

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

1210001126



Nº 38

ANÁLISE DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA
ATRAVÉS DE UM MÉTODO HÍBRIDO
ALUNO: EDUARDO FALCÃO DENIS
ORIENTADOR: ANTONIO PADILHA FELTRIN

Te.1126

unesp



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

ANÁLISE DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA ATRAVÉS
DE UM MÉTODO HÍBRIDO

EDUARDO FALCÃO DENIS

1210001126



Proc. 17/2000 NKD 02/2000

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCNICO DE DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
<i>24/01/2000</i>	<i>31/3/2000</i>
REGISTRADO POR	TOMBO
<i>Lelia</i>	<i>1.126</i>
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
<i>Doacao R\$ 10,00</i>	<i>D 395a</i>

Orientador:

Antonio Padilha Feltrin

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira / FEIS / UNESP como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA**.

3040400 - sistemas elétricos de Potência

Ilha Solteira, outubro de 1999

“Análise da Estabilidade Transitória Através de um Método Híbrido”

Eduardo Falcão Denis

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA (ME).

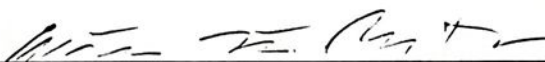


Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi - Coordenador

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin - orientador



Prof. Dr. Wellington Santos Mota



Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi

Ilha Solteira – SP, outubro de 1999

A Deus pois sem ele nada seria possível.



AGRADECIMENTOS

- A minha família pelo incentivo desde o começo deste trabalho;
- Ao professor Antonio Padilha Feltrin pela orientação, dedicação e estímulo;
- Aos professores Carlos Roberto Minussi e José Roberto Sanches Mantovani que não mediram esforços para me auxiliar;
- A todos os outros professores que de uma forma direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho;
- Aos funcionários Deoclecio Mitsuiti Kosaka e Carlos Alex Sander J. Gulo;
- A todos os outros funcionários do DEE (Departamento de Engenharia Elétrica) da FEIS (Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira);
- Aos funcionários da Seção de pós-graduação;
- Ao amigo Alessandro Ruiz Basso pela colaboração no trabalho;
- A todos os colegas do curso de pós-graduação;
- À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro.

RESUMO

Neste trabalho, desenvolve-se um programa que calcula soluções para a estabilidade transitória. Este problema é um dos que requer mais esforços computacionais na análise de sistemas de energia elétrica. Atualmente a simulação, através de integração numérica, é a melhor ferramenta disponível, por permitir a representação de modelos mais abrangentes e fornecer resultados confiáveis. As limitações ficam por conta do tempo computacional envolvido, e pela ausência de resultados que informem o grau de estabilidade ou instabilidade. Por outro lado, os métodos diretos de resolução, que exigem menor custo computacional, ainda não se mostraram amplamente aplicáveis e confiáveis. O melhor caminho parece ser através da utilização de soluções híbridas, em que um método direto é incorporado em um programa de simulação passo a passo. Este trabalho concentra esforços em uma solução híbrida, apresentando uma maneira de classificar as diferentes contingências que podem ocorrer no sistema. Como forma de ilustrar a metodologia utilizada, apresentam-se resultados considerando sistemas de energia elétrica compostos por 6, 9, 11 e 68 barras.

ABSTRACT

In this work, it is developed a program to calculate solutions for transient stability. In electrical power systems analysis, this issue is one of those which requires more computational efforts. Currently, step-by-step simulation is the best available tool for allowing the representation of more embraced models and providing reliable results. The limitations consist on the computational time involved and by the absence of results that inform the stability/instability level. On the other hand, direct methods of resolution demand less computational effort and didn't show ample reliability and applicability yet. The best method seems to be using hybrid solutions, where a direct method is incorporated in a simulation program. This work concentrates efforts on a hybrid solution, presenting a way for contingency ranking in dynamic security analysis. As a procedure to illustrate the adopted methodology, the results are given considering electrical power systems composed by 6, 9, 11 and 68 buses.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	1
------------------	---

CAPÍTULO II

ESTUDO DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

2.1 – INTRODUÇÃO	3
2.2 - EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO.....	4
2.3-MODELOS DE COMPONENTES	10
2.3.1 - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO	11
2.3.2 – MODELAGEM DOS TRANSFORMADORES	11
2.3.3 - REPRESENTAÇÃO DAS CARGAS	12
2.3.3.1 - IMPEDÂNCIA CONSTANTE	12
2.3.3.2 - CORRENTE CONSTANTE	13
2.3.3.3 - POTÊNCIA CONSTANTE.....	13
2.3.4 - REPRESENTAÇÃO DOS GERADORES.....	14
2.3.4.1 – EQUAÇÕES RESULTANTES DO MODELO CLÁSSICO	14

CAPÍTULO III

RESOLUÇÃO DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA UTILIZANDO UMA SOLUÇÃO HÍBRIDA

3.1 - INTRODUÇÃO	16
------------------------	----



3.2 – SOLUÇÃO VIA SIMULAÇÃO PASSO A PASSO	17
3.2.1 - MÉTODO TRAPEZOIDAL DE INTEGRAÇÃO.....	19
3.3 – SOLUÇÃO VIA MÉTODO DIRETO	21
3.3.1 – ENERGIAS CINÉTICA E POTENCIAL DAS MÁQUINAS INDIVIDUAIS	23
3.3.2 – MÉTODO DE OBTENÇÃO DA MÁQUINA CRÍTICA.....	25
3.3.3 - MÉTODO DA OBTENÇÃO DE MARGEM DE ESTABILIDADE	26
3.3.3.1 – SITUAÇÃO ESTÁVEL.....	27
3.3.3.2 – SITUAÇÃO INSTÁVEL.....	30
3.4 – SOLUÇÃO HÍBRIDA	35

CAPÍTULO IV

RESULTADOS OBTIDOS PARA A ANÁLISE DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA ATRAVÉS DE UM MÉTODO HÍBRIDO

4.1 – INTRODUÇÃO	38
4.2 – RESULTADOS	38

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO	56
-----------------	----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
---------------------------------	----



ANEXO A

DADOS DO SISTEMA DA REFERÊNCIA [02]

(68 BARRAS E 16 GERADORES)



CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Este trabalho trata de análise de estabilidade transitória de Sistemas de Energia Elétrica de Potência, ou seja, da capacidade que os rotores das máquinas elétricas possuem de continuar ou não em sincronismo (mesma rotação) após a ocorrência de perturbações (caracterizadas por um defeito do tipo curto-circuito, desligamento de linhas de transmissão, perda de geração, ou a combinação destes eventos).

No cálculo foi utilizado uma solução híbrida no qual um método direto foi incorporado em um programa de simulação passo a passo, sendo o modelo clássico adotado para a representação dos geradores.

O programa realizado encontra o gerador mais sensível ao defeito e, através desse gerador denominado de máquina crítica, calculam-se margens de estabilidade de sistemas reais e fictícios, que indicam índices de estabilidade ou instabilidade após a ocorrência de uma perturbação.

Essa metodologia de analisar o sistema, levando em conta somente a máquina crítica, mostrou-se eficiente e também requer menor esforço computacional, pois não é necessário realizar a simulação por longo período após a eliminação da falta.

O trabalho está dividido da seguinte forma:

- No capítulo II descrevem-se, de uma forma geral, o estudo da estabilidade transitória em sistemas de energia elétrica, o conceito da estabilidade, como a estabilidade pode ser classificada e a modelagem do sistema para resolvê-lo matematicamente. São apresentados tópicos que mostram como se realizam as

modelagens das linhas de transmissão, cargas e geradores. Descreve-se a modelagem do sistema onde são gerados dois tipos de equações algébricas e diferenciais, e como fazer para resolver essas equações.

- O capítulo III é dedicado a mostrar como é realizado o programa híbrido, as metodologias adotadas para calcular a energia cinética, potencial, total e a margem de estabilidade. Um fluxograma simplificado descreve a lógica do programa.

- O capítulo IV é dedicado aos testes e resultados com sistemas fictícios e sistemas testes.

- O capítulo V dedica-se as conclusões gerais e sugestões para a melhoria do trabalho.



CAPÍTULO II

ESTUDO DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

2.1 – INTRODUÇÃO

Nas condições normais de operação (regime permanente) os rotores estão na velocidade síncrona e existe um balanceamento entre a potência elétrica e a potência mecânica. Na verdade, um sistema interligado com um grande número de máquinas dificilmente está em regime permanente, em consequência da variação das cargas, e pela ação corretora dos equipamentos de controle.

Em situações transitórias de operação, decorrentes de uma grande perturbação no sistema, o equilíbrio entre a potência elétrica gerada e a potência mecânica de entrada é rompido, principalmente nos geradores mais próximos eletricamente do defeito. Em consequência, os rotores das máquinas sofrerão diferentes acelerações, levando eventualmente algumas máquinas à perda de sincronismo com relação ao resto do sistema. Se o sistema conseguir amortecer as oscilações causadas pela perturbação, o sistema atingirá um novo estado de operação em regime permanente ou retornará ao mesmo ponto de trabalho. Deve-se salientar que as condições do defeito têm forte influência na estabilidade do sistema. Por exemplo, o sistema pode ser estável ou instável, dependendo do tempo de religamento de uma linha de transmissão, ou do tempo de extinção do curto-circuito. Se o sistema for instável, pelo menos a velocidade de uma máquina tende a se afastar das demais, ocasionado o seu posterior desligamento pelo sistema de proteção.

A análise de estabilidade transitória consiste na avaliação dos efeitos procedentes de perturbações que causam acelerações diferentes nas máquinas síncronas.



Esta análise pode ser realizada através das soluções das equações diferenciais não-lineares, que descrevem o comportamento do sistema – equação de oscilação da máquina síncrona – e, posteriormente, via análise da evolução da posição angular de cada máquina síncrona ao longo do tempo (simulação) ou através de métodos diretos em que a análise da estabilidade do sistema é efetuada sem resolver, de forma explícita, as equações diferenciais.

Para que um sistema de energia elétrica forneça energia com qualidade, um dos fatores que deve ser obedecido, é a permanência do sistema em operação o maior número de horas possível. No caso da ocorrência de uma perturbação, o efeito desta deve ser limitado pela proteção do sistema a uma menor região, possível para que o sistema continue operando com as outras máquinas que não perderam o sincronismo.

Sendo assim, torna-se necessário o conhecimento do comportamento do sistema de energia elétrica diante de várias situações, ou seja, durante sua operação normal, como também durante a ocorrência de uma perturbação e após a extinção da perturbação. O conhecimento do comportamento do sistema é necessário para que se possa operá-lo de maneira confiável e otimizada. Na presença de alguma perturbação, torna-se necessária a previsão do que vai acontecer com o sistema, para que se possa agir de forma eficiente, mantendo assim, o sistema operando de forma satisfatória.

2.2 - EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO

Considera-se um sistema de energia elétrica composto por n máquinas síncronas. Considerou-se, ainda, a unidade geradora i recebendo, por meio do eixo da turbina, uma potência mecânica P_{m_i} que produz uma potência elétrica de saída P_{e_i} a rede, através das barras. Se essas duas potências forem iguais (desprezando as perdas relativamente pequenas dos geradores), o gerador funcionará com velocidade síncrona e constante (funcionamento em equilíbrio). Se existir diferença entre estas potências, vai ocorrer:

- (a) mudança da energia cinética ou velocidade da máquina síncrona;
- (b) aparecimento do conjugado (potência) de amortecimento que é desenvolvido principalmente nos enrolamentos amortecedores.



Matematicamente, este fenômeno pode ser descrito da seguinte forma [04]:

$$\underline{Pm}_i - \underline{Pe}_i = \frac{d}{dt}(Wcin_i) + Pamort_i \quad (2.1)$$

sendo:

$\underline{Pm}_i$ = potência mecânica de entrada (MW);

$\underline{Pe}_i$ = potência elétrica de saída (MW);

$Wcin_i$ = energia cinética total do gerador dada em MWs ou MJ;

$Pamort_i$ = potência de amortecimento.

A energia cinética total do gerador varia com o quadrado da velocidade ou frequência, portanto, pode-se escrever [04]:

$$Wcin_i = \{f_i / f_0\}^2 Wcin_i^0 \quad (2.2)$$

sendo:

$Wcin_i^0$ = energia cinética medida na frequência nominal;

f_0 = frequência nominal do sistema (60 Hz);

f_i = frequência instantânea do gerador.

A frequência f_i pode ser expressa na seguinte forma:



$$f_i = f_0 + \Delta f_i \quad (2.3)$$

sendo:

Δf_i = variação da frequência instantânea em torno do valor nominal.

Levando-se a equação (2.3) na equação (2.2), obtém-se:

$$Wcin_i = \{(f_0 + \Delta f_i) / f_0\}^2 Wcin_i^0 \quad (2.4)$$

Esta equação pode ser expressa por [04]:

$$Wcin_i = \{1 + 2\Delta f_i / f_0 + (\Delta f_i / f_0)^2\} Wcin_i^0 \quad (2.5)$$

Considerando-se que a relação $(\Delta f_i / f_0)^2$ é muito pequena (desprezível), a equação (2.5) pode ser expressa por [04]:

$$Wcin_i \cong Wcin_i^0 + 2\{\Delta f_i / f_0\} Wcin_i^0 \quad (2.6)$$

Derivando-se $Wcin_i$ (equação (2.6)) com relação ao tempo, obtém-se:

$$\frac{d}{dt}\{Wcin_i\} \cong \{2 Wcin_i^0 / f_0\} \frac{d}{dt}\{\Delta f_i\} \quad (2.7)$$

A variação de frequência (Δf_i) pode ser relacionada com a variação do ângulo da máquina síncrona da seguinte forma [04]:

$$\Delta f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \{\Delta \delta_i\} \quad (2.8)$$

Levando-se (2.8) em (2.7) resulta em:

$$\frac{d}{dt} \{W_{cin_i}\} \cong \{2 W_{cin_i}^0 / 2\pi f_0\} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} \quad (2.9)$$

Levando-se a (2.9) em (2.1), obtém-se:

$$\underline{Pm_i} - \underline{Pe_i} = 2 W_{cin_i}^0 / 2\pi f_0 \left\} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + P_{amort_i} \quad (2.10)$$

Com os desvios da velocidade do rotor, em relação a velocidade síncrona, correntes serão induzidas nos enrolamentos amortecedores. O efeito destas correntes causa o aparecimento de conjugados que tendem a impedir os movimentos do rotor [04]. O valor do conjugado cresce com a velocidade relativa $d\delta_i/dt$, e embora não exatamente correto, pode-se admitir proporcionalidade entre conjugado (ou potência) e velocidade, ou seja [04]:

$$P_{amort_i} \cong D_i \frac{d\delta_i}{dt} \quad (\text{MW}) \quad (2.11)$$

sendo:

D_i = coeficiente de amortecimento.

Levando-se a expressão de P_{amort_i} (equação 2.11) na equação (2.10), obtém-se:

$$\underline{Pm_i} - \underline{Pe_i} = \{2 Wcin_i^0 / 2\pi f_0\} \frac{d^2\delta_i}{dt^2} + D_i \frac{d\delta_i}{dt} \quad (MW) \quad (2.12)$$

Sendo esta expressão a equação de oscilação da máquina síncrona. Todos os termos são medidos em MegaWatts. Dividindo-se pelo MVA base, tem-se uma equação de oscilação expressa em pu, conforme mostra-se a seguir. Dividindo-se a equação (2.10) por Pr_i (potência base), obtém-se [04]:

$$Pm_i - Pe_i = \frac{2}{2\pi f_0} \frac{Wcin_i^0}{Pr_i} \frac{d^2\delta_i}{dt^2} + d_i \frac{d\delta_i}{dt} \quad (pu)$$

ou

$$Pm_i - Pe_i = M_i \frac{d^2\delta_i}{dt^2} + d_i \frac{d\delta_i}{dt} \quad (pu) \quad (2.13)$$

sendo:

$$\dot{\omega} = \frac{d^2\delta_i}{dt^2}$$

Utilizando o modelo clássico para a representação dos geradores e desprezando o coeficiente de amortecimento ($d_i = 0$) a equação (2.13) fica como segue:

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_s}{2H_i} (Pm_i - Pe_i) \quad (2.14)$$



em que:

P_{m_i} = potência mecânica de entrada da i-ésima máquina síncrona em pu;

P_{e_i} = potência elétrica de saída da i-ésima máquina síncrona em pu;

$$M_i = \frac{2H_i}{2\pi f_0};$$

$$H_i = \frac{W_{CIN} i^0}{Pr_i} \text{ (constante de inércia [s])}$$

O ângulo pode ser obtido através da seguinte equação:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_s \quad (2.15)$$

sendo:

δ_i = ângulo do rotor da máquina i;

ω_i = velocidade instantânea da turbina;

$\omega_s = 2\pi f_0$ (velocidade síncrona).

A equação (2.13) descreve a dinâmica do sistema válida para pequenos e grandes desvios nos ângulos das máquinas síncronas.

Neste trabalho, não se considerou o efeito do regulador de velocidade das máquinas síncronas. Portanto, a potência mecânica permanecerá constante durante todo

o período de estudo. O seu valor é determinado por um estudo inicial de fluxo de potência.

