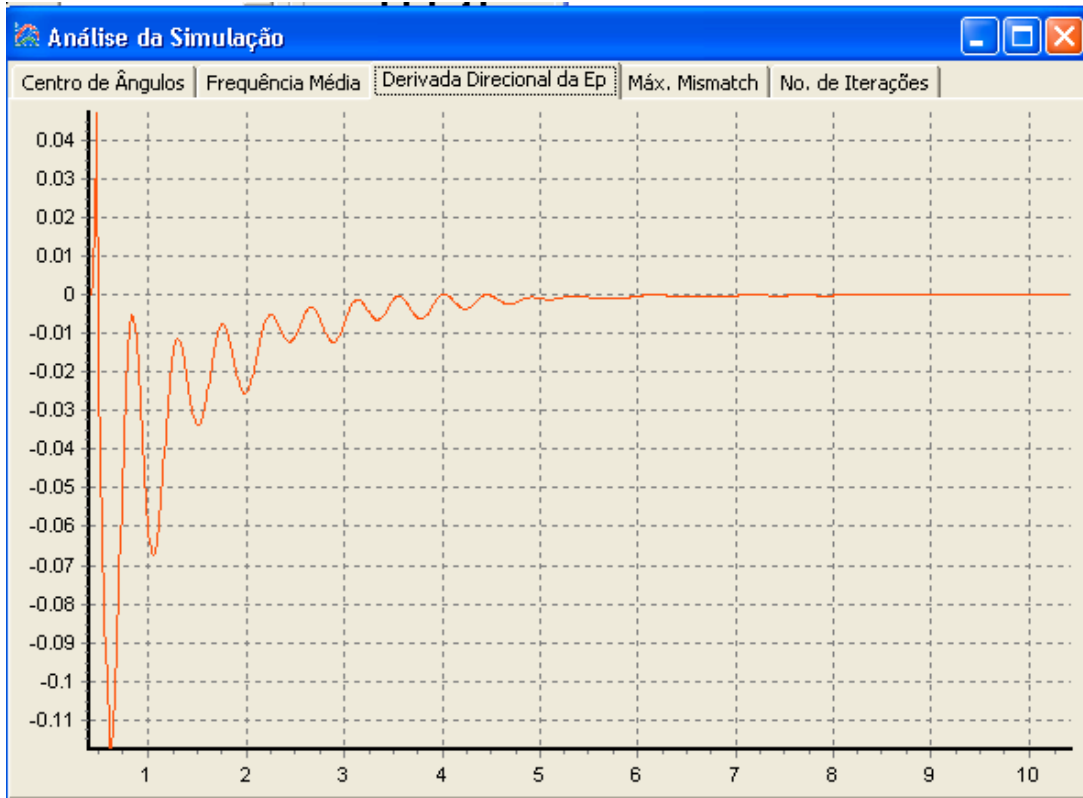


Figura 5.35 - Gráfico da Derivada direcional.

6. Conclusão

O intenso crescimento dos sistemas de potência tem trazido como consequência, a grande utilização de programas computacionais como suporte de estudos de uma maneira em geral. Este trabalho de fim de curso procurou atentar, portanto, que a utilização de programas computacionais se faz necessário e apresenta extrema relevância quando se trata de estabilidade transitória em sistemas de potência.

O Software PS-LAB demonstrou ser uma boa ferramenta para estudos de estabilidade transitória com a apresentação de resultados satisfatórios, porém tínhamos necessidade de executar tais casos para uma aferição do programa exposto.

Ao longo do desenvolvimento deste presente trabalho, verificou-se a implementação de casos, onde se buscava uma verificação das características do software PS-Lab utilizando o método de Superfícies de Limite de Energia Potenciais. Por esta razão, foram definidos casos onde a simulação pôde ser verificada de forma positiva. Principalmente em casos onde figurava erros nas simulações. Estas simulações, 9 barras e 45 barras, denotam que em alguns casos o software não trabalhou com eficiência, pois não demonstrou o instante que o sistema ultrapassa a zona limite de estabilidade podendo detectar a instabilidade do sistema.

Posteriormente, para uma possível continuação deste tema se sugere simulações com números maiores de barras para analisar e excluir os erros computacionais existentes no software.

7. Referências Bibliográficas

- [1] Mota, W. S., “*Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência*”, 2ª Edição, Editora EPIGRAF, Campina Grande, 2006.
- [2] ANEEL, “*Atlas da Energia Elétrica do Brasil*”, 2ª Edição, Brasília, 2005.
- [3] CBEE, “*Panorama da Energia Elétrica*”, site: www.eolica.org.br.
- [4] DECKER, I. C., “*Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas de Potência usando o Conceito de Superfície Limite de Energia Potencial*”, Tese de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1984.
- [5] Manzoni, Alessandro “*PSLab – Quick Reference*”, Rio de Janeiro, 2009.
- [6] Stevenson, W. D., Grainger, J., “*Elements of Power System Analysis*”, 4ª Edição, Mc Gran Hill, 1982.
- [7] ATHAY, T., Podmore., R., Virmani, S., “*A practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability*”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-98, n° 2, pp. 573 – 584, March – April,1979.
- [8] Sousa, A., “*Avaliação da Segurança Dinâmica usando Modelos Detalhados e Processamento Distribuído*”, Tese de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 1999.
- [9] Manzoni, A., “*Desenvolvimento de um Módulo Dinâmico para Simuladores de Ensaio e Treinamento em Sistemas de Energia Elétrica usando programação orientada a objetos*”, Tese de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1996.

[10] FONSECA, L. G. S., DECKER, I. C. "*Iterative Algorithm for Critical Energy Determination in Transient Stability of Power System*", Proceedings of the IFAC Symposium Planning & Operation in Electric Energy Systems, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, pp. 483 - 489, July 1985.