

ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA  
EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA  
EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

VIVALDO FERNANDO DA COSTA

Orientadores:

*Alcir José Monticelli*

*André Luiz Morelato França*

Tese apresentada à Faculdade de  
Engenharia-FEC-UNICAMP, como  
parte dos requisitos exigidos,  
para obtenção do título de MES-  
TRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

DEZEMBRO-1981

**UNICAMP**  
BIBLIOTECA CENTRAL

## AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho e em especial

a Alcir José Monticelli e André Luiz Morelato França pela preciosa orientação,

aos colegas Ariovaldo Verandio Garcia e Carlos Alberto F. Murari pela valiosa colaboração prestada,

a Taka Ota Perroni pelo trabalho datilográfico,

desejo expressar os meus agradecimentos.

*Para Dorte, Frederick e Felipe*

## RESUMO

Neste trabalho descreve-se um método para analisar a estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica, utilizando um esquema que resolve alternadamente os sistemas de equações diferenciais e algébricas, e o método Trapezoidal Implícito para efetuar a integração numérica. Particular atenção é dada aos problemas de inclusão da saliência dos rotores das máquinas síncronas e da modelagem dos sistemas de excitação incluindo-se os limites e saturação. Desenvolveu-se um programa computacional cujos resultados obtidos em testes com dois sistemas são apresentados.

## ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
CAPÍTULO I	
INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO II	
ESTUDOS DE ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTEN CIA .....	3
2.1. Formulação Geral do Problema .....	5
2.2. Métodos de Integração .....	8
2.2.1. Método Trapezoidal Implícito .....	11
2.3. Esquemas de Resolução .....	14
2.3.1. Esquema de Resolução Alternado .....	15
2.3.2. Esquema de Resolução Simultânea .....	17
CAPÍTULO III	
MODELAGEM DO SISTEMA .....	22
3.1. Equações Algébricas .....	22
3.1.1. Rede de Transmissão .....	23
3.1.2. Cargas .....	24
3.1.3. Transformação de Variáveis .....	28
3.1.4. Estator das Máquinas Síncronas .....	30
3.1.5. Modelo Clássico .....	32
3.1.6. Modelo com Saliência .....	33

3.2. Equações Diferenciais .....	39
3.2.1. Equações Dinâmicas do Rotor .....	39
3.2.2. Equações Elétricas do Rotor .....	39
3.2.3. Sistema de Excitação .....	40
3.3. Nota sobre os Modelos das Máquinas Síncronas .....	48

#### CAPÍTULO IV

ESQUEMA ALTERNADO COM MÉTODO TRAPEZOIDAL IMPLÍCITO .....	50
4.1. Esquema Geral .....	50
4.2. Resolução do Sistema de Equações Algébricas .....	51
4.3. Resolução das Equações Diferenciais - Método Trape	
zoidal Implícito .....	53
4.3.1. Equações Dinâmicas do Rotor .....	53
4.3.2. Equações Elétricas do Rotor .....	56
4.3.3. Sistema de Excitação .....	62
4.4. Cálculo das Condições Iniciais .....	68
4.4.1. Variáveis da Máquina .....	68
4.4.2. Variáveis do Sistema de Excitação .....	71
4.5. Descontinuidades .....	72

#### CAPÍTULO V

RESULTADOS .....	77
5.1. Sistema I .....	77
5.2. Sistema II .....	89

	<u>Pág.</u>
CAPÍTULO VI	
CONCLUSÕES .....	96
APÊNDICE A	
MODELAGEM DE CARGA POR IMPEDÂNCIA CONSTANTE .....	98
APÊNDICE B	
FORMA DAS EQUAÇÕES COM A SALIÊNCIA CONSIDERADA .....	100
B.1. Equação de Tensão do Estator .....	100
B.2. Forma Expandida da Equação Matricial da Rede .....	102
APÊNDICE C	
INCLUSÃO DA SALIÊNCIA NA MODELAGEM DA MÁQUINA .....	104
C.1. Impedância $Z_e$ Aproximada .....	104
C.2. Dedução da Expressão (3.16) .....	105
APÊNDICE D	
MÉTODO TRAPEZOIDAL IMPLÍCITO .....	107
D.1. Equações Dinâmicas do Rotor .....	107
D.2. Equações Diferenciais Elétricas do Rotor .....	108
APÊNDICE E	
SISTEMA DE EXCITAÇÃO .....	110
E.1. Dedução da Expressão (4.14) .....	110
E.2. Limites $E_{HIGH}$ e $E_{LOW}$ .....	115

	<u>Pág.</u>
E.3. Saturação da Excitatriz .....	117
E.4. Constante $K_E$ da Função de Transferência da Excita triz .....	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	121

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

O estudo da estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica, utilizando-se métodos de integração numérica, tem sua aplicabilidade limitada devido ao crescimento constante das dimensões dos sistemas. A crescente interligação dos sistemas, estes estudos têm exigido esforços computacionais cada vez maiores, sendo este problema muitas vezes agravado pela multiplicidade de casos que requerem análise. Além disso, os sistemas de energia elétrica têm se tornado mais complexos, impondo a necessidade de modelos mais detalhados e tempo de simulação mais longos. Neste contexto, técnicas mais eficientes e confiáveis de modelagem e integração numérica bem como diferentes estratégias de solução têm sido os caminhos apontados para se enfrentar as dificuldades.

Este trabalho, que pretende ser um primeiro passo de um projeto mais amplo, busca investigar, explorar e comprovar as potencialidades do esquema de resolução Alternado das equações algébricas e diferenciais combinado com o método Trapezoidal Implícito de integração numérica.

No Capítulo II é feita uma formulação analítica do problema, mostrando-se a forma geral dos sistemas de equações algébricas e diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico do sistema em estudos de estabilidade. São abordados dois esquemas de resolução possíveis deste sistema algébrico-diferencial ( Alternado e Simultâneo); e o método Trapezoidal Implícito a ser

utilizado na integração numérica.

No Capítulo III são descritas a modelagem da rede de transmissão, das cargas e das máquinas síncronas e seus controles, dando ênfase à inclusão do efeito da saliência e do sistema de excitação.

No Capítulo IV é apresentado e discutido mais detalhadamente o esquema de resolução Alternado do sistema algébrico-diferencial.

No Capítulo V são apresentados os resultados obtidos através de testes efetuados em dois sistemas reais, sendo um deles o sistema interligado da região Sul-Sudeste do Brasil.

O Capítulo VI é dedicado às conclusões e comentários finais.

No Apêndice A é descrita a modelagem de carga por impedância constante.

Nos Apêndices B e C respectivamente se mostra a forma das equações e as alterações necessárias para levar em conta o efeito da saliência na modelagem da máquina.

No Apêndice D são deduzidas as expressões algébricas resultantes da aplicação do método Trapezoidal Implícito às equações diferenciais do rotor.

No Apêndice E são deduzidas as expressões algébricas resultantes da aplicação do método Trapezoidal Implícito às equações que constituem o sistema de excitação. É mostrado também a forma como é levado em conta o efeito da saturação da excitatriz.

## CAPÍTULO II

### ESTUDOS DE ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Este trabalho trata da estabilidade de sistemas elétricos de potência, ou seja, da capacidade que os rotores das máquinas elétricas possuem, de continuar ou não em sincronismo (mesma velocidade) após a ocorrência de perturbações no sistema.

Em condições normais de operação os alternadores estão na velocidade síncrona e existe um balanceamento entre a potência elétrica gerada (e portanto consumida) e a potência mecânica proveniente das fontes primárias. Neste caso, diz-se que o sistema está operando em regime permanente. Na realidade, um sistema interligado com grande número de máquinas dificilmente está em regime permanente desde que pequenas perturbações (ocasionadas pela variação ininterrupta das cargas e pela ação corretora dos equipamentos de controle) estão sempre presentes. Desta forma o estado de regime permanente deve incluir a condição de pequena perturbação.

Em situações transitórias de operação, decorrentes de uma grande perturbação no sistema (caracterizada por defeitos do tipo: curto-circuito, desligamento de linhas de transmissão, perda de geração, ou uma combinação destes eventos), o equilíbrio entre a potência elétrica gerada e a potência mecânica de entrada é drasticamente rompido, principalmente nos geradores mais próximos eletricamente do defeito. Em consequência os rotores das máquinas sofrerão diferentes acelerações levando, eventualmente, algumas delas à perda de sincronismo com o resto

do sistema. Se as oscilações relativas dos diversos rotores tenderem a se amortecer fazendo como um todo atingir um novo estado de operação em regime permanente, então se diz que o ponto de operação inicial do sistema é estável a uma dada perturbação. Deve ser enfatizado que as condições do defeito têm forte influência na estabilidade do sistema. Por exemplo, um mesmo ponto de operação pode ser classificado como estável ou instável dependendo do tempo de religamento de uma linha de transmissão ou do tempo de extinção do curto-circuito. Se o ponto de operação for instável, a velocidade de pelo menos uma máquina tenderá progressivamente a se afastar das demais, ocasionando seu desligamento pelo sistema de proteção.

A estabilidade de sistemas elétricos de potência tem sido classificada de diversas maneiras. Uma classificação de acordo com a natureza das perturbações ocorridas pode ser a seguinte:

Estabilidade Transitória: refere-se à capacidade dos geradores síncronos permanecerem em sincronismo, após a ocorrência de uma grande perturbação;

Estabilidade de Regime Permanente: refere-se à capacidade dos geradores síncronos permanecerem em sincronismo quando o sistema é submetido às pequenas perturbações.

Nesta última categoria se incluem tanto os estudos que pressupõem uma perturbação infinitesimal do ponto de operação (regime quase-estático) quanto os estudos que procuram verificar se o ponto de operação é um ponto de equilíbrio instável, ou seja, se uma pequena perturbação pode acarretar o aparecimento de oscilações pouco amortecidas de amplitudes crescentes que

levarão à perda de sincronismo. Este último tipo de análise tem sido chamado por vários autores de Estabilidade Dinâmica. Em outras situações porém, encontra-se o termo Estabilidade Dinâmica com uma conotação mais geral englobando as duas categorias anteriores [1]. Já a referência [2] classifica a estabilidade de acordo com o horizonte de tempo após o defeito. Assim para tempos de análise após a perturbação, de 8 seg., 5 min e 20 min., as simulações são denominadas de curto, médio e longo prazo, respectivamente. O primeiro período é associado com a Estabilidade Transitória enquanto os demais são associados com a Estabilidade Dinâmica.

Via de regra, os estudos de Estabilidade Transitória exigem modelos não-lineares e a técnica normalmente usada é a simulação ponto a ponto do comportamento dinâmico. Já os estudos de Estabilidade de Regime Permanente podem, mas não obrigatoriamente, ser realizados através de linearizações em torno do ponto de operação permitindo a aplicação de técnicas de análise de sistemas lineares.

## 2.1. Formulação Geral do Problema

O comportamento dinâmico de um sistema elétrico de potência em estudos de estabilidade é descrito por um sistema de equações algébricas e diferenciais possuindo uma estrutura de acordo com o esquema mostrado na Figura 2.1., onde:

$E_{fd}$  - Tensão de saída do sistema de excitação aplicada ao enrolamento de campo do gerador;

$P_m$  - Potência mecânica aplicada no eixo;

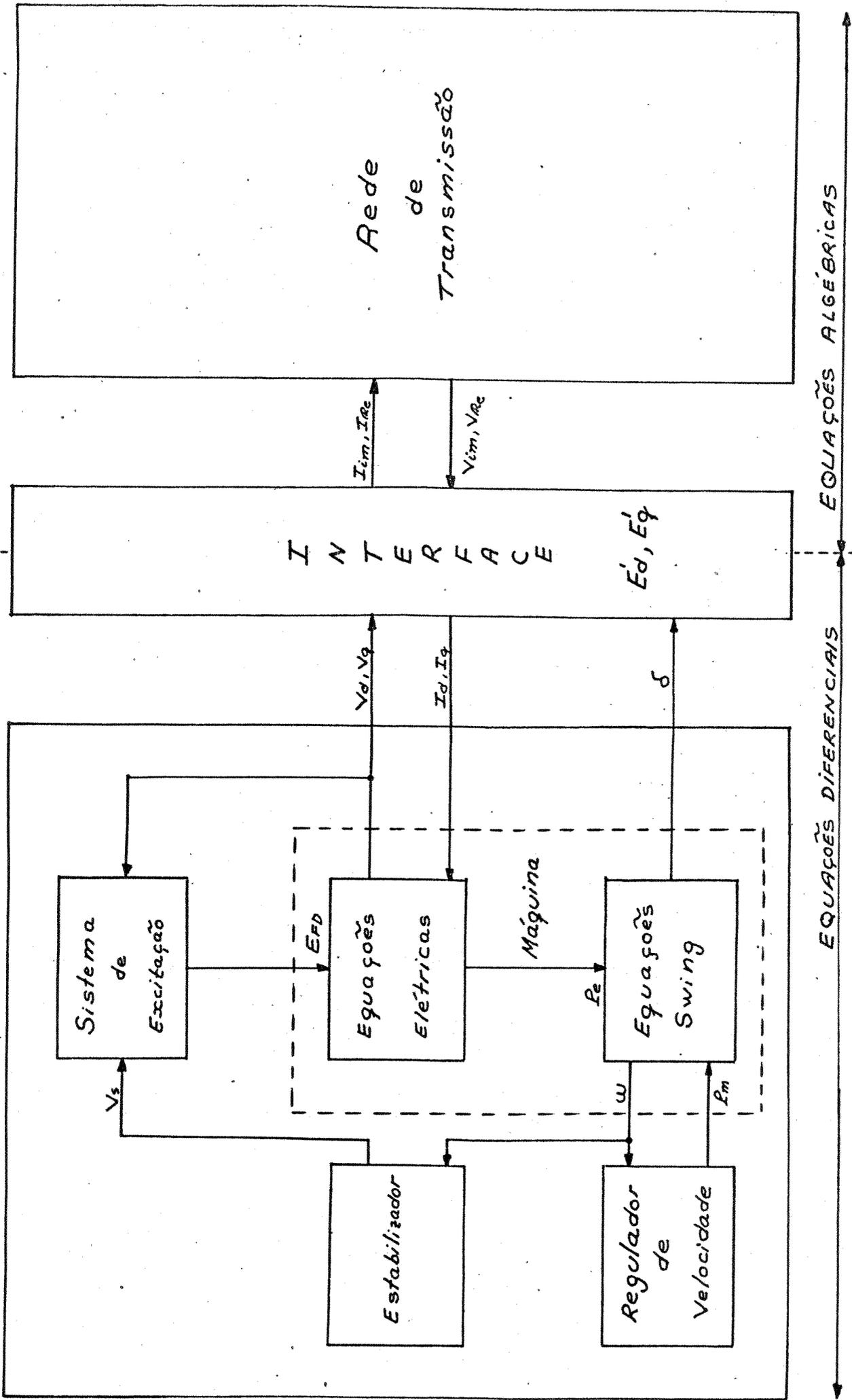


Figura 2.1 - Gerador síncrono conectado ao sistema de transmissão.

- $\omega$  - Velocidade angular em rad/seg.;
- $P_e$  - Potência elétrica de entreferro;
- $V_s$  - Sinal de saída do estabilizador;
- $\delta$  - Posição angular do rotor em relação ao eixo de referência síncrono;
- $V_d, V_q$  - Componentes de eixo direto e quadratura da tensão terminal da máquina;
- $E_d, E_q$  - Componentes de eixo direto e quadratura da tensão interna da máquina;
- $I_d, I_q$  - Componentes de eixo direto e quadratura da corrente de estator da máquina;
- $I_{lm}, I_{le}$  - Componentes de eixo real e imaginário da corrente de estator;
- $V_{lm}, V_{le}$  - Componentes de eixo real e imaginário da tensão terminal.

Na Figura 2.1 é mostrado o esquema para um gerador síncrono e seus controles, conectado ao sistema de transmissão. Como indicado na Figura 2.1, os geradores síncronos e seus controles são descritos por um sistema de equações diferenciais, e a rede de transmissão por um sistema de equações algébricas. Na realidade, dependendo da modelagem feita para os componentes situados à esquerda do sistema de interface (Fig. 2.1), equações algébricas (além das diferenciais) são também incluídas na descrição dos mesmos. Um exemplo disso é a consideração do efeito da saturação no sistema de excitação.

Assim sendo, em estudos de estabilidade a simulação do comportamento dinâmico do sistema, consiste na resolução de

um sistema de equações diferenciais;

$$\underline{\dot{y}} = f(\underline{x}, \underline{y}) \quad (2.1)$$

e de um sistema de equações algébricas;

$$\underline{g}(\underline{x}, \underline{y}) = 0 \quad (2.2)$$

onde

$\underline{y}$  - Variáveis de estado das equações diferenciais;

$\underline{x}$  - Variáveis de estado das equações algébricas;

$f$  - Funções que definem as equações diferenciais;

$g$  - Funções que definem as equações algébricas.

Existem variáveis que aparecem em ambos os sistemas de equações, (2.1) e (2.2). Estas variáveis são denominadas variáveis de "interface". Desta forma, pode-se definir como sendo:

$\underline{u}$  - subconjunto de  $\underline{x}$  compreendendo as variáveis de interface  $I_d$ ,  $I_q$ ,  $P_e$  e  $|V|$ .

$\underline{E}$  - subconjunto de  $\underline{y}$  compreendendo as variáveis de interface  $E_d$ ,  $E'_q$  e  $\delta$ .

