

unesp

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

***DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM
ENGENHARIA ELÉTRICA***

1210001040



Nº 14

**ESTUDO DE ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE
ENERGIA ELÉTRICA: IDENTIFICAÇÃO DE CRITICIDADES
ALUNO: PEDRO GAMEIRO LOPES
ORIENTADOR: LAURENCE DUARTE COLVARA**

Te.1040

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
STRICTU SENSU
AUTOMAÇÃO

ESTUDO DE ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA:
IDENTIFICAÇÃO DE CRITICIDADES

Ther 23/97 - UED 128/97

| | |
|--|----------------|
| UNESP - "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" DE ILHA SOLTEIRA | |
| SERVIÇO DE REGISTRO DE DOCUMENTAÇÃO | |
| DATA DE RECEBIMENTO | DATA DE TÍTULO |
| 01.08.97 | 29.8.97 |
| FUNÇÃO | TÍTULO |
| le | TE.1040 |
| CLASSIFICAÇÃO | |
| | L864e |

Ilustração
#10.05
Autor

"Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. "

1210001040



Pedro Gameiro Lopes

Orientador: Prof. Dr. Laurence Duarte Colvara

Ilha Solteira, julho de 1997

BCpIS - FEIS - UNESP

unesp

1 12 13 14 15 16 17 18

ESTUDO DE ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA: IDENTIFICAÇÃO DE CRITICIDADES

PEDRO GAMEIRO LOPES

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA - UNESP - COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.



NOBUO OKI - COORDENADOR

COMISSÃO EXAMINADORA:



LAURENCE DUARTE COLVARA - ORIENTADOR



JOSÉ FRANCISCO RODRIGUES



JOSÉ ROBERTO SANCHES MANTOVANI

ILHA SOLTEIRA, JULHO DE 1997

BCpIS - FEIS - UNESP

AGRADECIMENTOS

À Deus, meu Grande Orientador Espiritual, que sem a sua força este trabalho não teria sido iniciado.

Ao Professor Laurence Duarte Colvara, que sem o seu conhecimento e paciência este trabalho não teria sido concluído.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Elétrica da FEIS/UNESP, em especial ao Professor José Roberto Sanches Mantovani, e aos colegas de curso que, de alguma forma, auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Sr. Deoclécio Mitsuiti Kosada pela enorme colaboração prestada na parte de informática.

À Reitoria da UNESP e à CAPES.

SUMÁRIO

| | |
|---------------------------|----|
| NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA..... | 01 |
| RESUMO..... | 03 |
| ABSTRACT..... | 04 |

CAPÍTULO I INTRODUÇÃO

| | |
|---|----|
| 1. Estabilidade de Sistema de Energia Elétrica..... | 05 |
| 2. Estabilidade Transitória..... | 06 |
| 3. Descrição do Trabalho..... | 09 |

CAPÍTULO II MODELOS UTILIZADOS

| | |
|--|----|
| 1. A Máquina Síncrona..... | 11 |
| 2. Os Reguladores..... | 15 |
| 3. Linhas de Transmissão e Transformadores..... | 17 |
| 4. A Rede Elétrica..... | 18 |
| 5. Sistema Multimáquinas (Integração entre Máquinas e Rede)..... | 19 |
| 6. Redução do Sistema às Barras Internas dos Geradores..... | 20 |

CAPÍTULO III ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE UM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA DURANTE UMA FALTA

| | |
|--|----|
| 1. Rede Reduzida às Barras Internas dos Geradores mais a Barra de Falta..... | 23 |
| 2. Sensibilidade Eletromecânica..... | 25 |
| 3. Sensibilidade do Campo Eletromagnético sem Regulador Automático de Tensão..... | 27 |
| 4. Sensibilidade do Regulador Automático de Tensão (RAT)..... | 29 |
| 5. Sensibilidade do Campo Eletromagnético com Regulador Automático de Tensão..... | 30 |
| 6. Utilização dos Índices para Ordenação e Discriminação entre as Máquinas mais Perturbadas e as não Afetadas..... | 31 |

CAPÍTULO IV

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

| | |
|---|----|
| 1. Simulação..... | 33 |
| Resultados da Sensibilidade Eletromecânica..... | 41 |
| Resultados da Sensibilidade do Campo Sem RAT..... | 44 |
| Resultados da Sensibilidade do RAT..... | 46 |
| Resultados da Sensibilidade do Campo com RAT..... | 47 |
| 2. Análise dos Resultados..... | 48 |
| 3. Índice de Sensibilidade Eletromagnética..... | 48 |

Capítulo V

| | |
|----------------|----|
| CONCLUSÃO..... | 49 |
|----------------|----|

| | |
|-------------------|----|
| BIBLIOGRAFIA..... | 50 |
|-------------------|----|



NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA

| | | |
|------------------|---|---|
| ∂ | - | Derivada Parcial |
| δ | - | Posição Angular da Máquina Síncrona |
| Δ | - | Varição de Uma Grandeza |
| $\dot{\omega}$ | - | Velocidade Angular da Máquina Síncrona |
| ε | - | Varição da Tensão de Excitação ($E_{fd} - E_{fd}^0$) |
| θ | - | Fase da Admitância |
| B | - | Susceptância |
| D | - | Constante de Amortecimento |
| e | - | Varição da Tensão Interna da Máquina Síncrona ($E' - E'^0$) |
| E | - | Tensão Interna da Máquina Síncrona |
| E' | - | Tensão Interna da Máquina Síncrona no Sistema MBI |
| E' _d | - | Tensão Proporcional ao Enlace de Fluxo de Eixo Direto |
| E _q | - | Componente de Eixo em Quadratura da Tensão Interna da Máquina Síncrona |
| E' _q | - | Tensão Proporcional ao Enlace de Fluxo de Eixo em Quadratura |
| E _{fd} | - | Tensão de Excitação |
| E _k | - | Tensão da Barra de Falta |
| H | - | Constante de Inércia da Máquina Síncrona |
| G | - | Condutância |
| i _d | - | Corrente de Eixo Direto nos Terminais da Máquina Síncrona |
| K _d | - | Ganho do Amplificador do RAT |
| K _e | - | Ganho da Excitatriz |
| K _f | - | Ganho da Função de Transferência de Realimentação |
| K _R | - | Ganho Transitório do RAT (modelo reduzido) |
| M | - | Constante de Inércia da Máquina Síncrona |
| MBI | - | Sistema Máquina vs Barra Infinita |
| P _e | - | Potência Elétrica Entregue Pela Máquina Síncrona |
| P _m | - | Potência Mecânica Fornecida à Máquina Síncrona |
| T _r | - | Constante de Tempo do RAT |
| T _R | - | Constante de Tempo Associada ao Polo Localizado na Faixa de Frequência de interesse |
| RAT | - | Regulador Automático de Tensão |
| T' _{do} | - | Constante de Tempo de Circuito Aberto de Eixo Direto |



- T'_{q0} - Constante de Tempo de Circuito Aberto de Eixo em Quadratura
- V_d - Tensão de Eixo Direto
- V_q - Tensão em Quadratura
- V_T - Tensão Terminal
- \dot{x} - Derivada Temporal da Variável x (dx/dt)
- x' - Reatância Transitória
- x_d - Reatância de Eixo Direto
- x'_d - Reatância Transitória de Eixo Direto
- Z - Impedância

O subscrito "0" indica valores de equilíbrio.



RESUMO

Para se manter um sistema de potência com qualidade, sob os aspectos de segurança e economia para os consumidores, é necessário um planejamento muito bem coordenado pelas respectivas Empresas Concessionárias. Com o crescimento acentuado do sistema interligado torna-se impossível um estudo isolado e muito trabalhosa a representação do sistema total, em detalhes, para análise de estabilidade.

Observa-se que, diante de uma certa contingência, algumas máquinas são mais severamente afetadas que outras e pode ocorrer, também, que algumas não demonstrem sensibilidade à perturbação considerada.

O objetivo deste trabalho consiste em identificar, automaticamente, as máquinas que não são afetadas, tanto no aspecto mecânico como no eletromagnético, para que possam ser modeladas com a maior simplicidade possível. O processo de cálculo utilizado foi o de análise de sensibilidade.



ABSTRACT

To operate a power system with security, economics and quality under the customer's point of view, a well coordinate planning is necessary. However, the interconnected power system accentuated growing becomes impossible to do an isolated study and, in the other hand, the total system representation for stability studies is a too hard task.

It is observable that, for a certain contingency, some of the machine's system are strongly affected while others do not appear to be sensible to the same contingency.

The present subject is to identify automatically the machines that are not affected by the disturbance, in the mechanical as well as in the electromagnetic aspects in order to use models as simplest as possible. To do this, the analysis of sensitivity is used.



INTRODUÇÃO

Por tratar-se de um tema dentro do assunto inicialmente será dado um pequeno enfoque sobre Estabilidade de Sistemas de Energia Elétrica (SEE) e Estabilidade Transitória, sem intenção de um aprofundamento demasiado, e a seguir será apresentado o objetivo e a descrição deste trabalho.

1. Estabilidade de Sistema de Energia Elétrica.

Quando um sistema de energia elétrica, que vem operando sob estado de regime permanente, sofre uma perturbação e a correspondente resposta oscilatória que se segue é amortecida, fazendo com que haja uma acomodação em um período de tempo finito e proporcionando um retorno a uma nova condição de regime permanente, dizemos que o sistema é estável. Caso contrário o sistema será considerado instável.

Uma determinada perturbação (falta) pode causar o redimensionamento dos ângulos das tensões das máquinas síncronas e, também, provoca um desbalanceamento entre o sistema de geração e a carga resultando no estabelecimento de uma nova condição de regime permanente, com os respectivos ajustes dos ângulos de tensões. A perturbação pode ter origem na perda de um dos geradores, em uma falta ou perda de uma linha de transmissão, ou em uma combinação dos dois eventos e, também, por uma mudança de cargas aleatórias ocorrendo sob condições de operação normal.

A condição de estabilidade necessita que as oscilações do sistema sejam extintas. Esta condição é, às vezes, chamada de estabilidade assintótica e o sistema conterà forças inerentes que tendem a eliminar as oscilações.

Um sistema de energia elétrica é considerado estável quando todas as suas máquinas estão em sincronismo (ou em passo) e, instável, quando pelo menos uma de suas máquinas sai de sincronismo.

Quando o rotor de uma máquina síncrona desloca-se de um determinado ângulo crítico acarretará um desacoplamento magnético com relação ao seu estator provocando escorregamento de pólos. Sempre que os pólos atravessarem a região angular de estabilidade surgirão forças



no sentido de obrigar o rotor a voltar ao sincronismo, denominadas forças de sincronização.

Define-se como estabilidade de um sistema dinâmico a sua capacidade de retornar às condições de equilíbrio quando submetido às perturbações resultantes de falhas de geração ou transmissão e alterações nas cargas conectadas ao sistema, podendo, para fins de estudo, ser classificada em relação ao período de observação do fenômeno em^[6]:

- a) Estabilidade em regime transitório. (0 a 1 segundo)
- b) Estabilidade em regime dinâmico. (1 a 300 segundos)
- c) Estabilidade em regime permanente. (maior que 300 segundos)

A estabilidade dita em regime permanente é basicamente a capacidade do sistema manter o sincronismo quando sujeito às pequenas perturbações, provocadas por variações na carga ou na geração e, também, o desligamento de linhas, que se tornam semelhantes ao resultado proveniente de variações nas impedâncias da fonte para as cargas provocadas pelas alterações na configuração da rede elétrica.

2. Estabilidade Transitória.

Durante um período de tempo transitório haverá alteração na tensão terminal da máquina síncrona, no ângulo do rotor e na frequência, e a impedância vista "olhando de dentro" da rede para o terminal da máquina também pode sofrer variação .

A tensão do campo eletromagnético pode ser afetada por:

- Correntes induzidas nos enrolamentos amortecedores devido a mudanças repentinas nas correntes da armadura. A constante de tempo para estas correntes são usualmente na ordem de 0,1s e são frequentemente referidas como efeitos "subtransitórios".

- Correntes induzidas no enrolamento de campo devido às mudanças súbitas nas correntes da armadura. As constantes de tempo para este caso são da ordem de 1 segundo e são referidas como efeito transitório.

- Mudança na tensão do rotor provocada por alteração na excitatriz, onde são observados os efeitos subtransitório e transitório. Quando os efeitos subtransitórios tiverem quedas muito rápidas, usualmente, serão ignorados e somente os efeitos transitórios serão considerados de importância.

A estabilidade transitória pode ser definida como a capacidade de manutenção do sincronismo de um sistema de potência face às grandes perturbações provocadas por perdas súbitas de cargas, falhas de geração e curto-circuitos.

A perturbação transitória origina fenômenos indesejáveis como:

A perturbação transitória origina fenômenos indesejáveis como^[6]:

a) Redistribuição da potência elétrica na rede provocada pela modificação de suas condições normais.

b) A variação da potência elétrica da rede acarretará uma alteração na potência mecânica dos geradores mais sensíveis que provocarão

alterações em seus torques mecânicos de acordo com as variações das velocidades (acelerações) angulares e as inércias próprias das máquinas.

c) Se o transitório do sistema foi originado por uma falha, sua eliminação não faz necessariamente com que o sistema retorne à estabilidade.

d) Os geradores poderão se comportar como motores.

e) Durante o transitório ocorrem flutuações de tensões que podem não desaparecer com a eliminação da falta.

f) Uma ou mais máquinas podem não retornar ao sincronismo mesmo após a liberação da falta. —

Dentre os diversos fatores que provocam a instabilidade transitória de um sistema destacam-se:

a) A capacidade de transmissão.

b) As características técnicas das unidades geradoras, principalmente a energia mecânica.

c) As características de saturação magnética do estator e do rotor das máquinas síncronas.

d) As velocidades de manobra dos equipamentos que são utilizados para a eliminação das faltas.

e) A velocidade de religamento automático das linhas de transmissão.

Imediatamente após a perda de geração ou de carga, o equilíbrio entre o fornecimento de energia mecânica e o suprimento de energia elétrica deixa de existir. Quando o fornecimento de energia mecânica torna-se insuficiente as inércias dos rotores das máquinas fornecem, durante um período curto, a energia armazenada e provocará uma desaceleração. Quando se perde cargas a energia mecânica fornecida excede a elétrica requerida e provocará aceleração das máquinas.

A análise de estabilidade de sistemas de energia elétrica (SEE), tradicionalmente, tem sido obtida através de uma simulação do regime transitório de interesse, com obtenção das curvas de oscilação que proporcionarão subsídios para uma conclusão sobre a estabilidade. Como este método pode não impor restrições de modelagem dos elementos componentes do SEE poderão ser utilizados modelos tão elaborados quanto se queira, na proporção em que resultados mais realistas são desejados, o que implicará em um consumo demasiadamente alto de tempo tendo em vista a natureza da análise (indireta).

Por outro lado, os métodos diretos de análise de estabilidade dispensam a análise das curvas de oscilação e, também, o esforço de integração numérica fica significativamente reduzido. Estes métodos são baseados na agregação do sistema dinâmico pela Função de Lyapunov (FL)^[7], de modo que não é necessário observar o comportamento de cada variável do sistema, mas apenas algumas condições relacionadas à FL e a trajetória do sistema.