Aplicando-se a fórmula trapezoidal de integração numérica às equações 2.14 e 2.15, que descrevem o comportamento dinâmico das partes girantes das máquinas síncronas, obtém-se as seguintes equações algébricas:

$$\omega(t) = -\frac{\omega_s \Delta t}{4H} P_e(t) + \omega(t - \Delta t) + \frac{\omega_s \Delta t}{4H} [2P_m - P_e(t - \Delta t)] \quad (2.16)$$

$$\delta(t) = \frac{\Delta t}{2} \omega(t) + \delta(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [\omega(t - \Delta t) - 2\omega_s] \quad (2.17)$$

em que:

Δt é o passo de integração.

Os ângulos dos geradores também podem ser obtidos com relação ao centro de inércia (δ_{coa}). O centro de inércia é definido como [11]:

$$\delta_{coa} = \frac{\sum_{i=1}^{n. de geradores} H(i) \cdot \delta(i)}{\sum_{i=1}^{n. de geradores} H(i)} \quad (2.18)$$

2.3-MODELOS DE COMPONENTES

Dependendo do objetivo da análise que se deseja fazer, os componentes podem ser modelados utilizando modelos com maior ou menor detalhamento.



2.3.1 - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

As linhas de transmissão são modeladas, segundo o modelo π equivalente, conforme representado na figura 2. 1

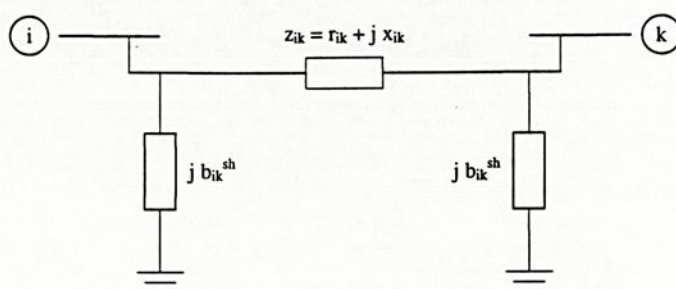


Figura 2.1 – Modelo π equivalente da linha de transmissão que liga o nó genérico “i” ao nó genérico “k”.

A admitância série da linha de transmissão é dada por:

$$y_{ik} = (z_{ik})^{-1} = (r_{ik} + j x_{ik})^{-1} = (r_{ik} / (r_{ik}^2 + x_{ik}^2)) - j (x_{ik} / (r_{ik}^2 + x_{ik}^2)) \quad (2.19)$$

Desta forma, representa-se a rede de transmissão através da matriz admitância Y . A matriz Y , quando as admitâncias mútuas são desconsideradas, é formada da seguinte maneira: na diagonal principal tem-se a soma de todas as admitâncias ligadas ao respectivo nó, e fora da diagonal, tem-se o negativo da admitância série que liga os nós correspondentes.

2.3.2 – MODELAGEM DOS TRANSFORMADORES

Os transformadores com o “tap” fixo em fase foram modelados pelo modelo π equivalente [09], como ilustrado na figura 2.2.

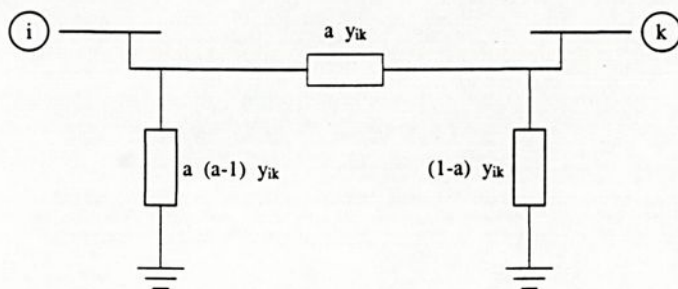


Figura 2.2 – Modelo π equivalente do transformador em fase que liga o nó genérico “i” ao nó genérico “k”.

sendo:

a = relação de transformação.

2.3.3 - REPRESENTAÇÃO DAS CARGAS

As cargas dos sistemas de energia elétrica podem ser modeladas através dos modelos de impedância constante, corrente constante ou potência constante, ou ainda, como uma combinação desses três modelos.

2.3.3.1 - IMPEDÂNCIA CONSTANTE

Neste modelo, a carga é descrita, segundo a referência [01], através de uma admitância constante para a terra da seguinte forma:

$$y_c = P_c^0 / |V_c^0|^2 - j(Q_c^0 / |V_c^0|^2) \quad (2.20)$$

Todos os dados necessários para o cálculo de y_c são obtidos através de um estudo inicial de fluxo de potência (caso base).

Através deste modelo, as cargas são representadas por admitâncias que são incluídas na diagonal principal da matriz Y.

2.3.3.2 - CORRENTE CONSTANTE

No modelo de corrente constante, a carga é representada através de uma fonte de corrente constante para a terra, cujo valor é calculado pela expressão [09]:

$$I_c^0 = ((P_c^0 + jQ_c^0) / V_c^0)^* \quad (2.21)$$

Semelhante a modelagem anterior, todos os dados necessários para o cálculo de I_c^0 têm origem num estudo inicial de fluxo de potência. Os valores das correntes de carga são incluídos nas respectivas posições do vetor I da equação:

$$I = Y V \quad (2.22)$$

2.3.3.3 - POTÊNCIA CONSTANTE

Neste caso, como o próprio título já diz, a potência é mantida constante, independente da tensão nodal. Com isso, a relação entre a corrente e a tensão da barra de carga passa a ser dada por:

$$I_c = ((P_c^0 + jQ_c^0) / V_c)^* \quad (2.23)$$

Isto faz com que ao utilizarmos o modelo de potência constante para representar as cargas do sistema, a equação (2.22) passa a exigir um processo iterativo de solução para que a corrente e a tensão nas barras de carga satisfaçam as equações (2.22) e (2.23).



2.3.4 - REPRESENTAÇÃO DOS GERADORES

Os geradores síncronos são modelados segundo [14], através de quatro modelos diferentes mas neste trabalho só será utilizado o primeiro modelo denominado modelo I.

Modelo I: Também conhecido como modelo clássico. Neste modelo, a magnitude do fluxo do campo magnético é mantida constante. São desprezadas todas as correntes de amortecimento e seus efeitos, bem como a saliência transitória da máquina síncrona. Este modelo requer a mínima quantidade de dados. Basicamente, fazem-se necessários a reatância transitória do eixo direto (x'_d) e a constante de inércia da máquina (H). O modelo clássico, devido a sua simplicidade, é usado para a análise da estabilidade transitória, ou seja, para a análise das primeiras oscilações da máquina síncrona após uma perturbação. Neste caso o modelo se mostra eficiente. Deve-se destacar que o modelo clássico é utilizado para análises que produzem resultados conservativos.

2.3.4.1 – EQUAÇÕES RESULTANTES DO MODELO CLÁSSICO

A representação dos geradores síncronos, através do modelo clássico [01], resume-se a uma fonte de tensão constante atrás da reatância transitória do eixo direto, como mostra a figura abaixo:

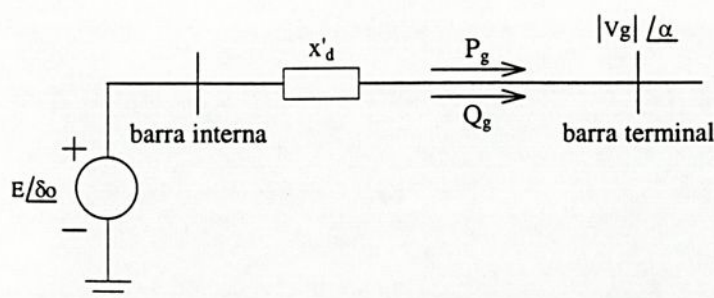


Figura 2.3 – Representação do gerador síncrono.

De acordo com a referência [01], a tensão interna da máquina síncrona foi calculada da seguinte maneira: primeiramente considerou-se a tensão da barra terminal com uma referência temporária como segue-se:

$$E \angle \delta' = (|V_g| + Q_g \cdot x' d / |V_g|) + j(P_g \cdot x' d / |V_g|) \quad (2.24)$$

sendo:

E = magnitude da tensão interna;

P_g = injeção de potência ativa na barra de geração;

Q_g = injeção de potência reativa na barra de geração;

V_g = tensão terminal da barra de geração;

α = ângulo da tensão terminal da barra de geração.

A forma de obtenção do ângulo real da tensão interna é descrita como mostrado a seguir:

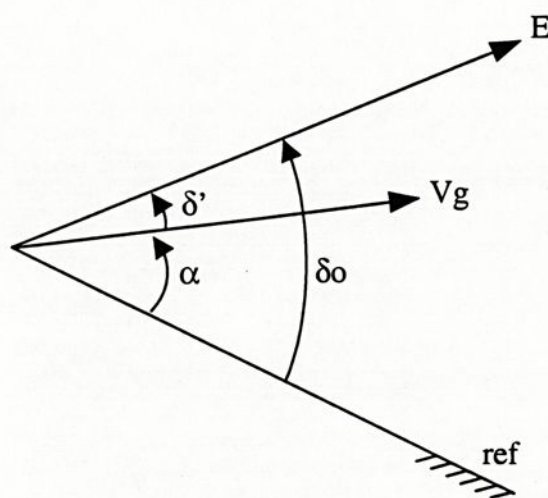


Figura 2.4 – Obtenção do ângulo real da tensão.

CAPÍTULO III

RESOLUÇÃO DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA UTILIZANDO UMA SOLUÇÃO HÍBRIDA

3.1 - INTRODUÇÃO

Os estudos de estabilidade em sistemas de energia elétrica têm como objetivo verificar o comportamento destes sistemas, após a ocorrência de uma perturbação do tipo curto-circuito, desligamento de linha de transmissão, perda de unidades geradoras, etc. Basicamente, busca-se determinar se os geradores permanecerão em sincronismo e se ocorrem oscilações de tensão.

O cálculo da estabilidade transitória, para várias situações de operação e para diferentes localizações de defeitos, constitui um dos maiores problemas em estudos de planejamento e operação de sistemas de energia elétrica. Tradicionalmente, a estabilidade é determinada através de simulação passo a passo no domínio do tempo. Estas simulações requerem a solução de dois conjuntos de equações provenientes da modelagem dos diversos componentes dos sistemas [13]: um conjunto de equações diferenciais que descrevem basicamente os geradores síncronos e seus controles; e um conjunto de equações algébricas que representam o estator das máquinas síncronas, rede de transmissão e cargas.

Atualmente, a simulação através de integração numérica é a melhor ferramenta disponível, por permitir a representação de modelos mais abrangentes e fornecer resultados confiáveis. As limitações ficam por conta do esforço computacional



envolvido e pela ausência de resultados que informem o grau de estabilidade ou instabilidade.

Por outro lado, os métodos diretos de resolução, que exigem menor custo computacional, têm como desvantagem a dificuldade de modelar os vários componentes do sistema.

O melhor caminho, atualmente encontrado, é através de uma solução híbrida em que um método direto é incorporado em um programa de simulação passo a passo. Além de fornecer uma margem de estabilidade ou instabilidade, um método híbrido pode também exigir menor esforço computacional, porque em muitos casos, poderá haver uma conclusão a respeito do caso estudado antes do tempo total da simulação.

3.2 – SOLUÇÃO VIA SIMULAÇÃO PASSO A PASSO

A modelagem dos diversos componentes de um sistema de energia elétrica leva ao estabelecimento de: um conjunto de equações diferenciais que descrevem os geradores síncronos e seus controles; e outro conjunto composto por equações algébricas, que representam o estator das máquinas síncronas e a rede de transmissão, incluindo as cargas. Estas equações podem ser expressas de forma geral, como:

$$\dot{y} = f(x,y) \text{ (equações diferenciais)} \quad (3.1)$$

$$g(x,y) = 0 \text{ (equações algébricas)} \quad (3.2)$$

sendo:

f = funções vetoriais que definem as equações diferenciais;

g = funções vetoriais que definem as equações algébricas;

y = vetor das variáveis de estado das equações diferenciais;

x = vetor das variáveis de estado das equações algébricas.

Os procedimentos para a resolução das equações diferenciais / algébricas são classificadas como [10]:

Esquema alternado: os conjuntos de equações diferenciais e algébricas são resolvidos separadamente para x e y durante cada passo de integração. Se na resolução das equações diferenciais as variáveis u (subconjunto das variáveis x que aparecem nas equações diferenciais) não são atualizadas durante o passo de integração, então, são introduzidos erros de interface.

Esquema Simultâneo: os conjuntos de equações diferenciais são resolvidos ao mesmo tempo. Neste caso, as equações diferenciais são transformadas em equações algébricas usando fórmulas de integração. Deste modo, todas as equações algébricas são resolvidas em um único sistema.

O esquema alternado, quando utiliza métodos de resolução de equações diferenciais implícitos, é chamado Esquema Alternado Implícito. Este é o caso em que se utiliza o método de resolução implícita de equações diferenciais usando a regra trapezoidal. Este esquema de resoluções se apresenta em dois modos: Esquema Normal quando a resolução do sistema algébrico é repetida (processo iterativo) até a convergência; Esquema Entrelaçado quando se realiza uma única iteração nos sistema algébrico. Neste caso, podem-se eliminar os erros de interface.

A solução das equações diferenciais pode ser feita usando-se vários métodos encontrados na literatura: método de Euler, Método de Euler Modificado, Método de Runge-Kutta de segunda, terceira e quarta ordens; Regra trapezoidal, etc. Entretanto, a regra trapezoidal tem apresentado um desempenho superior, se comparado com os demais métodos, tendo em vista sua simplicidade e sua ótima estabilidade numérica.

A metodologia a ser utilizada na simulação passo a passo considera o emprego de um esquema alternado para solução dos conjuntos de equações algébricas e diferenciais [13], porque este método apresenta boa precisão e um algoritmo modular. O método trapezoidal será a opção preferencial para a integração numérica. Dentro deste ponto de vista, apresenta-se no item 3.2.1 a concepção básica da regra trapezoidal.

Para a solução das equações foi utilizado o seguinte esquema de solução:



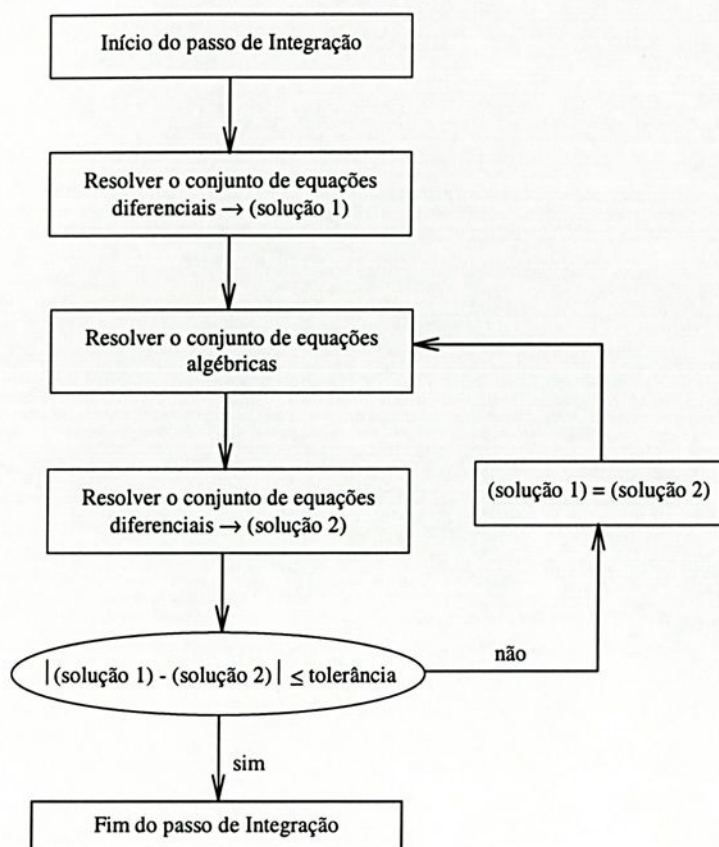


Figura 3.1 – Estrutura utilizada para um esquema alternado.

3.2.1 - MÉTODO TRAPEZOIDAL DE INTEGRAÇÃO

Neste trabalho, foram implementadas subrotinas que geralmente são utilizadas para a resolução das equações algébricas, utilizando métodos híbridos, que serão detalhadas mais adiante neste capítulo. As equações diferenciais foram resolvidas utilizando o método trapezoidal de integração, como mostra-se a seguir:

Considere a seguinte equação:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = f(x, y) \quad (3.3)$$

da qual deseja-se obter a solução no ponto x_n , a partir de sua solução conhecida no ponto x_{n-1} .