## 2.2. Métodos de Integração [2], [3], [4]

Através da aplicação de métodos de integração numérica pode-se avaliar as soluções da equação (2.1), em um conjunto finito de pontos como:  $\underline{x}_0, \underline{x}_1, \dots, \underline{x}_n, \underline{x}_{n+1}, \dots, \underline{x}_N$

onde  $\underline{x}_0$  é o ponto inicial de interesse e  $\underline{x}_N$  o ponto final. Considere-se que estes pontos são equidistantes, ou seja:

$$\underline{x}_{n+1} - \underline{x}_n = h$$

sendo  $h$  chamado de passo de integração. A partir de  $\underline{x}_n$  e  $\underline{y}_n$ , um passo de integração numérica fornece a solução  $\underline{y}_{n+1}$  no ponto  $\underline{x}_{n+1}$ .

Os métodos de integração numérica que necessitam de informações sobre a solução em um único ponto, são chamados de métodos de passo simples. Estes métodos são portanto auto-inicializáveis, isto é, requerem o valor de  $\underline{y}$  somente no ponto  $\underline{x} = \underline{x}_n$  para se obter  $\underline{y}_{n+1}$ . Esta é uma das vantagens da utilização destes métodos em estudos de estabilidade devido à presença de descontinuidades (instantes em que ocorrem o defeito, a eliminação do defeito, a atuação dos limites impostos a certas variáveis dos sistemas de controle, etc.). Métodos que se enquadram nesta categoria são por exemplo, os métodos de Euler e de Runge-Kutta.

Métodos de integração que necessitam de valores de  $\underline{y}$  ou de suas derivadas, ou ainda de ambos, em mais de um ponto, são chamados de métodos de passo múltiplo. Em geral estes métodos não são auto-inicializáveis, fato este que deve ser levado em conta nos instantes de descontinuidades.

Os métodos de integração são também classificados em métodos explícitos e implícitos. Por exemplo, o método de Euler Simples, cuja expressão de recorrência é dada por:

$$\underline{y}_{n+1} = \underline{y}_n + hf(\underline{x}_n, \underline{y}_n)$$

é do tipo explícito, pois a solução  $y_{n+1}$  aparece explicitamente em função de grandezas calculadas para instantes precedentes.

O método de Euler Modificado, cuja expressão de recorrência é dada por:

$$\underline{y}_{n+1} = \underline{y}_n + \frac{h}{2} [ \underline{f}(x_n, y_n) + \underline{f}(x_{n+1}, y_{n+1}) ]$$

é do tipo implícito, pois  $y_{n+1}$  aparece como argumento no segundo membro.

Expressões explícitas são também chamadas de expressões do tipo aberta, e expressões implícitas são chamadas de expressões do tipo fechada. Com uma expressão do tipo aberta a solução é obtida diretamente, enquanto que com a expressão do tipo fechada um processo iterativo torna-se necessário. Uma expressão do tipo aberta e uma do tipo fechada podem ser utilizadas conjuntamente: a primeira como preditora e a segunda como corretora, e desta forma o método de integração é chamado de Preditor - Corretor.

A opção por um método de integração a ser utilizado em estudos de estabilidade, deve levar em conta fatores diversos, tais como: erros de truncamento das fórmulas de integração, estabilidade numérica, desempenho do método na presença de descontinuidades, etc. Os métodos implícitos são mais eficientes computacionalmente do que os métodos explícitos, além do que permitem a utilização de passos de integração maiores do que com os métodos explícitos [2]. Neste trabalho a opção feita é pelo método Trapezoidal Implícito, que é o método recomendado pelas referências [2],[3],[5].

2.2.1. Método Trapezoidal Implícito

Considere-se o seguinte sistema linear de equações:

$$\underline{\dot{Z}} = A \underline{Z} \quad (2.3)$$

do qual se deseja obter a solução no instante  $t_n$  a partir de sua solução conhecida no instante  $t_{n-1}$ .

Integrando-se a equação (2.3) no intervalo  $t_{n-1}$  a  $t_n$ , obtêm-se:

$$\underline{Z}_n = \underline{Z}_{n-1} + \int_{t_{n-1}}^{t_n} A \underline{Z} dt \quad (2.4)$$

A integral da equação (2.4) pode ser aproximada por:

$$\int_{t_{n-1}}^{t_n} A \underline{Z} dt = A \frac{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{n-1}}{2} h \quad (2.5)$$

onde  $h = t_n - t_{n-1}$ . A justificativa para esta aproximação é mostrada graficamente na Figura (2.2) para cada componente de  $\underline{Z}$ .

Desta forma, da equação (2.4) tem-se:

$$\underline{Z}_n = \underline{Z}_{n-1} + A \frac{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{n-1}}{2} h \quad (2.6)$$

ou ainda,

$$\underline{Z}_n = \left( I - \frac{h}{2} A \right)^{-1} \left( I + \frac{h}{2} A \right) \underline{Z}_{n-1} \quad (2.7)$$

onde

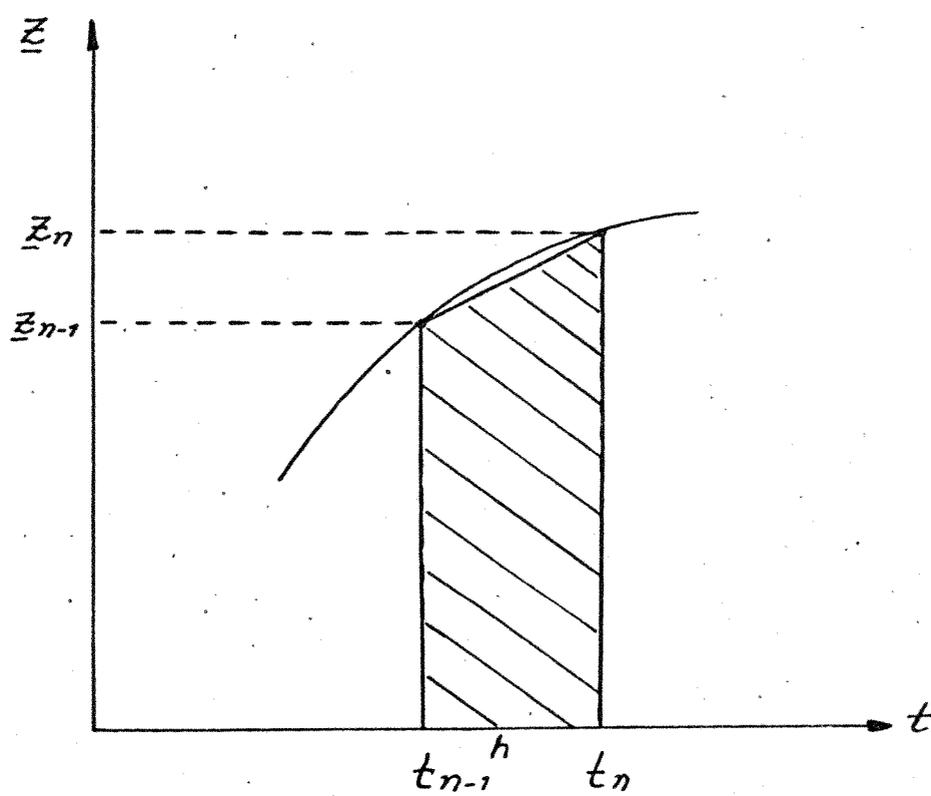


Figura 2.2 - Regra Trapezoidal.

$I$  - matriz identidade.

Como pode-se notar pela equação (2.7), neste caso em que o sistema é linear, é possível explicitar  $\underline{z}_n$ .

Considere-se agora o sistema de equações (2.1) como sendo linear, posto na forma:

$$\underline{y} = A\underline{y} + B\underline{x} \quad (2.8)$$

Integrando-se a equação (2.8) no intervalo  $t_{n-1}$  a  $t_n$ , obtém-se:

$$\underline{y}_n = \underline{y}_{n-1} + \int_{t_{n-1}}^{t_n} A\underline{y} dt + \int_{t_{n-1}}^{t_n} B\underline{x}_n dt \quad (2.9)$$

Utilizando-se a regra trapezoidal de integração, e assumindo que  $\underline{y}$  e  $\underline{x}$  variam linearmente no intervalo  $t_{n-1}$  a  $t_n$ , tem-se:

$$\underline{y}_n = \underline{y}_{n-1} + A \left( \frac{\underline{y}_n + \underline{y}_{n-1}}{2} \right) h + B \left( \frac{\underline{x}_n + \underline{x}_{n-1}}{2} \right) h \quad (2.10)$$

ou ainda,

$$\left( I - \frac{1}{2} h A \right) \underline{y}_n = \frac{1}{2} h B \underline{x}_n + C_{n-1} \quad (2.11)$$

onde

$$C_{n-1} = \left( I + \frac{1}{2} h A \right) \underline{y}_{n-1} + \frac{1}{2} h B \underline{x}_{n-1}$$

A equação (2.11) resultante da aplicação da regra

trapezoidal é uma equação implícita e algébrica. Assim, com a regra trapezoidal, um sistema de equações diferenciais pode ser transformado em um sistema algébrico e desta forma as equações são resolvidas simultaneamente, como por exemplo as equações diferenciais correspondentes ao sistema de excitação (VER CAPÍTULO IV).

### 2.3. Esquemas de Resolução

A simulação do comportamento dinâmico de um sistema elétrico de potência, consiste na resolução simultânea no tempo do sistema de equações diferenciais (2.1) e do sistema de equações algébricas (2.2). Os métodos de resolução deste sistema algébrico-diferencial, diferem basicamente pela forma com que são relacionados os dois sistemas de equações (2.1 e 2.2). O sistema de equações diferenciais (2.1) é resolvido através da aplicação de métodos de integração numérica, que em última análise o transformam em um sistema de expressões algébricas de variáveis discretas. Por outro lado, o sistema de equações algébricas (2.2) é resolvido pelos métodos aplicáveis a sistemas não-lineares.

O esquema de resoluções é chamado: Alternado, quando os sistemas (2.1) e (2.2) são resolvidos separadamente durante cada passo de integração, alternando-se as respectivas soluções.

O esquema de resolução é chamado Simultâneo, quando os sistemas de equações (2.1) e (2.2) são resolvidos conjuntamente, sendo considerados como um único sistema algébrico.

### 2.3.1. Esquema de Resolução Alternado

Este esquema é utilizado na maioria dos programas de estabilidade existentes [2] , [5] . Os esquemas de resolução possíveis, irão depender dos métodos de integração numérica utilizados para a resolução das equações diferenciais, bem como de técnicas de extrapolação.

Considere-se por exemplo, o seguinte esquema de resolução: o sistema de equações diferenciais (2.1) é integrado ao longo do intervalo de tempo  $t-\Delta t$  a  $t$  , supondo-se que o subconjunto  $\underline{u}$  permaneça constante no valor  $\underline{u}(t-\Delta t)$ . Desta forma, obtendo-se a solução  $\underline{y}(t)$  do sistema diferencial (2.1), o sistema algébrico (2.2) é resolvido obtendo-se então a solução  $\underline{x}(t)$  conforme ilustrado pela Fig. (2.3). A utilização deste esquema com métodos de integração numérica de fórmulas abertas , como por exemplo o método de Euler Simples, acarreta em soluções exatas do sistema algébrico-diferencial, ou seja, não ocorrerá "erro de interface" no processo de resolução dos sistemas algébrico-diferencial. O "erro de interface" está relacionado com o fato de que a maioria dos métodos de integração numérica, necessita de mais de uma avaliação de  $\underline{y}$  durante um passo de integração. Assim sendo, para cada valor de  $\underline{y}$  é necessário obter-se o valor correspondente de  $\underline{u}$  . Se  $\underline{u}$  for mantido constante ao longo do passo, ocorrerá então o "erro de interface" entre os sistemas algébrico e diferencial.

Embora os métodos de integração de fórmulas abertas não acarretem em "erro de interface" entre os sistemas algébricos e diferencial, é preferível utilizar-se um método de passo múltiplo devido a um melhor desempenho numérico. Com estes métodos o "erro de interface" também pode ser evitado, se pa-

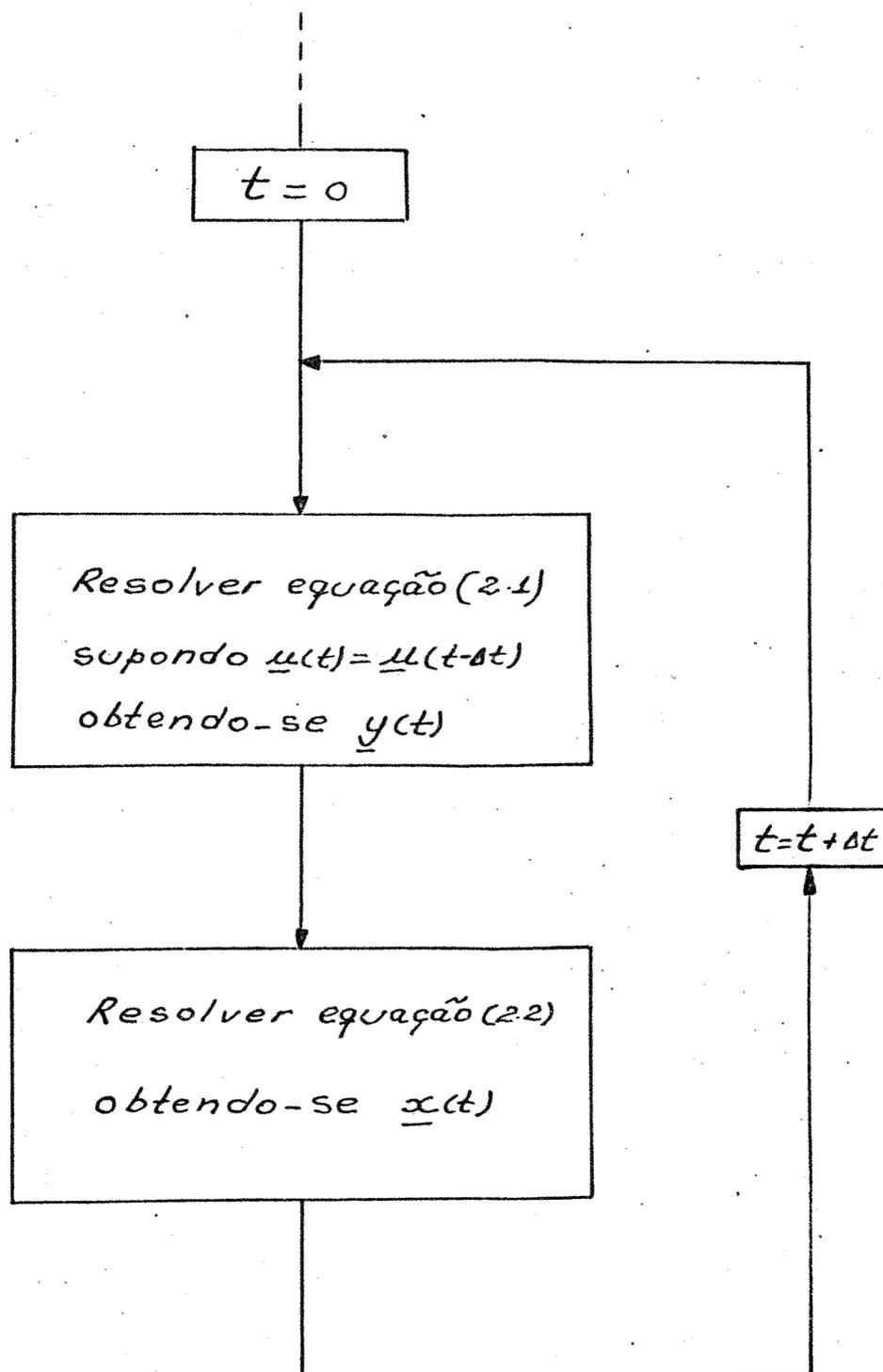


Figura 2.3 - Esquema de resolução mantendo-se  $\underline{u}$  constante durante o passo  $t-\Delta t \rightarrow t$ .

ra cada valor de  $\underline{y}$  ou de sua derivada requeridos em um passo de integração, uma solução exata do sistema (2.2) for realizada a fim de se obter os valores de  $\underline{x}$  correspondentes. Entretanto, isto acarreta em um esforço computacional considerável que pode ser evitado através da utilização de técnicas de extrapolação. Esta é uma forma de se evitar um número excessivo de soluções do sistema algébrico (2.2), reduzindo-se desta forma o tempo computacional. Este esquema de solução quando técnicas de extrapolação são utilizadas, é melhor visualizado pelo diagrama mostrado na Figura (2.4).

No esquema anterior, a qualidade da predição feita para os valores de  $\underline{\mu}$ , tem uma influência decisiva na precisão dos resultados. Assim sendo, um esquema mais eficiente pode ser realizado conforme ilustra o diagrama mostrado na Figura (2.5). É feita inicialmente uma extrapolação de  $\underline{\mu}(t)$  a partir de valores prévios armazenados. Em seguida a equação (2.1) é resolvida, obtendo-se então os valores de  $\underline{E}(t)$  que são inseridos na equação (2.2). Resolvendo-se a equação (2.2) é possível então obter-se uma nova estimativa de  $\underline{\mu}(t)$  que é então utilizada para se obter uma nova solução da equação (2.1). Este processo é repetido até que a diferença entre duas soluções sucessivas da equação (2.1) seja menor ou igual a uma tolerância pré-fixada. Com este esquema iterativo, a predição terá influência somente no número de iterações até se obter a convergência, e não na precisão do resultado obtido. Este é o esquema implementado neste trabalho, que será novamente abordado posteriormente (CAPÍTULO IV).