Os estudos de análise de estabilidade de SEE utilizando os métodos diretos foram originados e desenvolvidos considerando, principalmente, o modelo clássico da máquina síncrona, que é representado apenas por uma fonte de tensão constante "atrás" de uma reatância transitória

(reatância de eixo direto da máquina), o que equivale a admitir que uma máquina síncrona apresenta dinâmica exclusivamente de natureza mecânica.

Para o modelo clássico, os resultados obtidos pelos métodos diretos já apresentam resultados de elevada qualidade, porém fornecem soluções que poderão ser consideradas apenas como uma estimativa do seu comportamento real, tendo em vista que a máquina síncrona apresenta diversas dinâmicas que não são consideradas, tais como a de campo eletromagnético e dos enrolamentos amortecedores além de contar com dispositivos de controle como reguladores automáticos de tensão, estabilizadores de sistemas de potência e reguladores de velocidade.

O método de análise de estabilidade de SEE utilizando o conceito da Região de Sincronização Positiva (RSP) estabelece uma região em torno do ponto de equilíbrio estável onde as forças que atuam no sistema se caracterizam como ações restaurativas do equilíbrio e o torque líquido no eixo da máquina é dado por uma função $f(\sigma, e)$ [4]. A figura I.1 mostra a RSP e suas fronteiras, onde são considerados valores fixos para a variável e , e para diferentes valores de e têm-se diferentes pontos de equilíbrio estável, ao longo da curva tracejada (que passa pela origem). A RSP é limitada por curvas definidas como curvas de torque nulo (CTN's) e pela linha de Mínima Tensão Interna (MTI).

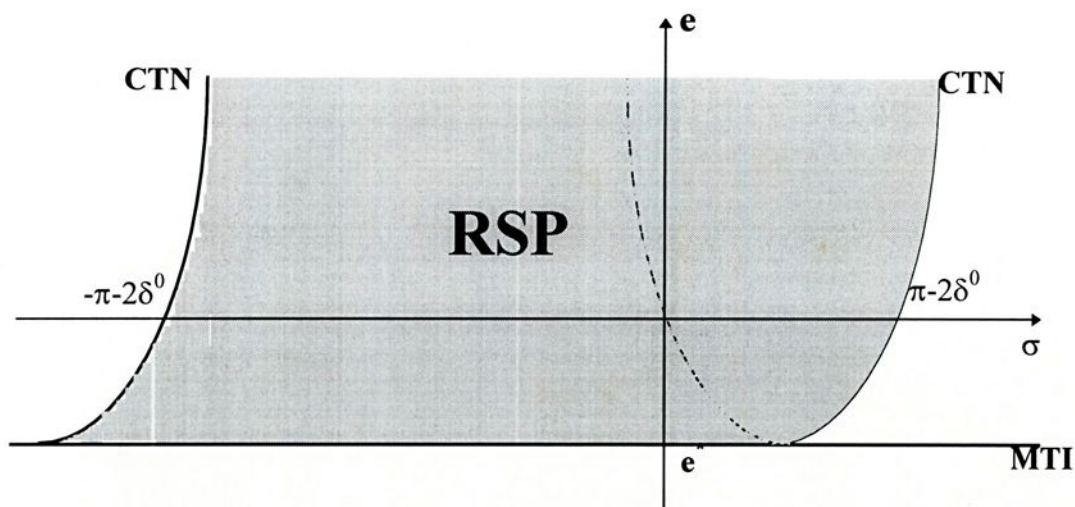


Figura I.1. Região de Sincronização Positiva e suas fronteiras.

A RSP não apresenta fronteira na direção de e positivo o que reforça o fato de valores elevados da tensão interna não representarem restrições de estabilidade e reforçam o torque sincronizante. O princípio básico do método consiste em verificar se a trajetória do sistema abandona a RSP (concluindo pela instabilidade), necessitando avaliar o comportamento da trajetória em relação às suas fronteiras.



O método RSP já teve uma evolução até a consideração dos reguladores automáticos de tensão (RAT's) e de velocidades (RV's) e com a obtenção dos tempos críticos de eliminação de faltas. Sendo um método que avalia a evolução da trajetória pós falta e com o nível de detalhamento de modelos considerados é requerido um elevado esforço computacional. Entretanto, poderá ser observado que, em um sistema submetido a uma determinada perturbação, haverá máquinas que serão muito e outras pouco afetadas, sendo que algumas não apresentarão nenhuma sensibilidade.

3. Descrição do Trabalho

A finalidade deste trabalho é providenciar um cálculo prévio de índices indicativos do grau com que cada máquina será afetada, classificando a listagem das máquinas em ordem decrescente do valor da sensibilidade à falta considerada e discriminando, para análise, aquelas que devem ser modeladas com detalhes de campo eletromagnético, regulador automático de tensão e de velocidade; as que necessitam de um detalhamento intermediário de campo eletromagnético e reguladores; as que não haverá necessidade de considerar os reguladores e, eventualmente, nem o campo; e finalmente aquelas cujas dinâmicas não exercem nenhuma influência sobre o comportamento global do sistema podendo ser simplesmente desconsideradas.

O método de cálculo que será utilizado é aquele baseado na análise de sensibilidade, consistindo em se determinar o grau do efeito provocado pela variação de um dos parâmetro sobre o desempenho geral de um sistema, função de diversas variáveis, e que pode ser obtido através de uma função de sensibilidade (S) a qual pode ser definida por^[18,21]:

$$S = \frac{\partial(F(\Gamma, x))}{\partial\lambda} \quad (1.01)$$

onde:

$$\lambda \in \Gamma$$

F(x) é a função representativa do sistema.

Γ é o conjunto de Parâmetros do sistema.

O trabalho foi dividido em:

Capítulo I. Apresenta uma introdução contendo um pequeno enfoque sobre estabilidade e estabilidade transitória dos sistemas de energia elétrica, o objetivo do trabalho e uma definição de função sensibilidade.



Capítulo II. Apresenta os modelos matemáticos que serão utilizados no desenvolvimento dos cálculos necessários: a máquina síncrona, os reguladores, linhas de transmissão e transformadores, a rede elétrica, o sistema multimáquinas (integração entre máquinas e rede) e redução do sistema às barras internas dos geradores.

Capítulo III. Apresenta o desenvolvimento do cálculo dos índices de sensibilidade de cada máquina de um SEE face à uma determinada falta, sob os aspectos eletromecânico e eletromagnético.

Capítulo IV. Apresenta os resultados obtidos para os índices de sensibilidade na simulação de um sistema hipotético constituído de 13 máquinas, 26 barras e 38 linhas. Visando avaliar a validade e o modelo adotado com as reduções obtidas pelas desconsiderações de diversas dinâmicas do sistema, foram incluídos os gráficos comparativos do sistema total com aqueles do sistema modelado com a retirada das máquinas que não demonstraram sensibilidades, de acordo com os resultados do cálculo da sensibilidade das máquinas.

Capítulo V. Apresenta a conclusão do trabalho.



MODELOS UTILIZADOS

Neste capítulo serão apresentados os modelos que representarão as partes componentes do Sistema de Energia Elétrica (SEE), a saber: as máquinas síncronas, as linhas de transmissão e transformadores, a rede, o sistema multimáquinas (integração máquina e rede), redução da rede às barras internas dos geradores para análise de estabilidade, com inclusão das respectivas equações que demonstrarão, com um bom grau de precisão, o comportamento do sistema dinâmico.

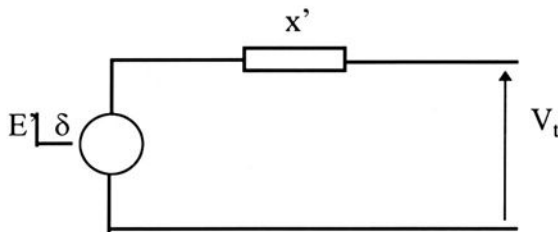
1. A Máquina Síncrona.

Figura II.1. Modelo de Uma Máquina Síncrona.

A figura II.1 mostra o modelo de máquina síncrona^[1] representada pelo conhecido modelo de dois eixos, onde x' (x'_d para a componente de eixo direto e x'_q para a componente de eixo em quadratura) é a reatância transitória e δ é o ângulo do rotor (ou ângulo de torque).

A tensão E' tem as componentes E'_d e E'_q como mostrado no diagrama fasorial da figura II.2, tendo as dinâmicas regidas, respectivamente pelos enrolamentos amortecedor e de campo caracterizados pelas constantes de tempo T'_{q0} e T'_{d0} , como se descreverá a seguir:

No desenvolvimento deste trabalho será empregado o modelo de máquina síncrona do tipo rotor cilíndrico (desprezando-se a saliência transitória e, conseqüentemente, $x'_d = x'_q$) com consideração, além da dinâmica mecânica descrita pela posição angular (δ) e velocidade angular do eixo da máquina (ω), do enrolamento do campo

Fazendo a substituição: $\frac{2H}{\omega} = M$, obtemos a expressão que fornecerá o valor da aceleração:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} [P_m - P_e] \quad (II.02)$$

onde:

$\dot{\omega}$ - aceleração do rotor da máquina.

M - constante de inércia da máquina com a velocidade angular dada em pu.

b) Equação da dinâmica da tensão do campo eletromagnético.

A dinâmica da tensão do campo de uma máquina síncrona do tipo rotor cilíndrico é representada pela expressão^[2]:

$$T'_{do} \dot{E}'_q = E_{fd} - E_q \quad (II.03)$$

sendo^[4]:

$$E_q = E'_q + (x_d - x'_d) i_d \quad (II.04)$$

e:

$$T'_{qo} \dot{E}'_d = -E'_d + (x_q - x'_q) i_q \quad (II.05)$$

onde:

x_d - é a reatância de eixo direto.

x_q - é a reatância de eixo em quadratura.

T'_{do} - é a constante de tempo de circuito aberto correspondente ao eixo direto.

T'_{qo} - é a constante de tempo de circuito aberto correspondente ao eixo em quadratura.

A potência elétrica (ativa) que será fornecida pela máquina é dada por:

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (II.06)$$

sendo v_d e v_q as componentes de eixo direto e quadratura da tensão terminal da máquina que, através do diagrama fasorial apresentado na figura II.2, são obtidas por:

$$\begin{aligned} v_d &= E'_d + x'_q i_q \\ v_q &= E'_q - x'_d i_d \end{aligned} \quad (II.07)$$

que resulta:

$$P_e = E'_d i_d + E'_q i_q + (x'_q - x'_d) i_d i_q \quad (II.08)$$

Como o trabalho será desenvolvido considerando-se a máquina síncrona de rotor liso será desconsiderada a saliência transitória e, conseqüentemente, $x'_d = x'_q$, assim a potência elétrica fornecida será dada por:

$$P_e \cong E'_d i_d + E'_q i_q \quad (II.09)$$

Adicionalmente, considerando-se, no diagrama fasorial da figura II.2 o ângulo α constante, e desconsiderando portanto a dinâmica de E'_d , tem-se o modelo conhecido como de $1\frac{1}{2}$ eixos, de modo que seu diagrama fasorial, simplificado, assim como a expressão da potência ficam como apresentado a seguir:

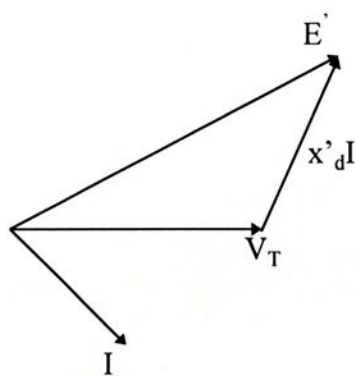


Figura II.3. Diagrama Fasorial do Modelo de Máquina Síncrona de $1\frac{1}{2}$ eixos.

$$P_e = \text{Re}[E'I^*] \quad (II.10)$$

2. Os Reguladores.

A operação satisfatória de um gerador síncrono com grandes ângulos de carga, durante perturbações transitórias depende da fonte de excitação e dos reguladores de tensão.

O controle da tensão nos terminais de uma máquina síncrona é desempenhado pela ação direta do Regulador Automático de Tensão (RAT) na excitatriz que providenciará a variação necessária na tensão do campo eletromagnético. O RAT faz uma comparação entre a tensão do sistema e outra tomada como referência (tensão nominal), com grande sensibilidade em relação às pequenas oscilações apresentadas pelo sistema, e proporciona as devidas correções de tensão com grande velocidade de resposta procurando manter a tensão terminal no valor especificado.

A figura II.3^[6] mostra o diagrama esquemático de uma máquina síncrona com excitação automática e regulador automático de tensão, cujo diagrama de blocos está representado na figura II.4 .

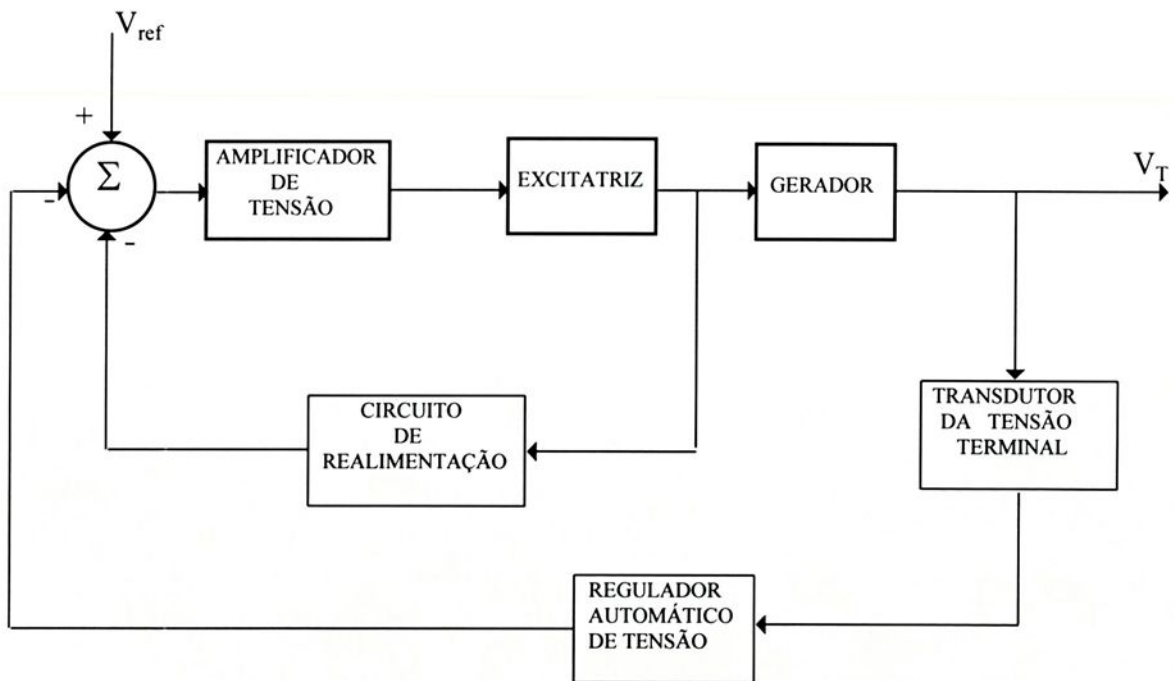


Figura II.4. Máquina Síncrona com Regulador Automático de Tensão.