Integrando-se a equação 3.3, no intervalo x_{n-1} a x_n , obtém-se:

$$y_n - y_{n-1} = \int_{x_{n-1}}^{x_n} f(x, y) dx \quad (3.4)$$

Com base na figura 3.2, a integral da equação 3.4 pode ser aproximada por:

$$\int_{x_{n-1}}^{x_n} f(x, y) dx \approx [f(x_{n-1}, y_{n-1}) + f(x_n, y_n)] \frac{h}{2} \quad (3.5)$$

sendo: $h = x_n - x_{n-1}$

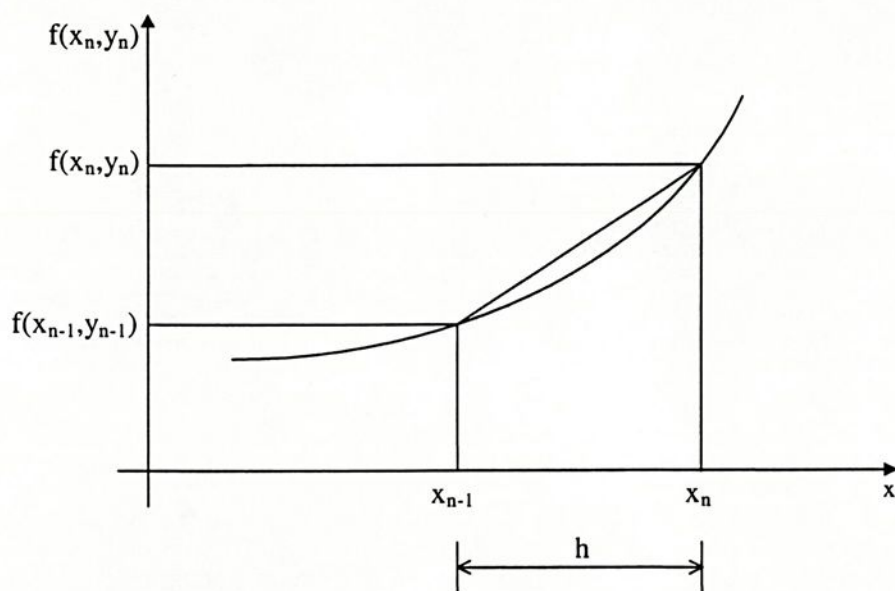


Figura 3.2- Regra do Trapézio.

Sendo assim, a equação 3.4 torna-se:

$$y_n - y_{n-1} = [f(x_{n-1}, y_{n-1}) + f(x_n, y_n)] \frac{h}{2} \quad (3.6)$$

A equação 3.6 é resultante da aplicação do método trapezoidal, sendo uma equação implícita e algébrica. Sendo assim, com o uso do método trapezoidal um sistema de equações diferenciais pode ser transformado em um sistema algébrico.

3.3 – SOLUÇÃO VIA MÉTODO DIRETO

Os métodos diretos são procedimentos de análise que não necessitam das soluções das equações diferenciais. Uma das vantagens dos métodos diretos é a sua capacidade de produzir um índice de estabilidade. Por outro lado, os métodos diretos de resolução, que exigem menor esforço computacional, ainda não se mostraram amplamente aplicáveis e confiáveis. Por essa razão neste trabalho utilizar-se-á uma solução híbrida.

É comum associar métodos diretos aos baseados em funções de Lyapunov e em funções energias [11, 08]. Um dos métodos que tem ganhado destaque na literatura nos últimos anos é o baseado na Função de Energia Transitória (TEF). Neste tipo de método é possível obterem-se margens de estabilidade transitória, a partir da diferença entre a energia transitória total do sistema, no instante de eliminação do defeito, ($V_{(tcl)}$) e a energia transitória total do sistema ($V_{(tcr)}$) em um tempo crítico. Uma maneira de obtenção desta margem é mostrada em [07]. A figura 3.3a ilustra as oscilações entre máquinas de um sistema multi-máquinas, sendo θ_1 o ângulo da máquina 1 e θ_2 o ângulo da máquina 2. A trajetória que passa sobre o ponto B' mostra um caso em que o sistema é estável e a trajetória que passa pelo ponto A mostra um caso em que o sistema passou pelo limite de estabilidade. As linhas com traço contínuo indicam superfícies de energia potencial constante, o limite de estabilidade é representado pela superfície limite de energia potencial (PEBS). O limite de estabilidade contém os pontos de equilíbrio instáveis de controle(UEP).

Na realidade as curvas (linhas pontilhadas) não são exatamente como apresentadas. De fato elas apresentam vários pontos de picos locais como ilustrado na figura 3.3b.



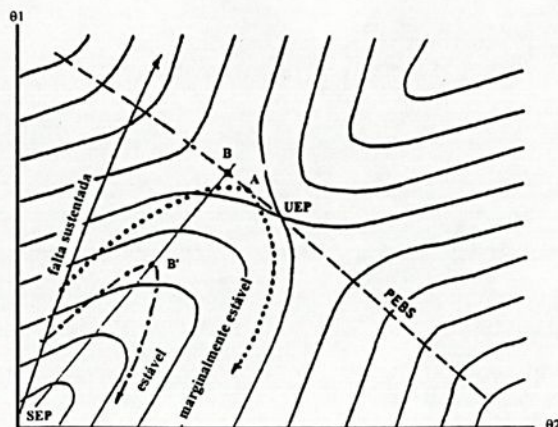


Figura 3.3a – Trajetória do sistema sobre a superfície da energia potencial.

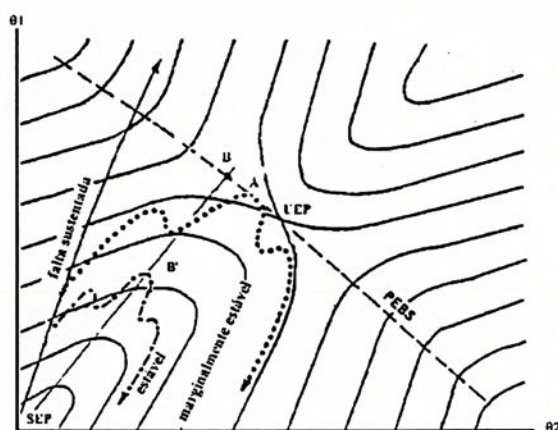


Figura 3.3b – Trajetória do sistema com oscilação entre as máquinas.

A diferença entre o ponto B e B' (figura 3.3a) é um índice que aponta o quanto o sistema é estável ou não após a ocorrência de uma perturbação. No exemplo dado o sistema é estável. Quando a trajetória do sistema ultrapassa a linha PEBS o sistema é instável.

O cálculo da margem de estabilidade através dos métodos que usam a energia no transitório, exige a obtenção do ponto UEP. Isto significa obter a função de energia no ponto de equilíbrio instável, ou seja, é necessário obter a energia transitória crítica (V_{cr}).

O cálculo do ponto UEP pode exigir um tempo computacional demasiado, quando se pensa em um número elevado de contingências.

Desta maneira, neste trabalho, optou-se por aproveitar algumas vantagens do método da energia no transitório, porém com simplificações que permitem avaliar contingências em tempo real. Um método que permite obter margens de estabilidade, a partir da energia no transitório, é mostrado em [06]. Este método consiste em analisar as energias cinética e potencial da máquina crítica do sistema, sem necessidade de obtenção do ponto UEP.

Um problema que surge neste tipo de abordagem, é o demorado tempo de simulação para obter esta máquina crítica [06]. De modo a seguir mostram-se os cálculos das energias e uma idéia simples para resolver o problema de obtenção da máquina crítica.

3.3.1 – ENERGIAS CINÉTICA E POTENCIAL DAS MÁQUINAS INDIVIDUAIS

No cálculo das margens de estabilidade que aparece em [06] toda a análise é feita a partir da energia transitória de uma máquina. A obtenção de energia é como segue.

Dado um sistema de n geradores representados pelo modelo clássico, as equações da dinâmica do rotor podem ser descritas como mostrado na equação (2.14) e (2.15), reescrevendo a equação (2.14) com relação ao centro de inércia vem [07]:

$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = P_i - P_{e_i} - \frac{M_i}{M_t} P_{coa} \quad (3.7)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i, \quad i = 1, n \quad (3.8)$$

em que:

$$M_t = \sum_{i=0}^n M_i ;$$

$$P_i = P_{m_i} - E_i^2 G_{ij} ;$$

G_{ij} = elemento real da matriz Y ;

$$P_{coa} = \sum_{i=1}^n P_i - P_{e_i} .$$

A seguir serão apresentadas as equações usadas para o cálculo da energia cinética, potencial e total [07]:

$$V_{ke_i} = 1/2 \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 \quad (3.9)$$

As funções das energias potenciais podem ser expressas por [11]:

$$V_{pe1_i} = \sum_{i=1}^n (-P_{m_i} (\delta_i(t) - \delta_i(t_{cl}))) \quad (3.10)$$

$$V_{pe2_i} = \sum_{i=1}^n \frac{(P_{e_i}(t - \Delta t) + P_i(t))(\delta_i(t) - \delta_i(t - \Delta t))}{2} \quad (3.11)$$

$$V_{pe3_i} = \sum_i^n V_{pe2_i} \quad (3.12)$$

$$V_{pe_i} = V_{pe1_i} + V_{pe3_i} \quad (3.13)$$

A função energia pode ser obtida como segue [07]:

$$V_i = V_{ke_i} + V_{pe_i} \quad (3.14)$$

em que:

$P_{e_i}(t - \Delta t)$ = potência elétrica do passo anterior da máquina i ;

$\delta_i(t - \Delta t)$ = ângulo do passo anterior da máquina i ;

$\delta_i(t_{cl})$ = representa o ângulo pós-falta da máquina i ;

t_{cl} = tempo de eliminação do defeito;

V_i = energia total da máquina i;

V_{ke_i} = energia cinética da máquina i;

V_{pe_i} = energia potencial da máquina i.

3.3.2 – MÉTODO DE OBTENÇÃO DA MÁQUINA CRÍTICA

Normalmente, para uma dada perturbação num grande sistema de potência, somente as máquinas próximas eletricamente da perturbação serão gravemente afetadas. É esperado que para essa situação de perturbação uma máquina seja mais severamente afetada, e essa máquina é chamada de crítica. Inicialmente ela perde o sincronismo e, subseqüentemente, outras máquinas também perderão o sincronismo, sendo assim o sistema todo poderá perder o sincronismo. Portanto, espera-se poder avaliar a estabilidade do sistema observando o limite de estabilidade somente da máquina crítica, pois é essa máquina que poderá iniciar a instabilidade do sistema.

Para a obtenção da máquina crítica pode-se simular e verificar qual máquina sofre maior variação de velocidade. Porém, isto exige uma simulação completa. Aqui busca-se formas de identificar a máquina crítica levando em conta a aceleração das máquinas durante o período de falta do sistema. O cálculo da aceleração tem sido utilizado para identificar geradores coerentes [12], a aceleração é dada por:

$$acel_i = \frac{\Delta Pe_i}{M_i} \quad (3.15)$$

em que :

$acel_i$ = aceleração da máquina i;

$\Delta Pe_i = Pe_i(t - \Delta t) - Pe_i(t)$.



Essas máquinas que mais aceleram são certamente fortes candidatas a serem o gerador crítico do sistema, mas para podermos ter certeza de qual será o gerador crítico tem que ser inserida mais uma condição.

Essa segunda condição é a análise da somatória da energia potencial do sistema, é feita da seguinte maneira, observa-se o pico da somatória da energia potencial do sistema após a ocorrência da perturbação e nesse instante observa-se qual é o maior ângulo delta dos geradores. O gerador crítico do sistema é classificado como sendo aquele que apresenta maior abertura angular no instante de pico, e daí por diante trabalha-se somente com as energias desse gerador.

3.3.3 - MÉTODO DA OBTENÇÃO DE MARGEM DE ESTABILIDADE

A margem de estabilidade MS é um índice que aponta o grau de estabilidade ou instabilidade do sistema após a ocorrência de uma grande falta no sistema vide [06].

A fim de explicar melhor o método, são utilizados resultados obtidos com um sistema teste. Os dados deste sistema são mostrados na figura 3.4. Este sistema aparece na referência [03]. Este sistema é de pequeno porte porém, permite avaliar e entender a metodologia utilizada para a obtenção da margem de estabilidade. O defeito ocorrido no sistema em todos os casos que serão mostrados é um curto-circuito na linha 3.



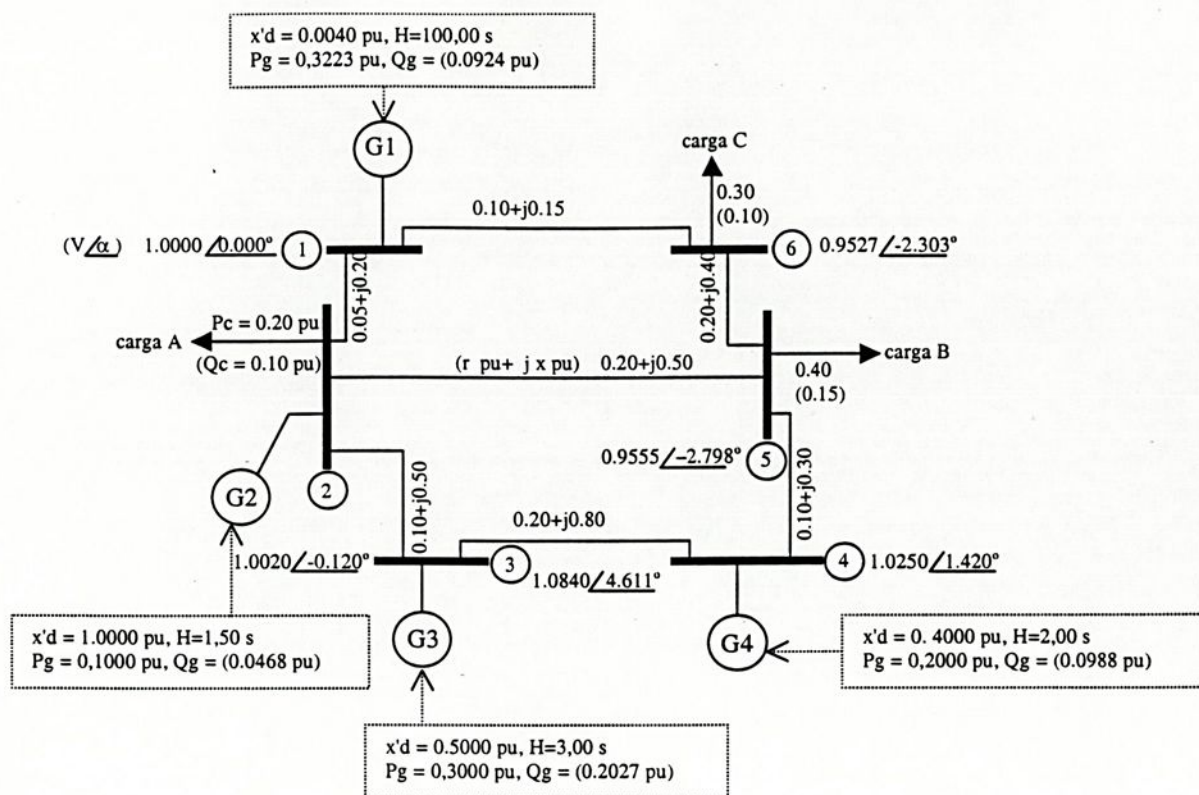


Figura 3.4 – Sistema de 6 barras e 4 geradores.

3.3.3.1 – SITUAÇÃO ESTÁVEL

Para o sistema ser estável é necessário que a energia cinética do sistema passe pelo valor zero na primeira oscilação dos ângulos dos geradores.

Quando $t_{cl} < t_{cr}$, o ângulo da máquina crítica (bem como das outras máquinas do sistema) tem um pico de valor no período pós-falta. Neste caso, a máquina e o sistema são capazes de converter toda energia cinética, ganha durante o período de falta, em energia potencial no período pós-falta. Para determinar a margem de estabilidade, é necessário conhecer energia transitória adicional que o sistema e a máquina poderiam absorver sem perda de sincronismo ou estabilidade. Para conhecer a energia adicional, é exigido injetar mais energia transitória no sistema reinserindo a falta. Neste estudo, a falta é reinserida quando a energia cinética do sistema alcança um mínimo valor no período de pós-falta.

Observa-se que a mínima energia cinética do sistema indica a máxima energia potencial e, conseqüentemente, próximo do limite de estabilidade. Portanto, a falta é reinserida quando a energia potencial do sistema alcança o primeiro valor de pico de forma que o sistema pode escapar da região de estabilidade facilmente. A figura 3.5 mostra a variação da energia cinética, potencial e total da máquina crítica. Pode ser observado que a energia cinética do sistema no pós-falta, da figura 3.5, alcança o valor mínimo em 0,37 [s]. Considerando t_{ins} o tempo no qual a energia cinética do sistema torna-se mínimo. Assim, a falta é reinserida em 0,37 [s] (chamado t_{ins}) para determinar o máximo global da energia potencial da máquina crítica. Pode ser observado na figura 3.5 que a energia total V_i da máquina permanece mais ou menos constante no período pós-falta (de t_{cl} para t_{ins}) porque a injeção de energia transitória foi cessada em t_{cl} . Quando a falta é reinserida em t_{ins} a energia potencial das máquinas muda e alcança um valor máximo global em t_m . Considerando que o máximo valor global da energia potencial da máquina crítica é $V_{pe_i}^{max}$, a diferença entre $V_{pe_i}^{max}$ e a energia total transitória no tempo de eliminação t_{cl} (0,30 [s] neste caso) é energia transitória adicional que pode ser absorvida. Assim, a margem de estabilidade da máquina pode ser considerada como:

$$MS = (V_{pe_i}^{max} - V_{pe_i}(t_{cl})) - V_{ke_i}(t_{cl}) \quad (3.16)$$

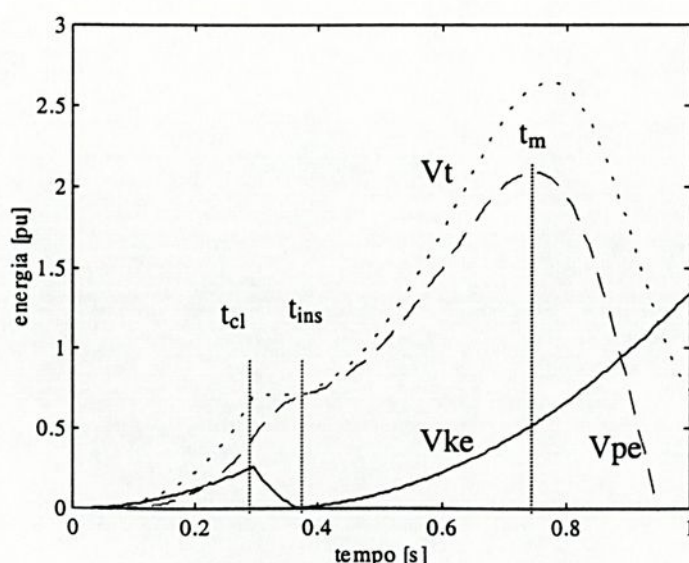


Figura 3.5 – Energias cinética, potencial e total, $t_{cl} = 0,30$ [s] e reinserida a perturbação em 0,37[s]. Máquina Crítica 3.