### 2.3.2. Esquema de Resolução Simultânea

Neste esquema o sistema de equações diferenciais

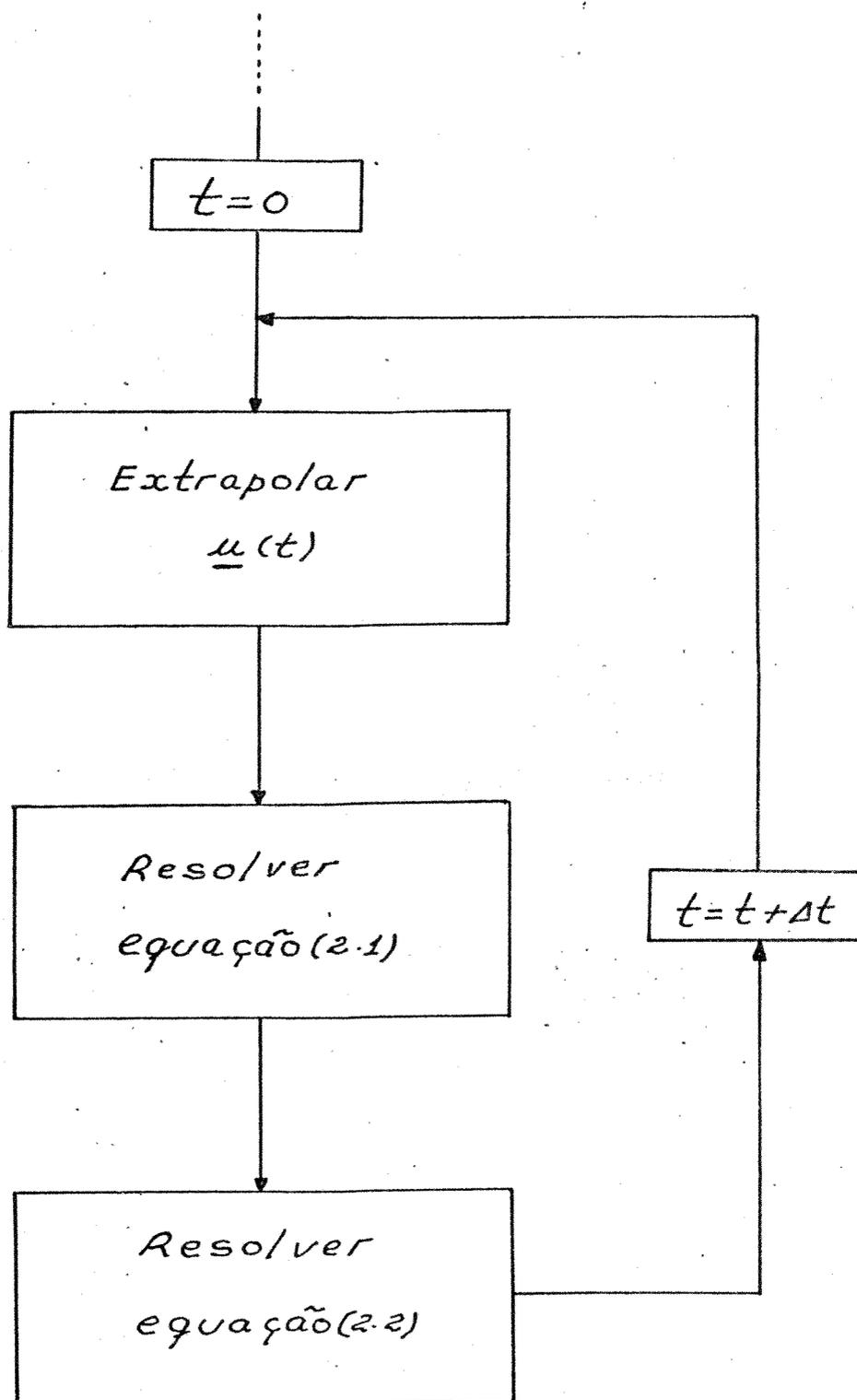


Figura 2.4 - Esquema de resolução usando técnicas de extrapolação para o subconjunto  $\underline{u}$ .

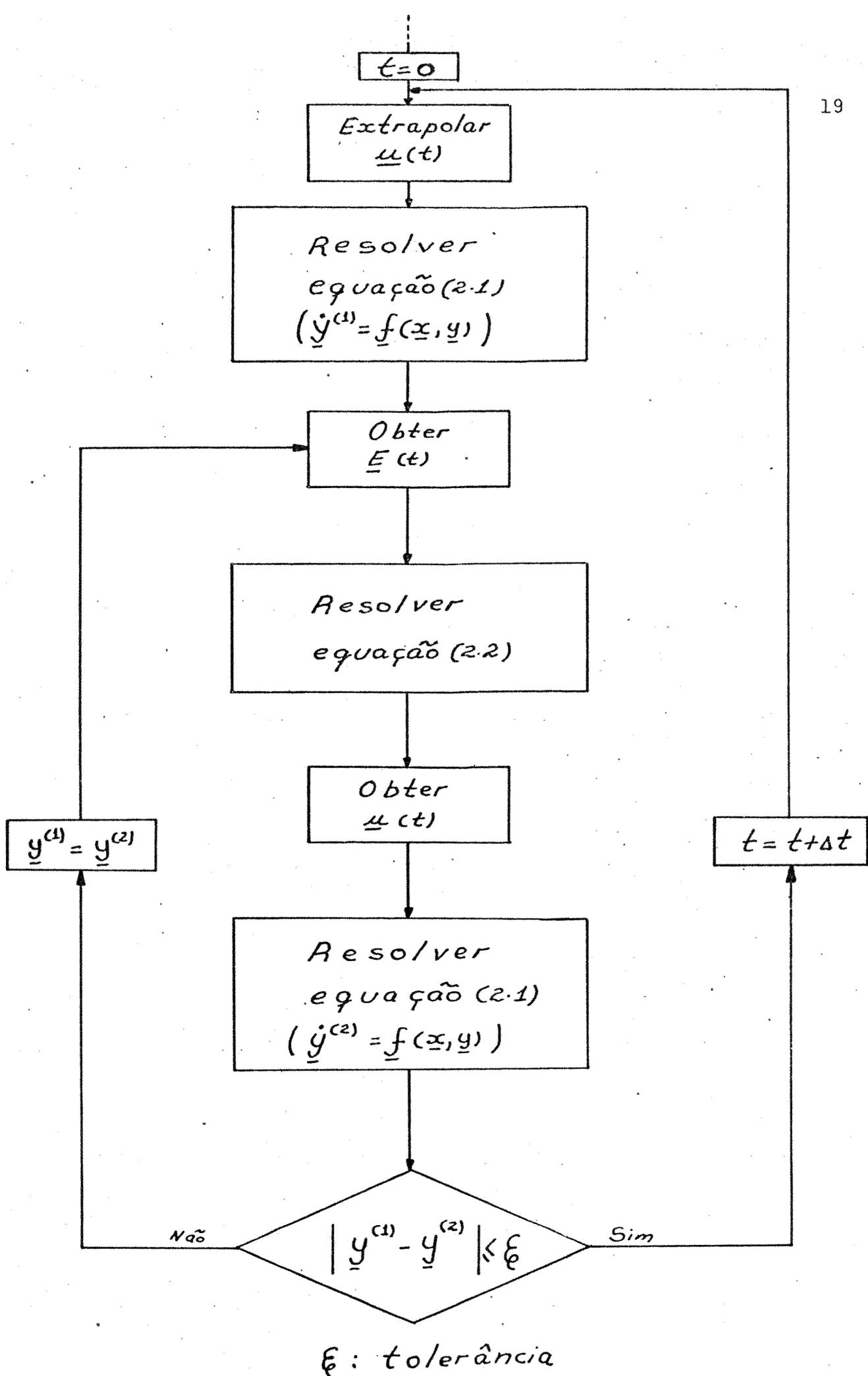


Figura 2.5 - Esquema de resolução iterativo.

(2.1) é transformado em um sistema de equações algébricas, e desta forma ambos os sistemas (2.1) e (2.2) são resolvidos conjuntamente como sendo um único sistema algébrico, não ocorrendo desta maneira o "erro de interface". O sistema de equações diferenciais é transformado em um sistema de equações algébricas, através da aplicação de métodos de integração implícitos. Daí o fato deste esquema ser denominado também de Simultânea Implícito.

Como descrito pela referência [2] o sistema (2.1) através da aplicação de métodos de integração implícito, pode ser escrito na forma:

$$\underline{y}_n = K h \underline{f}(\underline{x}_n, \underline{y}_n) + \underline{C} \quad (2.12)$$

onde  $K$  é um coeficiente constante, e  $\underline{C}$  é uma combinação das variáveis  $\underline{y}$  e  $\underline{\dot{y}}$  no instante  $t_{n-1}$ . Desta forma os sistemas (2.1) e (2.2) podem ser escritos conjuntamente como:

$$\underline{F}_1 = \underline{y}_n - K h \underline{f}(\underline{x}_n, \underline{y}_n) - \underline{C} \quad (2.13a)$$

$$\underline{F}_2 = \underline{g}(\underline{x}_n, \underline{y}_n) \quad (2.13b)$$

A opção geralmente feita para a resolução do sistema de equações (2.13), é pelo método de Newton [2], [3]. Isto se deve ao fato de que com tal método cargos com modelos que não o de impedância constante, barras de tensão controlada, inclusão do efeito da saliência (no método de Newton as equações são reais), podem ser implementadas sem grandes dificuldades.

Desta forma, com o método de Newton as equações(2.13) são postas na forma:

$$\begin{array}{|c|} \hline \underline{F}_1 \\ \hline \underline{F}_2 \\ \hline \end{array} = - \underbrace{\begin{array}{|c|c|} \hline J_1 & J_2 \\ \hline J_3 & J_4 \\ \hline \end{array}}_{\mathcal{J}} \cdot \begin{array}{|c|} \hline \Delta y_n \\ \hline \Delta z_n \\ \hline \end{array} \quad (2.15)$$

onde  $\mathcal{J}$  é a matriz jacobiana. Uma versão deste método utilizando-se o método de integração trapezoidal implícito é apresentado na referência [3].

## CAPÍTULO III

### MODELAGEM DO SISTEMA

Conforme já mencionado no capítulo precedente, a modelagem matemática de um sistema de energia elétrica, em estudos de estabilidade transitória, é feita através de um subconjunto de equações algébricas  $(g(\underline{x}, \underline{y}) = 0)$  e um subconjunto de equações diferenciais  $(\dot{\underline{y}} = f(\underline{x}, \underline{y}))$

Neste capítulo será estudada a modelagem da rede de transmissão, das cargas e das máquinas síncronas e seus sistemas de controle, procurando-se mostrar a forma das equações  $g(\underline{x}, \underline{y})$  e  $f(\underline{x}, \underline{y})$ , e o significado das variáveis de estado das equações algébricas  $\underline{x}$ , das variáveis de estado das equações diferenciais  $\underline{y}$ , das variáveis de "interface"  $\underline{\mu}$  (subconjunto de  $\underline{x}$  que aparece em  $f$ ) e  $\underline{E}$  (subconjunto de  $\underline{y}$  que aparece em  $g$ ).

#### 3.1. Equações Algébricas $(g(\underline{x}, \underline{y}) = 0)$

O subsistema de equações algébricas representa a rede de transmissão, as cargas e os estatores das máquinas síncronas.

As equações das cargas e da rede de transmissão são as mesmas utilizadas nos programas convencionais de fluxo de carga. Isto constitui uma aproximação pois estas equações valem apenas para regimes senoidais, condições que são verificadas apenas de maneira aproximada durante os transitórios que interessam do ponto de vista da estabilidade do sistema. O mesmo tipo de

aproximação é feita na dedução das equações do estator da máquina síncrona, onde se ignora o termo  $p\lambda$  das equações de Park [6]. Assim sendo, trabalha-se com um modelo do tipo estático. Se estas aproximações não fossem feitas, tanto o modelo do estator das máquinas síncronas como o modelo da rede de transmissão seriam dados por equações diferenciais (não se poderia, por exemplo, utilizar o modelo equivalente  $\tilde{\pi}$  para representar linhas de transmissão e transformadores). Isto acarretaria um acréscimo muito elevado no esforço computacional sem trazer uma melhoria significativa nos resultados da análise da estabilidade transitória. Note-se, no entanto, que em outros tipos de estudos pode ser necessária a representação da rede através de equações diferenciais, como ocorre na análise de surtos de tensão [7].

### 3.1.1. Rede de Transmissão

A rede de transmissão é representada através do sistema de equações:

$$\underline{I} = Y \underline{V} \quad (3.1)$$

onde

- $\underline{I}$  - vetor de correntes nodais
- $\underline{V}$  - vetor das tensões nodais
- $Y$  - matriz admitância nodal

sendo que  $\underline{I}$  pode ser uma função de  $\underline{V}$  (como ocorre nas barras de cargas modeladas por impedância constante ou potência constan

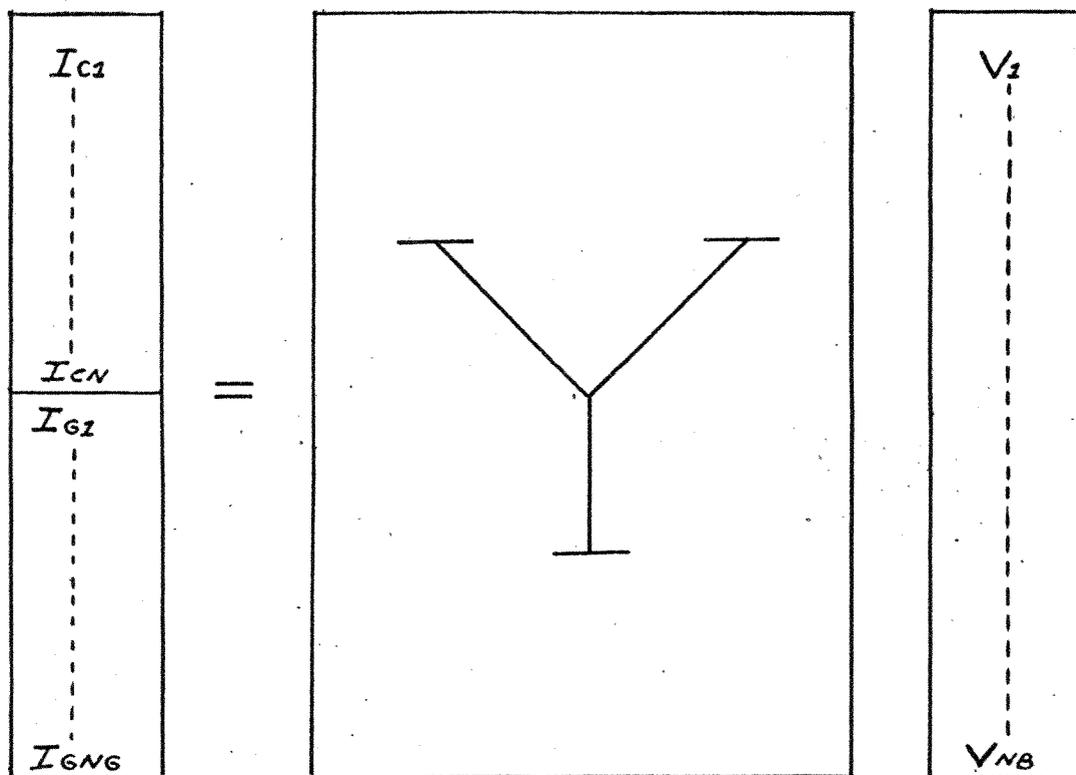
te), ou uma função de  $\underline{V}$  e das tensões internas dos geradores  $\underline{E}'$  (como ocorre nas barras de geração). Isto implica que, dependendo da modelagem das cargas e dos geradores, o sistema algébrico (3.1) poderá ser linear ou não.

Os elementos da matriz  $\underline{Y}$  são obtidos a partir do circuito equivalente  $\pi$  das linhas de transmissão e dos transformadores. Em geral a matriz  $\underline{Y}$  é complexa, esparsa e simétrica. O grau de esparsidade (proporção de elementos nulos na matriz) depende basicamente das dimensões da rede e também da utilização de equivalentes estáticos [8] (a eliminação de nós passivos em geral deteriora o grau de esparsidade). A simetria de  $\underline{Y}$  pode ser afetada dependendo, por exemplo, da maneira como são representados transformadores defasadores (que não podem ser representados por modelos tipo equivalente  $\pi$ ). A matriz  $\underline{Y}$  permanece inalterada durante a simulação de um transitório do sistema, a menos dos chaveamentos de componentes que ocorrem em instantes bem determinados (desligamento de uma linha devido a um curto-circuito).

Considere-se o sistema de equações  $\underline{I} = \underline{Y}\underline{V}$  representado na Figura 3.1, onde para efeito de ilustração, os nós correspondentes às cargas precedem os nós terminais dos geradores. Dependendo da modelagem das cargas, as injeções de correntes  $\underline{I}_{ci}$  poderão ser nulas, funções lineares ou não-lineares de  $\underline{V}_i$ , como será visto a seguir. As correntes  $\underline{I}_{ci}$  também podem ser funções lineares ou não-lineares de  $\underline{V}_i$ .

### 3.1.2. Cargas

Neste trabalho, três tipos de modelagem de cargas são



$N = N^\circ$  de barras de carga

$N + N_6 = N_B = N^\circ$  de barras

Figura 3.1: Sistema de equações da rede.

considerados: impedância constante, corrente constante e potência constante. Em nenhum deles é levada em conta a influência da frequência sobre as cargas.

a) Impedância Constante

Neste modelo a carga é representada através de uma admittância para a terra (ver Apêndice A):

$$Y_c = G_c + jB_c \quad (3.2a)$$

onde

$$G_c = -\frac{P_c}{|V^o|^2} \quad (3.2b)$$

$$B_c = \frac{Q_c}{|V^o|^2} \quad (3.2c)$$

sendo  $|V^o|$  e  $P_c + jQ_c$ , respectivamente, a magnitude da tensão nodal e a injeção de potência complexa nas condições iniciais da rede (caso básico).