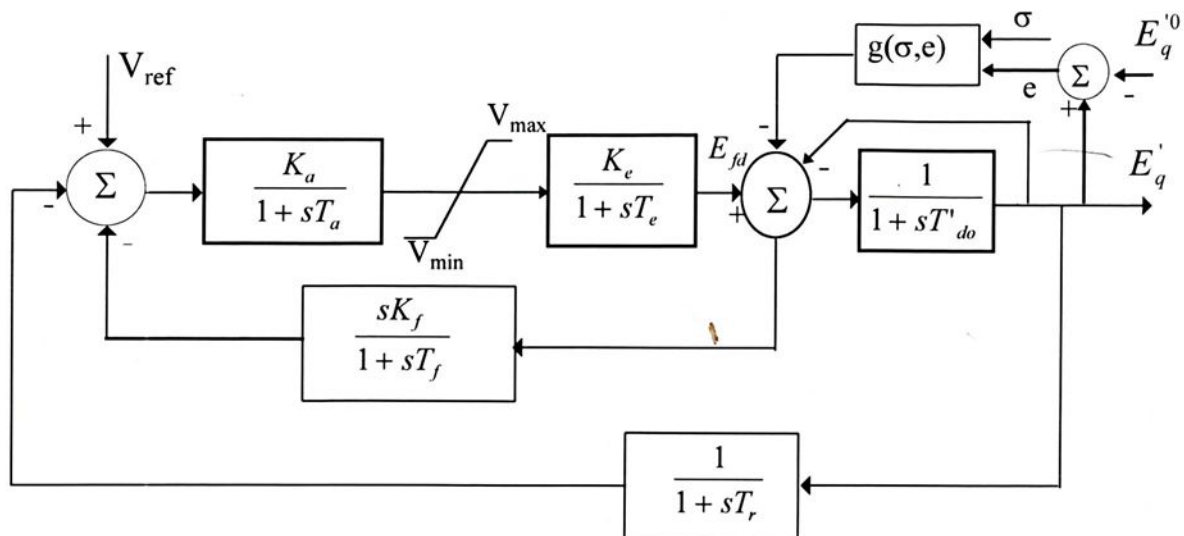


Figura II.5. Diagrama de Blocos da Figura II.3.

Como se pode notar através do diagrama de blocos mostrado na figura II.5 o desempenho do RAT ocorre por meio de um procedimento de considerável complexidade. Como as oscilações do transitório eletromecânico do sistema de potência acontece com freqüências na faixa de 0,5 a 2,0 Hz^[4], que correspondem às velocidades angulares entre 3,14 e 12,5 rad/s e, visto que, há uma acentuada separação entre os pólos de $\Delta E_{fd}(s)/\Delta V(s)$, poderá ser obtida uma redução de ordem do sistema e ser representado por um modelo linear de primeira ordem, como mostrado na figura II.06^[2,4]:

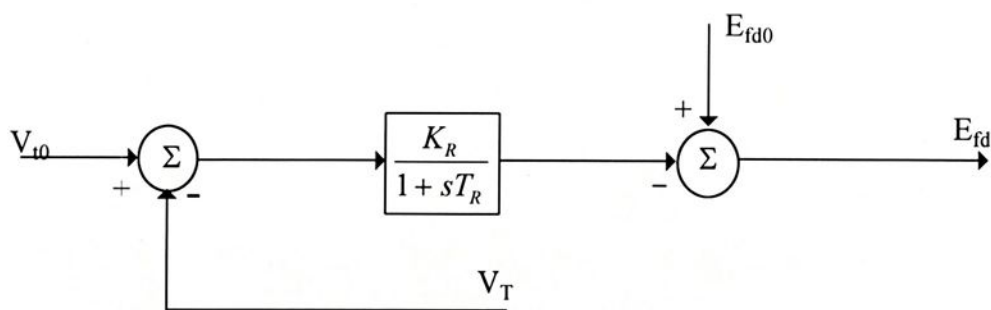


Figura II.6. Modelo Simplificado do Regulador Automático de Tensão.

Onde o RAT é representado por um bloco linear de primeira ordem definido por um ganho K_R e constante de tempo T_R associada ao polo localizado na faixa de freqüência de oscilação de interesse, e a expressão representativa do comportamento dinâmico do RAT tem a forma^[4]:

$$T_R \frac{d E_{fd}}{dt} = -\Delta E_{fd} - K_R \Delta V \quad (11.11)$$

Considerando V_0 constante, em relação ao valor de equilíbrio, obtém-se^[4] :

$$T_R \frac{d\varepsilon}{dt} = -\varepsilon - K_R \Delta V_T \quad (11.12)$$

onde^[4]:

$$\varepsilon = E_{fd} - E_{fd}^0 \quad (11.13)$$

e:

$$\Delta V_T = V_T - V_T^0 \quad (11.14)$$

ou:

$$\Delta V_T = (v_d^2 + v_q^2)^{1/2} - V_T^0 \quad (11.15)$$

Considerando alguma aproximação, a expressão da variação da tensão terminal será representada por^[3]:

$$\Delta V_T \cong \frac{v_d^0}{v_T^0} \Delta v_d + \frac{v_q^0}{v_T^0} \Delta v_q \quad (11.16)$$

onde as variações nas componentes de eixo direto e de quadratura da tensão terminal podem não ter um comportamento linear e, também, não há necessidade de que tenham valores pequenos. Esta aproximação foi útil em trabalhos anteriores quando se buscava a determinação de FL para o SEE com RAT.

3. Linhas de Transmissão e Transformadores.

As linhas de transmissão terão suas representações através de seus circuitos equivalentes π com as respectivas resistências e reatâncias indutivas totais inseridas nos braços séries, e as correspondentes susceptâncias capacitivas divididas em valores iguais nos dois braços "shunt".

Os transformadores terão suas representações através do seu circuito equivalente mostrado na figura II.6[25].

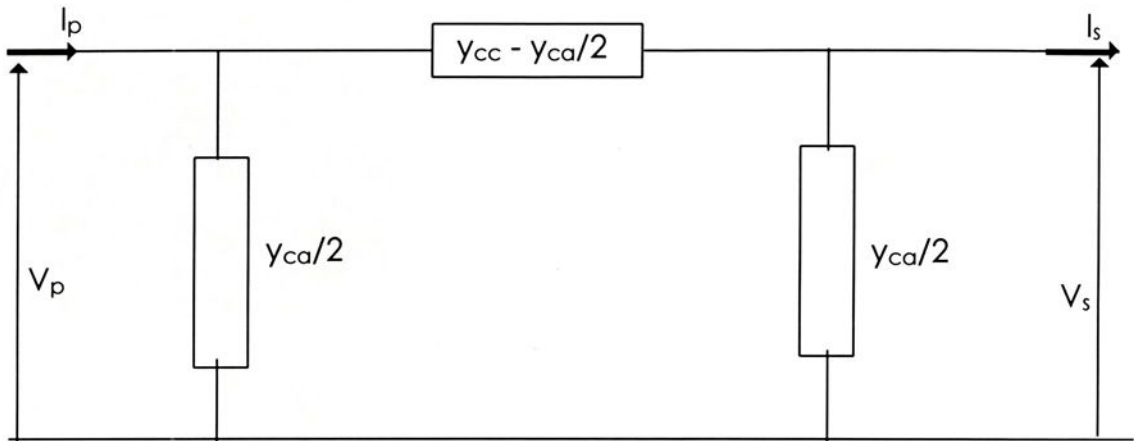


Figura II.7. Circuito Equivalente do Transformador.

Que tem os seus parâmetros que estão indicados na figura definidos como:

Y_{cc} - é a admitância obtida através do ensaio de curto circuito nos terminais secundários do transformador.

Y_{ca} - é a admitância obtida através do ensaio em vazio (circuito aberto) que é a admitância de magnetização do núcleo do transformador.

V_p - é a tensão que é aplicada nos terminais primários do transformador.

V_s - é a tensão que é fornecida pelos terminais secundários do transformador.

I_p - é a corrente que circula pelos enrolamentos primários do transformador.

I_s - é a corrente transformada através da relação de transformação que circula nos enrolamentos secundários do transformador, e que irá alimentar uma carga.

4. A Rede Elétrica.

A rede elétrica que possui uma dinâmica de natureza eletromagnética, com constantes de tempo muito inferiores às referentes ao comportamento eletromecânico do sistema, será considerada em regime permanente e terá a sua representação genérica por:

$$I = YE \quad (11.17)$$

onde os parâmetros envolvidos serão definidos como: I é a representação do vetor dos fasores das injeções de correntes nas barras (ou correntes dos nós), E do vetor dos fasores das tensões das barras e Y da matriz das admitâncias das barras.

A matriz das admitâncias complexas das barras (Y) será formada pelos elementos Y_{ii} introduzidos nas posições que estão situadas na diagonal e Y_{ij} nas posições que não pertencem à diagonal, que serão definidos como:

a) Y_{ii} é a representação da admitância própria da barra i e expressa por:

$$Y_{ii} = |Y_{ii}| \angle \theta_{ii} \quad (11.18)$$

ou:

$$Y_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} \quad (11.19)$$

b) Y_{ij} corresponde a representação da admitância de transferência entre as barras i e j , e será expressa por.

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} \quad (11.20)$$

ou:

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (11.21)$$

5. Sistema Multimáquinas (Integração entre Máquinas e Rede).

A injeção de potência elétrica (P_{ei}) na barra i proporcionada pelo fornecimento de potência ativa através de uma máquina genérica i será representada pela equação^[1]:

$$P_{ei} = \text{Re}(E_i I_i^*) \quad (11.22)$$

da qual podemos obter^[1]:

$$P_{ci} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (11.23)$$

OU:

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n E_i E_j [B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (11.24)$$

A variação da tensão terminal (ΔV_T) pode ser representada, por uma complementação da equação 11.16, através de^[3]:

$$\Delta V_{T_i} \cong K_{e_i} e_i - x'_{d_i} \frac{v_q^0}{V_{T_i}^0} g_i(\sigma, e) + x'_{d_i} \frac{v_{d_i}^0}{V_{T_i}^0} h_i(\sigma, e) \quad (11.25)$$

onde^[3] :

$$\sigma = \delta - \delta_0 \quad (11.26)$$

$$K_{e_i} = (1 + x'_{d_i} B_{ii}) \frac{v_{qi}^0}{V_{T_i}^0} \quad (11.27)$$

$$g_i(\sigma, e) = \sum_j \{-B_{ij} E_j' [\cos(\sigma_K + \delta_{ij}^0) - \cos \delta_{ij}^0] + G_{ij} E_j' [\sin(\sigma_K + \delta_{ij}^0) - \sin \delta_{ij}^0]\} \quad (11.28)$$

$$h_i(\sigma, e) = \sum_j \{B_{ij} E_j' [\sin(\sigma_K + \delta_{ij}^0) - \sin \delta_{ij}^0] + G_{ij} E_j' [\cos(\sigma_K + \delta_{ij}^0) - \cos \delta_{ij}^0]\} \quad (11.29)$$

6. Redução do Sistema às Barras Internas dos Geradores.

Para o desenvolvimento do estudo de análise de estabilidade, neste trabalho, as barras internas das máquinas síncronas serão incluídas na estrutura da rede, bem como as admitâncias das cargas (consideradas constantes), propiciando uma redução da matriz admitância de barras às barras internas dos geradores, resultando no modelo da figura 11.8.

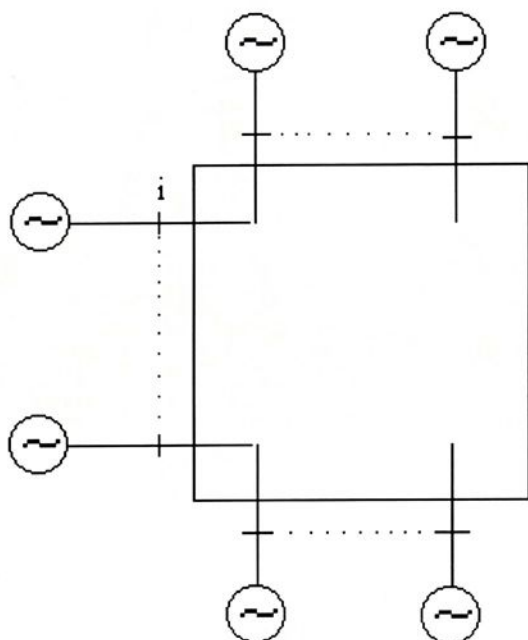


Figura II.8. Rede reduzida às Barras Internas dos Geradores.

Considerando a redução de rede ilustrada através da figura II.8 a corrente terminal para uma máquina síncrona genérica i do sistema poderá ser calculada por:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} E_j \quad (II.30)$$

que colocada em termos das componentes da rede, com índices R e I representando as parcelas real e imaginária da grandeza complexa, e G_{ij} e B_{ij} a condutância e a susceptância de transferência entre as barras i e j , resultará na expressão:

$$\begin{bmatrix} I_{Ri} \\ I_{Ii} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{Rj} \\ E_{Ij} \end{bmatrix} \quad (II.31)$$

As componentes de eixo direto e quadratura para a corrente de uma máquina síncrona i genérica poderá ser calculada através da transformação:



$$\begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen } \delta_i & -\text{cos } \delta_i \\ \text{cos } \delta_i & \text{sen } \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ri} \\ I_{Li} \end{bmatrix} \quad (11.32)$$

OU:

$$\begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \left\{ \begin{bmatrix} \text{sen } \delta_i & -\text{cos } \delta_i \\ \text{cos } \delta_i & \text{sen } \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{sen } \delta_i & \text{cos } \delta_i \\ -\text{cos } \delta_i & \text{sen } \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_{dj} \\ E'_{qj} \end{bmatrix} \right\} \quad (11.33)$$

que, finalmente, conduzirá aos valores das componentes de eixo direto e em quadratura da corrente i :

$$\begin{aligned} i_{di} = & G_{ii} E'_{di} - B_{ii} E'_{qi} + \sum_{j=1, j \neq i}^n [B_{ij} (E'_{dj} \text{sen } \delta_{ij} - E'_{qj} \text{cos } \delta_{ij})] + \\ & + \sum_{j=1, j \neq i}^n [G_{ij} (E'_{dj} \text{cos } \delta_{ij} + E'_{qj} \text{sen } \delta_{ij})] \end{aligned} \quad (11.34)$$

e:

$$\begin{aligned} i_{qi} = & G_{ii} E'_{qi} - B_{ii} E'_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n [B_{ij} (E'_{dj} \text{cos } \delta_{ij} + E'_{qj} \text{sen } \delta_{ij})] + \\ & + \sum_{j=1, j \neq i}^n [G_{ij} (-E'_{dj} \text{sen } \delta_{ij} + E'_{qj} \text{cos } \delta_{ij})] \end{aligned} \quad (11.35)$$

Como será adotado o modelo de um $1\frac{1}{2}$ eixos a equação 11.35 não será utilizada no desenvolvimento deste trabalho, utilizar-se-á apenas a equação 11.34.

Admite-se, para fins de análise, a ocorrência de um curto circuito trifásico na barra k. Como o interesse do estudo reside em se avaliar quais os efeitos desta contingência sobre cada uma das máquinas, não importando neste momento, o comportamento do restante da rede, faz-se uma redução da rede preservando apenas as barras das máquina e aquela onde ocorre a falta (k). O diagrama da figura III.1 é uma ilustração do procedimento, mostrando a rede reduzida, e a representação da falta pela impedância Z_f .