As figuras 3.6 e 3.7 mostram, respectivamente, as energias cinética e potencial para as máquinas 1, 2 e 4.

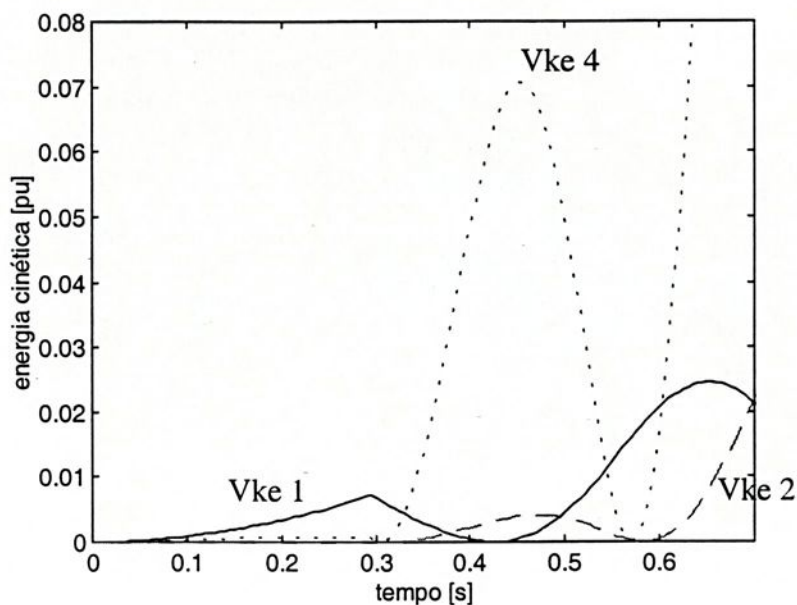


Figura 3.6 – Energia cinética das máquinas 1,2 e 4. Caso estável, $t_{cl} = 0,30$ [s].

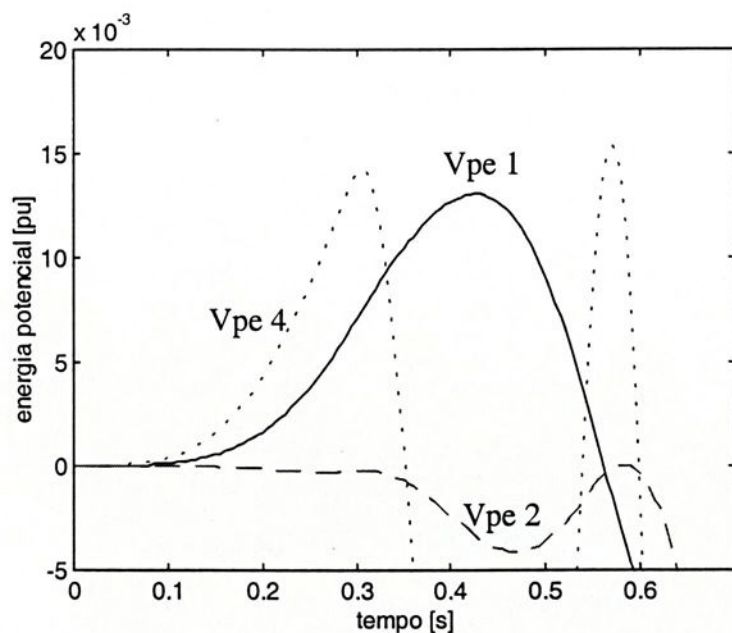


Figura 3.7 – Energia potencial das máquinas 1,2 e 4. Caso estável, $t_{cl} = 0,30$ [s].

Observa-se que o componente da energia potencial da equação 3.14 é calculado com relação ao ângulo pós-falta $\delta(t_{cl})$. Porém, a diferença da energia potencial ($V_{pe_i}^{max} - V_{pe_i}(t_{cl})$) na equação 3.16 pode ser avaliada com relação a algum ponto de referência arbitrária sem introduzir erro significativo. Neste caso, os erros envolvidos no cálculo de $V_{pe_i}^{max}$ e $V_{pe_i}(t_{cl})$, devido a mudança no ponto de referência, cancela um ao outro na expressão da margem de estabilidade na equação 3.16.

A figura 3.8 mostra a margem de estabilidade para tempos de eliminação do defeito que variam de 0,30 a 0,57 segundos. A máquina crítica, obtida através da análise da aceleração, é a número 3.

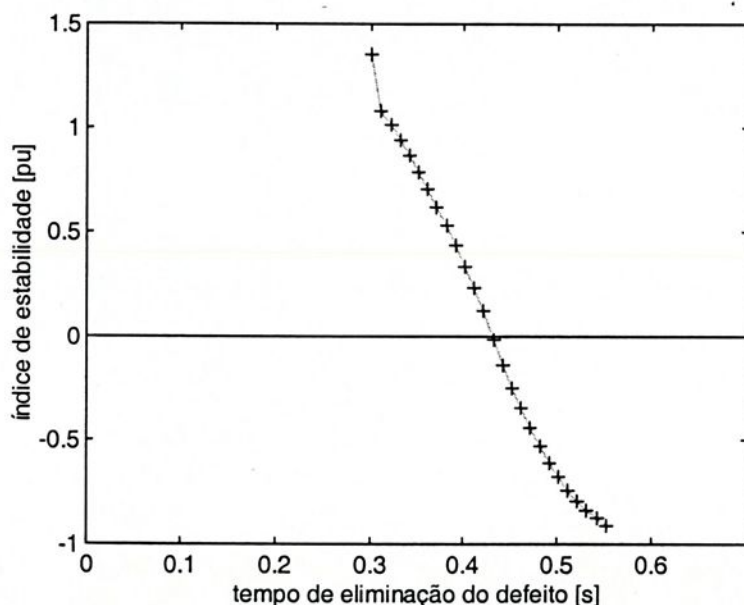


Figura 3.8 – Índices de estabilidade para um curto – circuito 3 ϕ na barra 3.

3.3.3.2 – SITUAÇÃO INSTÁVEL

Quando $t_{cl} > t_{cr}$ (tempo crítico de eliminação da falta), pelo menos uma das máquinas (máquina crítica) no sistema fica fora de sincronismo no período pós-falta. Sendo assim, o ângulo pós-falta da máquina crítica aumenta monotonicamente e não tem um valor de pico. A figura 3.9 mostra as variações típicas das energias potencial,

cinética e total. Pode ser observado na figura 3.9 que o valor da energia potencial e cinética aumentam durante o período da falta. Quando a falta é eliminada em t_{cl} , a energia cinética da máquina é convertida para energia potencial, isto ocorre próximo do período pós-falta (isto é, a energia cinética diminui e a energia potencial aumenta).

Pode ser observado na figura 3.9 que a energia cinética no pós-falta diminui e alcança um valor mínimo $V_{ke_i}^{min}$. No mesmo tempo t_m , a energia potencial é máxima. Pode-se também notar que V_i é quase constante. A energia cinética mínima $V_{ke_i}^{min}$ é o excesso de energia que não pode ser absorvida ou convertida em energia potencial. Neste caso, a margem de estabilidade da máquina (MS) pode ser considerada como excesso negativo ou a energia cinética não absorvida:

$$MS = - V_{ke_i}^{min} \quad (3.17)$$

O valor negativo da margem de estabilidade indica que o sistema é instável.

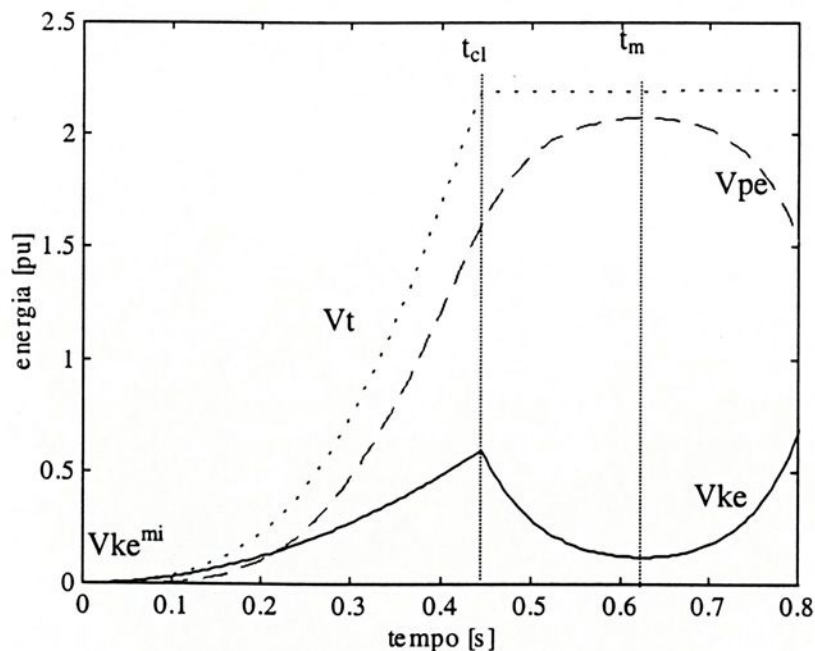


Figura 3.9 – Energias cinética, potencial e total, $t_{cl} = 0,45$ [s]. Referentes a máquina crítica 3 (caso instável).

As figuras 3.10 e 3.11 mostram, respectivamente, as curvas das energias cinética e potencial das máquinas 1, 2 e 4, referente ao sistema da figura 3.4. As energias da máquina 3 não foram incorporadas nos gráficos para possibilitar melhor visualização uma vez que atingem valores diferentes. Através da curva da energia cinética, pode-se perceber a necessidade de trabalhar com as energias da máquina crítica, pois o comportamento das outras máquinas não obedecem os critérios adotados para a obtenção da margem de estabilidade. Por exemplo pode-se perceber, pela figura 3.10, que as energias de algumas máquinas passam por zero, e da máquina crítica não passa (figura 3.9). Portanto só a máquina crítica pode informar corretamente o comportamento.

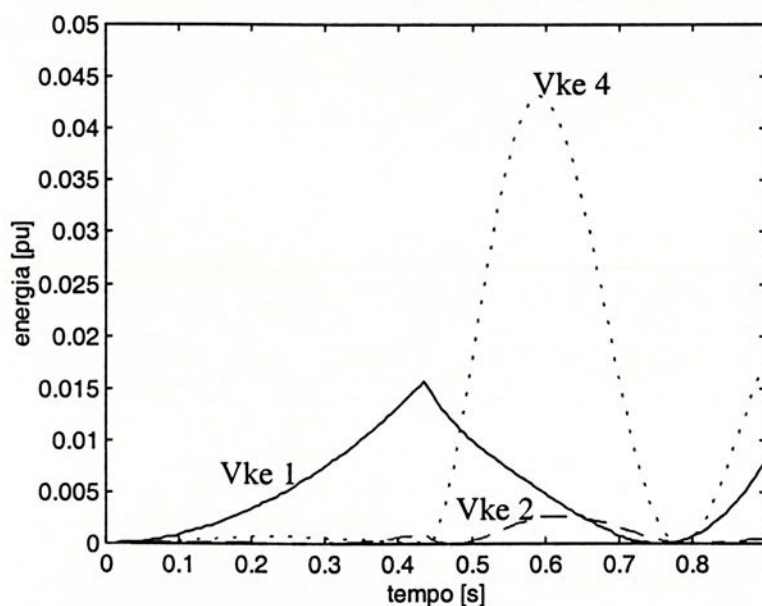


Figura 3.10 - Energia cinética das máquinas 1, 2 e 4. Caso instável, $t_{cl} = 0,45[s]$.

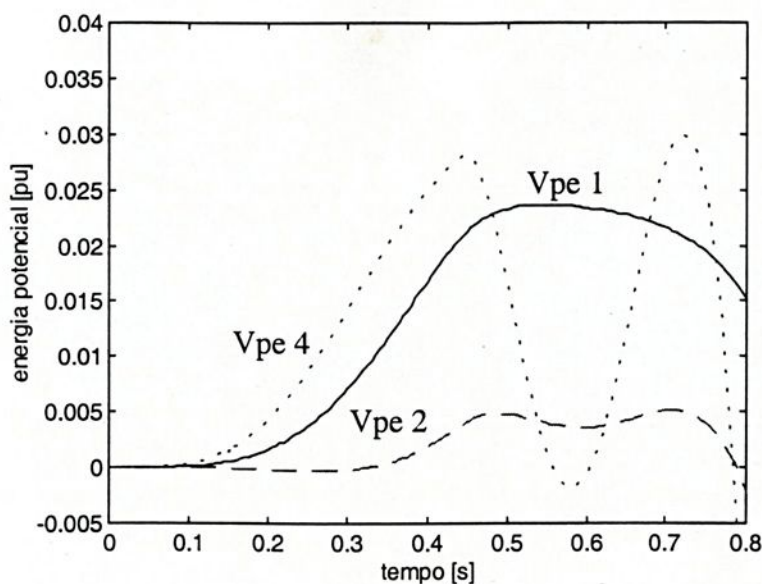


Figura 3.11 – Energia potencial das máquinas 1, 2 e 4. Caso instável, $t_{cl} = 0,45[s]$.

Quando $t_{cl} \gg t_{cr}$, o tempo em que ocorre ponto máximo da energia potencial pode ser inferior ao tempo de eliminação da falta. Neste caso, a máquina é incapaz de converter a energia cinética em energia potencial no período pós-falta. A figura 3.12 mostra a variação da energia cinética, potencial e total da máquina crítica. Observa-se, na figura 3.12, que a máxima energia potencial da máquina ocorre por volta de 0,52 [s] que é menor do que o tempo da eliminação da falta $t_{cl}(=0,55 [s])$. A energia cinética da máquina aumenta monotonicamente igualmente no período pós-falta.

Neste caso, o sistema também é instável ou distante do limite de estabilidade. A margem de estabilidade da máquina pode novamente ser considerada como o mínimo negativo da energia cinética no período pós-falta. Neste caso, o mínimo da energia cinética é igual a energia cinética na eliminação da falta.

$$MS = - V_{ke_i}(t_{cl}) \quad (3.18)$$

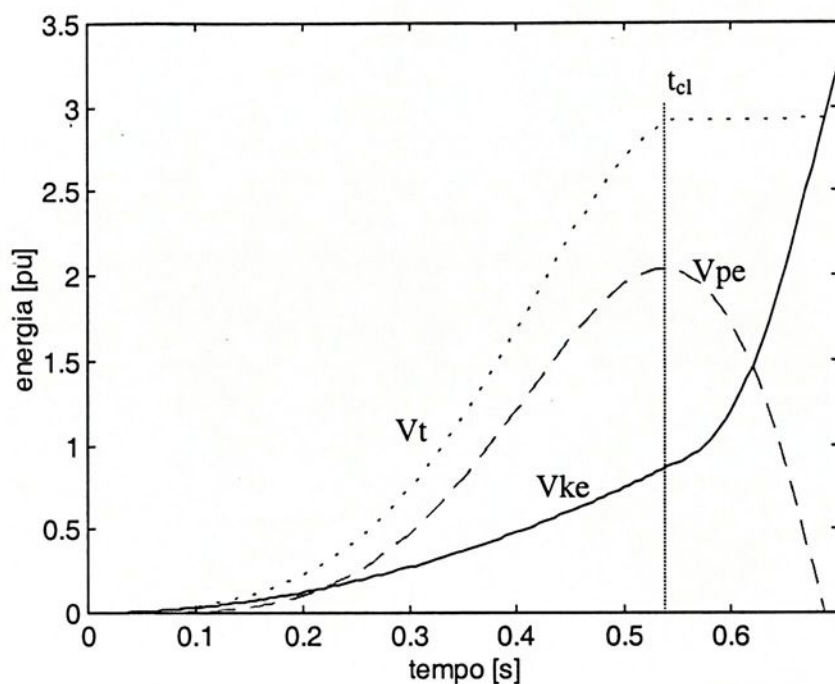


Figura 3.12 – Energia cinética, potencial e total, $t_{cl} = 0,55$ [s]. Máquina Crítica 3.