Durante um transitório as magnitudes das tensões nodais variam, e como a admitância  $Y_c$  permanece constante, as potências  $P_c$  e  $Q_c$  variam proporcionalmente ao quadrado das magnitudes das tensões ( $P_c = -G_c |V|^2$  e  $Q_c = B_c |V|^2$ ).

Neste modelo as cargas são representadas por elementos passivos, cujas admitâncias são incluídas diretamente na diagonal principal da matriz  $Y$ . As correntes  $I_{ci}$  correspondentes

(Figura 3.1) são nulas.

#### b) Corrente Constante

Neste caso a carga é representada através de uma fonte de corrente constante para a terra:

$$I_c^* = \frac{P_c^{\circ} + j Q_c^{\circ}}{V^{\circ}} \quad (3.3)$$

onde  $I_c^*$  é o valor conjugado da corrente constante  $I_c$ .

Durante um transitório as potências  $P_c$  e  $Q_c$  variam em função da tensão nodal ( $P_c + j Q_c = I_c^* V$ ), e não mais em função do quadrado da magnitude da tensão como ocorria com o modelo de impedância constante.

As correntes dadas pela expressão (3.3) são incluídas no vetor  $\underline{I}$  da equação (3.1). Neste caso as correntes  $I_{ci}$  correspondentes (Figura 3.1) são diferentes de zero.

#### c) Potência Constante

Neste caso admite-se que a carga  $P_c + j Q_c$  é constante, independentemente da tensão nodal ( $P_c = P_c^{\circ}$  e  $Q_c = Q_c^{\circ}$ ). Com isto o modelo dado pela equação (3.1) passa a ser não-linear, da mesma forma que ocorre nos programas convencionais de cálculo de fluxo de carga, exigindo um processo iterativo de resolução. Uma discussão adicional sobre este tipo de modelagem será apresentada no capítulo IV, quando forem abordados os métodos de resolução.

### 3.1.3. Transformação de Variáveis

As variáveis que descrevem o sistema de transmissão são geralmente expressas no sistema de referência complexo (real e imaginário), denominado também eixo rotativo síncrono. Por outro lado, as equações da máquina síncrona assumem uma forma mais conveniente quando as tensões internas, as correntes de armadura e as tensões terminais são expressas no sistema de referência  $d, q$ . Em situações de regime permanente estes dois sistemas têm a mesma velocidade e mantêm uma diferença angular constante. Em situações transitórias o ângulo entre os dois sistemas de referência varia pois a velocidade do rotor não se mantém constante nestas situações.

É necessário então, para construir e resolver o sistema de equações algébricas (3.1), expressar as variáveis do estator de cada máquina nos eixos de referência do sistema de transmissão. Isto é feito através de uma transformação de variáveis por rotação de eixos, conforme ilustrado pela Figura 3.2.

Esta transformação pode ser expressa simbolicamente, como [2]:

$$d + j q = (R_e + j I_{im}) e^{-j\delta}$$

ou

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_e \\ I_{im} \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} R_e \\ I_{im} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

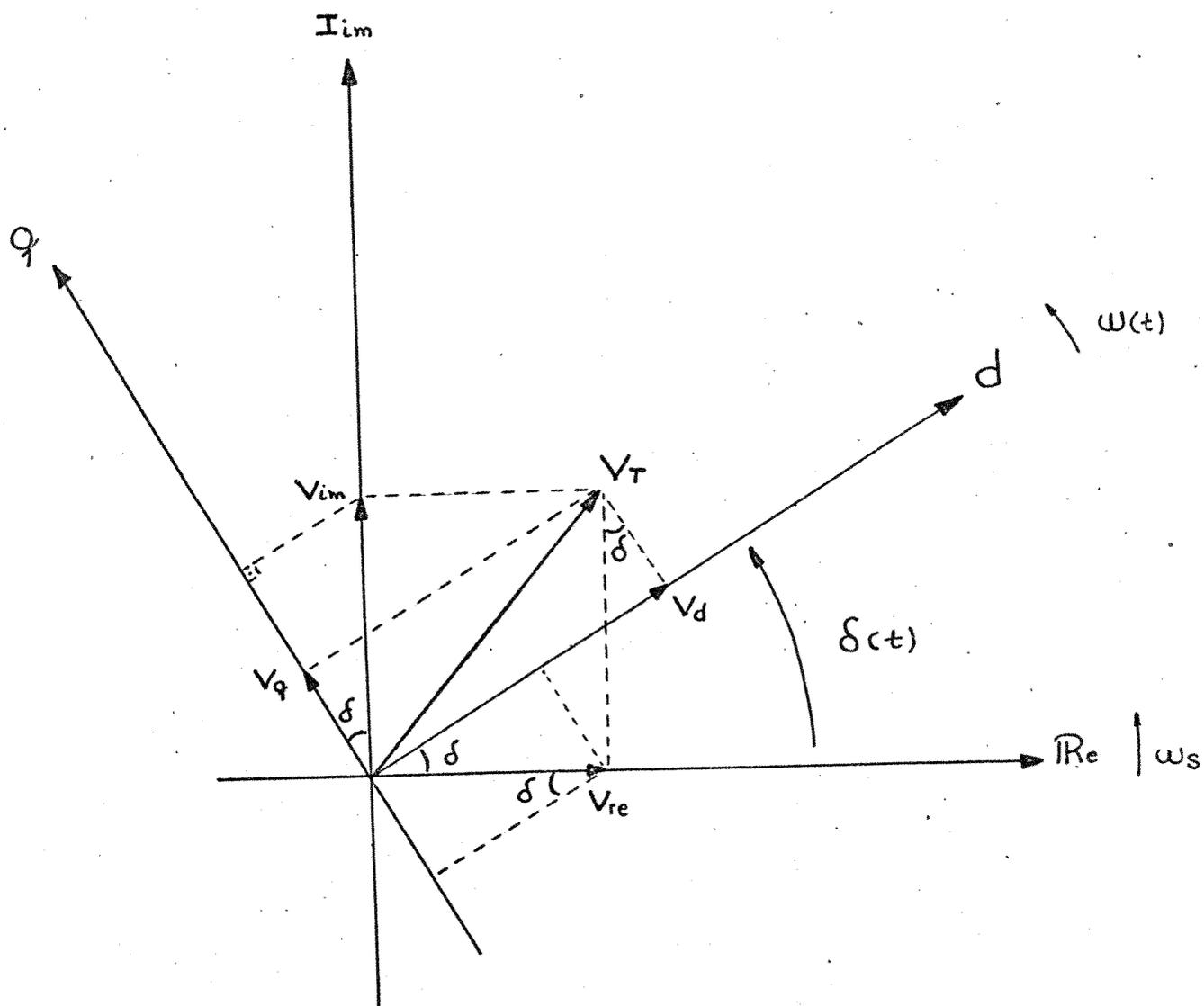


Figura 3.2: Transformação de variáveis.

$$V_d = V_{re} \cos \delta + V_{im} \sin \delta$$

$$V_q = -V_{re} \sin \delta + V_{im} \cos \delta$$

onde  $T$  é a matriz de transformação (matriz de rotação).

Deve-se notar que na transformação de variáveis supõe-se que o sistema de referência  $(Re, Im)$  permanece sempre na velocidade síncrona, isto é, a frequência elétrica da rede de transmissão permanece em seu valor nominal apesar da variação de velocidade das máquinas síncronas. Em outras palavras supõe-se que cada gerador enxerga, sob o ponto de vista da frequência, o resto do sistema como uma barra infinita com a frequência elétrica imposta pelas demais máquinas.

#### 3.1.4. Estator das Máquinas Síncronas

##### a) Equações Terminais

As equações terminais do estator da máquina síncrona (em pu.) no sistema de referência  $d, q$  são dadas por [6]:

$$\begin{array}{|c|} \hline E'_d - V_d \\ \hline E'_q - V_q \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline R_e & -X'_q \\ \hline X'_d & R_e \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline I_d \\ \hline I_q \\ \hline \end{array} = Z_{dq} \begin{array}{|c|} \hline I_d \\ \hline I_q \\ \hline \end{array} \quad (3.5)$$

Aplicando-se a transformação dada pela equação (3.4) na equação acima obtém-se [2]:

$$\begin{array}{|c|} \hline E'_{Re} - V_{Re} \\ \hline E'_{Im} - V_{Im} \\ \hline \end{array} = T^{-1} \cdot \begin{array}{|c|c|} \hline R_e & -X'_q \\ \hline X'_d & R_e \\ \hline \end{array} \cdot T \cdot \begin{array}{|c|} \hline I_{Re} \\ \hline I_{Im} \\ \hline \end{array} = Z_e \cdot \begin{array}{|c|} \hline I_{Re} \\ \hline I_{Im} \\ \hline \end{array} \quad (3.6)$$

onde  $Z_e = T^{-1} Z_{dq} T$  é a matriz impedância do estator.

As variáveis pertencentes ao subconjunto  $\underline{u}$  devem ser calculadas em função da tensão terminal da máquina  $V = V_{Re} + jV_{Im}$  e das variáveis  $E'_d$ ,  $E'_q$  e  $\delta$  pertencentes ao subconjunto  $\underline{E}$ .

As correntes do estator ( $I_d$ ,  $I_q$ ) são obtidas a partir da equação (3.5), como sendo:

$$\begin{array}{|c|} \hline I_d \\ \hline I_q \\ \hline \end{array} = \frac{-1}{Z_{dq}} \cdot \begin{array}{|c|} \hline E'_d - V_d \\ \hline E'_q - V_q \\ \hline \end{array} = \frac{1}{R_e^2 + X'_d X'_q} \cdot \begin{array}{|c|c|} \hline R_e & X'_q \\ \hline -X'_d & R_e \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline E'_d - V_d \\ \hline E'_q - V_q \\ \hline \end{array} \quad (3.7)$$

#### b) Potência Elétrica

A potência elétrica ( $P_t$ ) na barra terminal da máquina é dada por:

$$P_t = \text{Re} \{ V I^* \} = \begin{array}{|c|c|} \hline V_{Re} & V_{Im} \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline I_{Re} \\ \hline I_{Im} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline V_d & V_q \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline I_d \\ \hline I_q \\ \hline \end{array} \quad (3.8)$$

onde

$V$  - tensão terminal

$I$  - corrente terminal

e que pode ser verificada facilmente aplicando-se a transformação (3.4).

Substituindo-se a equação (3.7) em (3.8) e utilizando-se a transformação dada em (3.4), chega-se a:

$$P_t = -R_e |I|^2 + (X'_d - X'_q) I_d I_q + E'_d I_d + E'_q I_q \quad (3.9)$$

A potência de entreferro é dada pela potência terminal menos as perdas no estator, ou seja:

$$P_e = T_e \omega = (X'_q - X'_d) I_d I_q + E'_d I_d + E'_q I_q \quad (3.10)$$

### 3.1.5. Modelo Clássico ( $X'_d = X'_q$ )

Quando o efeito da saliência é ignorado ( $X'_d = X'_q$ ) a matriz  $Z_e$  passa a ser a própria matriz  $Z_{dq}$ , e neste caso torna-se possível a sua representação através de uma impedância constante e complexa.

Neste caso a equação (3.6) pode ser reescrita na forma complexa:

$$E' - V = Z_e I \quad (3.11)$$

onde  $E' = E_{re} + j I_{im}$ ,  $V = V_{re} + j V_{im}$ ,  $I = I_{re} + j I_{im}$   
e  $Z_e = R_e + j X'_d$  (ver Apêndice B).

Esta é a forma clássica de representação da máquina síncrona, conforme ilustram o circuito equivalente e o diagrama fasorial mostrados na Figura (3.3).

Uma forma mais conveniente pode ser obtida através do equivalente Norton, e desta maneira, uma injeção de corrente  $E'/Z_e$  e uma simples impedância "shunt"  $Z_e$  são conectadas na barra terminal da máquina, conforme ilustrado pela Figura (3.4).

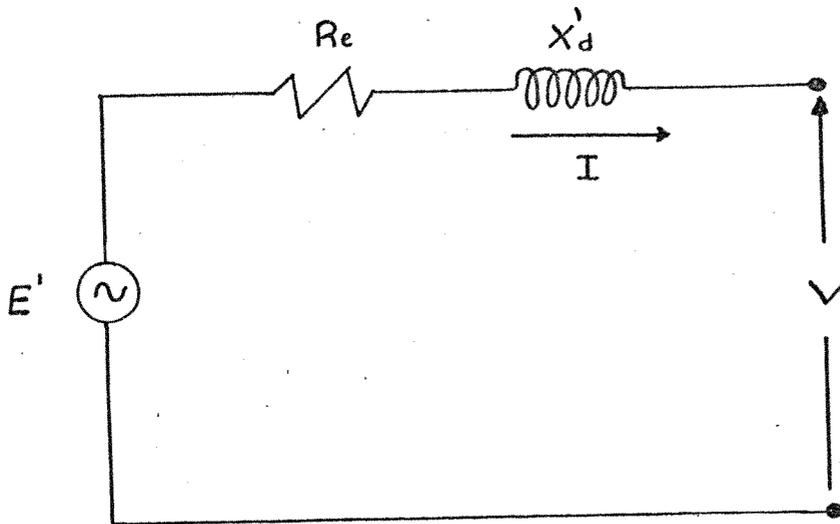
Neste caso, pode-se reescrever a equação matricial da rede (3.1), como:

$$\underline{I}^c(E) = \underline{Y}^c \underline{V}^c \quad (3.12)$$

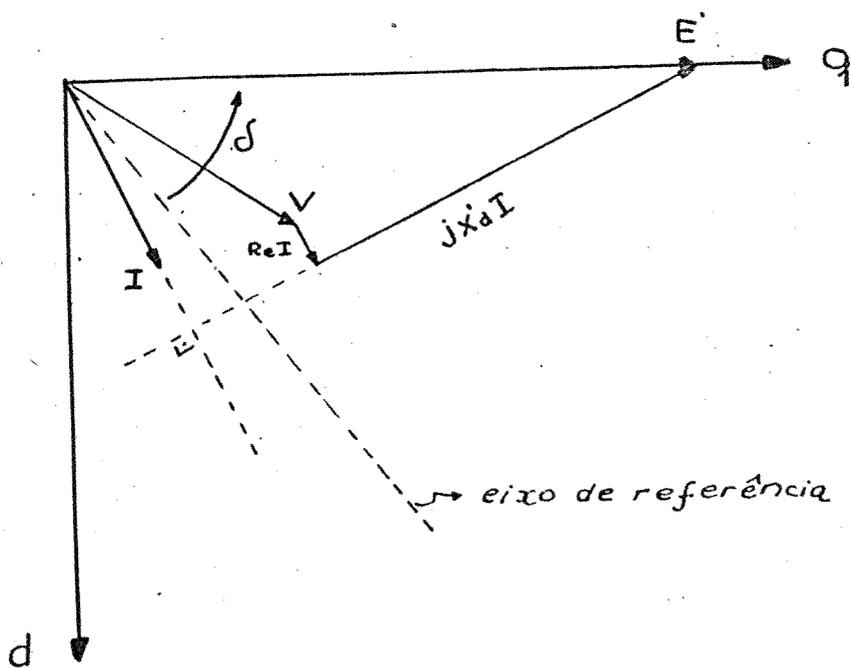
onde o índice  $c$  significa complexo, a matriz  $\underline{Y}^c$  inclui as impedâncias "shunt" que são adicionadas aos elementos correspondentes da diagonal, e o vetor de correntes nodais  $\underline{I}^c$  inclui as injeções de correntes  $E'/Z_e$  que dependem somente do subconjunto  $\underline{E}$  de  $\underline{y}$ .

### 3.1.6. Modelo com Saliência ( $X'_d \neq X'_q$ )

Se a saliência transitória é considerada na modelagem



a)



b)

Figura 3.3: a) circuito equivalente;  
b) diagrama fasorial.

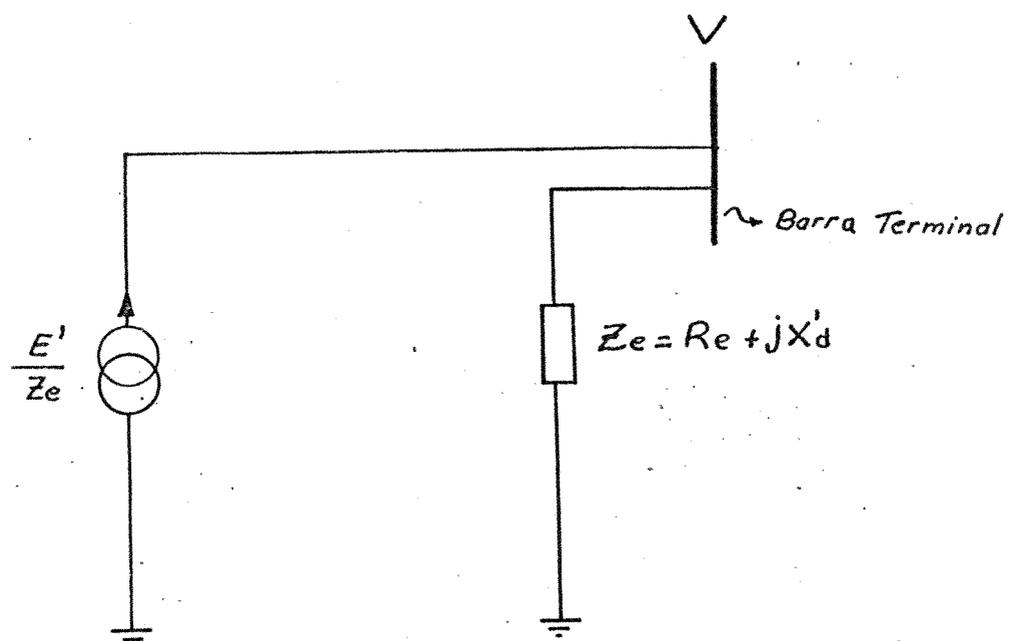


Figura 3.4: Equivalente Norton

dos geradores a matriz impedância  $\underline{Z}_e$  da equação (3.6) é não-bilateral sendo função do ângulo  $\delta$  do rotor. Sua não-bilateralidade significa que ela, e portanto as equações (3.6) e (3.1), não podem ser escritas na forma complexa (Ver Apêndice B).