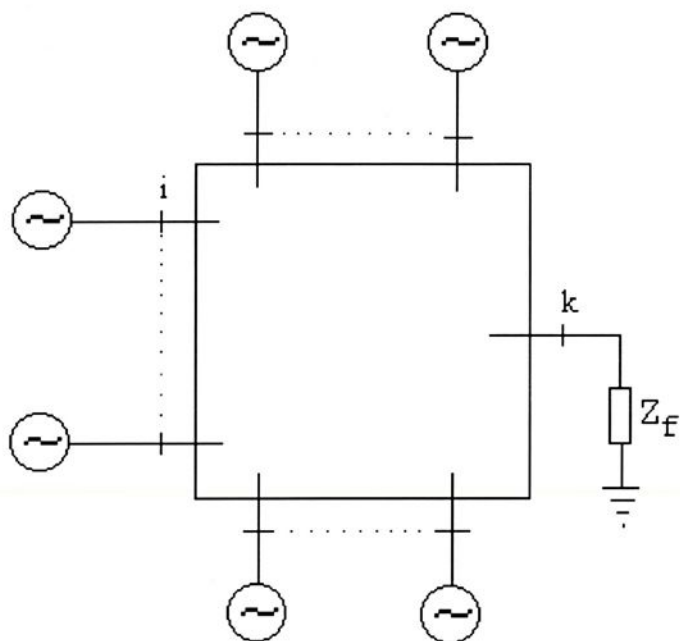


Figura III.1. Rede Reduzida às Barras Internas dos Geradores e a Barra de Falta.

No desenvolvimento das deduções das expressões representativas dos índices de sensibilidade será utilizada a redução de rede às barras internas dos geradores (figura II.7) mais a inclusão da barra de falta, conforme figura III.1.

Então, segundo a redução de Kron, a rede reduzida será dada por:

$$\begin{bmatrix} I_g \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{gg} & Y_{gk} \\ Y_{kg} & Y_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_k \end{bmatrix} \quad (\text{III.02})$$

Como as tensões nas barras internas das máquinas síncronas, com dinâmica regida pela constante de tempo T'_{do} , não podem ter variações bruscas tem-se que a tensão na barra de falta k (E_k), no instante da



aplicação da falta (trifásica e equilibrada), poderá ser representada pela expressão^[6]:

$$E_k = \frac{Z_f}{Z_{kk} + Z_f} E_k^0 \quad (\text{III.03})$$

ou:

$$E_k = \left(1 - \frac{Z_{kk}}{Z_{kk} + Z_f} \right) E_k^0 \quad (\text{III.04})$$

onde Z_{kk} representa a impedância própria da barra k e Z_f a impedância de falta.

2. Sensibilidade Eletromecânica.

O índice de sensibilidade eletromecânica (I_{SM}) representará o grau de perturbação da aceleração de cada máquina, de um sistema de energia elétrica frente a uma determinada falta, e será definida como:

$$I_{SM} = \frac{\partial(\dot{\omega})}{\partial Z_f} \quad (\text{III.05})$$

Considerando o sistema reduzido conforme mostrado na figura III.1 e as equações II.01, II.23 e III.03, na instalação da falta a aceleração de uma máquina genérica i poderá ser obtida através da equação:

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} \left[Pm_i - Pe_i^0 + \frac{Z_{kk}}{Z_{kk} + Z_f} Pe_{ik}^0 \right] \quad (\text{III.06})$$

onde Pe_{ik}^0 representa o "fluxo de potência" da máquina i para a barra k , dado por^[2]:

$$Pe_{ik}^0 = E_i^0 E_k^0 [G_{ik} \cos \delta_{ik}^0 + B_{ik} \sen \delta_{ik}^0] \quad (\text{III.07})$$

Como não se considera variações de Pm_i , e no instante imediatamente anterior à falta, Z_f é infinita, então:

$$Pm_i - Pe_i^0 = 0 \quad (III.08)$$

Consequentemente toda a aceleração será provocada pela presença da falta na barra k e a equação III.06 sofrerá uma simplificação que resultará na expressão:

$$\Delta \dot{\omega}_i|_{cc_k} \equiv \dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} \frac{Z_{kk}}{Z_{kk} + Z_f} Pe_{ik}^0 \quad (III.09)$$

Derivando a equação III.09 em relação à impedância de falta (Z_f) será obtida a expressão que representará o índice de sensibilidade eletromecânica.

Logo:

$$S = \frac{\partial(\dot{\omega}_i)}{\partial Z_f} = \frac{1}{M_i} \frac{(-Z_{kk})}{(Z_{kk} + Z_f)^2} Pe_{ik}^0 = \frac{-Z_{kk}}{(Z_{kk} + Z_f)^2} \frac{Pe_{ik}^0}{M_i} \quad (III.10)$$

Como o fator $\frac{Z_{kk}}{(Z_{kk} + Z_f)^2}$ é constante para uma determinada falta a sensibilidade eletromecânica será diretamente proporcional à relação $\frac{-Pe_{ik}^0}{M_i}$, assim:

$$I_{SM}(i) = -\frac{Pe_{ik}^0}{M_i} \quad (III.11)$$

que, substituindo Pe_{ik}^0 pelo seu valor definido pela equação III.07, resultará na expressão representativa do índice de sensibilidade eletromecânica, dada por:

$$I_{SM}(i) = -\frac{E_i^0 E_k^0}{M_i} [B_{ik} \text{sen} \delta_{ik}^0 + G_{ik} \text{cos} \delta_{ik}^0] \quad (III.12)$$

3. Sensibilidade do Campo Eletromagnético sem Regulador Automático de Tensão.

O índice de sensibilidade do campo eletromagnético sem consideração do RAT - Regulador Automático de Tensão - (I_{sc}) será definido por:

$$I_{sc} = \frac{\partial \dot{E}'_q}{\partial Z_f} \quad (III.13)$$

A seguir será apresentada a dedução da expressão representativa do índice de sensibilidade do campo eletromagnético (I_{sc}), sem Regulador Automático de Tensão (RAT), considerando-se a rede reduzida às barras internas dos geradores mais a inclusão da barra de falta conforme ilustrado através da figura III.1.

Como no desenvolvimento da análise do campo eletromagnético não se considera variação na tensão de excitação ($\Delta E_{fd} = 0$) e utilizando a equação II.03:

$$\Delta \dot{E}'_{q_i} = \frac{1}{T'_{do_i}} (\Delta E_{fd_i} - \Delta E_{q_i}) = -\frac{\Delta E_{q_i}}{T'_{do_i}} = -\frac{1}{T'_{do_i}} [(x_{d_i} - x'_{d_i}) \Delta i_{d_i}] \quad (III.14)$$

De acordo com a equação II.34 e considerando que $E'_{d_i} = 0$ o valor de Δi_{d_i} , originado exclusivamente pela presença da falta na barra k, será obtido por:

$$\begin{aligned} \Delta i_{d_i} &= (E'_{qk} - E_{qk}^0)(-B_{ik} \cos \delta_{ik}^0 + G_{ik} \sin \delta_{ik}^0) = \\ &= \frac{-z_{kk}}{z_{kk} + Z_f} E_{qk}^0 [-B_{ik} \cos \delta_{ik}^0 + G_{ik} \sin \delta_{ik}^0] \end{aligned} \quad (III.15)$$

Substituindo a equação III.15 na III.14 e, de forma análoga ao desenvolvimento do índice I_{SM} , considerando-se que, no instante da aplicação da falta, E_k terá o seu valor representado pela equação III.03, obtemos:

$$\begin{aligned}\Delta E'_{q_i} &= -\frac{1}{T'_{do_i}}(x_{d_i} - x'_{d_i}) \frac{(-Z_{kk})}{Z_{kk} + Z_f} E_{q_k}^0 [-B_{ik} \cos \delta_{ik}^0 + G_{ik} \sin \delta_{ik}^0] = \\ &= \frac{1}{T'_{do_i}}(x_{d_i} - x'_{d_i}) \frac{Z_{kk}}{Z_{kk} + Z_f} i_{d_{ik}}^0\end{aligned}\quad (\text{III.16})$$

Sendo $i_{d_{ik}}^0$ o valor da parcela da corrente $i_{d_i}^0$ correspondente à barra de falta k.

Como:

$$\frac{\partial(\Delta \dot{E}'_{q_i})}{\partial Z_f} = \frac{\partial(\dot{E}'_{q_i} - \dot{E}_{q_i}^0)}{\partial Z_f} = \frac{\partial \dot{E}'_{q_i}}{\partial Z_f}\quad (\text{III.17})$$

e, fazendo a derivada parcial da equação III.16 em relação à impedância de falta (Z_f) e substituindo o resultado na equação III.17, resultará na equação:

$$\frac{\partial \dot{E}'_{q_i}}{\partial Z_f} = \frac{1}{T'_{do_i}}(x_{d_i} - x'_{d_i}) \frac{(-Z_{kk})}{(Z_{kk} + Z_f)^2} i_{d_{ik}}^0\quad (\text{III.18})$$

Tomando a mesma consideração do item anterior (cálculo do índice de sensibilidade eletromecânica), obtemos para o índice de sensibilidade do campo eletromagnético sem regulador automático de tensão (I_{SC}) a expressão:

$$I_{SC}(i) = \frac{\partial \dot{E}'_{q_i}}{\partial Z_f} = -\frac{1}{T'_{do_i}}(x_{d_i} - x'_{d_i}) i_{d_{ik}}^0\quad (\text{III.19})$$

que, substituindo o valor de $i_{d_{ik}}^0$ pelo valor de sua correspondente parcela representativa na equação II.34, dado por:

$$i_{d_{ik}}^0 = E_{q_k}^0 (-B_{ik} \cos \delta_{ik}^0 + G_{ik} \sin \delta_{ik}^0)\quad (\text{III.20})$$

resulta:

$$I_{sc}(i) = \frac{E_{qk}^{\prime 0}}{T_{do_i}} (x_{d_i} - x'_{d_i}) (B_{ik} \cos \delta_{ik}^0 - G_{ik} \sin \delta_{ik}^0) \quad (\text{III.21})$$

4. Sensibilidade do Regulador Automático de Tensão (RAT).

O índice de sensibilidade do regulador automático de tensão (I_{SRAT}) será definido por:

$$I_{SRAT} = \frac{\partial \dot{E}_{fd}}{\partial Z_f} \quad (\text{III.22})$$

Utilizando a equação II.11 e fazendo a derivada parcial em relação à impedância de falta (Z_f) obteremos o índice definido pela equação III.22:

$$I_{SRAT} = \frac{\partial \dot{E}_{fd}}{\partial Z_f} = - \frac{K_{R_i}}{T_{R_i}} \frac{\partial \Delta V_{T_i}}{\partial Z_f} \quad (\text{III.23})$$

Fazendo a derivada parcial da equação II.25 em relação à impedância de falta (Z_f) obtemos:

$$\frac{\partial V_{T_i}}{\partial Z_f} = -x'_{d_i} \frac{v_{q_i}^0}{V_{T_i}^0} \frac{\partial}{\partial Z_f} g_i(\sigma, e) + x'_{d_i} \frac{v_{d_i}^0}{V_{T_i}^0} \frac{\partial}{\partial Z_f} h_i(\sigma, e) \quad (\text{III.24})$$

onde os valores de $g_i(\sigma, e)$ e $h_i(\sigma, e)$ serão representados pelas equações II.28 e II.29.

Utilizando a equação III.03, pode ser obtido:

$$\Delta E'_k = E'_k - E_k^{\prime 0} = E_k^{\prime 0} \left(\frac{-Z_{kk}}{Z_{kk} + Z_f} \right) \quad (\text{III.25})$$

Considerando as variações Δg_i e Δh_i , obtidas pela utilização das equações II.28 e II.29 e simultaneamente com a introdução da III.25, serão obtidas as equações:

$$\begin{aligned} \Delta g_i &= -B_{ik} \frac{-Z_{KK}}{Z_{KK} + Z_f} E_K^0 \cos(\sigma_k + \delta_{ij}^0) + G_{ik} E_K^0 \frac{-Z_{KK}}{Z_{KK} + Z_f} \text{sen}(\sigma_k + \delta_{ik}^0) = \\ &= \frac{Z_{KK}}{Z_{KK} + Z_f} E_K^0 \{B_{ik} \cos \delta_{ik}^0 - G_{ik} \text{sen} \delta_{ik}^0\} \end{aligned} \quad (\text{III.26})$$

e:

$$\Delta h_i = \frac{-Z_{KK}}{Z_{KK} + Z_f} E_K^0 (B_{ik} \text{sen} \delta_{ik}^0 + G_{ik} \cos \delta_{ik}^0) \quad (\text{III.27})$$

Considerando uma falta sólida ($Z_f \rightarrow 0$) e fazendo a substituição $Z_f = 0$ nas equações III.26 e III.27 e substituindo os resultados, assim obtidos, na III.24, obtemos:

$$\frac{\partial \mathcal{N}_{T_i}}{\partial Z_f} = x'_{d_i} \frac{v_{qi}^0}{V_{T_i}^0} (-B_{ik} \cos \delta_{ik}^0 + G_{ik} \text{sen} \delta_{ik}^0) - x'_{d_i} \frac{v_{di}^0}{V_{T_i}^0} (B_{ik} \text{sen} \delta_{ik}^0 + G_{ik} \cos \delta_{ik}^0) \quad (\text{III.28})$$

Substituindo a equação III.28 na III.23 obtemos a expressão que fornecerá o índice de sensibilidade do regulador automático de tensão que será:

$$I_{SRAT} = \frac{K_{R_i} x'_{d_i}}{T_{R_i} V_{T_i}^0} [v_{qi}^0 (B_{ik} \cos \delta_{ik}^0 - G_{ik} \text{sen} \delta_{ik}^0) + v_{di}^0 (B_{ik} \text{sen} \delta_{ik}^0 + G_{ik} \cos \delta_{ik}^0)] \quad (\text{III.29})$$

5. Sensibilidade do Campo Eletromagnético com Regulador Automático de Tensão.

O valor do índice de sensibilidade do campo com RAT será definido como:

$$I_{SCCR} = \frac{\partial \dot{E}_q}{\partial Z_f} \quad (\text{III.30})$$

Utilizando a equação de campo para uma máquina síncrona (equação II.03) obtemos a equação:

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} (E_{fd} - E_q) \quad (\text{III.31})$$

e fazendo a sua derivada parcial em relação à impedância de falta (Z_f), vem:

$$\frac{\partial \dot{E}'_q}{\partial Z_f} = \frac{1}{T'_{do}} \left(\frac{\partial E_{fd}}{\partial Z_f} - \frac{\partial E_q}{\partial Z_f} \right) \quad (\text{III.32})$$

Como $T_R \ll T'_{do}$ consideraremos $T_R = 0$ que, substituído na equação II.11, resultará:

$$-\Delta E_{fd} - K_R \Delta V_T = 0 \quad (\text{III.33})$$

e fazendo a derivada parcial da equação III.31 em relação à impedância de falta chega-se a:

$$\frac{\partial \Delta E_{fd}}{\partial Z_f} = K_R \frac{\partial}{\partial Z_f} (\Delta V_T) \quad (\text{III.34})$$

De forma análoga ao que foi desenvolvido nos itens 3 e 4, e utilizando os resultados lá obtidos, poderá ser obtida a expressão do índice de sensibilidade do campo eletromagnético com regulador automático de tensão dada por:

$$I_{SCCR}(i) = \frac{1}{T'_{do_i}} \left\{ \frac{K_{R_i} x'_{d_i}}{T_{R_i} V_{T_i}^0} [v_{qi}^0 (B_{ik} \cos \delta_{ik}^0 - G_{ik} \sin \delta_{ik}^0) + v_{d_i} (B_{ik} \sin \delta_{ik}^0 + G_{ik} \cos \delta_{ik}^0)] + E_{qk}^{''0} (x_{d_i} - x'_{d_i}) (B_{ik} \cos \delta_{ik}^0 - G_{ik} \sin \delta_{ik}^0) \right\} \quad (\text{III.35})$$

6. Utilização dos Índices para Ordenação e Discriminação entre as Máquinas mais Perturbadas e as não Afetadas.

Após a análise dos resultados de uma série de simulações, para os índices anteriormente apresentados, foram determinados os limites

percentuais para cada um deles, a fim de se definir as máquinas que serão menos sensíveis a uma determinada falta, e que poderão ser modeladas com as respectivas simplificações:

Índice de Sensibilidade Mecânica - 2%

Índice de Sensibilidade do Campo - 12%

Índice de Sensibilidade do RAT - 10%

Índice de Sensibilidade do Campo com RAT - 8%

Os limites estabelecidos pelos parâmetros acima descritos foram calculados pelo seguinte procedimento:

$$I = \frac{\textit{porcentagem}}{100} (I_{MAX} - I_{MIN}) + I_{MIN} \quad (\text{III.36})$$

e, isolando o parâmetro porcentagem chega-se a:

$$\boxed{\textit{porcentagem} = 100 \frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}}} \quad (\text{III.37})$$

Onde: I é o índice de sensibilidade da máquina considerada, I_{min} o da máquina de menor grau e I_{max} o da máquina de maior grau.