As figuras 3.13 e 3.14 mostram, respectivamente, as curvas da energia cinética e potencial das máquinas 1, 2 e 4.

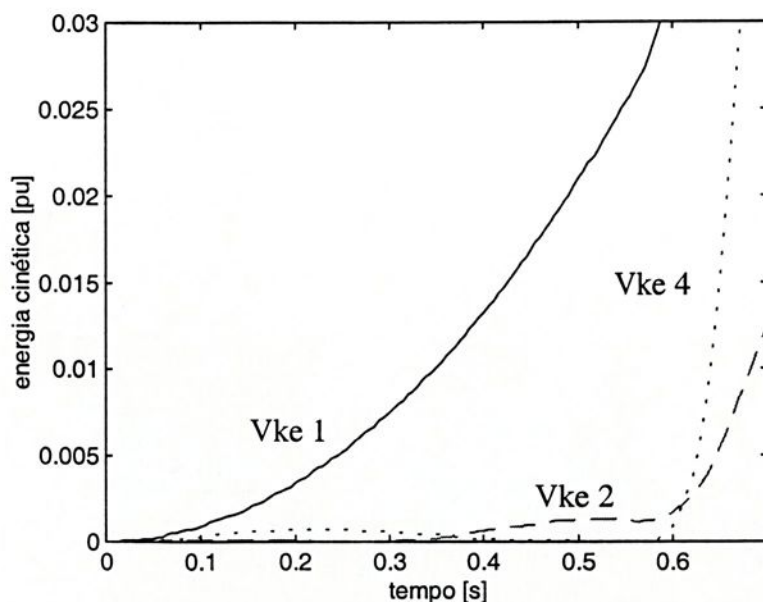


Figura 3.13 – Energia cinética das máquinas 1, 2 e 4. Caso muito instável, $t_{cl} = 0,55$ [s].

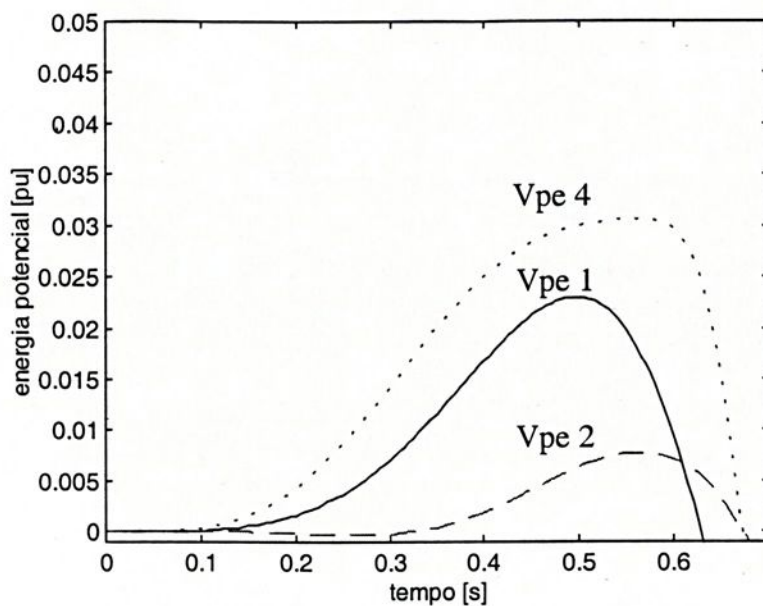


Figura 3.14 – Energia potencial das máquinas 1,2 e 4. Caso muito instável, $t_{cl} = 0,55$ [s].

3.4 – SOLUÇÃO HÍBRIDA

O programa, implementado na linguagem FORTRAN para análise da estabilidade transitória, segue o algoritmo da figura 3.15. Nesta figura o tempo T, que define o tempo total de simulação, pode ser crítico e variar de sistema para sistema.

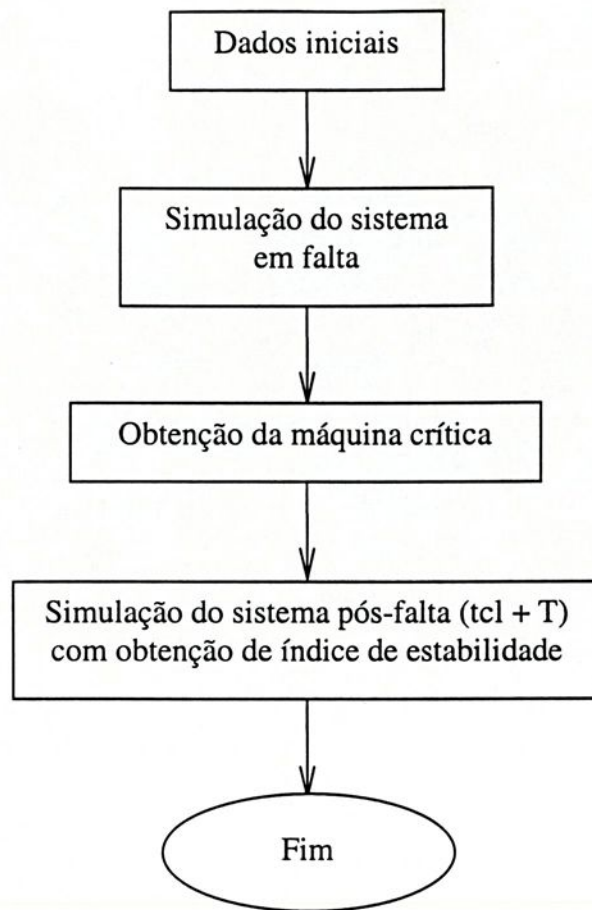


Figura 3.15 – Fluxograma simplificado do programa.

A vantagem desse método híbrido é que basta analisar somente uma máquina, pois quando ocorre uma perturbação no sistema somente uma máquina é afetada gravemente e, através da análise dessa máquina, chamada de máquina crítica, consegue-se calcular os índices de estabilidade do sistema.

Em relação à figura 3.15, a leitura do caso base é a leitura dos dados do sistema em operação normal. São lidos a configuração do sistema, variáveis da geração e a característica da carga. Esses dados são obtidos pelo fluxo de carga do sistema. São lidos, no próximo passo, os dados referente à contingência ocorrida. Neste trabalho, a contingência adotada foi um curto-circuito trifásico em uma linha de transmissão, próximo a uma das barras.

A obtenção do estado de falta e do estado pós-falta é feito logo após a leitura do caso base, através do uso de um algoritmo de fluxo de potência com o uso do Método de Newton.

Na resolução das equações algébricas, segundo o modelo adotado neste trabalho, representa-se a parte estática nas equações da rede $I = Y V$, que permanecem na forma expandida sem redução às barras internas de geração. A grande vantagem da estrutura do sistema não ser reduzida é a de permitir incorporar outros modelos de carga.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS OBTIDOS PARA A ANÁLISE DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA ATRAVÉS DE UM MÉTODO HÍBRIDO

4.1 – INTRODUÇÃO

Para verificar a metodologia utilizada foi criado um programa que realiza todos os processos descritos anteriormente.

O programa foi testado para vários sistemas e mostra claramente o grau de estabilidade ou instabilidade após uma perturbação.

4.2 – RESULTADOS

Os primeiros testes foram realizados com um sistema de potência teste, extraído de [01], cujos dados são mostrados na figura 4.1. Este é um sistema de pequeno porte que permite avaliar e compreender com maior segurança alguns resultados. As figuras 4.2 e 4.3 mostram os ângulos dos geradores para um teste bastante conhecido, um curto-circuito trifásico na barra 7, eliminado após 0,08 segundos com o desligamento da linha 5-7.



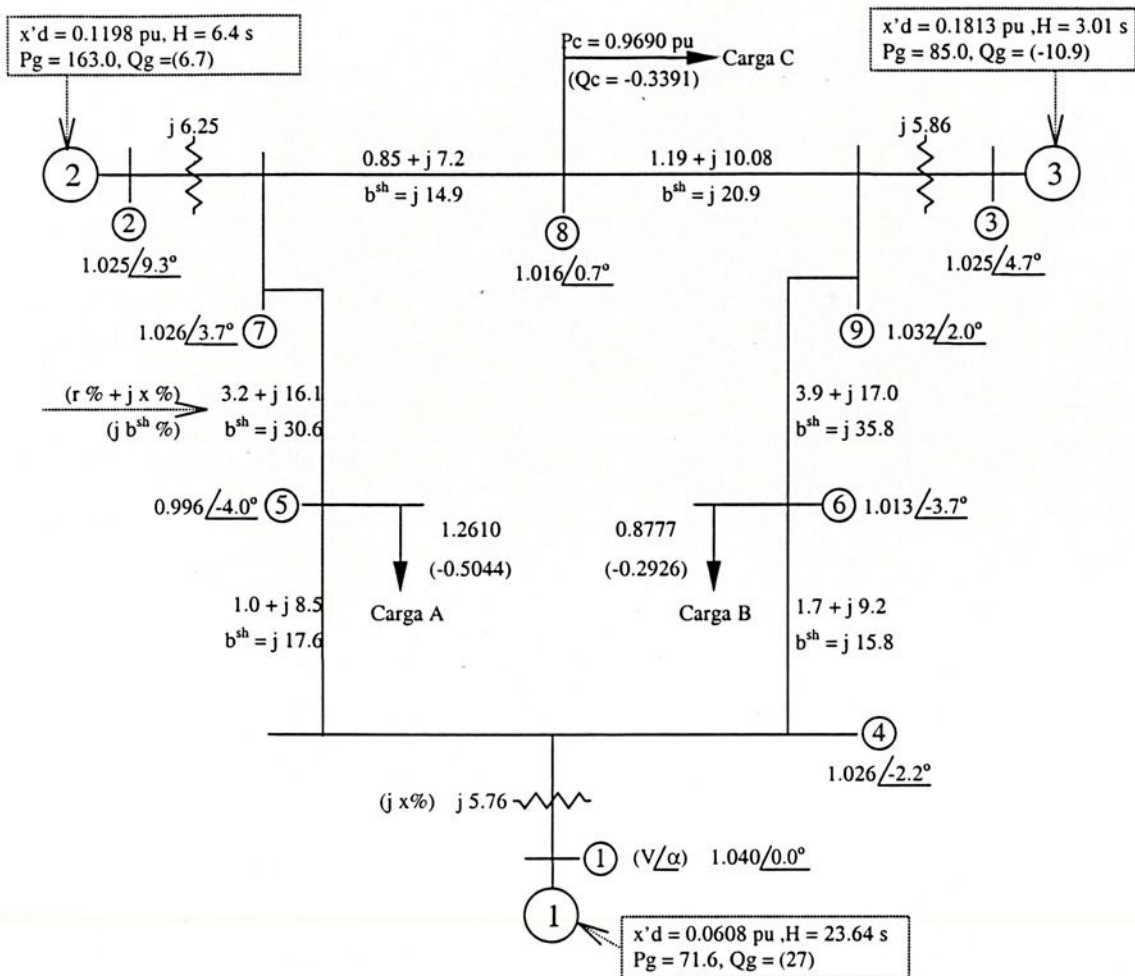


Figura 4.1 – Sistema de 9 barras e 3 geradores.

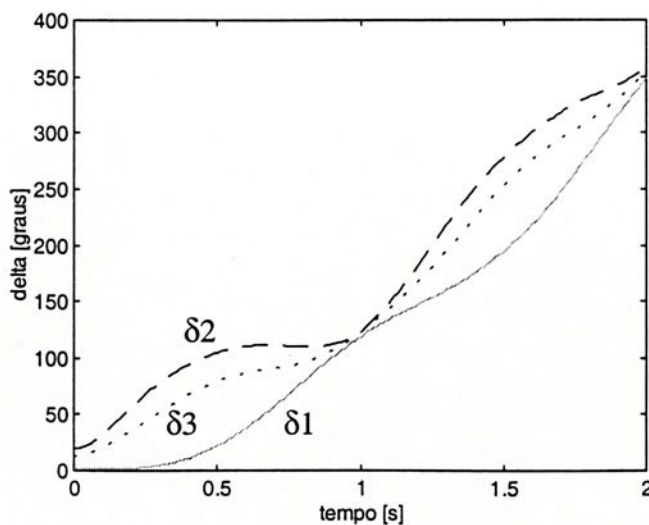


Figura 4.2 – Ângulos dos geradores 1, 2 e 3 para um tempo de chaveamento de 0,080 [s] (caso estável).

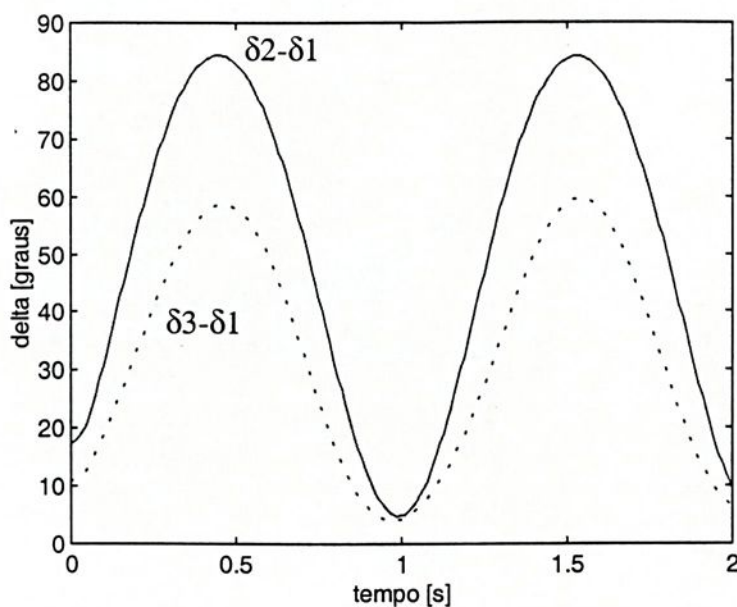


Figura 4.3 – Ângulos dos geradores 2 e 3 em relação ao gerador 1 para um tempo de chaveamento de 0,080 [s] (caso estável).

A figura 4.4 mostra os ângulos dos geradores para o mesmo defeito, porém agora eliminado em 0,160 segundos. Isto representa uma situação marginalmente estável.

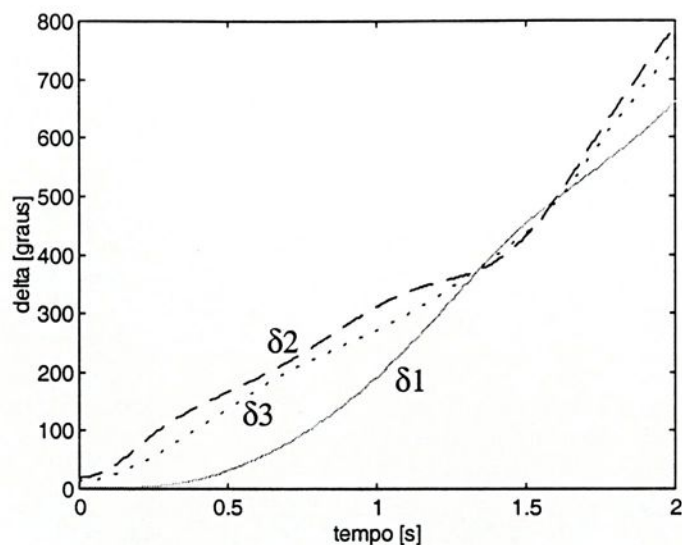


Figura 4.4 – Ângulos dos geradores 1, 2 e 3 para um tempo de chaveamento de 0,160 [s] (caso estável).

A figura 4.5 mostra os ângulos dos geradores para o mesmo defeito, porém agora eliminado em 0,165 segundos. Isto representa uma situação instável.

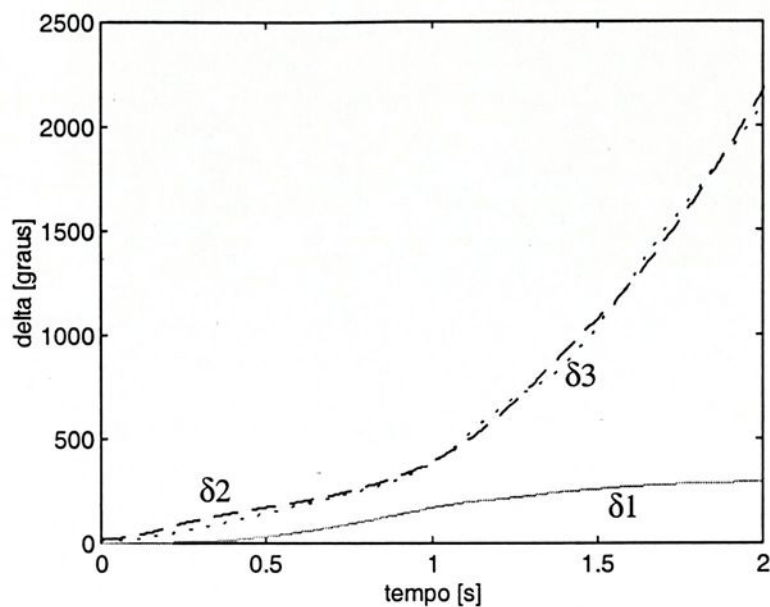


Figura 4.5 – Ângulos dos geradores 1, 2 e 3 para um tempo de chaveamento de 0,165 [s] (caso instável).