Assim sendo, se  $X'_d \neq X'_q$  para uma ou mais máquinas, a equação (3.1) deve ser escrita em uma forma expandida nas partes real e imaginária [2] (ver Apêndice B):

$$\underline{I}^e = Y^e \underline{V}^e \quad (3.13)$$

onde o índice  $e$  significa expandido.

Para um valor determinado do ângulo  $\delta$  de cada máquina, a equação (3.13) é linear em  $\underline{V}^e$  e portanto a sua resolução é direta e não iterativa. A restrição à forma expandida (3.13), é que durante a simulação o ângulo  $\delta$  e portanto a matriz impedância  $\underline{Z}_e$  de cada máquina variam, tornando necessário uma refatorização contínua da matriz  $Y^e$ . Uma outra restrição, é o fato da matriz  $Y^e$  requerer um armazenamento pelo menos duas vezes maior que o da matriz  $Y^c$ .

Uma alternativa, adotada neste trabalho, é sugerida na referência [5]. A admitância "shunt" do equivalente Norton é aproximada por (Ver Apêndice C):

$$Y_e = \frac{R_e - j^{1/2} (X'_d + X'_q)}{R_e^2 + X'_d X'_q} \quad (3.14)$$

Para que a representação seja correta, é necessário incluir uma injeção de corrente adicional, função da tensão terminal da máquina, cuja finalidade é compensar a aproximação efetuada, ou seja, a corrente  $I$  deve ter o mesmo valor que o modelo anterior

$$I = Y_e E' + I_{\text{saliência}} \quad (3.15)$$

sendo (ver Apêndice C) o termo de correção dado por:

$$I_{\text{saliência}} = j \frac{1}{2} \frac{X'_q - X'_d}{R_e^2 + X'_d X'_q} (E'^* - V^*) e^{j2\delta} \quad (3.16)$$

conforme ilustrado pela Figura (3.5). Este termo deve ser ajustado iterativamente a partir da tensão terminal  $V$ .

A impedância "shunt" de cada máquina poderia ser aproximada também por:

$$Z_e = R_e + jX'_d \quad (3.17)$$

mas, conforme verificado pela referência [5], a convergência pode não ser obtida em alguns casos, o que não acontece se for utilizada a aproximação dada pela expressão (3.14).

Finalmente, deve-se notar que se a saliência transitória for ignorada ( $X'_d = X'_q$ ), então de acordo com as expressões (3.14) e (3.16), tem-se que  $Y_e = (R_e + jX'_d)^{-1}$  e

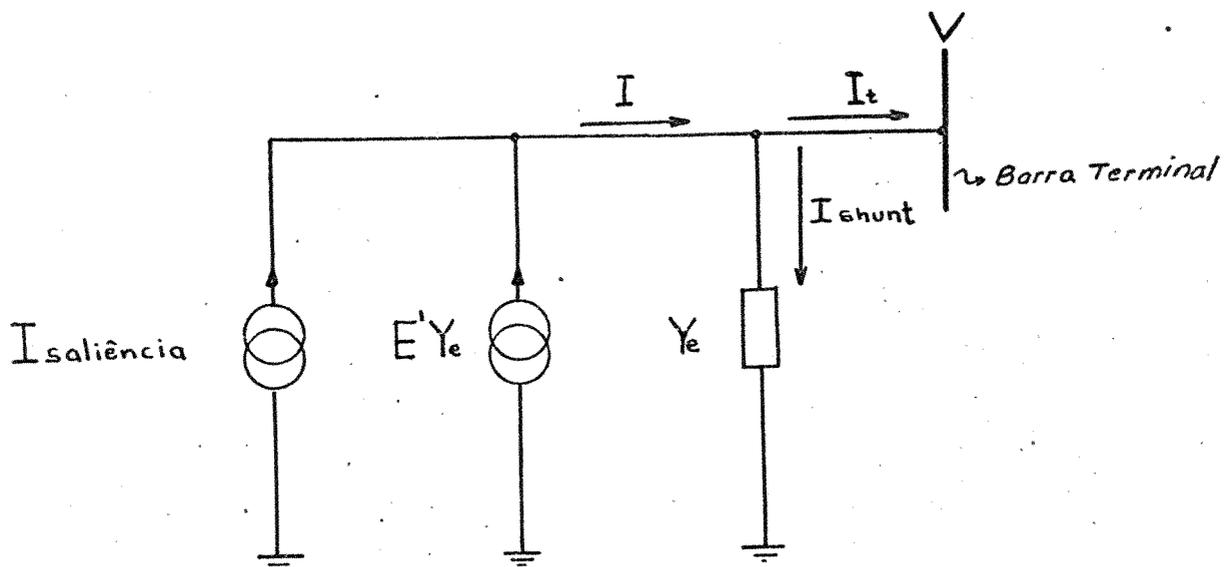


Figura 3.5: Circuito equivalente do gerador incluindo a saliência.

$I_{saliência} = 0$ .

### 3.2. Equações Diferenciais ( $\dot{y} = f(x, y)$ )

#### 3.2.1. Equações Dinâmicas do Rotor

O comportamento dinâmico das partes girantes da máquina (rotor, turbina, etc), é descrito pelas seguintes equações diferenciais [5]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} (P_m - P_e) \quad (3.18)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (3.19)$$

onde

$H$  - constante de inércia em seg.

$\omega$  - velocidade angular em rad/seg

$\omega_s$  - velocidade angular síncrona em rad/seg

$P_e$  - potência de entreferro (equação 3.10)

Se não for considerada a ação do regulador de velocidade, a potência mecânica  $P_m$  permanecerá constante.

#### 3.2.2. Equações Elétricas do Rotor

A modelagem da máquina síncrona, considerando-se os enrolamentos  $d$  e  $q$  no estator e o enrolamento de campo no rotor,

é dada pelas equações [6]:

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_{d0}} \left[ E'_q + (X_d - X'_d) I_d - E_{FD} \right] \quad (3.20)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_{q0}} \left[ E'_d - (X_q - X'_q) I_q \right] \quad (3.21)$$

onde

$E'_d$  - componente de eixo direto da tensão interna do máquina.

$E'_q$  - componente de eixo em quadratura da tensão interna do máquina.

$T'_{d0}$  - constante de tempo de eixo direto com estator em aberto

$T'_{q0}$  - constante de tempo de eixo em quadratura com estator em aberto

$E_{FD}$  - tensão no enrolamento de campo do rotor

As equações (3.20) e (3.21) representam as variações com o tempo dos fluxos concatenados de eixo direto e eixo em quadratura, respectivamente.

### 3.2.3. Sistema de Excitação

Considerem-se os componentes básicos de um sistema de excitação, conforme representado na Figura (3.6) [9]. O regulador mede a tensão de saída do gerador e a compara com uma tensão desejada (tensão de referência). Este sinal de erro produzido pelo regulador é então amplificado, e aplicado ao enrolamento de campo da excitatriz. Dessa forma, pode-se variar a tensão

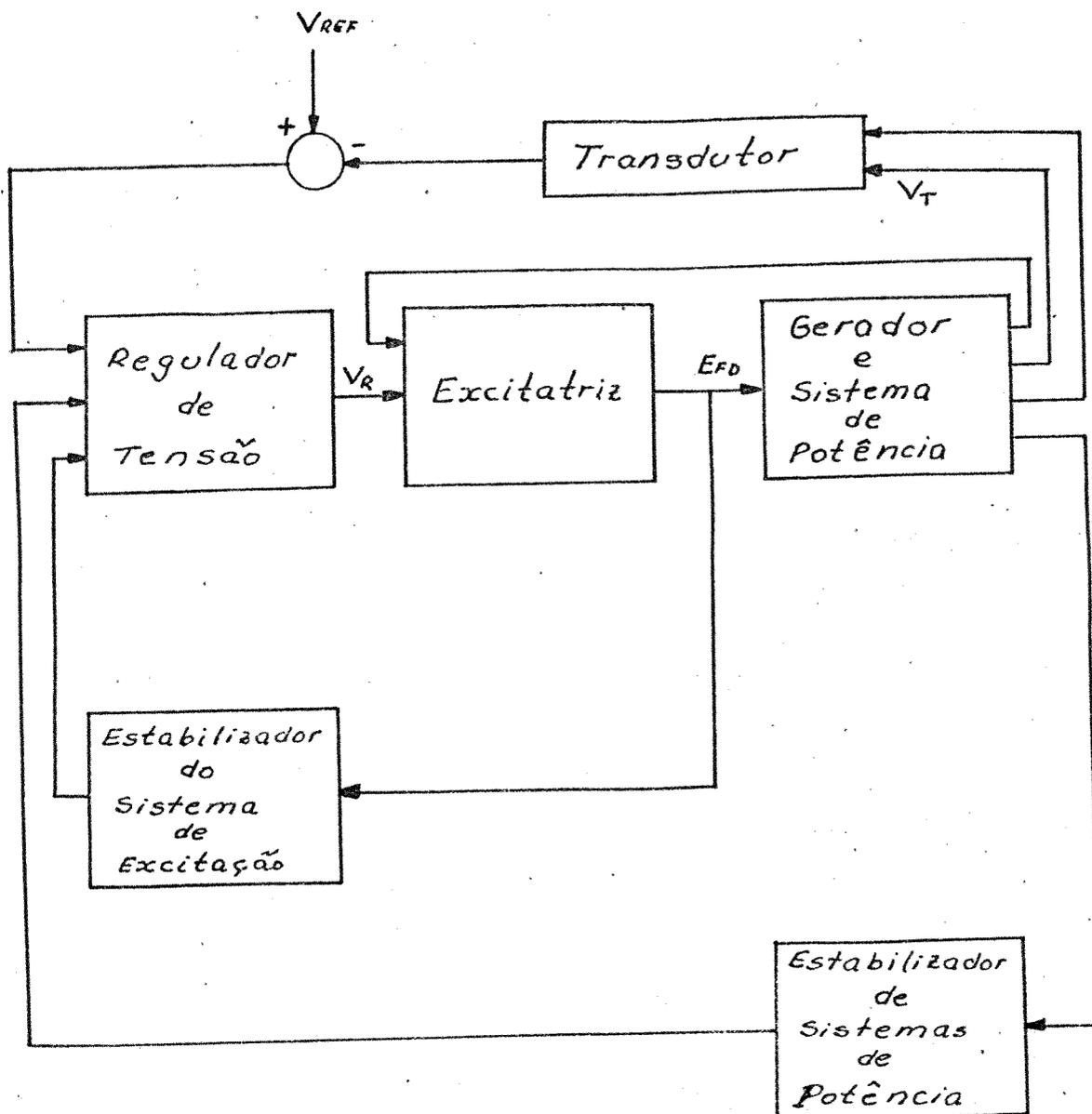


Figura 3.6: Componentes básicos do sistema de excitação.

de saída da excitatriz que é aplicada ao campo do gerador. Ou seja, a saída da excitatriz é controlada pelo regulador de tal forma que a tensão terminal do gerador (ou a geração de reativos) varie de uma maneira desejada.

Em muitos sistemas hoje em uso, a excitatriz é um gerador de corrente contínua acionado pela turbina (mesmo eixo do gerador) ou por um motor de indução. As excitatrizes mais modernas são circuitos com componentes a estado sólido constituídos por retificadores rotativos (diodos) ou por retificadores controlados (tiristores)..

A velocidade de resposta de um sistema de excitação é de grande importância em estudos de estabilidade. Devido à alta indutância do enrolamento de campo do gerador, é difícil variar rapidamente a corrente de campo. Isto introduz consideráveis atrasos nas funções de controle. Com o advento da tecnologia dos componentes a estado sólido tornou-se possível desenvolver sistemas de excitação com velocidades de resposta mais rápidas que vieram melhorar o comportamento dos geradores, durante condições de operação normal e de emergência.

O modelo computacional do sistema de excitação implementado neste trabalho é o modelo designado como Tipo 1 pela referência [10]. Ele tem sido utilizado para representar a maioria dos sistemas de excitação existentes em estudos computacionais. O diagrama de blocos deste sistema é mostrado na Figura (3.7).

A tensão terminal do gerador  $V_T$  que é o sinal de entrada para o sistema de excitação, passa inicialmente por um

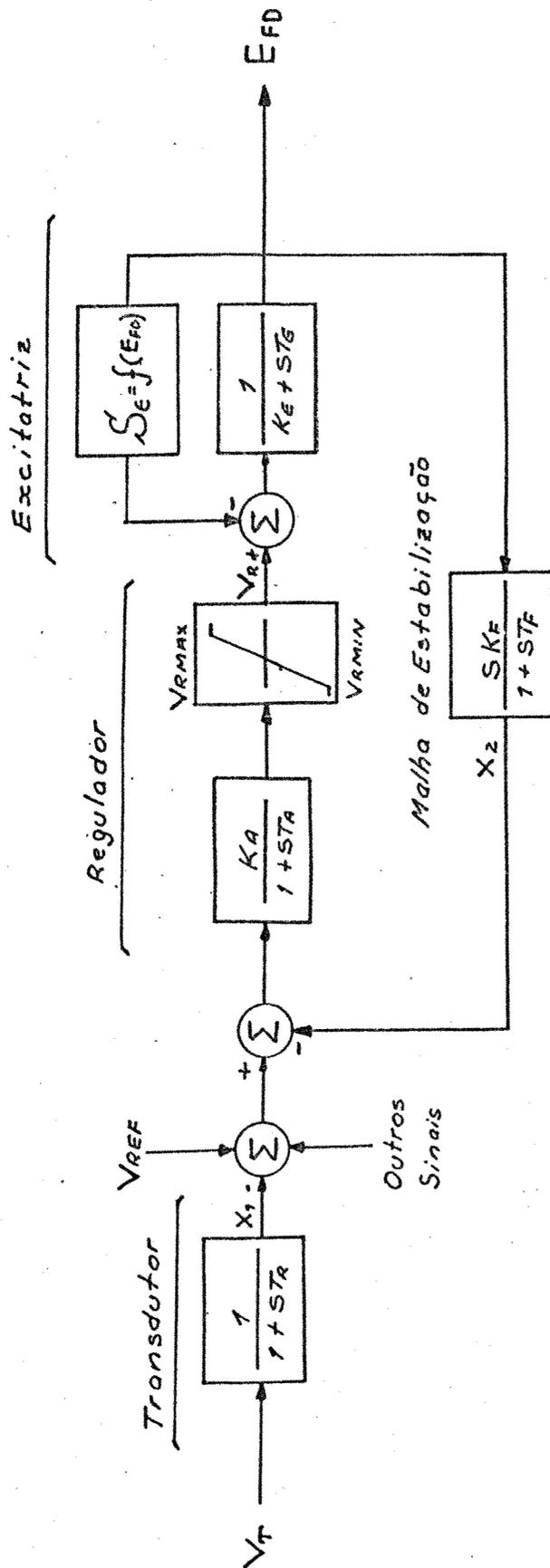


Figura 3.7: Representação do sistema de excitação tipo 1, com regulador e excitatriz de ação contínua.

transdutor com uma constante de tempo  $T_R$ . Em geral  $T_R$  tem um valor muito pequeno e freqüentemente é considerada como nula. A saída  $X_1$  do transdutor é comparada com a tensão de referência  $V_{REF}$  que é a própria tensão terminal do gerador nas condições de pré-perturbação. Os sinais provenientes do estabilizador de sistemas de potência são injetados na entrada "outros sinais" o que não é considerado neste trabalho.

O sinal de erro na tensão obtida na saída do 1º somador é combinado no 2º somador com o sinal  $X_2$  da malha de estabilização. O sinal de erro resultante é a entrada do regulador.

O regulador representado por uma função de transferência com ganho  $K_A$  e constante de tempo  $T_A$  amplifica este sinal, produzindo um sinal de saída  $V_R$ . Entre os ganhos envolvidos no sistema Tipo 1,  $K_A$  é o que possui o maior valor.

No somador seguinte, o sinal que representa a saturação da excitatriz é subtraído de  $V_R$ . O sinal resultante é então aplicado à função de transferência que representa a excitatriz. O sinal representando a saturação é a própria tensão de saída da excitatriz (ou tensão aplicada ao enrolamento de campo do gerador  $E_{FD}$ ), multiplicada por uma função da saturação não-linear. O valor de  $K_E$  é escolhido como sendo igual em magnitude, à função de saturação para o valor inicial de  $E_{FD}$ . Para uma melhor discussão sobre  $K_E$  ver Apêndice E.

A saída da excitatriz  $E_{FD}$  é aplicada à função de transferência de ganho  $K_F$  e constante de tempo  $T_F$ , com o sinal de saída  $X_2$  entrando no 2º somador. A função desta malha de estabilização é eliminar oscilações indesejadas ("overshoot") da ten

são de saída  $E_{FD}$  da excitatriz.