Serão consideradas não afetadas, por uma determinada falta, as máquinas cujos índices de sensibilidades estiverem dentro dos limites definidos pelos parâmetros descritos acima.



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

1. Simulação.

Como exemplo numérico foi utilizado um sistema de 13 máquinas, 26 barras e 38 linhas, com diagrama unifilar e características técnicas apresentadas a seguir.

É importante observar que, embora os índices tenham sido desenvolvidos para modelos consideravelmente simplificados, a aplicação é realizada em simulação com modelos mais elaborados. As máquinas são simuladas segundo o modelo de Park incluindo várias dinâmicas desconsideradas no desenvolvimento dos índices.



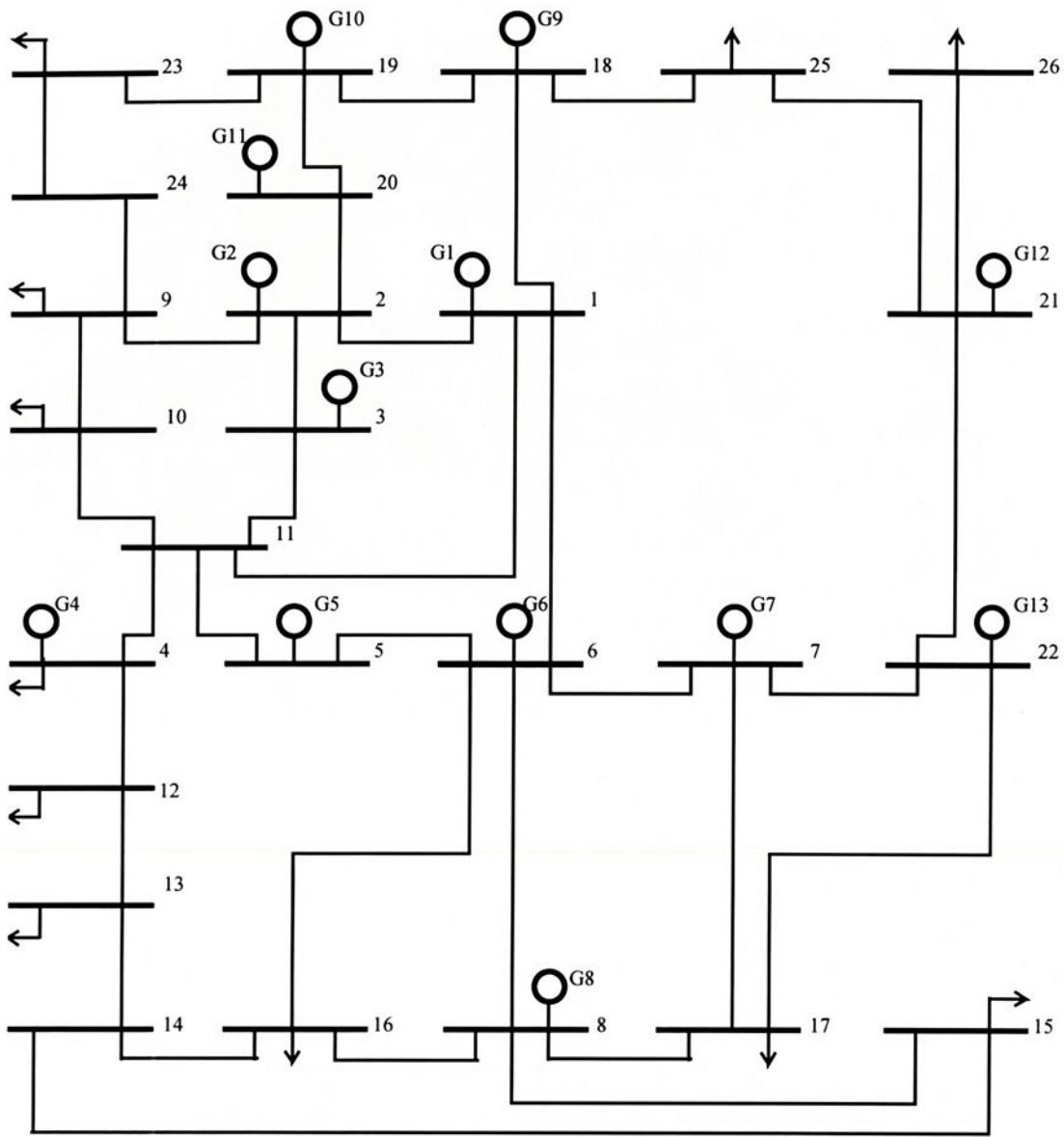


Figura II.4. Diagrama Unifilar de um Sistema 13 Máquinas.

Tabela I.1

| Dados de Máquinas | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Máq. | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| X_d [pu] | 0.4000 | 0.4200 | 0.5800 | 0.4600 | 0.5000 | 0.6000 | 0.7200 | 0.6500 | 0.4000 | 0.4200 | 0.5800 | 0.4600 | 0.7200 |
| X'_d [pu] | 0.1000 | 0.1200 | 0.1600 | 0.1500 | 0.1500 | 0.2000 | 0.1800 | 0.2200 | 0.1000 | 0.1200 | 0.1600 | 0.1500 | 0.1800 |
| M [s ²] | .01590 | .01856 | .02122 | .01697 | .02652 | .02387 | .01591 | .03180 | .01591 | .01856 | .02122 | .01697 | .01591 |
| D [s] | 0.0060 | 0.0070 | 0.0080 | 0.0060 | 0.0090 | 0.0080 | 0.0070 | 0.0150 | 0.0060 | 0.0070 | 0.0080 | 0.0060 | 0.0070 |
| T_{do} [s] | 6.0000 | 5.6000 | 6.4000 | 6.0000 | 5.5000 | 6.0000 | 6.0000 | 5.5000 | 6.0000 | 5.6000 | 6.4000 | 6.0000 | 6.0000 |
| K_R | 25.000 | 25.000 | 25.000 | 25.000 | 25.000 | 25.000 | 25.000 | 25.000 | 25.000 | 25.000 | 25.000 | 25.000 | 25.000 |
| T_R [s] | 0.0800 | 0.1000 | 0.0800 | 0.0800 | 0.1000 | 0.0800 | 0.0800 | 0.1000 | 0.0800 | 0.1000 | 0.0800 | 0.0800 | 0.0800 |



Tabela I.2

| Número da Linha | Dados de Linhas (p.u.) | | | | | |
|--------------------|------------------------|----------|--------|----------|--------|--------|
| | Barra | | Yserie | | Yshunt | |
| | Inicial | Terminal | G | B | G | B |
| 01 | 02 | 09 | 0.8512 | -6.8238 | 0 | 0.0120 |
| 02 | 01 | 02 | 0.8201 | -6.0503 | 0 | 0.0120 |
| 03 | 09 | 10 | 3.4502 | -18.2514 | 0 | 0.0050 |
| 04 | 02 | 03 | 2.2252 | -12.0582 | 0 | 0.0320 |
| 05 | 10 | 11 | 0.8124 | -5.5304 | 0 | 0.0100 |
| 06 | 03 | 11 | 1.4461 | -10.8820 | 0 | 0.0140 |
| 07 | 01 | 11 | 3.9314 | -17.8245 | 0 | 0.0340 |
| 08 | 01 | 06 | 0.8484 | -6.7188 | 0 | 0.0100 |
| 09 | 04 | 11 | 1.1238 | -8.5249 | 0 | 0.0120 |
| 10 | 04 | 12 | 0.4289 | -3.4883 | 0 | 0.0020 |
| 11 | 12 | 13 | 1.5176 | -11.5938 | 0 | 0.0300 |
| 12 | 13 | 14 | 0.9396 | -11.7171 | 0 | 0.0300 |
| 13 | 14 | 15 | 1.2250 | -12.6364 | 0 | 0.0350 |
| 14 | 05 | 11 | 1.5076 | -12.5743 | 0 | 0.0350 |
| 15 | 05 | 06 | 0.7253 | -7.8066 | 0 | 0.0010 |
| 16 | 06 | 07 | 2.5142 | -18.1357 | 0 | 0.0400 |
| 17 | 14 | 16 | 1.1208 | -8.9422 | 0 | 0.0100 |
| 18 | 08 | 16 | 1.0922 | -9.6419 | 0 | 0.0100 |
| 19 | 08 | 17 | 0.0699 | -6.4136 | 0 | 0.0100 |
| 20 | 07 | 17 | 0.8237 | -6.8307 | 0 | 0.0100 |
| 21 | 06 | 16 | 1.5023 | -9.3937 | 0 | 0.0100 |
| 22 | 06 | 08 | 0.8154 | -7.3277 | 0 | 0.0100 |
| 23 | 08 | 15 | 1.0096 | -9.5269 | 0 | 0.0100 |
| 24 | 19 | 23 | 0.8512 | -6.8238 | 0 | 0.0120 |
| 25 | 18 | 19 | 0.8201 | -6.0503 | 0 | 0.0120 |
| 26 | 23 | 24 | 3.4502 | -18.2514 | 0 | 0.0050 |
| 27 | 19 | 20 | 2.2252 | -12.0582 | 0 | 0.0320 |
| 28 | 24 | 09 | 0.8124 | -5.5304 | 0 | 0.0100 |
| 29 | 20 | 02 | 0.8512 | -6.8238 | 0 | 0.0140 |
| 30 | 18 | 01 | 3.9314 | -17.8245 | 0 | 0.0340 |
| 31 | 18 | 07 | 0.8484 | -6.7188 | 0 | 0.0100 |
| 32 | 18 | 25 | 1.5076 | -12.5743 | 0 | 0.0350 |
| 33 | 21 | 25 | 0.8201 | -6.0503 | 0 | 0.0120 |
| 34 | 21 | 22 | 0.8154 | -7.3277 | 0 | 0.0100 |
| 35 | 22 | 07 | 0.8512 | -6.8238 | 0 | 0.0120 |
| 36 | 22 | 17 | 0.8237 | -6.8307 | 0 | 0.0100 |
| 37 | 21 | 26 | 1.6472 | -14.6294 | 0 | 0.0300 |
| 38 | 21 | 07 | 0.8512 | -6.8238 | 0 | 0.0120 |



Tabela I.3

| Dados de Barras (p.u.) | | | | |
|------------------------|---------|----------|---------|-----------------|
| Número da Barra | Tipo | Potência | | Tensão (Módulo) |
| | | Ativa | Reativa | |
| 01 | Geração | 1.8000 | | 1.0500 |
| 02 | Geração | 1.5000 | | 1.0500 |
| 03 | Geração | 1.0000 | | 1.0500 |
| 04 | Geração | 1.5000 | | 1.0500 |
| 05 | Geração | 1.1000 | | 1.0400 |
| 06 | Geração | 1.2000 | | 1.0500 |
| 07 | Geração | 1.2000 | | 1.0500 |
| 08 | Folga | | | 1.0300 |
| 09 | Carga | -1.5000 | -0.2000 | |
| 10 | Carga | -0.8000 | -0.0700 | |
| 11 | Carga | -3.2000 | -0.3000 | |
| 12 | Carga | -0.8000 | -0.0800 | |
| 13 | Carga | -1.0000 | -0.1500 | |
| 14 | Carga | -0.6500 | -0.1000 | |
| 15 | Carga | -1.5000 | -0.2500 | |
| 16 | Carga | -1.0500 | -0.2100 | |
| 17 | Carga | -1.5000 | -0.2000 | |
| 18 | Geração | 1.8000 | | 1.0500 |
| 19 | Geração | 1.5000 | | 1.0500 |
| 20 | Geração | 1.0000 | | 1.0500 |
| 21 | Geração | 1.3000 | | 1.0300 |
| 22 | Geração | 1.2000 | | 1.0400 |
| 23 | Carga | -1.0000 | -0.1000 | |
| 24 | Carga | -0.6000 | -0.5000 | |
| 25 | Carga | -2.0000 | -0.2500 | |
| 26 | Carga | -1.7000 | -0.2000 | |

Considerando o caso de falta na barra de número 21 foram obtidos os seguintes resultados:

ÍNDICE DE SENSIBILIDADE MECÂNICA

$$M(12) = 315.9491$$

$$M(13) = 113.3776$$

$$M(7) = 87.8134$$

$$M(9) = 82.3396$$

$$M(1) = 48.2459$$

$$M(6) = 31.8059$$

$$M(10) = 18.3481$$

$$M(8) = 18.0914$$

$$M(5) = 15.9137$$

$$M(2) = 14.7721$$

$$M(4) = 13.2899$$

$$M(3) = 9.9390$$

$$M(11) = 7.8433$$

MÁQUINAS NÃO AFETADAS

3

4

11

ÍNDICE DE SENSIBILIDADE DO CAMPO SEM RAT

$$M(12) = .3445$$

$$M(13) = .2162$$

$$M(7) = .1600$$

$$M(9) = .0903$$

$$M(6) = .0603$$

$$M(8) = .0557$$

$$M(1) = .0524$$

$$M(5) = .0372$$

$$M(10) = .0257$$

$$M(2) = .0203$$



$$M(3) = .0192$$

$$M(4) = .0170$$

$$M(11) = .0165$$

MÁQUINAS NÃO AFETADAS

1

2

3

4

5

8

10

11

ÍNDICE DE SENSIBILIDADE DO RAT

$$M(12) = 11.8022$$

$$M(13) = 5.4895$$

$$M(7) = 4.0298$$

$$M(9) = 2.3340$$

$$M(6) = 2.2326$$

$$M(8) = 1.6801$$

$$M(1) = 1.3425$$

$$M(5) = .8767$$

$$M(4) = .6789$$

$$M(10) = .6049$$

$$M(3) = .5997$$

$$M(11) = .5315$$

$$M(2) = .4701$$

MÁQUINAS NÃO AFETADAS

1

2



- 3
- 4
- 5
- 10
- 11

ÍNDICE DE SENSIBILIDADE DO CAMPO COM RAT

- M(12)= -.1871
- M(13)= -.1430
- M(7)= -.1063
- M(9)= -.0591
- M(1)= -.0345
- M(6)= -.0306
- M(8)= -.0252
- M(5)= -.0212
- M(10)= -.0149
- M(2)= -.0119
- M(3)= -.0117
- M(11)= -.0099
- M(4)= -.0080

MÁQUINAS NÃO AFETADAS

- 2
- 3
- 4
- 5
- 10
- 11

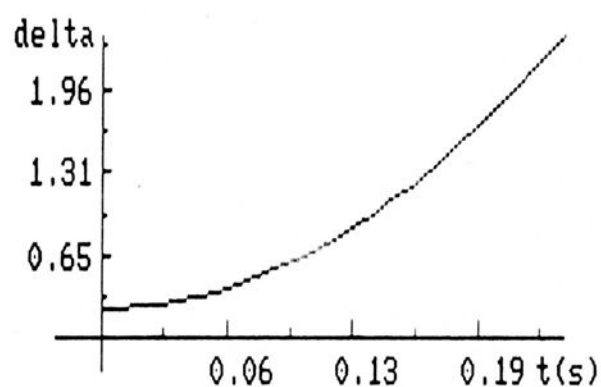


A seguir serão apresentados os gráficos que mostrarão o comportamento do sistema face à falta descrita acima, sendo que na coluna da esquerda ficarão aqueles referentes ao sistema completo e na direita aqueles resultantes da retirada das máquinas que são menos sensíveis à falta.