A figura 4.6 mostra as energias total, cinética e potencial da máquina crítica para o mesmo sistema. Nesta figura t_{cl} é tempo de eliminação da falta, t_m é o tempo onde a energia potencial atinge seu maior valor. Isto representa uma situação instável.

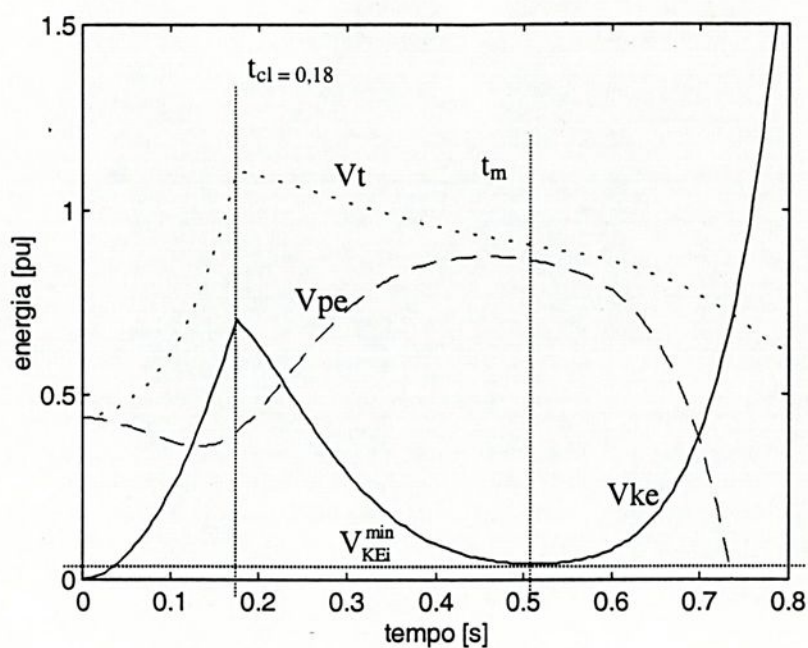


Figura 4.6 – Energias cinética, potencial e total, $t_{cl} = 0,18$ [s]. Máquina crítica 2 (caso instável).

A figura 4.7 mostra as energias com um tempo de eliminação da falta de 0,36 segundos para o mesmo sistema. Isto representa uma situação muito instável.

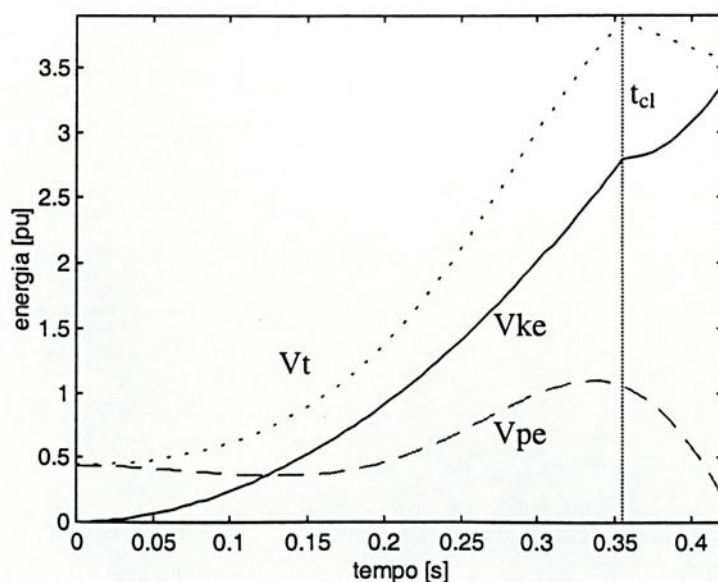


Figura 4.7 – Energia cinética potencial e total, $t_{cl} = 0,36$ [s]. Máquina crítica 2 (caso instável).

A figura 4.8 mostra as energias para um tempo de eliminação da falta em 0,08 segundos e reinserida em 0,44 para o mesmo sistema. Isto representa uma situação estável.

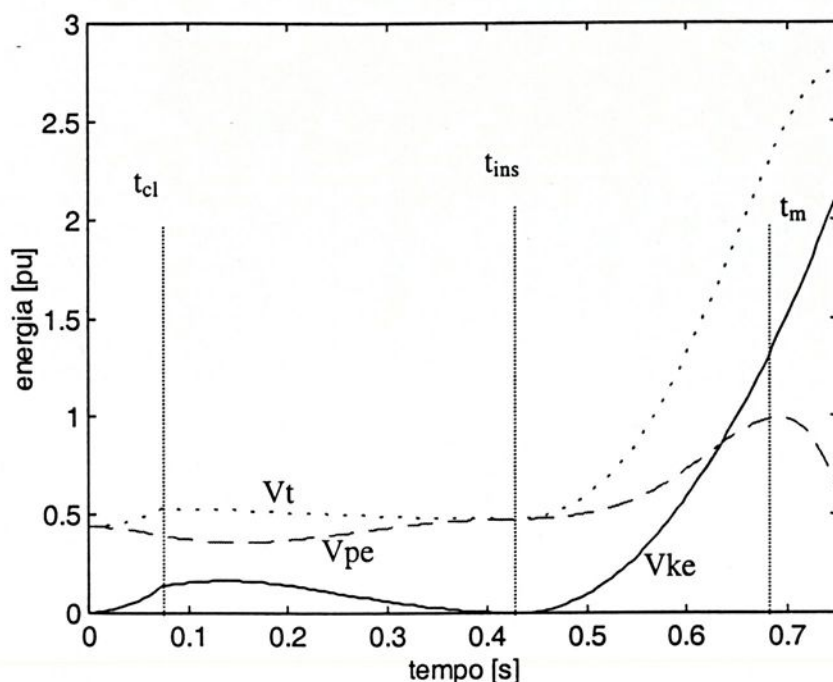


Figura 4.8 – Energias cinética, potencial e total, $t_{cl}=0,08$ [s] e reinserida a perturbação em 0,44 [s]. Máquina crítica 2 (caso estável).

O grau de estabilidade calculado, a partir do método proposto, é mostrado a seguir na figura 4.9, onde é apresentado um resultado com diferentes tempos de eliminação da falta. O tempo limite para eliminação do defeito, sem que o sistema saia de sincronismo, é aquele com margem de estabilidade igual a zero (t_{cr}). Margem de estabilidade positiva indica sistema estável, negativa indica sistema instável e com um alto valor negativo indica que o sistema é muito instável.

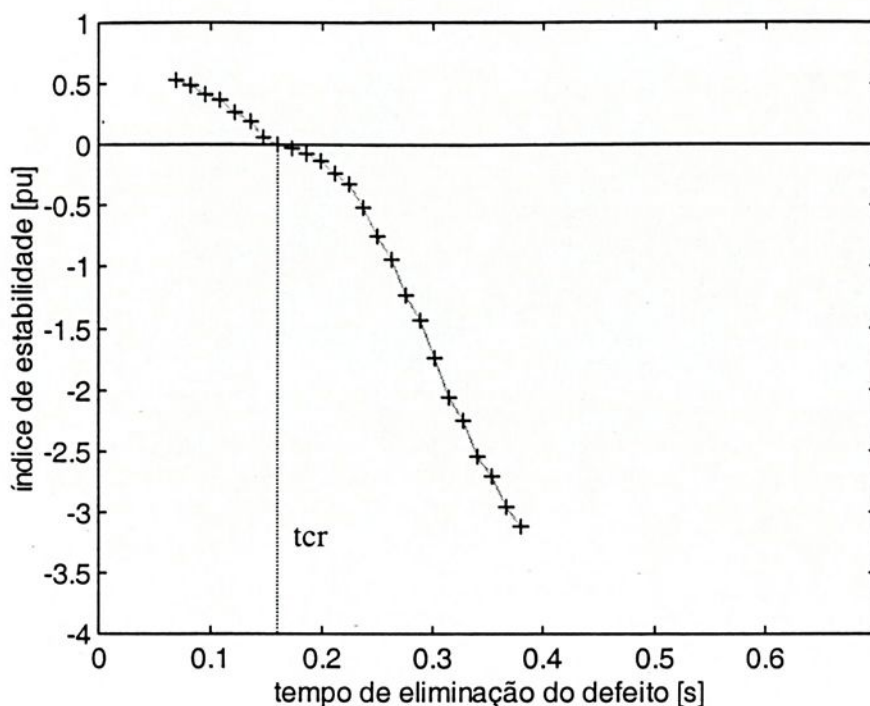


Figura 4.9 – Índice de estabilidade. Máquina crítica 2.

Os próximos testes foram realizados com o sistema teste, extraído de [05], e cujos dados são mostrados na figura 4.10. A figura 4.11 mostra a margem de estabilidade para um defeito que ocorre na barra 10 sendo eliminado através da retirada da linha 10-8. Os tempos de eliminação do defeito variam de 0,045 a 0,39 segundos. A máquina crítica obtida através da análise da aceleração é a número 4.

Os resultados indicam que para este defeito o tempo crítico é de 0,175 segundos. Isto pode ser verificado na figura 4.11, sendo que este tempo corresponde ao ponto em que a margem de estabilidade é zero.

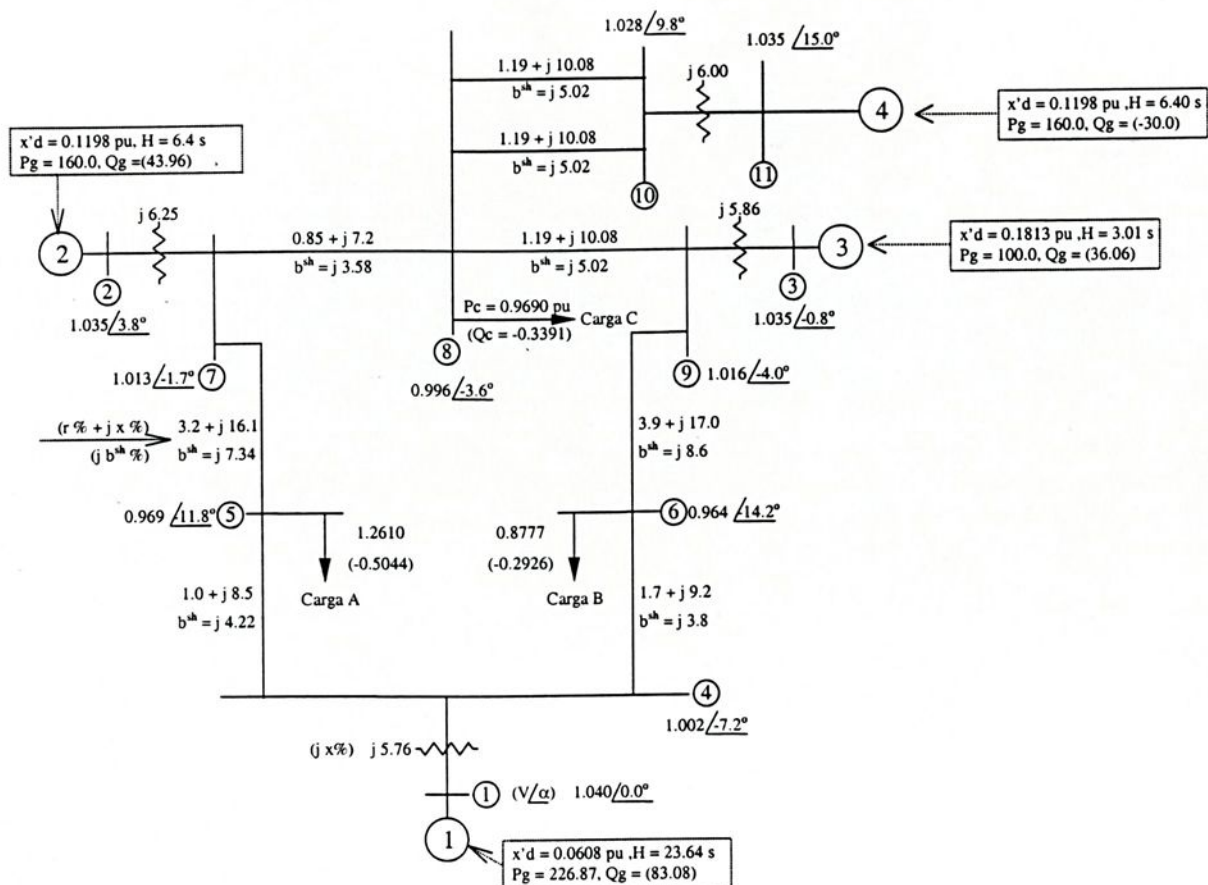


Figura 4.10 – Sistema de 11 barras e 4 geradores (WSCC4).

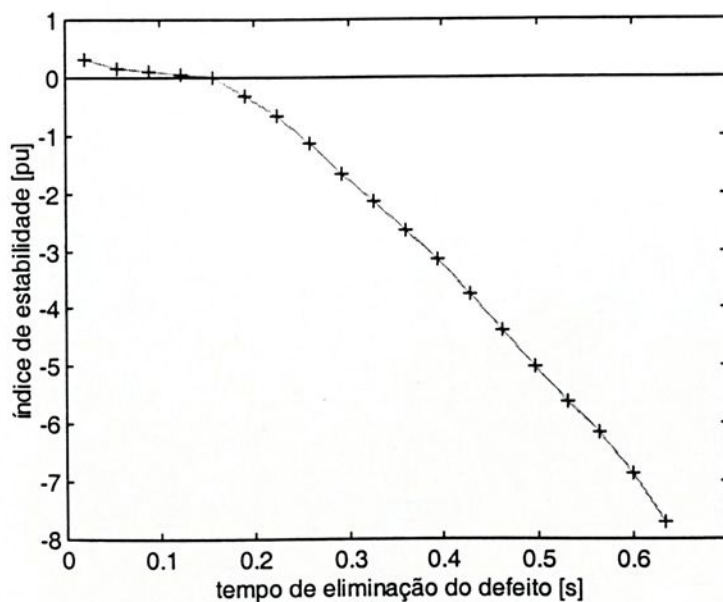


Figura 4.11 – Índices de estabilidade para um curto 3 ϕ na barra 10.

Testes mais completos foram realizados com o sistema de potência teste, extraído de [02], e cujos dados são mostrados no Anexo A. O diagrama unifilar do sistema é mostrado na figura 4.12. Este é um sistema de um porte razoável, englobando 16 geradores, 35 cargas, 68 barras e 86 ligações (linhas de transmissão e transformadores), que permitem realizar testes para avaliar com detalhes a metodologia proposta.



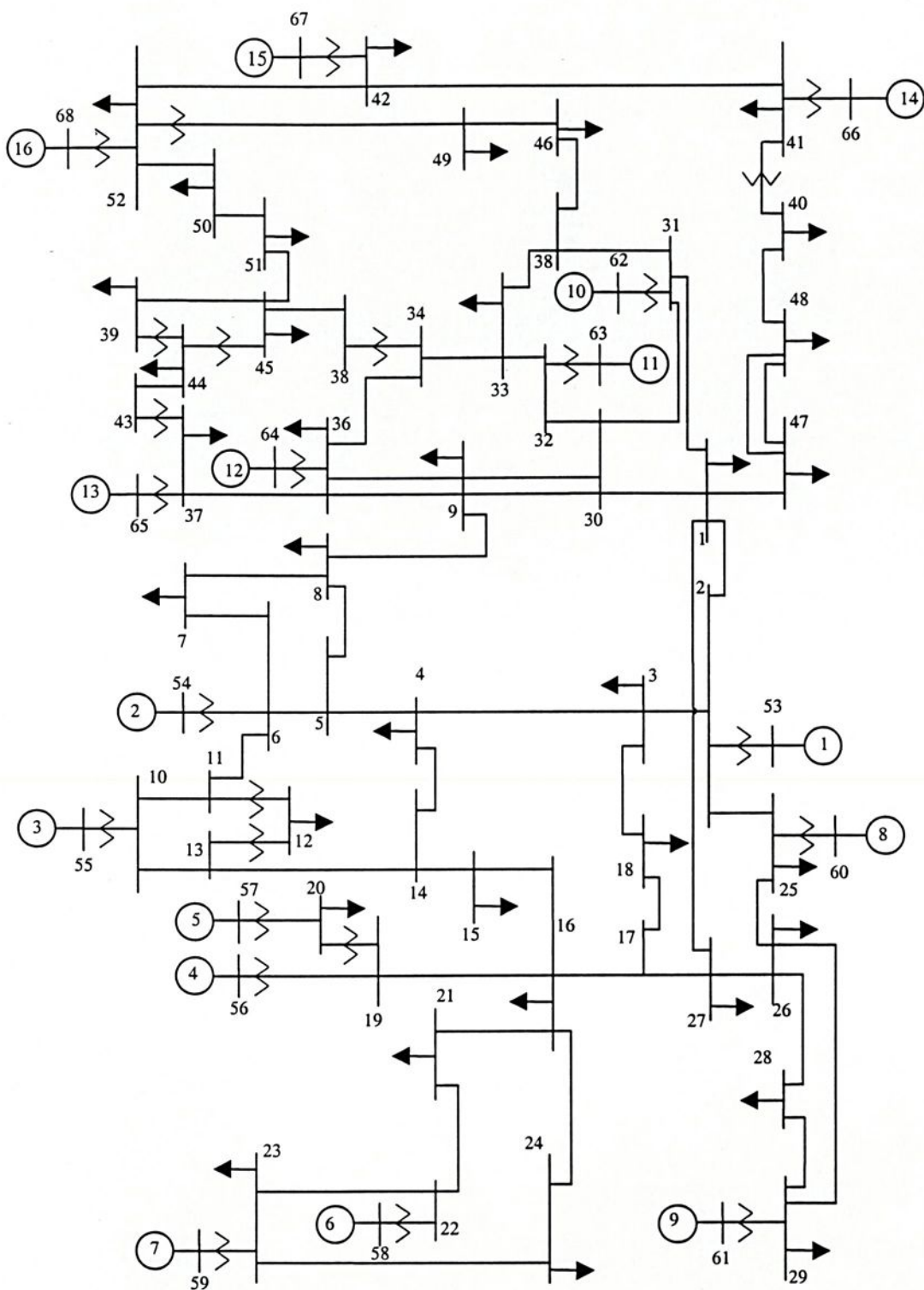


Figura 4.12 - Diagrama unifilar do Sistema de 16 geradores e 68 barras.