Por problemas práticos de operação, há a necessidade de se impor limites à variável de saída  $E_{FD}$  da excitatriz. Por exemplo, pôde ser necessário um limite superior para prevenir um sobreaquecimento do enrolamento de campo ou um limite inferior para se evitar que o gerador perca o sincronismo devido a uma excitação insuficiente [11]. Como estes limites não são devidos a uma limitação do equipamento (excitatriz), e sim às considerações práticas de operação, eles são levados em conta impondo-se os limites  $V_{RMAX}$  e  $V_{RMIN}$  a saída  $V_R$  do regulador.

Para a obtenção destes limites considere-se as seguintes expressões que devem ser satisfeitas em condições de regime:

$$V_R - (K_E + S_E)E_{FD} = 0 \quad (3.22)$$

$$E_{FDMIN} \leq E_{FD} \leq E_{FDMAX} \quad (3.23)$$

Portanto, para  $E_{FD} = E_{FDMAX}$  tem-se:

$$V_{RMAX} - (K_E + S_{EMAX})E_{FDMAX} = 0 \quad (3.24)$$

Assim, para as três constantes  $V_{RMAX}$ ,  $S_{EMAX}$  e  $E_{FDMAX}$  a especificação de duas quaisquer estabelece o valor da terceira. Em geral,  $S_{EMAX}$  e  $E_{FDMAX}$  são especificadas como dados de entrada, e o limite  $V_{RMAX}$  é calculado internamente no pro-

grama através da expressão (3.24). O limite inferior  $V_{RMIN}$  é obtido, fazendo-se:

$$V_{RMIN} = - V_{RMAX} \quad (3.25)$$

A função de saturação da excitatriz é definida como mostra a Figura (3.8) pela seguinte relação:

$$S_E = \frac{A - B}{B} \quad (3.26)$$

onde as quantidades  $A$  e  $B$  são definidas pela corrente de campo da excitatriz que produz a tensão  $E_{FD}$  nas curvas de saturação com carga e linha de entreferro, respectivamente. Portanto,  $S_E$  é uma função não-linear de  $E_{FD}$ . Em geral, a função de saturação pode ser definida por dois pontos que são considerados como dados de entrada do programa. Dessa forma, como sugerido pela referência [10],  $S_E$  é especificada pelas constantes  $S_{EMAX}$  e  $S_{E.75MAX}$  correspondentes às tensões  $E_{FDMAX}$  e  $0.75 E_{FDMAX}$ , respectivamente.

A função de saturação neste trabalho, será aproximada por uma função exponencial do tipo:

$$S_E \stackrel{\Delta}{=} A_{EX} e^{B_{EX} E_{FD}} \quad (3.27)$$

onde

$$A_{EX} = \frac{S_{E.75MAX}^4}{S_{EMAX}^3}$$

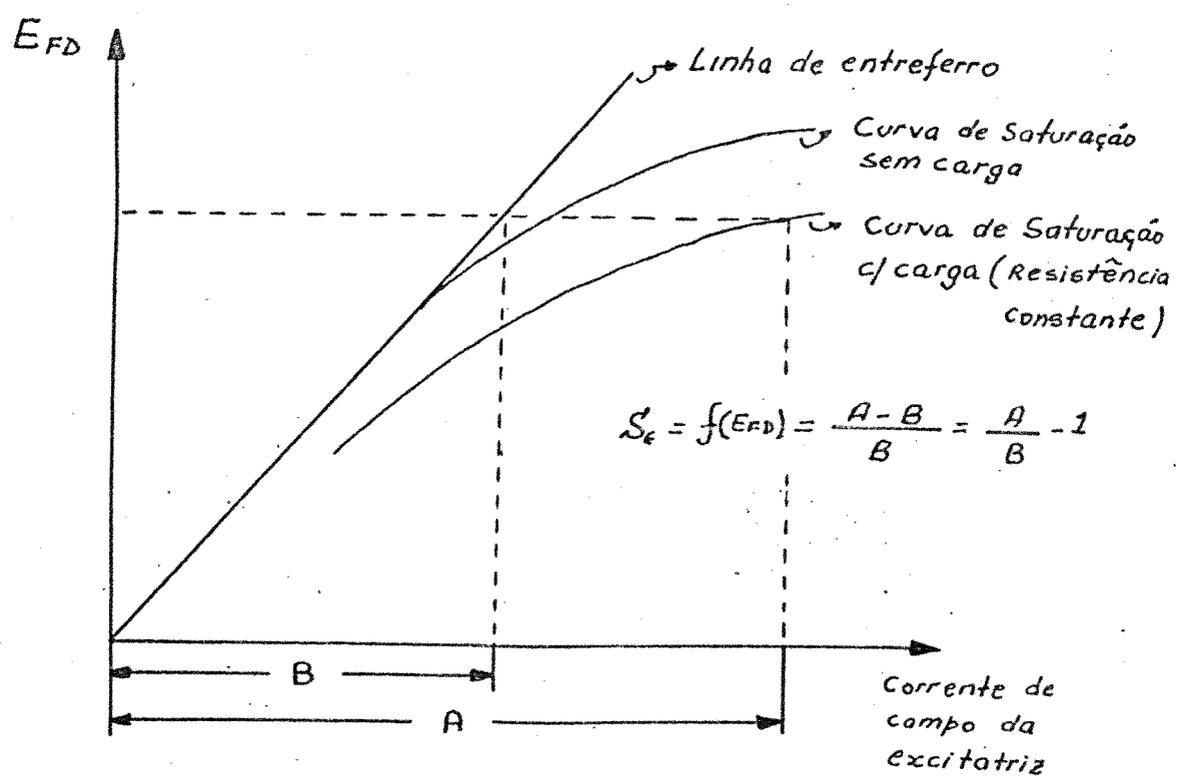


Figura 3.8: Curvas de saturação da excitatriz.

$$B_{EX} = \frac{4}{E_{FDMAX}} \ln \frac{S_{EMAX}}{S_{E.75MAX}}$$

As constantes  $A_{EX}$  e  $B_{EX}$  são calculadas a partir das seguintes expressões da equação (3.27):

$$S_{E.75MAX} = A_{EX} e^{B_{EX} \cdot 75 E_{FDMAX}} \quad (3.28)$$

$$S_{EMAX} = A_{EX} e^{B_{EX} E_{FDMAX}} \quad (3.29)$$

### 3.3. Nota Sobre os Modelos das Máquinas Síncronas

Como foi visto anteriormente, as máquinas síncronas entram na modelagem do sistema através das equações algébricas:

$g(\underline{x}, \underline{y}) = \underline{0}$  e das equações diferenciais  $\dot{\underline{y}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{y})$ , diferentemente do que ocorre com os demais componentes (cargas, sistemas de controle, etc.), que contribuem apenas com equações de um tipo ou de outro.

No estudo de máquinas síncronas é usual adotar-se uma classificação dos modelos segundo o grau de complexidade

[12] . Neste capítulo foram considerados dois modelos:

#### Modelo I

Este modelo, também chamado de Modelo Clássico, é formado pelas equações dinâmicas do rotor (3.18) e (3.19), e pelo circuito equivalente da Figura 3.3, que representa uma

f.e.m.  $E'$  de magnitude constante atrás da reatância transi-  
tória  $X'd$ .

### Modelo II

Este modelo é formado pelas equações dinâmicas do ro-  
tor (3.18) e (3.19), pelas equações algébricas do estator  
(3.7), e pela equação diferencial de fluxo concatenado  
(3.20).

## CAPÍTULO IV

### ESQUEMA ALTERNADO COM MÉTODO TRAPEZOIDAL IMPLÍCITO

Neste capítulo é apresentado o processo alternado de resolução dos subconjuntos de equações algébricas ( $\underline{g}(\underline{x}, \underline{y}) = 0$ ) e diferenciais ( $\underline{\dot{y}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{y})$ ). São utilizadas técnicas de fatoração triangular de matrizes esparsas para a resolução do sistema de equações algébricas, e o método Trapezoidal Implícito para a resolução das equações diferenciais.

#### 4.1. Esquema Geral

O método de resolução alternada dos sistemas algébrico ( $\underline{g}(\underline{x}, \underline{y}) = 0$ ) e diferencial ( $\underline{\dot{y}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{y})$ ), consta basicamente dos seguintes passos [5]:

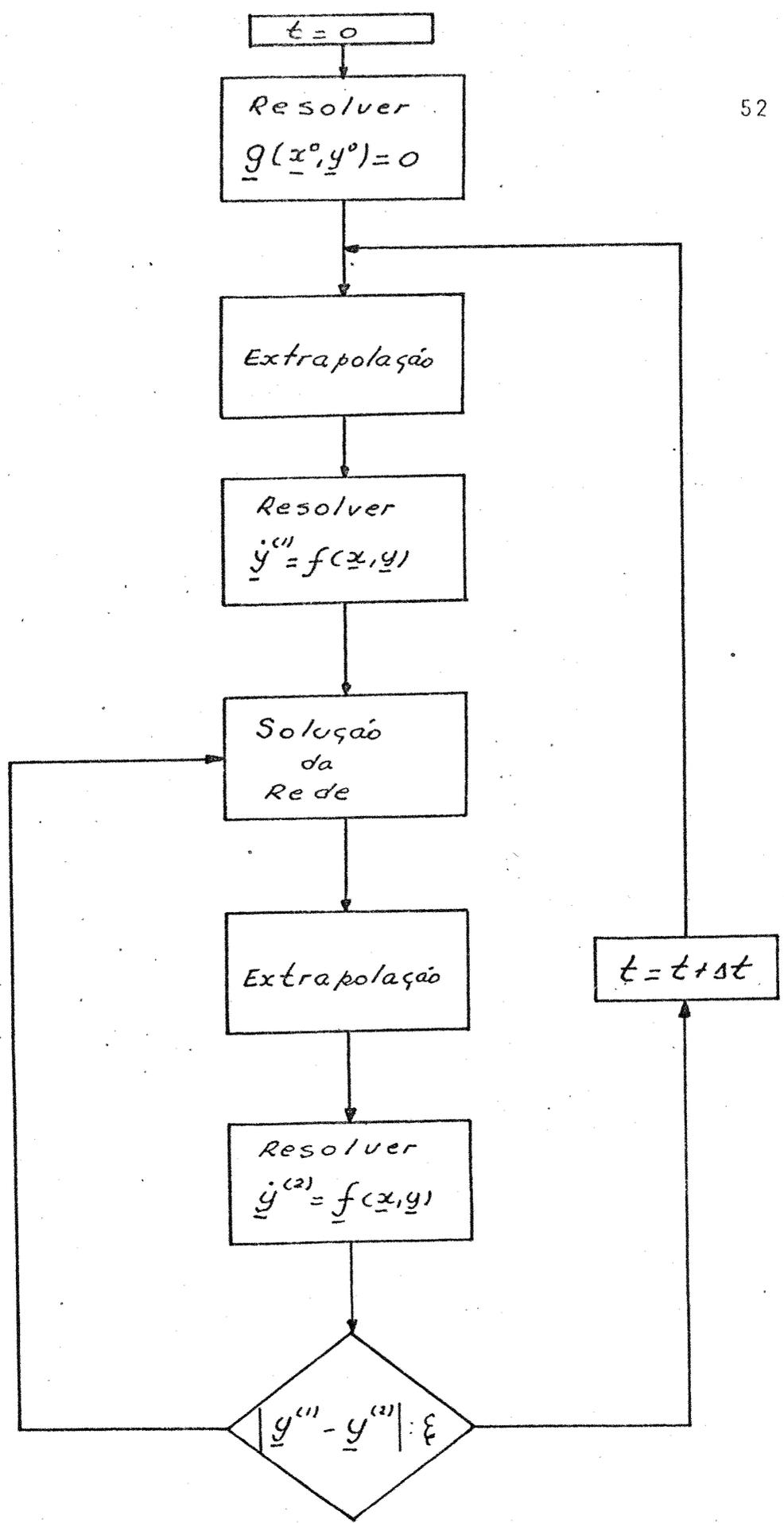
- 1 - Obter as condições iniciais de operação da rede e dos geradores, através da resolução do sistema de equações algébricas ( $\underline{g}(\underline{x}, \underline{y}) = 0$ ) no instante  $t = 0$  (pré-perturbação);
- 2 - Utilizando-se técnicas de extrapolação, predizer valores de  $\underline{x}(t)$  no intervalo  $t - \Delta t$  a  $t$  (quando possível);
- 3 - Resolver o sistema de equações diferenciais ( $\underline{\dot{y}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{y})$ ) através do método Trapezoidal Implícito, utilizando os valores de  $\underline{x}$  obtidos no pas

- so anterior;
- 4 - Resolver o sistema de equações algébricas (solução da rede);
  - 5 - Corrigir a previsão feita no intervalo  $t-\Delta t$  a  $t$ , calculando-se os valores  $\underline{x}(t)$ ;
  - 6 - Resolver o sistema de equações diferenciais ( $\underline{\dot{y}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{y})$ ) através do método Trapezoidal Implícito, utilizando-se os valores de  $\underline{x}$  obtidos no passo anterior;
  - 7 - Comparar as diferenças de duas soluções sucessivas para  $\underline{y}(t)$  com uma tolerância pré-fixada. Se ela for desprezível seguir ao passo 8. Se não, retornar ao passo 4;
  - 8 - Fazer  $t = t + \Delta t$  e retornar ao passo 2

como ilustrado pela Figura (4.1).

#### 4.2. Resolução do Sistema de Equações Algébricas

Como visto no capítulo precedente, o sistema de equações algébricas pode ser posto na forma:  $\underline{I}^c = \underline{Y}^c \underline{V}^c$ . Este sistema poderá ser linear ou não, dependendo da modelagem das cargas (impedância, corrente ou potência constante) e dos estados das máquinas síncronas (inclusão ou não do efeito da saliência). No caso, por exemplo, das cargas serem modeladas por impedância ou corrente constante e os geradores pelo Modelo I (clássico), o sistema de equações algébricas será linear. A modelagem das cargas por potência constante, ou a utilização do Modelo II para as máquinas síncronas, acarretará em



$\xi$  - Tolerância

Figura 4.1 - Esquema de resolução alternado.

um sistema algébrico não-linear.

Na modelagem de cargas por potência constante a não-linearidade se deve ao fato da corrente (complexa) ser função do inverso da tensão (complexa). Com relação ao Modelo II da máquina síncrona, a não-linearidade se deve à saliência (componente  $I_{saliência}$  da Figura 3.5). Note-se que outros tipos de não-linearidades também podem ser considerados da mesma forma que os precedentes (saturação da máquina síncrona, por exemplo).

No caso de modelos lineares a resolução do sistema  $\underline{I} = \underline{Y}\underline{V}$  é trivial (utiliza-se o método da fatoração triangular de matrizes esparsas). Para modelos não lineares ( $\underline{I}(\underline{V}) = \underline{Y}\underline{V}$ ), onde  $\underline{I}(\underline{V})$  é uma função não-linear) é adotado um procedimento iterativo no qual, a cada iteração, resolve-se o sistema linear  $\underline{I} = \underline{Y}\underline{V}$  considerando-se um valor estimado de  $\underline{I}$ , e atualizando-se o vetor  $\underline{I}$  a medida que se obtenham novas estimativas de  $\underline{V}$ .

#### 4.3. Resolução das Equações Diferenciais - Método Trapezoidal Implícito

O método Trapezoidal Implícito será aplicado na resolução do sistema de equações diferenciais que compreende as equações dinâmicas do rotor (3.18) e (3.19), e as equações diferenciais correspondentes aos quatro blocos do sistema de excitação Tipo-1 (Figura 3.7).

##### 4.3.1. Equações Dinâmicas do Rotor [5]

Aplicando-se o método Trapezoidal Implícito às equa-

ções dinâmicas do rotor (3.18) e (3.19), obtêm-se (Apêndice D):

$$\delta(t) = -\frac{(\Delta t)^2 \omega_s}{8H} P_e(t) + \alpha(t - \Delta t) \quad (4.1)$$

onde

$$\alpha(t - \Delta t) = \delta(t - \Delta t) + \Delta t \left[ \omega(t - \Delta t) + \omega_s \right] + \frac{(\Delta t)^2 \omega_s}{8H} \left[ 2P_m - P_e(t - \Delta t) \right] \quad (4.2)$$

é conhecido a partir dos valores obtidos no passo anterior.

No início do passo de integração a ser realizado, o valor de  $P_e(t)$  da equação (4.1) não é conhecido. De acordo com o método de solução alternada descrito anteriormente, o valor do ângulo  $\delta(t)$  no final do passo é obtido através de um processo iterativo. Desta forma, ao se fazer a primeira estimativa de  $\delta(t)$  utilizando a equação (4.1), pode-se assumir o valor de  $P_e(t)$  como sendo igual ao do passo anterior ou então utilizar um valor extrapolado. Neste trabalho, o valor de  $P_e(t)$  utilizado na primeira estimativa de  $\delta(t)$ , é obtido através de uma extrapolação linear. Ou seja, utilizando os valores da potência elétrica de dois passos anteriores,  $P_e(t)$  é estimado como:

$$P_e(t) = 2P_e(t - \Delta t) - P_e(t - 2\Delta t) \quad (4.3)$$

como ilustrado na Figura (4.2). Nos instantes de descontinuidades (ocorrência do defeito, eliminação do defeito) não é feita a extrapolação e o valor de  $P_e(t)$  é assumido como sendo o do passo anterior.