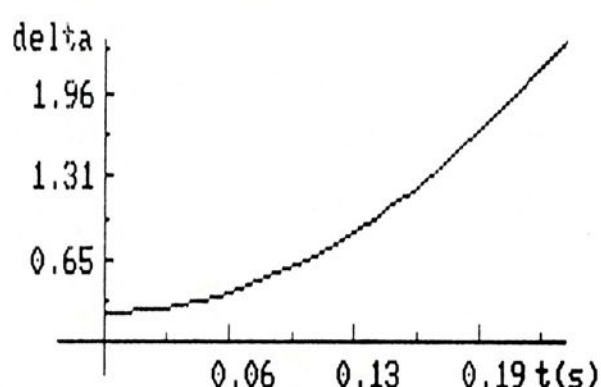
Nos resultados da sensibilidade eletromecânica e sensibilidade do campo eletromagnético sem RAT foram incluídos os gráficos até a primeira máquina que não demonstrou sensibilidade à falta considerada, nos demais (sensibilidade do RAT e sensibilidade do campo com RAT), aqueles referentes a máquina mais sensível e máquinas de transição (última sensível e primeira a não demonstrar sensibilidade).



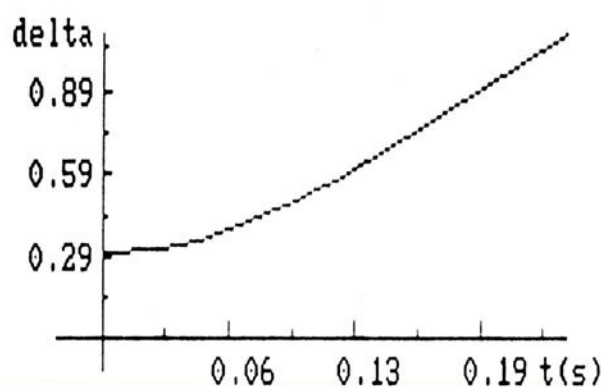
RESULTADOS DA SENSIBILIDADE ELETROMECCÂNICA



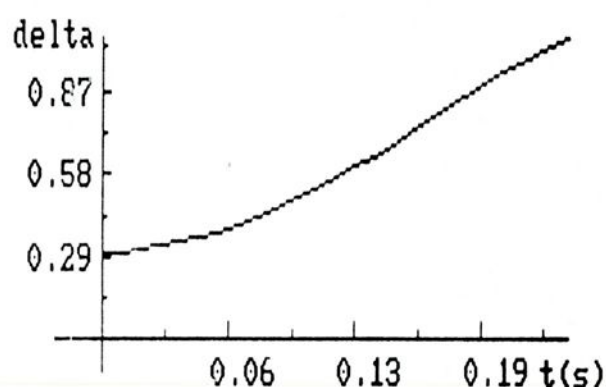
MAQUINA 12



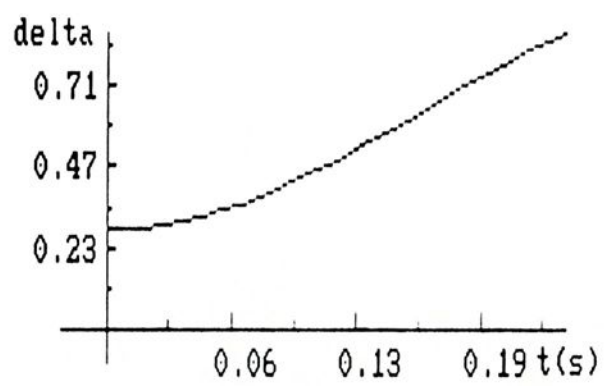
MAQUINA 12



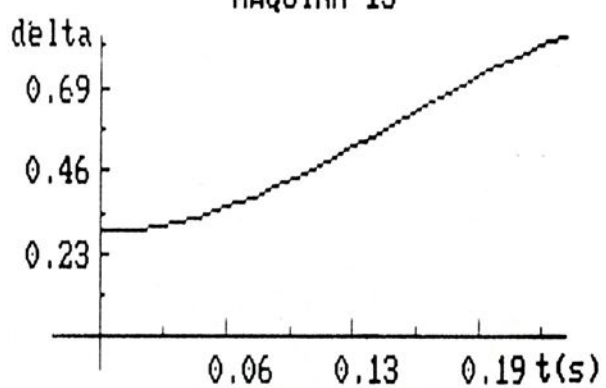
MAQUINA 13



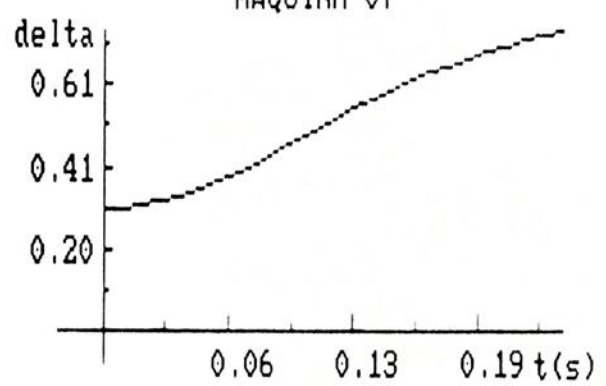
MAQUINA 13



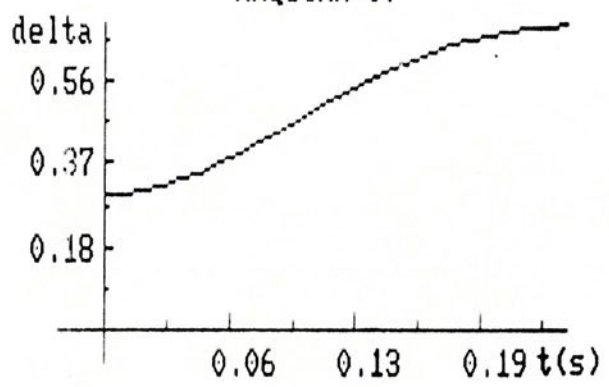
MAQUINA 07



MAQUINA 07

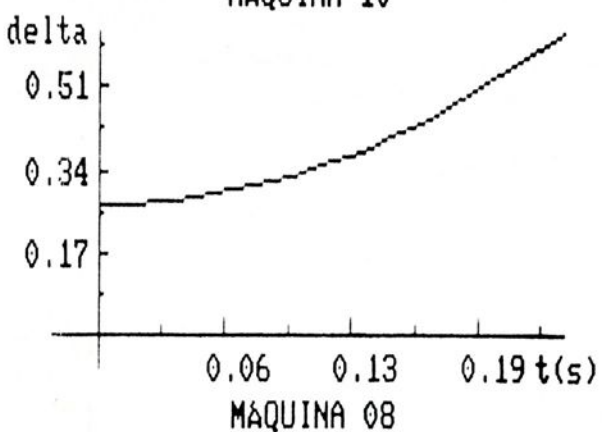
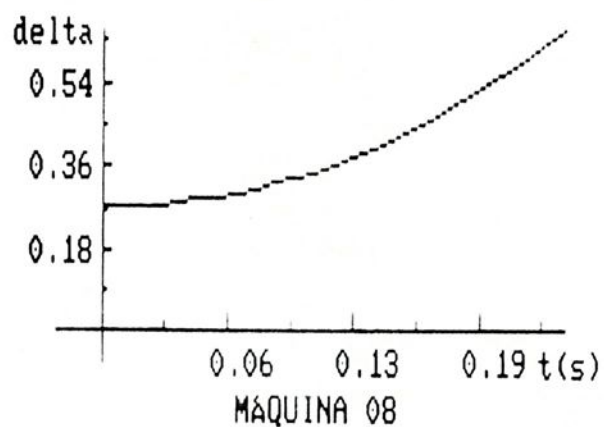
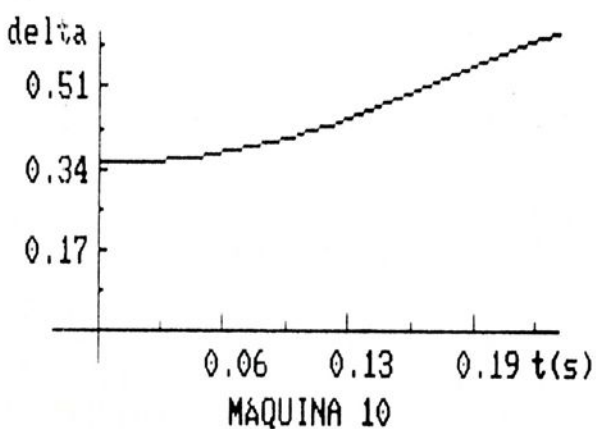
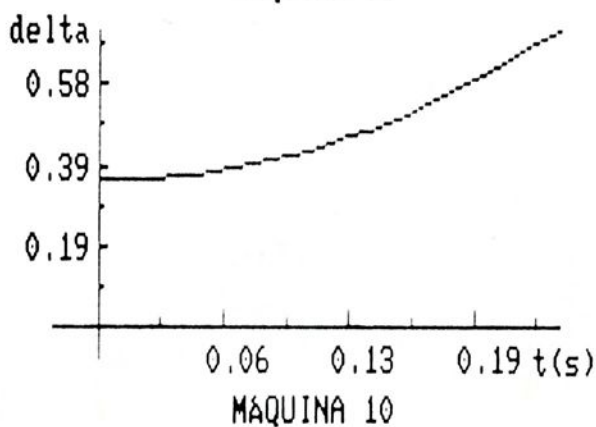
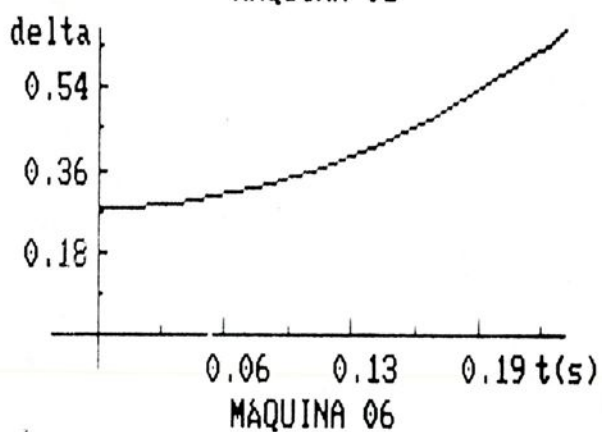
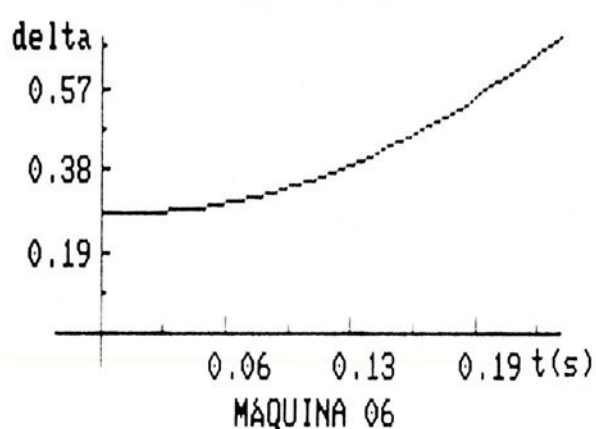
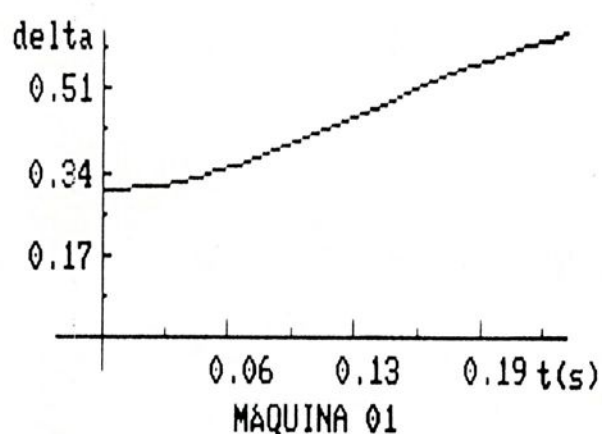
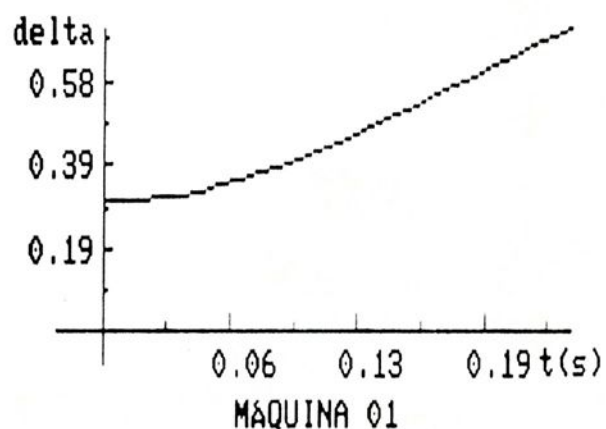