A figura 4.13 mostra o resultado da simulação de um caso estável. A simulação foi realizada até 3,5 segundos, para um curto-circuito trifásico próximo à barra 29. Esta perturbação é eliminada em 0,065 segundos com o desligamento da linha de transmissão 28 – 29.

A figura 4.14 mostra o resultado da simulação de um caso instável, em que o curto-circuito próximo a barra 29, agora é eliminado em 0,07 segundos.

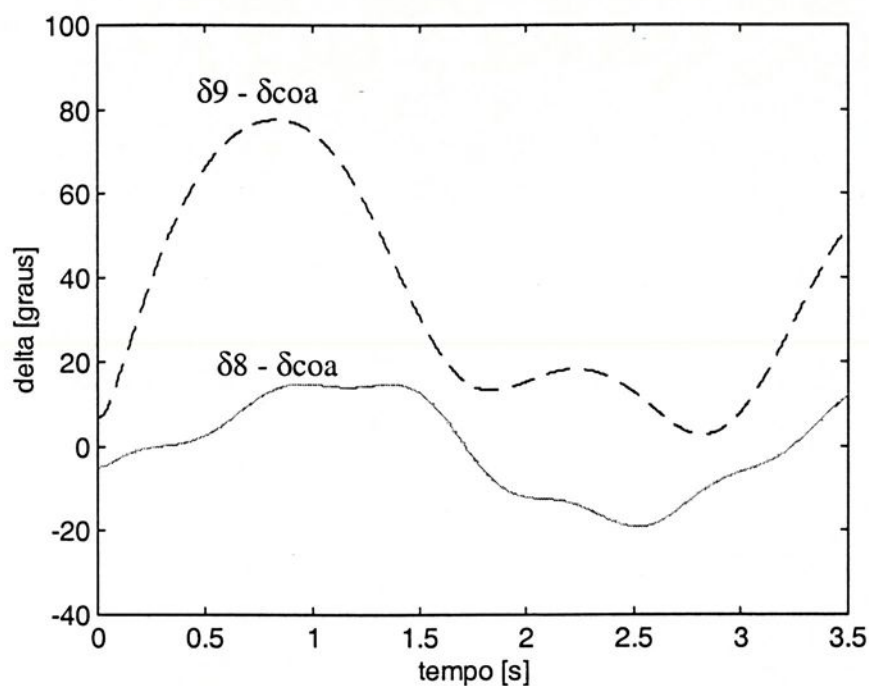


Figura 4.13 – Ângulos dos geradores 8 e 9, em relação ao centro dos ângulos (caso estável).

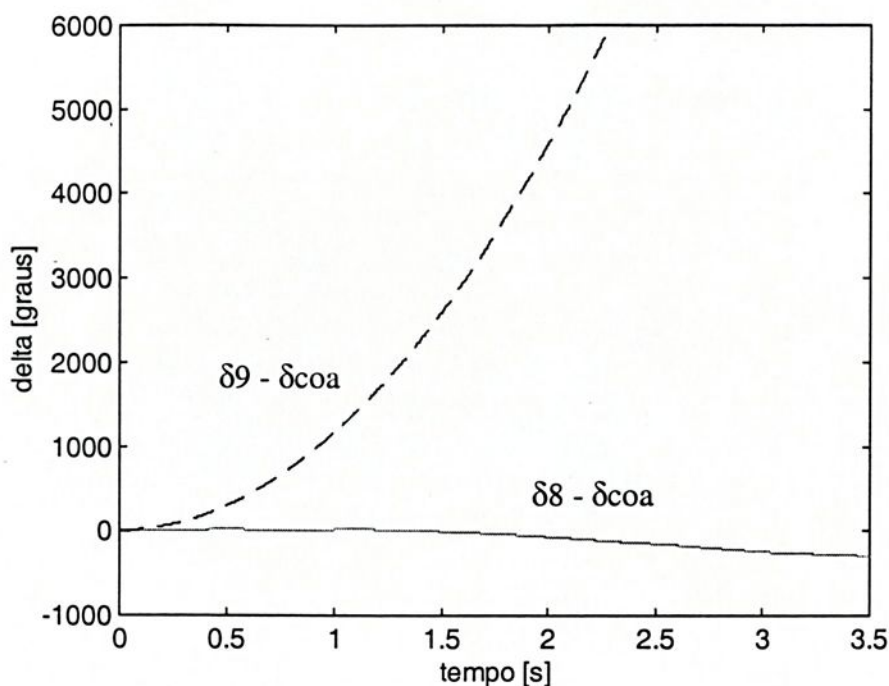


Figura 4.14 – Ângulos dos geradores 8 e 9, em relação ao centro dos ângulos (caso instável).

A figura 4.15 mostra a margem de estabilidade para um defeito que ocorre na barra 29 e é eliminado através da retirada da linha 28-29. Os tempos de eliminação do defeito variam de 0,045 até 0,26 segundos. A máquina crítica é a número 9, sendo que isto pode ser observado na tabela 4.1. Nesta tabela aparecem as informações das 6 máquinas que mais aceleram.

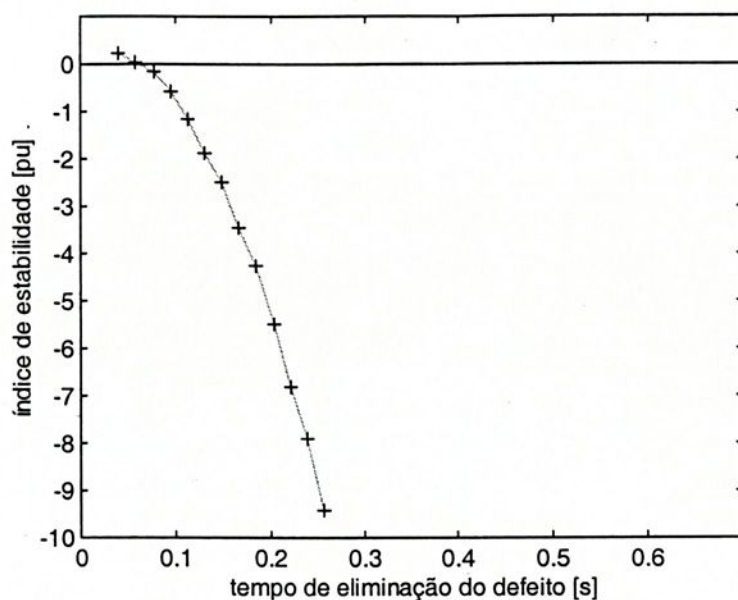


Figura 4.15 – Índices de estabilidade para um curto – circuito 3 ϕ na barra 29.

Tabela 4.1 – Aceleração das máquinas para o defeito na barra 29.

Número da máquina	3	4	6	7	8	9
Aceleração(m/s ²)	1,6187	1,9757	2,3074	1,8378	3,0310	13,5435

A figura 4.16 mostra a margem de estabilidade para um defeito, que ocorre na barra 19, eliminado sem o desligamento de linhas de transmissão. Os tempos de eliminação do defeito variam de 0,045 até 0,46 segundos. A máquina crítica é a número 4, sendo que isto pode ser observado na tabela 4.2. Nesta tabela aparecem as informações das 6 máquinas que mais aceleram.

Tabela 4.1 – Aceleração das máquinas para o defeito na barra 19.

Número da máquina	3	4	5	6	7	9
Aceleração(m/s ²)	3,5239	12,1585	9,3018	6,6384	5,2542	3,9516

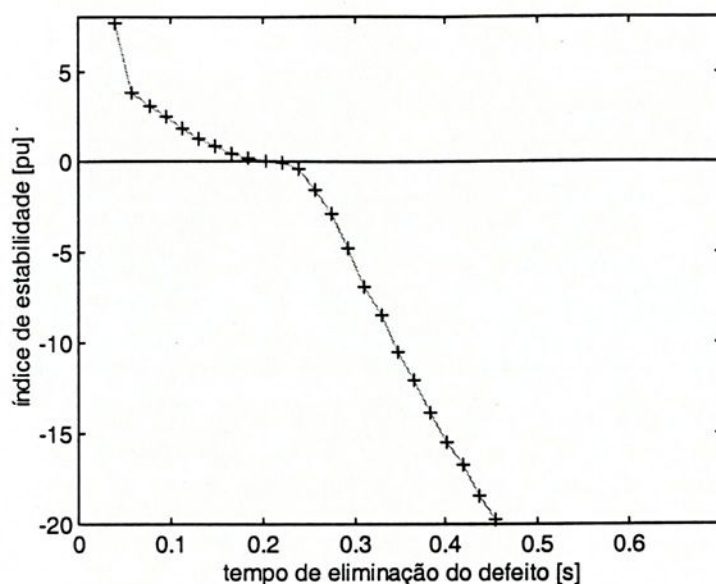


Figura 4.16 – Índices de estabilidade para um curto – circuito 3 ϕ na barra 19.

A figura 4.17 mostra a margem de estabilidade para um defeito que ocorre na barra 6, eliminado sem o desligamento de linhas de transmissão,. Os tempos de eliminação do defeito variam de 0,045 até 0,43 segundos. A máquina crítica é a número 2.

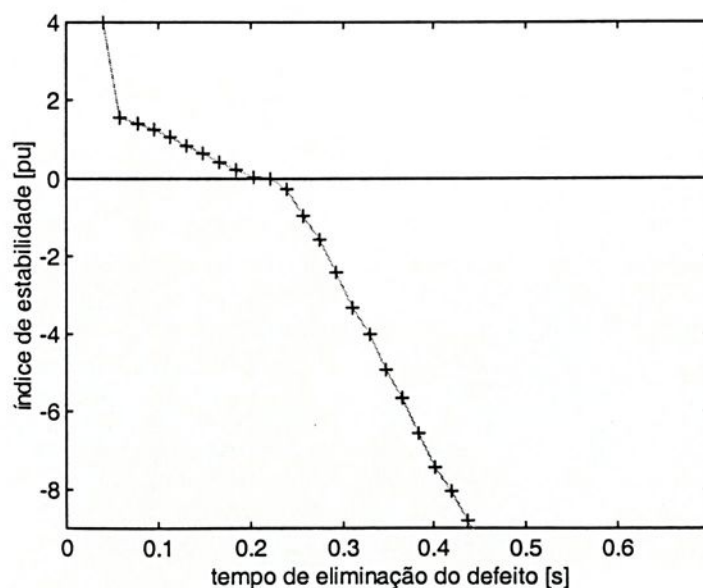


Figura 4.17 – Índices de estabilidade para um curto – circuito 3 ϕ na barra 6.

A figura 4.18 mostra a margem de estabilidade para um defeito que ocorre na barra 25 e é eliminado através da retirada da linha 25-26. Os tempos de eliminação do defeito variam de 0,18 até 0,453 segundos. A máquina crítica é a número 8.

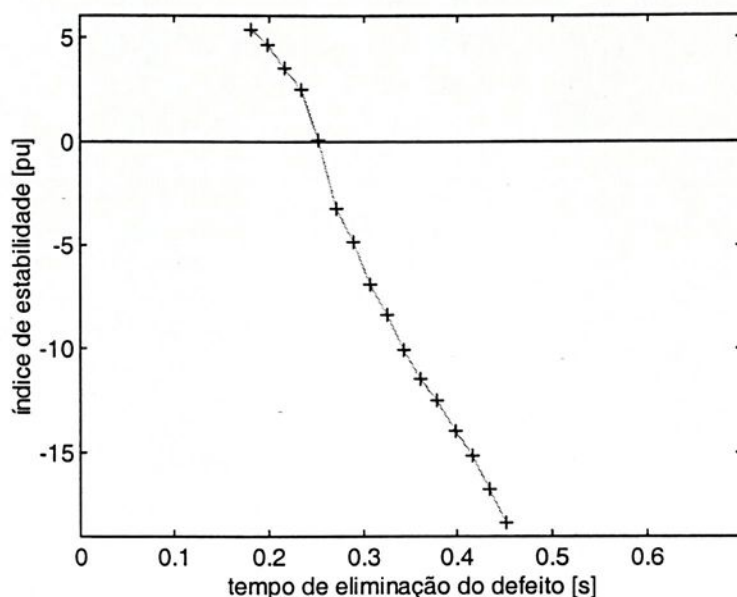


Figura 4.18 – Índices de estabilidade para um curto-circuito 3 ϕ na barra 25.

Um defeito na barra 7 eliminado sem o desligamento de linhas de transmissão, em 0,29 segundos representa um caso estável. A fim de observar a influência nas máquinas mais próximas é mostrada a figura 4.19, onde mostram-se as energias cinéticas das máquinas 2 e 3. Isto permite observar que a escolha da máquina crítica errada vai produzir resultados insatisfatórios.

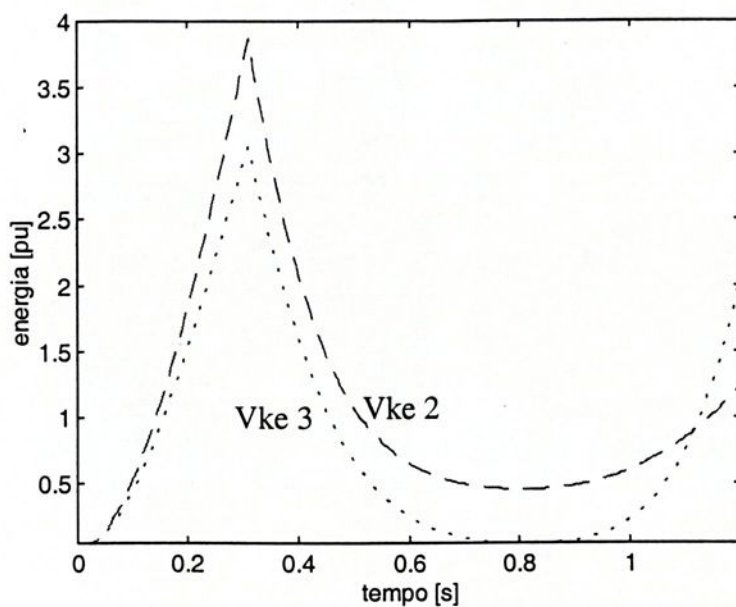


figura 4.19 – Energias cinéticas da máquina 2 e 3. Caso estável.

A figura 4.20 mostra a margem de estabilidade. Os tempos de eliminação do defeito variam de 0,13 até 0,47 segundos. A máquina crítica é a número 3.

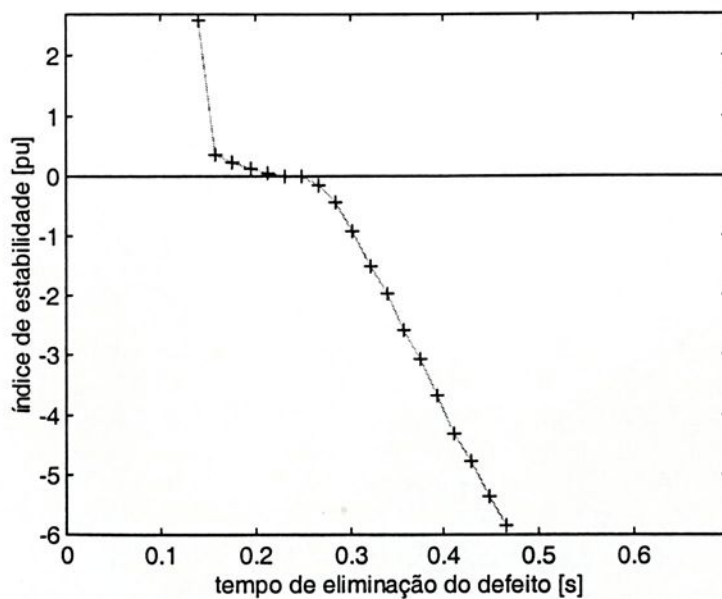


Figura 4.20 – Índices de estabilidade para um curto-circuito 3 ϕ na barra 7.

A figura 4.21 mostra a margem de estabilidade para um defeito que ocorre na barra 45 sendo eliminado através da retirada da linha 45-39. Os tempos de eliminação do defeito variam de 0,42 até 0,77 segundos. A máquina crítica, obtida através da análise da aceleração é a número 15.