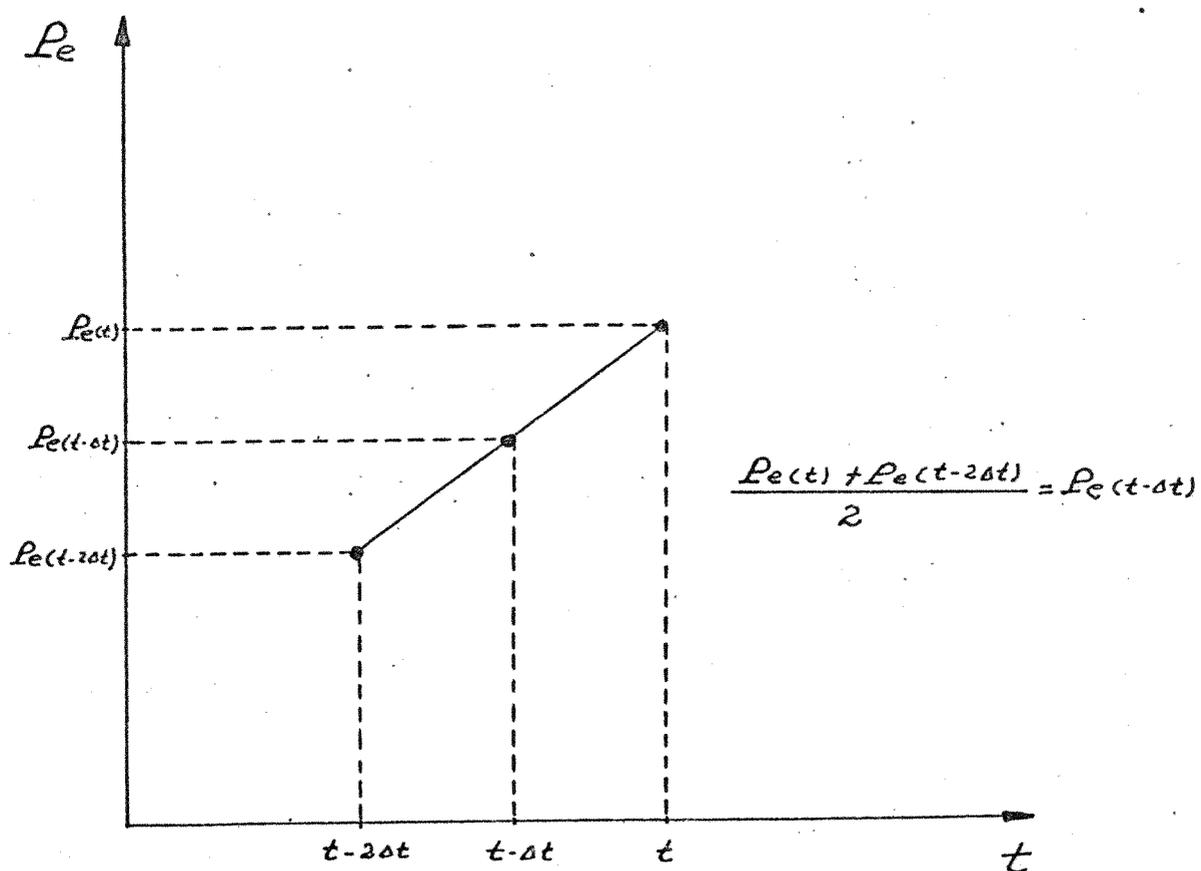


Figura 4.2 - Extrapolação linear da potência elétrica

Desta forma, a obtenção de  $\delta(t)$  em um passo de integração, pode ser esquematizada através das seguintes etapas:

- (i) - Calcular  $\alpha(t-\Delta t)$  pela equação (4.2);
- (ii) - Calcular  $\delta(t)$  através da equação (4.1);
- (iii) - Obter a solução da rede, computando-se assim o valor de  $P_e(t)$ ;
- (iv) - Calcular  $\delta(t)$  através da equação (4.1);
- (v) - Comparar a diferença de duas soluções sucessivas de  $\delta(t)$  com uma tolerância pré-fixada. Se ela for desprezível, atualizar o valor de  $\delta(t)$  e iniciar novo passo de integração. Se não, retornar a etapa (iii).

Este processo de solução das equações dinâmicas do rotor, pode ser visualizado através da Figura (4.3) onde é considerado o Modelo I para os geradores ( $E'_q = cte$ ).

#### 4.3.2. Equações elétricas do rotor [5], [13]

Quando o modelo adotado para os geradores não é o Modelo I, é necessária a resolução das equações diferenciais elétricas do rotor. Desta maneira, aplicando-se o método trapezoidal implícito às equações (3.20) e (3.21) obtém-se (Apêndice D):

$$E'_q(t) = -a_d (X_d - X'_d) I_d(t) + F_q \quad (4.4)$$

$$E'_d(t) = a_q (X_q - X'_q) I_q(t) + F_d \quad (4.5)$$

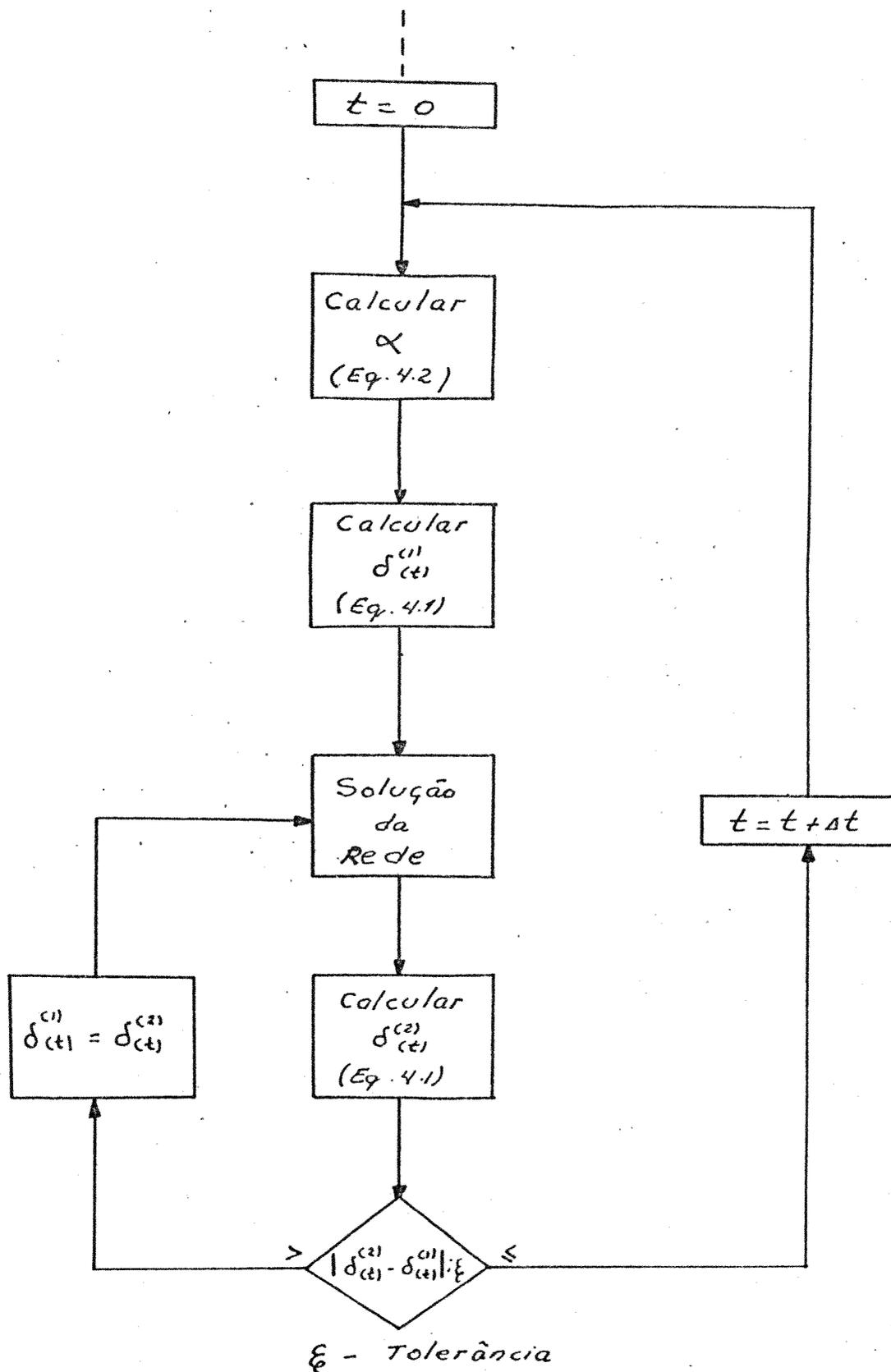


Figura 4.3 - Diagrama simplificado do processo de resolução do sistema de equações algébricas e das equações dinâmicas do rotor, durante um passo de integração (Modelo I).

onde

$$F_q = E'_q(t-\Delta t) + a_d \left[ E_{FD}(t-\Delta t) + E_{FD}(t) - 2E'_q(t-\Delta t) - (X_d - X'_d)I_d(t-\Delta t) \right] \quad (4.6a)$$

$$F_d = E'_d(t-\Delta t) - a_q \left[ 2E'_d(t-\Delta t) + (X_q - X'_q)I_q(t-\Delta t) \right] \quad (4.6b)$$

com

$$a_d = \frac{\Delta t}{\Delta t + 2T'_{d0}}$$

$$a_q = \frac{\Delta t}{\Delta t + 2T'_{q0}}$$

e ainda  $F_q$  e  $F_d$  sendo conhecidos a partir de valores obtidos no passo anterior  $t - \Delta t$  e de  $E_{FD}(t)$  (que também é conhecido se a excitatriz é representada como uma fonte de tensão constante).

Substituindo-se as equações (4.4) e (4.5) na equação (3.7), obtêm-se as seguintes expressões para  $I_d(t)$  e  $I_q(t)$ :

$$\begin{bmatrix} I_d(t) \\ I_q(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{R_e^2 + X'_{dmod} X'_{qmod}} \cdot \begin{bmatrix} R_e & X'_{qmod} \\ -X'_{dmod} & R_e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_d - V_d(t) \\ F_q - V_q(t) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

onde

$$X'_{dmod} = X'_d + a_d (X_d - X'_d)$$

$$X'_{qmod} = X'_q + a_q (X_q - X'_q)$$

De acordo com o Modelo II adotado neste trabalho,  $E'_d = 0$  e portanto a equação (4.5) não é considerada. (A sua inclusão equivaleria ao Modelo III, como classificado pela Referência [12]). Logo, como para o Modelo II,  $X'_q = X_q$  e  $E'_d = 0$  tem-se:

$$X'_{qmod} = X'_q = X_q$$

$$F_d = 0$$

e portanto, a equação (4.7) restringe-se a (considerando  $R_e = 0$ )

$$\begin{bmatrix} I_d(t) \\ I_q(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{X'_{dmod} X_q} \cdot \begin{bmatrix} 0 & X_q \\ -X'_{dmod} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -V_d(t) \\ F_q - V_q(t) \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Como a única equação a ser considerada é a equação (4.4), somente o termo  $I_d(t)$  é necessário ser obtido. Logo, da equação (4.8) tem-se:

$$I_d(t) = \frac{F_q - V_q(t)}{X'_{dmod}} \quad (4.9)$$

Ao calcular-se o valor de  $I_d(t)$  no início do passo de integração, a fim de se fazer a primeira estimativa para  $E'_q(t)$  pela equação (4.4), o valor de  $V_q(t)$  não é conhecido. Desde que o processo de solução é iterativo, ela pode ser assumida como sendo igual a do passo anterior, ou então ser extrapolada. Neste trabalho, ao fazer-se a primeira estimativa de  $I_d(t)$  pela equação (4.9), o valor da tensão  $V(t)$  é assumido como sendo a do passo anterior  $t - \Delta t$ , mas com sua fase sendo avançada pela variação do ângulo  $\delta$  de  $t - \Delta t$  a  $t$ , ou seja, feita a primeira estimativa de  $\delta(t)$  através da equação (4.4), obtém-se:

$$\Delta\delta = \delta(t) - \delta(t - \Delta t) \quad (4.10)$$

Assim,  $V(t)$  é obtido como:

$$V(t) = |V| e^{j(\phi + \Delta\delta)} \quad (4.11)$$

sendo  $|V|$  e  $\phi$ , respectivamente a magnitude e a fase da tensão  $V$  no instante  $t - \Delta t$ . Assim,  $V_q(t)$  é obtida através da transformação (3.4).

Desta forma, considerando-se o Modelo II para os geradores e assumindo que a excitatriz é representada por uma fonte de tensão constante ( $E_{FD} = cte$ ), o processo de resolução das equações diferenciais (3.18), (3.19), (3.20) e (3.21) durante um passo de integração, segue as seguintes etapas (como ilustrado na Figura (4.4)):

- (i) - Calcular  $\alpha$  e  $F_q$ , através das equações (4.2)

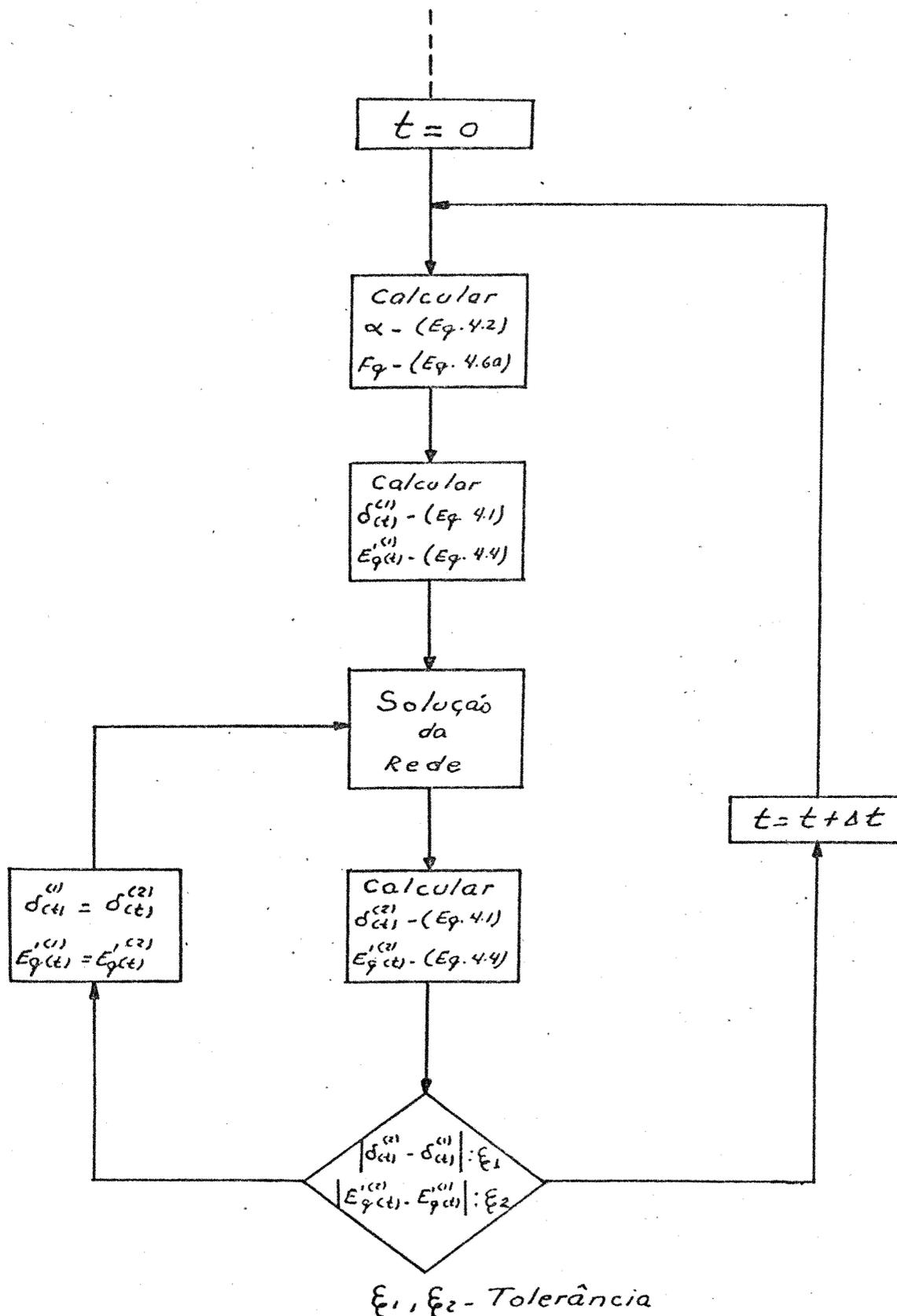


Figura 4.4 - Diagrama simplificado do processo de solução do sistema de equações algébricas e diferenciais durante um passo de integração (Modelo II com  $EFD = cte$  ).

e (4.6a), respectivamente;

- (ii) - Calcular  $\delta(t)$  através da equação (4.1);
- (iii) - Determinar  $E'_q(t)$  pela equação (4.4);
- (iv) - Obter a solução da rede;
- (v) - Obter  $\delta(t)$  através da equação (4.1);
- (vi) - Determinar  $E'_q(t)$  pela equação (4.4);
- (vii) - Comparar as diferenças de duas soluções sucessivas de  $\delta(t)$  e  $E'_q(t)$  com uma tolerância pré-fixada. Se ela for desprezível, atualizar o valor de  $F_q$  e iniciar novo passo de integração. Se não, retornar a etapa (iv).