MAQUINA 09

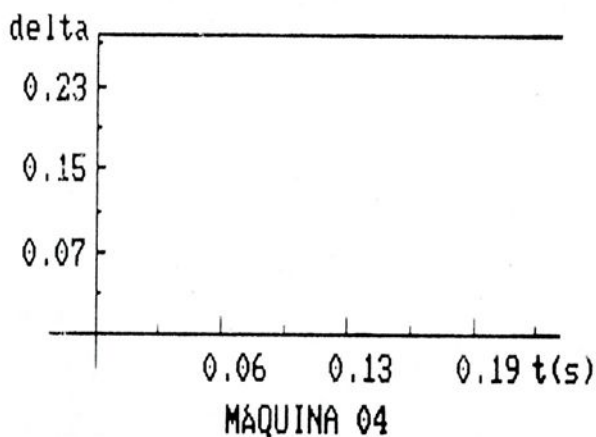
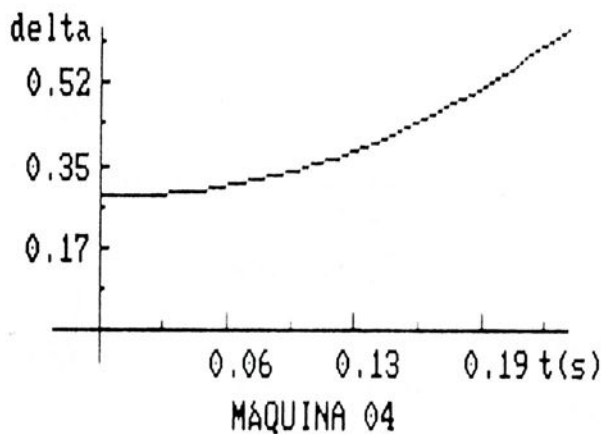
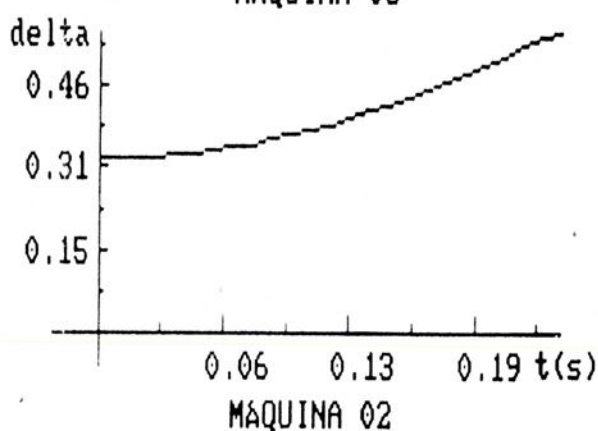
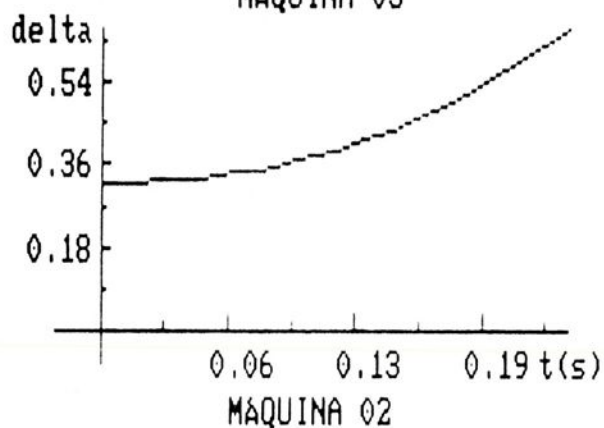
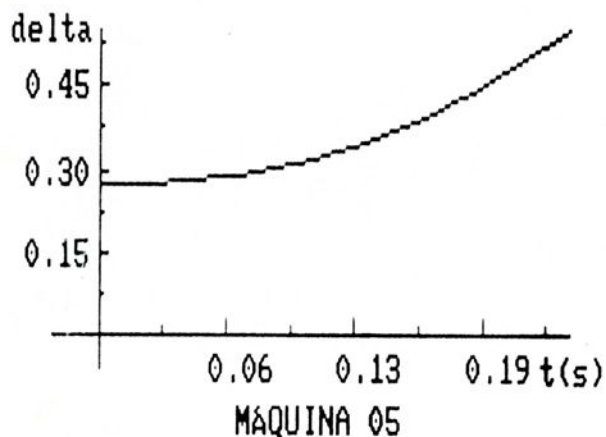
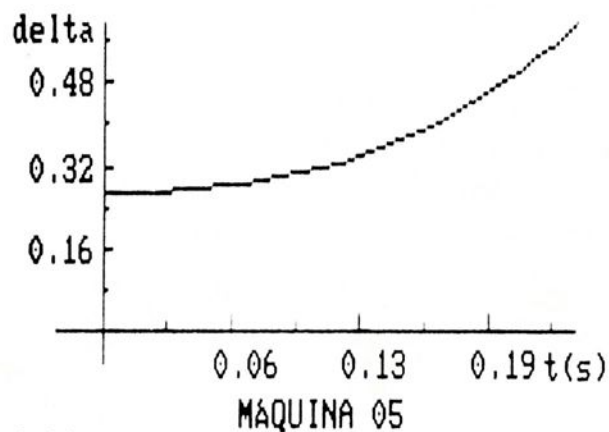


MAQUINA 09

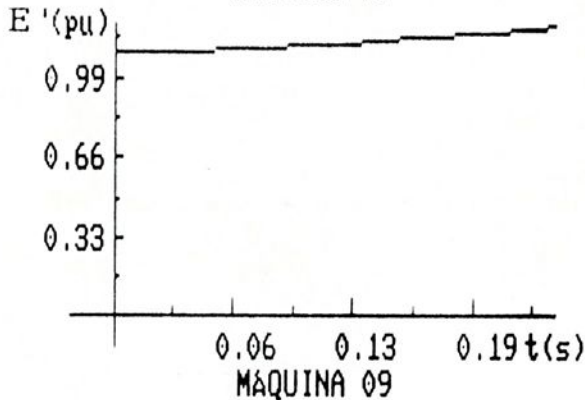
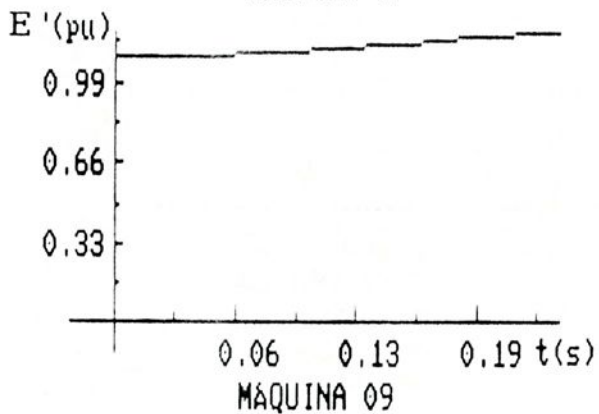
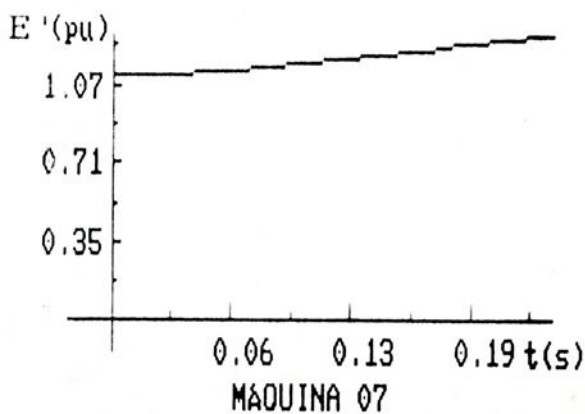
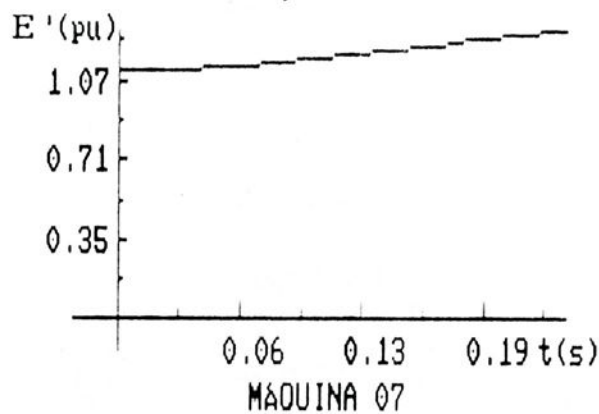
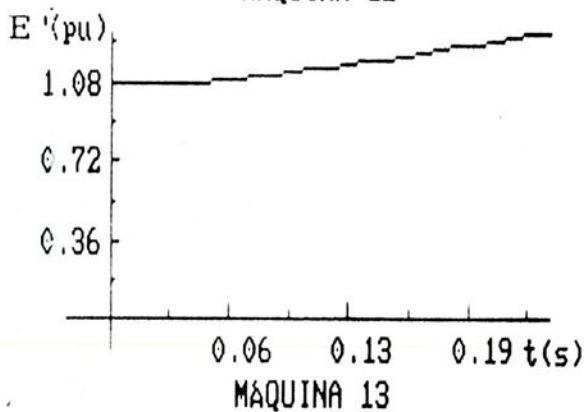
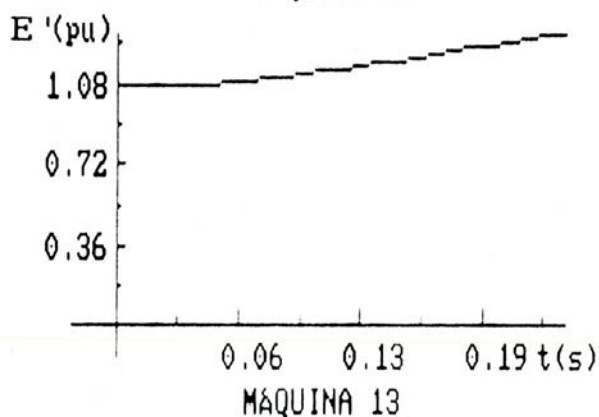
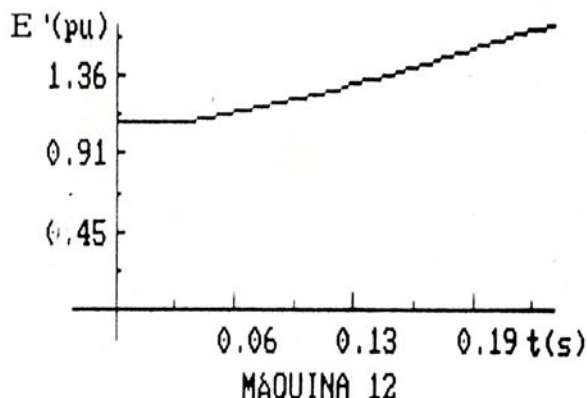
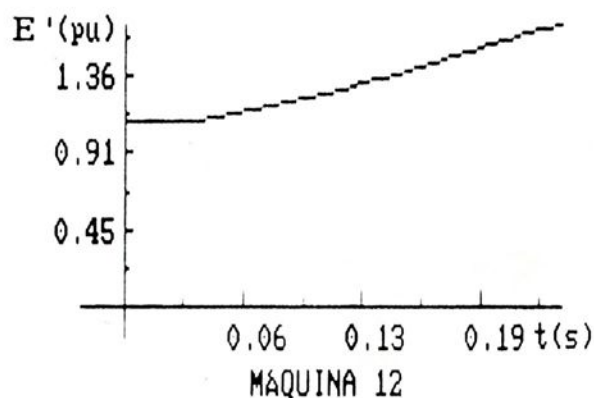
RESULTADOS DA SENSIBILIDADE ELETROMECCÂNICA



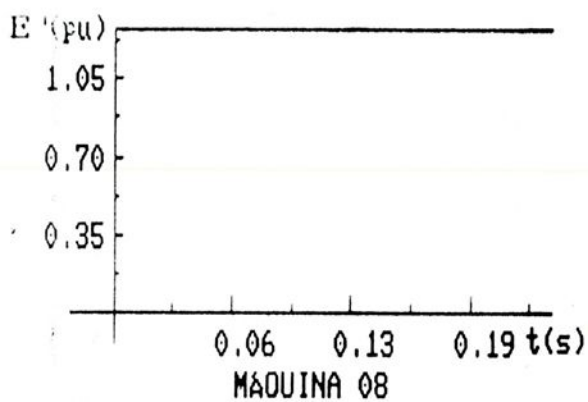
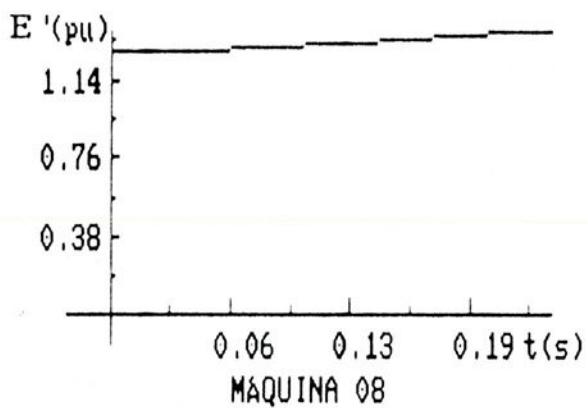
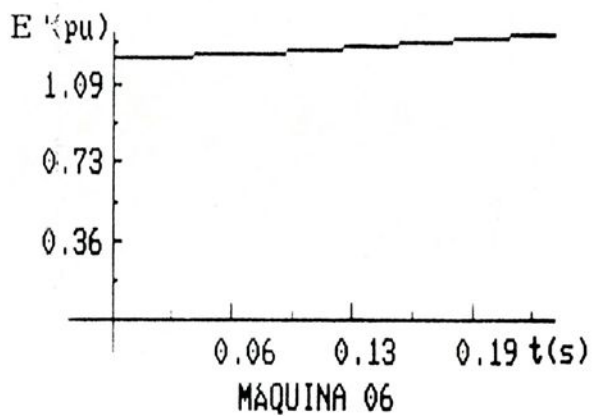
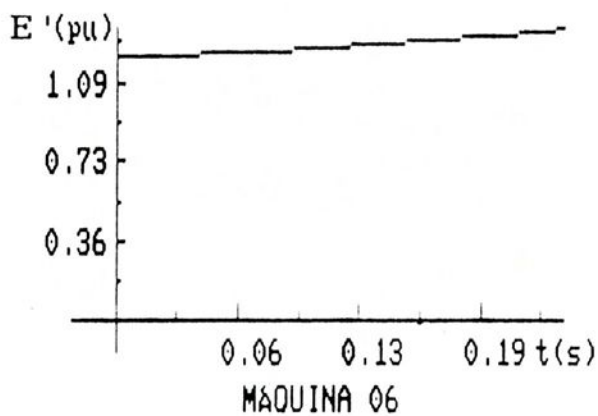
RESULTADOS DA SENSIBILIDADE ELETROMECCÂNICA