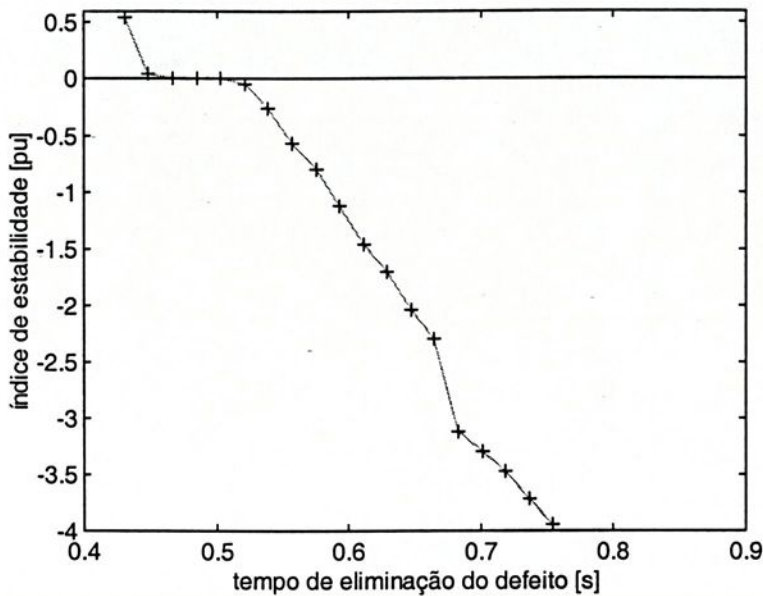


Figura 4.21 – Índices de estabilidade para um curto-circuito 3φ na barra 45.

A tabela 4.3 mostra uma análise de uma série de contingências, as quais foram classificadas por ordem de severidade. Os resultados foram obtidos com relação ao sistema da figura 4.12.

Tabela 4.3 – Classificação de contingências.

Barra sob falta	t _{cl} [s]	Linha Retirada	Linha Reenseriada	MS	Situação	T[s]
29	0,3660	29-28	não	-19,5361	muito instável	0,001
19	0,4160	19-20	sim	-16,7302	muito instável	0,001
25	0,3010	25-26	não	-6,0270	instável	0,049
6	0,3160	6-54	sim	-3,5365	instável	0,141
7	0,2760	7-6	não	-0,1221	instável	0,324

7	0,3010	7-6	não	-0,7067	instável	0,499
45	0,5000	45-39	não	0,0001	estável	0,600
51	0,3510	51-45	sim	0,0676	estável	0,649
45	0,451	45-39	não	0,3257	estável	0,799
51	0,3010	51-45	sim	0,6436	estável	0,798



CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvido um programa para simulação da estabilidade transitória em sistemas de energia elétrica. Este programa permite a simulação de n -máquinas, sendo que atualmente são representadas pelo modelo clássico, porém a estrutura da implementação facilita a incorporação de outros modelos. A rede de transmissão não é reduzida às barras internas de geração. Assim, permite que outros tipos de modelos de cargas sejam implementados. O algoritmo tem uma característica híbrida, ou seja, realiza a simulação via regra do trapézio e cálculo de margens de estabilidade baseado no método da função da energia durante o transitório.

O cálculo da margem da estabilidade é realizado usando-se a energia no transitório de apenas uma máquina. Isto evita o dispendioso processo de obtenção do ponto de equilíbrio instável de controle (UEP). As limitações ficam por conta da obtenção da máquina crítica. Aqui foi apresentada uma maneira rápida de obtenção desta máquina.

Com o programa desenvolvido, é possível classificar uma série de contingências de uma forma bastante rápida, uma vez que as simulações podem, na maioria dos casos, ser interrompidas antes de um segundo. Este tempo de simulação pode variar de sistema para sistema e também depender da localização do defeito.

Como sugestões para futuros trabalhos, indicam-se as várias implementações e testes que podem ser realizados, a fim de fazer uma maneira eficiente de classificação de contingências para análise de segurança dinâmica. A seguir destacam-se:



- implementações de outros índices para classificar contingências. Isto é útil para classificar comparações e, também, para uma classificação com uma composição de vários índices;
- a classificação de contingência, a partir de vários índices, poderá exigir a utilização de técnicas que permitam atribuir pesos diferentes a cada um deles, por exemplo, redes neurais;
- testes com diferentes sistemas precisam ser realizados para calibrar a obtenção da máquina crítica e o valor de T do algoritmo da figura 3.15. O valor de T define o tempo total de simulação;
- o cálculo da margem de estabilidade para casos estáveis requer a reinserção do defeito. Isto é uma desvantagem do método apresentado. Melhorias para este cálculo são desejáveis.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] ANDERSON, P. M., FOUAD, A. A. "Power System Control and Stability". IEEE Press, 1994.
- [02] CHOW, J. H., editor. "Time-Scale Modelling of Dynamic Networks With Applications to Power Systems". Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer-Verlag, 1982. Series editors BALAKRISNAN, A V. and THOMAS, M.
- [03] EL – ABIAD, A. H. and NAGAPPAN, K. "Transient Stability Regions for Multi-Machine Power Systems". IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS – 85, pp. 169-179, Feb. 1996.
- [04] ELGERD, O. I. "Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica". McGraw-Hill do Brasil, São Paulo-SP, 1976.
- [05] FOUAD, A. A., et al, "Transient Stability Margin as a Tool for Dynamic Security Assessment". EPRI Report No. EL – 1755, March, 1981.
- [06] HAQUE, M. H. "Hybrid Method of Determining the Transient Stability Margin of a Power System". IEE Proc. – Gener. Transm. Distrib., Vol. 143(1): 27-32. January 1996.
- [07] MARIA, G. A., TANG, C., and KIM, J. "Hybrid Transient Stability Analysis". IEEE Trans.on PAS.5 (2), pp. 384-391. May 01990.
- [08] FOUAD, A. A. And VITTAL, V. "Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method". Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1986.

- [09] MONTICELLI, A. J. "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica". Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1983.
- [10] PADILHA, A. F. "Cálculo da Estabilidade Transitória em Sistemas de Energia Elétrica Utilizando Esquema Simultâneo Implícito". Dissertação de Mestrado, Unicamp, Março-86.
- [11] PAI, M. A., "Power System Stability : Analysis by the Direct Method of Lyapunov". North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1981.
- [12] LEE, S. T. Y. and SCHWEPPE, F. C., "Distance Measures and Coherency Recognition for Transient Stability Equivalents". IEEE PES Winter Meeting, New York, 1973,paper T 73092-4 (8p).
- [13] STOTT, B. "Power System Dynamics Response Calculations". Proceedings of the IEEE, 67(2) : 219-241, Feb. 1979.
- [14] YOUNG, C. C. "The Synchronous Machine". IEEE Tutorial Course. Modern Concepts of Power System Dynamics, p. 11 – 24, New York, May 1970.



ANEXO A

DADOS DO SISTEMA DA REFERÊNCIA [02]

(68 BARRAS E 16 GERADORES)



Neste apêndice são apresentados todos os dados, do sistema da figura 4.12, que são necessários para o cálculo da estabilidade transitória. Na tabela A1 mostram-se os dados de barra. Na tabela A2 os dados de linha e na tabela A3 os dados dos geradores.

Tabela A1 - Dados de barra.

Número da Barra	Tipo da Barra	V (tensão)	θ (ângulo em graus)	Potência ativa consumida pu	Potência reativa consumida pu	Pg (potência ativa gerada pu)	Qg (potência reativa gerada pu)
1	0	1.0590	6.61	2.5300	1.1900	.000	.000
2	0	1.0520	8.43	.0000	.0000	.000	.000
3	0	1.0330	5.43	3.2200	.0200	.000	.000
4	0	1.0060	4.31	5.0000	1.8400	.000	.000
5	0	1.0070	5.25	.0000	.0000	.000	.000
6	0	1.0090	5.93	.0000	.0000	.000	.000
7	0	.9990	3.66	2.3400	.8400	.000	.000
8	0	.9990	3.12	5.2200	1.7700	.000	.000
9	0	1.0390	2.58	1.0400	1.2500	.000	.000
10	0	1.0180	8.45	.0000	.0000	.000	.000
11	0	1.0140	7.60	.0000	.0000	.000	.000
12	0	1.0550	7.62	.0900	.8800	.000	.000
13	0	1.0160	7.78	.0000	.0000	.000	.000
14	0	1.0130	6.24	.0000	.0000	.000	.000
15	0	1.0170	6.14	3.2000	1.5300	.000	.000
16	0	1.0330	7.68	3.2900	.3200	.000	.000
17	0	1.0360	6.59	.0000	.0000	.000	.000
18	0	1.0340	5.72	1.5800	.3000	.000	.000
19	0	1.0500	12.27	.0000	.0000	.000	.000
20	0	.9900	10.84	6.8000	1.0300	.000	.000
21	0	1.0330	10.31	2.7400	1.1500	.000	.000
22	0	1.0500	15.00	.0000	.0000	.000	.000
23	0	1.0450	14.71	2.4800	.8500	.000	.000
24	0	1.0390	7.85	3.0900	-.9200	.000	.000
25	0	1.0600	9.70	2.2400	.4700	.000	.000
26	0	1.0560	8.20	1.3900	.1700	.000	.000
27	0	1.0430	6.31	2.8100	.7600	.000	.000
28	0	1.0520	11.33	2.0600	.2800	.000	.000
29	0	1.0510	13.97	2.8400	.2700	.000	.000
30	0	1.0540	6.07	.0000	.0000	.000	.000
31	0	1.0570	8.63	.0000	.0000	.000	.000
32	0	1.0510	10.96	.0000	.0000	.000	.000

33	0	1.0560	7.47	1.1200	.0000	.000	.000
34	0	1.0650	2.54	.0000	.0000	.000	.000
35	0	1.0140	2.53	.0000	.0000	.000	.000
36	0	1.0420	-.85	1.0200	-.1900	.000	.000
37	0	1.0290	-6.80	60.0000	3.0000	.000	.000
38	0	1.0560	8.68	.0000	.0000	.000	.000
39	0	1.0060	-8.44	2.6700	.1300	.000	.000
40	0	1.0680	15.22	.6600	.2400	.000	.000
41	0	.9990	44.49	10.0000	2.5000	.000	.000
42	0	.9990	38.92	11.5000	2.5000	.000	.000
43	0	1.0150	-7.61	.0000	.0000	.000	.000
44	0	1.0140	-7.64	2.6800	.0500	.000	.000
45	0	1.0180	2.53	2.0800	.2100	.000	.000
46	0	1.0320	9.65	1.5100	.2800	.000	.000
47	0	1.0740	7.36	2.0300	.3300	.000	.000
48	0	1.0770	9.28	2.4100	.0200	.000	.000
49	0	1.0120	12.88	1.6400	.2900	.000	.000
50	0	1.0120	19.33	1.0000	-1.4700	.000	.000
51	0	1.0220	6.52	3.3700	-1.2200	.000	.000
52	0	.9930	38.59	24.7000	1.2300	.000	.000
53	1	1.0450	10.85	.0000	.0000	2.500	1.150
54	1	.9800	14.41	.0000	.0000	5.450	1.840
55	1	.9830	16.44	.0000	.0000	6.500	1.990
56	1	.9970	17.49	.0000	.0000	6.320	1.070
57	1	1.0110	16.01	.0000	.0000	5.050	1.620
58	1	1.0500	20.34	.0000	.0000	7.000	2.200
59	1	1.0630	22.56	.0000	.0000	5.600	.990
60	1	1.0300	16.45	.0000	.0000	5.400	.000
61	1	1.0250	20.79	.0000	.0000	8.000	.050
62	1	1.0100	15.90	.0000	.0000	5.000	.060
63	1	1.0000	18.35	.0000	.0000	10.000	-.170
64	1	1.0160	4.86	.0000	.0000	13.500	2.490
65	2	1.0110	.00	.0000	.0000	35.910	8.750
66	1	1.0000	46.02	.0000	.0000	17.850	.620
67	1	1.0000	39.78	.0000	.0000	10.000	.670
68	1	1.0000	45.53	.0000	.0000	40.000	4.600

Obs.: Tipo de barra (0 = carga, 1 = geração e 2 = referência).

Tabela A2 - Dados das linhas de transmissão e dos transformadores.

Nó Inicial	Nó Final	R(pu)	X(pu)	BSH (susceptância total)(pu)	tap (relação de transformação)
1	2	.0035	.0411	.6987	0.0000
1	30	.0008	.0074	.4800	0.0000

2	3	.0013	.0151	.2572	0.0000
2	25	.0070	.0086	.1460	0.0000
2	53	.0000	.0181	.0000	1.0250
3	4	.0013	.0213	.2214	0.0000
3	18	.0011	.0133	.2138	0.0000
4	5	.0008	.0128	.1342	0.0000
4	14	.0008	.0129	.1382	0.0000
5	6	.0002	.0026	.0434	0.0000
5	8	.0008	.0112	.1476	0.0000
6	7	.0006	.0092	.1130	0.0000
6	11	.0007	.0082	.1389	0.0000
6	54	.0000	.0250	.0000	1.0700
7	8	.0004	.0046	.0780	0.0000
8	9	.0023	.0363	.3804	0.0000
9	30	.0019	.0183	.2900	0.0000
10	11	.0004	.0043	.0729	0.0000
10	13	.0004	.0043	.0729	0.0000
10	55	.0000	.0200	.0000	1.0700
12	11	.0016	.0435	.0000	1.0600
12	13	.0016	.0435	.0000	1.0600
13	14	.0009	.0101	.1723	0.0000
14	15	.0018	.0217	.3660	0.0000
15	16	.0009	.0094	.1710	0.0000
16	17	.0007	.0089	.1342	0.0000
16	19	.0016	.0195	.3040	0.0000
16	21	.0008	.0135	.2548	0.0000
16	24	.0003	.0059	.0680	0.0000
17	18	.0007	.0082	.1319	0.0000
17	27	.0013	.0173	.3216	0.0000
19	20	.0007	.0138	.0000	1.0600
19	56	.0007	.0142	.0000	1.0700
20	57	.0009	.0180	.0000	1.0090
21	22	.0008	.0140	.2565	0.0000
22	23	.0006	.0096	.1846	0.0000
22	58	.0000	.0143	.0000	1.0250
23	24	.0022	.0350	.3610	0.0000
23	59	.0005	.0272	.0000	0.0000
25	26	.0032	.0323	.5310	0.0000
25	60	.0006	.0232	.0000	1.0250
26	27	.0014	.0147	.2396	0.0000
26	28	.0043	.0474	.7802	0.0000
26	29	.0057	.0625	1.0290	0.0000
28	29	.0014	.0151	.2490	0.0000
29	61	.0008	.0156	.0000	1.0250
9	30	.0019	.0183	.2900	0.0000

9	36	.0022	.0196	.3400	0.0000
9	36	.0022	.0196	.3400	0.0000
36	37	.0005	.0045	.3200	0.0000
34	36	.0033	.0111	1.4500	0.0000
35	34	.0001	.0074	.0000	.9460
33	34	.0011	.0157	.2020	0.0000
32	33	.0008	.0099	.1680	0.0000
30	31	.0013	.0187	.3330	0.0000
30	32	.0024	.0288	.4880	0.0000
1	31	.0016	.0163	.2500	0.0000
31	38	.0011	.0147	.2470	0.0000
33	38	.0036	.0444	.6930	0.0000
38	46	.0022	.0284	.4300	0.0000
46	49	.0018	.0274	.2700	0.0000
1	47	.0013	.0188	1.3100	0.0000
47	48	.0025	.0268	.4000	0.0000
47	48	.0025	.0268	.4000	0.0000
48	40	.0020	.0220	1.2800	0.0000
35	45	.0007	.0175	1.3900	0.0000
37	43	.0005	.0276	.0000	0.0000
43	44	.0001	.0011	.0000	0.0000
44	45	.0025	.0730	.0000	0.0000
39	44	.0000	.0411	.0000	0.0000
39	45	.0000	.0839	.0000	0.0000
45	51	.0004	.0105	.7200	0.0000
50	52	.0012	.0288	2.0600	0.0000
50	51	.0009	.0221	1.6200	0.0000
49	52	.0076	.1141	1.1600	0.0000
52	42	.0040	.0600	2.2500	0.0000
42	41	.0040	.0600	2.2500	0.0000
41	40	.0060	.0840	3.1500	0.0000
31	62	.0000	.0260	.0000	1.0400
32	63	.0000	.0130	.0000	1.0400
36	64	.0000	.0075	.0000	1.0400
37	65	.0000	.0033	.0000	1.0400
41	66	.0000	.0015	.0000	1.0000
42	67	.0000	.0015	.0000	1.0000
52	68	.0000	.0030	.0000	1.0000
1	27	.0320	.3200	.4100	0.0000

Tabela A3 - Dados dos geradores.

Número da barra	X_d (reatância transitória em pu)	H (constante de inércia em [s])
53	.0310	42.000
54	.0697	30.200
55	.0531	35.800
56	.0436	28.600
57	.0660	26.000
58	.0500	34.800
59	.0490	26.400
60	.0570	24.300
61	.0570	34.500
62	.0457	31.000
63	.0180	28.200
64	.0310	92.300
65	.0055	248.000
66	.0029	300.000
67	.0029	300.000
68	.0071	225.000

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
AV. BRASIL, 56 - CAIXA POSTAL 31
15385-000 - ILHA SOLTEIRA - SP**