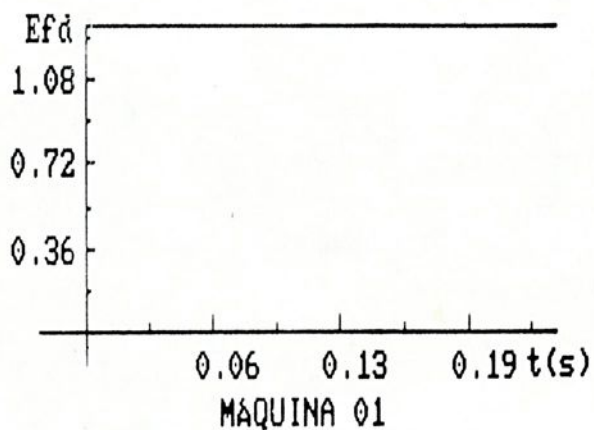
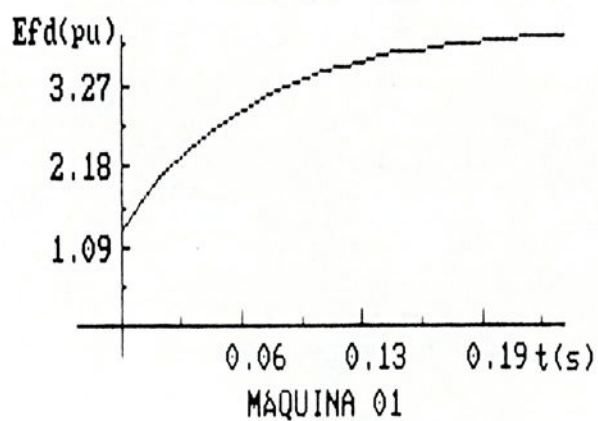
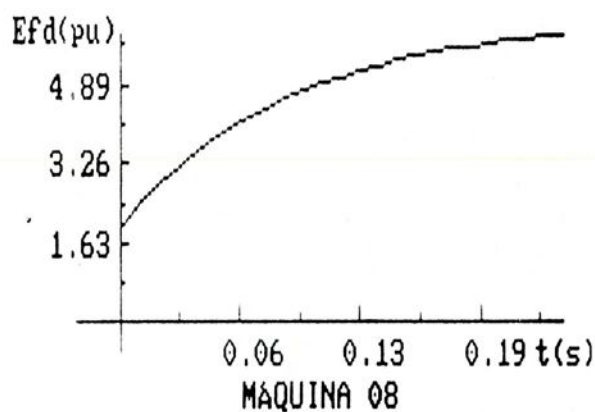
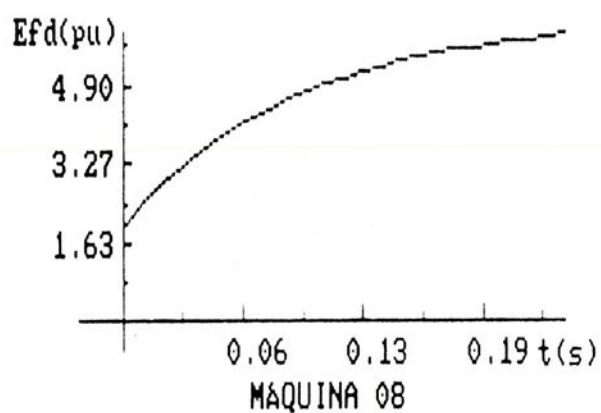
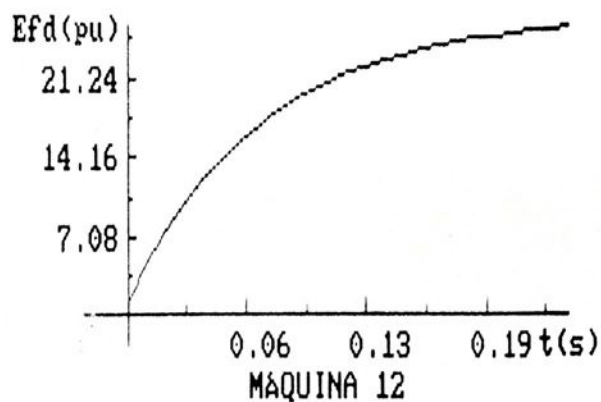
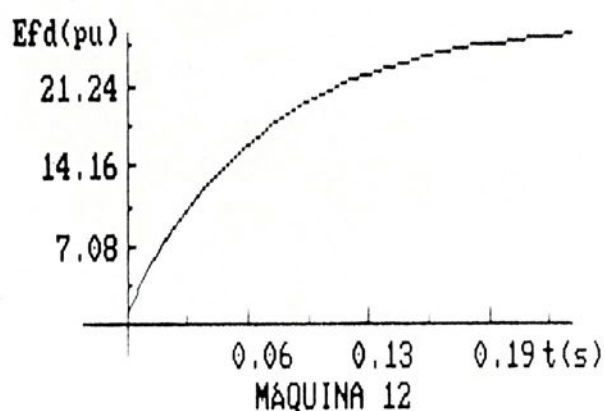
RESULTADOS DA SENSIBILIDADE DO CAMPO SEM RAT



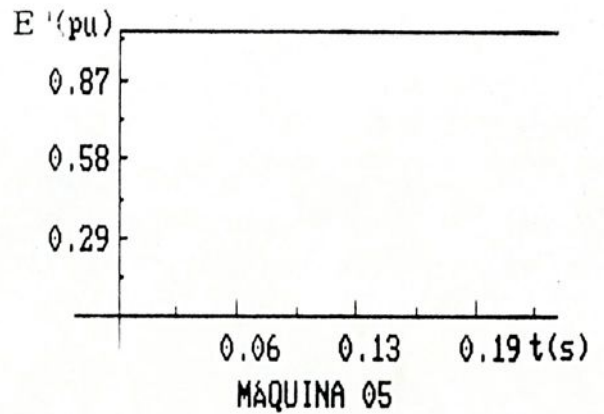
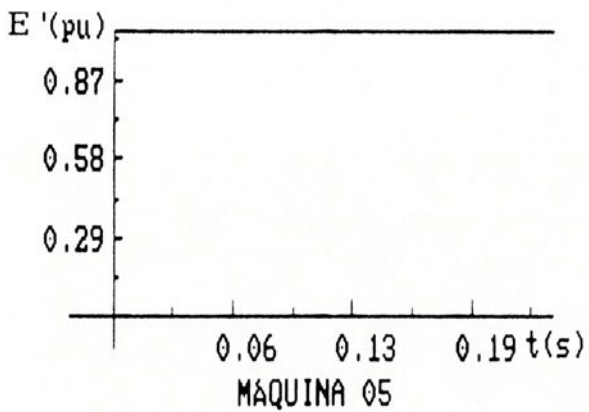
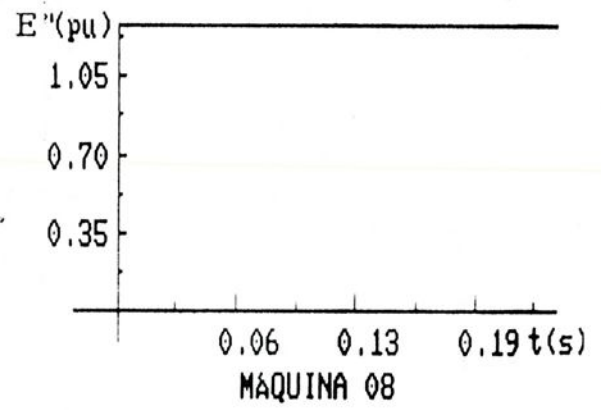
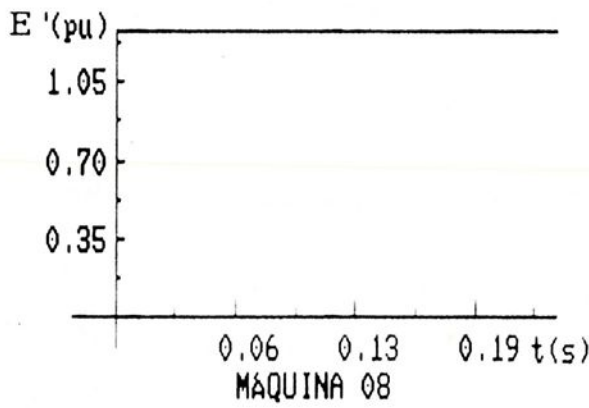
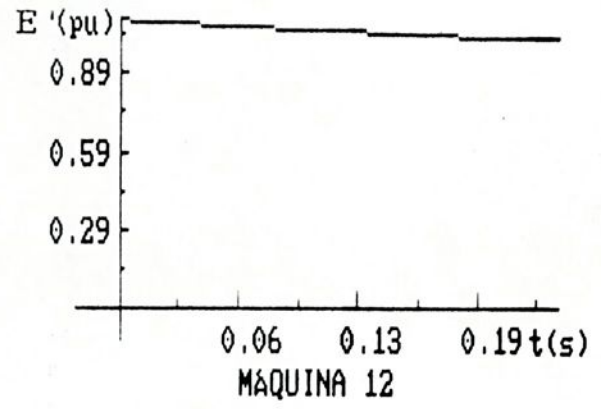
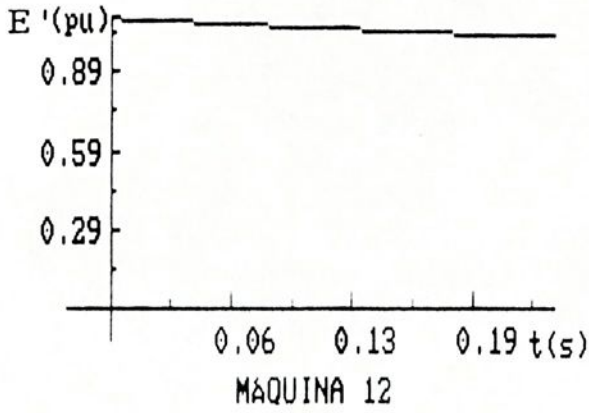
RESULTADOS DA SENSIBILIDADE DO CAMPO SEM RAT



RESULTADOS DA SENSIBILIDADE DO RAT



RESULTADOS DA SENSIBILIDADE DO CAMPO COM RAT



2. Análise dos Resultados.

Fazendo uma análise dos resultados obtidos no exemplo simulado pode-se concluir que:

As máquinas que deverão ser modeladas com a maior complexidade possível, com inclusão de todos os detalhes (dinâmica eletromecânica, campo eletromagnético e regulador automático de tensão, serão as de números 6, 7, 9, 12 e 13.

As máquinas que deverão ser modeladas com o campo sem o RAT serão: 1 e 8.

As máquinas que deverão ser modeladas sem o campo eletromagnético (modelo clássico) serão as de números: 2, 5 e 10.

As máquinas que deverão ser modeladas sem consideração de nenhuma dinâmica serão: 3, 4 e 11.

3. Índice de Sensibilidade Eletromagnética.

Analisando os resultados de um grande número de contingências foi observado que os valores dos índices de sensibilidade do campo com RAT (I_{SCCR}) são englobados pelos índices de sensibilidade do campo sem RAT (I_{SC}) e índices de sensibilidade do RAT (I_{SRAT}). E considerando que não é possível utilizar um modelo do RAT sem consideração do campo eletromagnético definiremos como **ÍNDICE DE SENSIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA** aquele obtido para o índice de sensibilidade do campo com RAT.



CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho consiste em identificar, automaticamente, a severidade com que cada máquina síncrona de um sistema de energia elétrica é afetada por uma determinada contingência, classificando as máquinas em ordem decrescente de sensibilidade à falta considerada e discriminando para análise aquelas que devem ser modeladas com detalhes de campo, regulador automático de tensão e regulador de velocidade, as que necessitam um detalhamento intermediário de campo e reguladores, aquelas em que não se necessita considerar os reguladores e eventualmente nem o campo, e aquelas cujas dinâmicas não exercem quaisquer influências no comportamento do sistema podendo ser simplesmente desconsideradas.

Este desenvolvimento conduz a uma redução de custo computacional na utilização do método automático de análise de estabilidade transitória considerando reguladores automáticos de tensão, reguladores de velocidades e estabilizadores de sistemas de potência, já desenvolvido, em sistemas de grande porte.

O método desenvolvido neste trabalho vem ajudar no planejamento e operação de sistemas de energia elétrica (SEE). No planejamento se exige um grande número de análises, e na Operação respostas rápidas. Este método combinado com o método da região de sincronização positiva (RSP), que já tem mostrado alto grau de precisão, encaminha-se na eficiência da melhoria dos métodos de análise para fins de planejamento e operação.



BIBLIOGRAFIA

- [01] FOUAD, A. A. and VITAL, V.; Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method. Prentice-Hall, Inc., A Simon & Schuster Company, Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.
- [02] ANDERSON, P. M. and FOUAD, A. A.; Power System Control and Stability. The Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA, 1977.
- [03] COLVARA, L. D.; Método Automático de Análise de Estabilidade Transitória de Sistemas de Energia Elétrica Considerando Modelos Detalhados: Um Desenvolvimento, Ilha Solteira, 1995, 52p, Tese de Livre-Docência - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.
- [04] COLVARA, L. D.; Análise de Estabilidade de Sistemas de Potência com Reguladores Automáticos de Tensão. Rio de Janeiro, 1988, 134p, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [05] LOURENÇO, F. E; Melhoria de Modelos Considerados em Análise de Estabilidade Transitória por Métodos Diretos. Ilha Solteira, 1995, 81p, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".
- [06] HARPER, G. E.; Analisis Moderno de Sistemas Eléctricos de Potência. Editorial Limusa, México, 1977.
- [07] PAI, M. A.; Power Systems Stability. Analysis by Direct Method of Lyapunov. North-Holland Publishing Company, Amsterdam-New York-Oxford, 1981.
- [08] MONTICELLI, A. J.; Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1983.
- [09] VIEIRA FILHO, X.; Operação de Sistemas de Potência com Controle Automático de Geração. Editora Campus Ltda, Rio de Janeiro, 1984.

- [10] MILLER, R. H.; Operação de Sistemas de Potência. Eletrobrás (SP). McGraw-Hill, Rio de Janeiro, 1987.
- [11] WEEDY, B. M.; Sistemas Elétricos de Potência. Editora da USP, São Paulo, 1973.
- [12] JORDÃO, R. G.; Máquinas Síncronas. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A, Rio de Janeiro, 1980.
- [13] ELGERD, O. I.; Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica. McGraw-Hill, São Paulo, 1977.
- [14] STEVENSON, W. D.; Elementos de Análise de Sistemas de Potência. McGraw-Hill, São Paulo, 1978.
- [15] TROULLINOS, G. and DORSEY, J.; Coherency and Model Reduction: State Space Point of View. IEEE, New York, 1989, 07p.
- [16] HAQUE, M. H. and RABIN, A.H.M.A.; An Efficient Method of Identifying Coherent Generators Using Taylor Series Expansion. IEEE, San Francisco, 1987, 07p.
- [17] ELGERD, O. I.; Control Systems Theory. McGraw-Hill. New York, 1967.
- [18] D'AZZO, J. J. e HOUPIS, C. H.; Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1978.
- [19] LEE, S. T. Y. and SCHWEPPE, F. C.; Distance Measures and Coherency Recognition for Transiente Stability Equivalents. New York, 1973. 08p.
- [20] STAGG, G. W. and EL-ABIAD, A. H.; Computer Methods in Power System Analysis. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. Tokio, 1968.
- [21] DIRECTOR, S. W.; Circuitos Elétricos. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Rio de Janeiro, 1980.
- [22] ALTINO, L.; Máquinas Síncronas: Teoria e Aplicações. Editora Universitária da Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 1984.
- [23] DEMELLO, F. P. and CONCÓRDIA, C.; Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control. IEEE, 1969, 14p.
- [24] BELHOMME, R., Zhao, H. and PAVELLA, M.; Power System Reduction Techniques for Direct Transient Stability Methods, IEEE, 1993, 07p.



[25] ARRILAGA J., ARNOLD C. P. and HARKER B. J.; Computer Modelling of Electrical Power Systems. John Weley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 1991.



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
AV. BRASIL, 56 - CAIXA POSTAL 31
15378-000 ILHA SOLTEIRA - SP