#### 4.3.3. Sistema de Excitação [5]

Foi visto anteriormente que o valor atualizado de  $E'_q$  é obtido, a cada passo, através da equação:

$$E'_q(t) = -a_d (X_d - X'_d) I_d(t) + F_q \quad (4.12)$$

sendo

$$F_q = E'_q(t-\Delta t) + a_d \left[ E_{FD}(t-\Delta t) + E_{FD}(t) - 2E'_q(t-\Delta t) - (X_d - X'_d) I_d(t-\Delta t) \right] \quad (4.13)$$

Quando o sistema de excitação é considerado como uma fonte de tensão constante, então  $E_{FD}(t) = E_{FD}(t-\Delta t) = cte$  ,

e o cálculo de  $E'_g(t)$  pode ser feito diretamente através das equações (4.12) e (4.13). Em situações reais, no entanto,  $E_{FD}$  (saída do sistema de excitação) varia com o tempo (ver, por exemplo, o sistema de excitação Tipo 1, representado na Figura (3.7)). Nestes casos, antes de se calcular  $E'_g(t)$ , além de  $E_{FD}(t-\Delta t)$ , é necessário o conhecimento de  $E_{FD}(t)$ . (ver equação (4.13)). O cálculo de  $E_{FD}(t)$  exige a resolução do sistema de equações que constituem o modelo do sistema de excitação.

No caso de sistema Tipo 1 isto é feito da seguinte maneira:

- (i) - As equações diferenciais correspondentes aos quatro blocos: filtro, regulador, excitatriz e malha de estabilização são transformadas em equações algébricas através da aplicação do método Trapezoidal Implícito;
- (ii) - Estas equações algébricas são então reduzidas a uma única equação algébrica linear, que coloca a saída  $E_{FD}(t)$  em função da entrada  $V_T(t)$  (Apêndice E):

$$E_{FD}(t) = E_0 - b V_T(t) \quad (4.14)$$

onde

$$E_0 = \frac{a_A}{a_A a_E + \frac{2K_A K_E}{2T_F + \Delta t}} \left[ b_E + \frac{K_A}{a_A} \left( 2V_{REF} - \frac{1}{a_R} V_T(t-\Delta t) - \frac{4T_R}{2T_R + \Delta t} X_2(t-\Delta t) + \frac{2K_E}{2T_F + \Delta t} E_{FD}(t-\Delta t) - \frac{4T_F}{2T_F + \Delta t} X_2(t-\Delta t) + \frac{2T_A - \Delta t}{2T_A + \Delta t} V_R(t-\Delta t) \right) \right] \quad (4.15)$$

$$b = \frac{K_A / a_R}{a_A a_E + K_F K_A / (T_F + \frac{\Delta t}{2})} \quad (4.16)$$

e ainda

$$a_R = \frac{2T_R}{\Delta t} + 1 \quad (4.17)$$

$$a_A = \frac{2T_A}{\Delta t} + 1 \quad (4.18)$$

$$a_E = \frac{2T_E}{\Delta t} + K_E + K_1 \quad (4.19)$$

$$b_E = E_{FD}(t-\Delta t) \left( \frac{2T_E}{\Delta t} - K_E + K_1 \right) + V_R(t-\Delta t) + 2K_2 \quad (4.20)$$

Pode-se notar que nas expressões (4.12), (4.13) e (4.14)  $E_q'$  aparece como função de  $F_q$ , que é função de  $E_{FD}(t)$ , que por sua vez é função de  $V_T(t)$ . Isto indica a seqüência com que os cálculos devem ser efetuados, ou seja,  $V_T(t)$ ,  $E_{FD}(t)$ ,  $F_q$  e  $E_q'(t)$ .

Como pode ser observado na expressão (4.14) a variável de saída do regulador  $V_R(t)$  não aparece explicitamente, pois ela foi eliminada para se colocar  $E_{FD}(t)$  em função apenas da entrada  $V_T(t)$  (Apêndice E). Desta maneira, o valor de  $V_R(t)$  não é calculado durante o passo de integração, sendo calculado somente após concluído o passo através da equação (E.15) dada no Apêndice E. Como existem os limites  $V_{RMAX}$  e  $V_{RMIN}$  impostos a esta variável, este fato deve ser leva

do em conta ao calcular-se  $EFD(t)$  pela expressão (4.14). Uma alternativa seria verificar se  $VR$  violou seus limites após concluído o passo de integração: se fosse observada uma violação  $VR$  poderia ser simplesmente fixado no limite daí para frente. Isto, no entanto, não dá bons resultados quando grandes passos de integração são utilizados. Outra alternativa seria refazer o passo. Isto porém, apresenta as seguintes desvantagens: maior custo computacional; e necessidade de se armazenarem os valores das variáveis no passo anterior, sem atualização, para a eventualidade de se ter que refazer o passo.

A alternativa adotada neste trabalho é a sugerida pela referência [5]. O efeito dos limites  $VR_{MAX}$  e  $VR_{MIN}$  impostos a saída do regulador  $VR$ , pode ser refletido na variável  $EFD(t)$ . Ou seja, são impostos limites a variável  $EFD(t)$  de tal forma que se  $VR(t)$  violar seus limites durante o passo de integração,  $EFD(t)$  é automaticamente fixada no valor correspondente. Os limites em  $EFD(t)$ , deduzidos no Apêndice E são:

$$E_{HIGH} = (b_E + VR_{MAX}) / a_E \quad (4.21)$$

$$E_{LOW} = (b_E + VR_{MIN}) / a_E \quad (4.22)$$

e portanto, a variável  $EFD(t)$  calculada pela expressão (4.14) está sujeita às seguintes restrições:

$$E_{LOW} \leq EFD(t) \leq E_{HIGH} \quad (4.23)$$

Note-se que estes limites são dinâmicos ao contrário dos limites  $V_{RMAX}$  e  $V_{RMIN}$  que são constantes.  $E_{HIGH}$  e  $E_{LOW}$  são recalculados a cada passo de tal forma a terem o mesmo efeito que os limites impostos na variável eliminada  $V_R(t)$ , ou seja,  $E_{HIGH}$  e  $E_{LOW}$  são os valores calculados de  $E_{FD}$  no início do passo supondo-se, respectivamente, que a variável  $V_R$  passe de  $V_R(t-\Delta t)$  para  $V_R(t) = V_{RMAX}$  ou  $V_R(t) = V_{RMIN}$  durante o passo de integração  $t - \Delta t \rightarrow t$ . Dito de outra forma,  $E_{HIGH}$  é o máximo valor que  $E_{FD}$  pode assumir após um passo de integração e isto ocorre quando  $V_R$  passa do seu valor anterior para o valor máximo ou mínimo permitido.

A curva de saturação da excitatriz é considerada linear por partes, sendo neste trabalho considerada uma curva linearizada com duas inclinações somente (Apêndice E).

O processo de resolução do sistema de equações algébricas e diferenciais, em um passo de integração, com a inclusão do sistema de excitação, segue as seguintes etapas (ilustrado na Figura (4.5)):

- (i) - Calcular  $\alpha$ , através da equação (4.2);
- (ii) - Calcular  $E_0$ ,  $b$ ,  $E_{HIGH}$  e  $E_{LOW}$  através das equações (4.15), (4.16), (4.21) e (4.22) respectivamente, e determinar  $E_{FD}(t)$  pela equação (4.14) supondo que  $V_T(t) = V_T(t-\Delta t)$
- (iii) - Calcular  $F_q$ , através da equação (4.6a);
- (iv) - Determinar  $\delta(t)$  e  $E_q'(t)$ , através das equações (4.1) e (4.4) respectivamente;
- (v) - Obter a solução da rede;

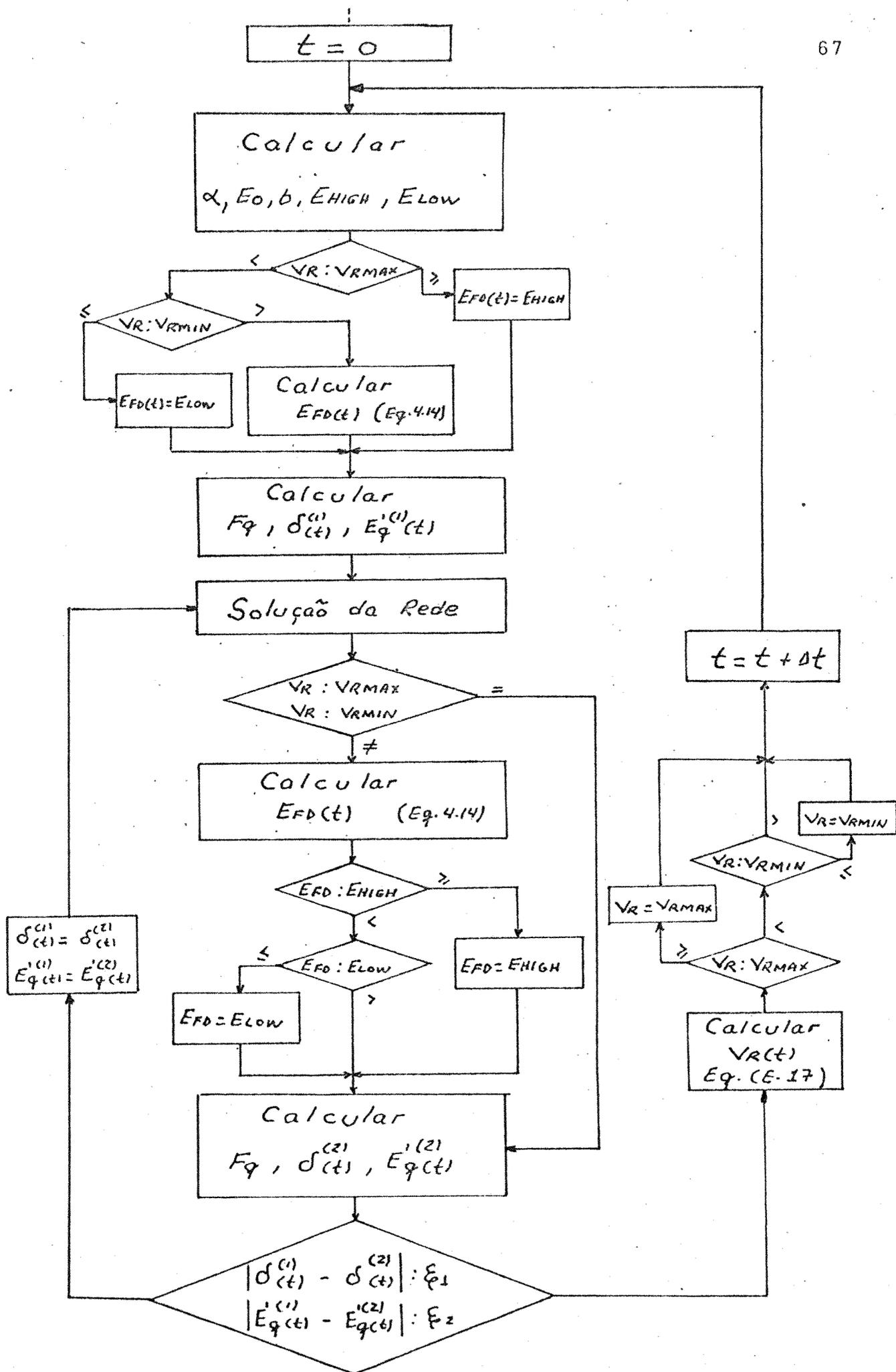


Figura 4.5 - Inclusão do sistema de excitação Tipo 1.

- (vi) - Calcular  $E_{FD}(t)$ , através da equação (4.14) observando as restrições impostas pelas equações (4.23);
- (vii) - Calcular  $F_g$ , através da equação (4.62);
- (viii) - Determinar  $\delta(t)$  e  $E'_g(t)$ , através das equações (4.1) e (4.4), respectivamente;
- (ix) - Comparar as diferenças de duas soluções sucessivas de  $\delta(t)$  e  $E'_g(t)$  com uma tolerância pré-fixada. Se ela for desprezível, iniciar novo passo de integração. Se não, retornar a etapa (v).

#### 4.4. Cálculo das Condições Iniciais

##### 4.4.1. Variáveis da Máquina [2]

Parte-se de uma solução inicial fornecida por um método convencional de Fluxo de Carga, a partir da qual determina-se o ponto de operação inicial de regime (pré-perturbação) para cada máquina.

A corrente de armadura (estator) é conhecida, sendo dada por:

$$I_a = \frac{S^*}{V^*} = \frac{P - jQ}{V^*} \quad (4.24)$$

onde  $V$  é a tensão terminal complexa e  $S$  é a potência terminal complexa, conhecidas a partir do fluxo de carga.

Com a corrente de armadura  $I_a$  e a tensão terminal  $V$  conhecidas, a posição do eixo  $q$  para cada máquina fica determinada. Como se pode notar pelo diagrama fasorial da máquina de pólos salientes (mostrada na Figura (4.6)), o fasor,

$$E_{qd} = V + jX_q I_a \quad (4.25)$$

está localizado no eixo em quadratura. O ângulo  $\delta$  entre o eixo real de referência da rede e o eixo  $q$  de cada máquina é determinado como sendo a fase do fasor  $E_{qd}$  ou seja;

$$\delta(0) = \angle E_{qd} \quad (4.26)$$

Determinado o ângulo  $\delta$ , as variáveis terminais  $I_a$  e  $V$  podem ser transformadas em suas componentes de eixo direto e em quadratura ( $I_d, I_q, V_d, V_q$ ), através da transformação (3.4). Assim, da equação (3.5) tem-se ( $R_e = 0$ ):

$$E'_q(0) = V_q + X'_d I_d(0) \quad (4.27)$$

O valor inicial de  $E_{FD}$  é determinado a partir da equação (3.20), que em regime permanente assume a forma:

$$\left. \frac{d}{dt} E'_q \right|_{(0)} = -\frac{1}{T'_{do}} \left[ E'_q(0) + (X_d - X'_d) I_d(0) - E_{FD}(0) \right] \quad (4.28)$$

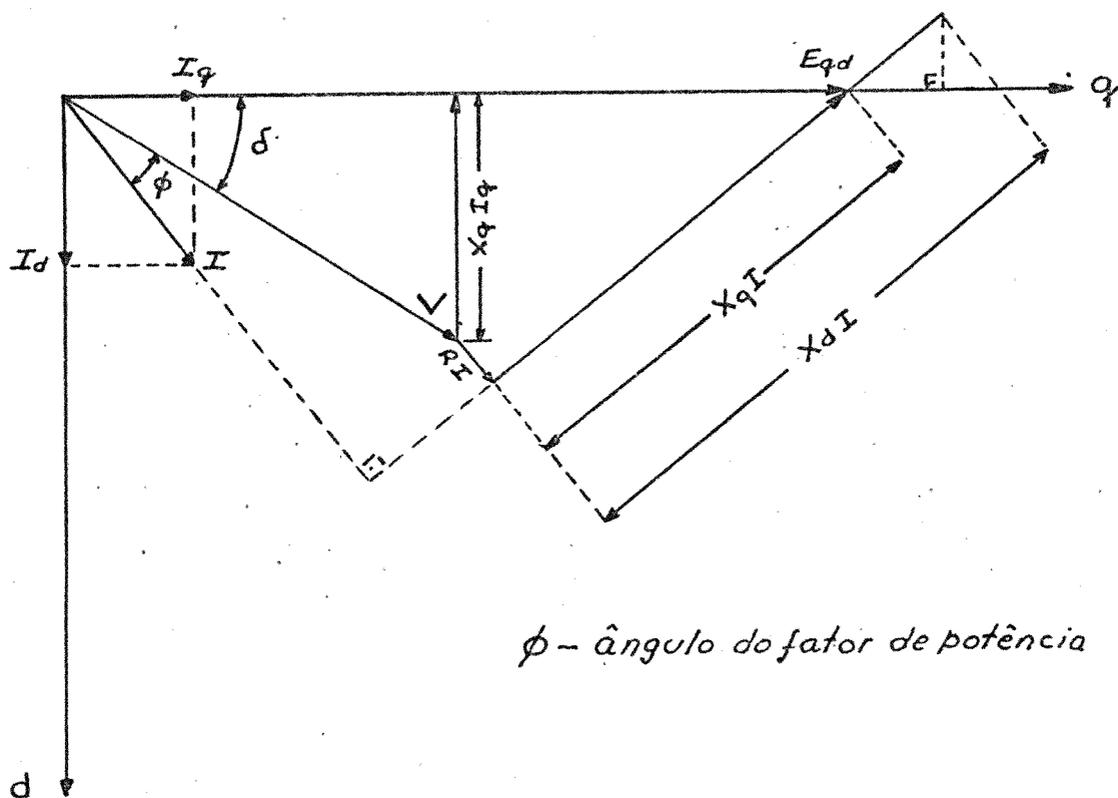


Figura 4.6 - Diagrama fasorial para a máquina de polos salientes.

e portanto

$$E'_q(0) + (X_d - X'_d)I_d(0) - E_{FD}(0) = 0 \quad (4.29)$$

e assim

$$E_{FD}(0) = E'_q(0) + (X_d - X'_d)I_d(0) \quad (4.30)$$

A potência mecânica é dada por:

$$P_m = P_e(0)$$

onde  $P_e$  é a potência elétrica de entreferro dada pela equação (3.10).

#### 4.4.2. Variáveis do sistema de excitação

Considere-se o instante ( $t=0$ ) em que ocorre o defeito, como sendo o início da simulação do comportamento dinâmico do sistema. A inicialização das variáveis do sistema de excitação é feita no instante  $t=0^+$  (imediatamente após a ocorrência do defeito) utilizando-se a solução do Fluxo de Carga para a situação pós-defeito.

Desde que;

$$E_{FD}(0^+) = E_{FD}(0^-) \quad (4.31)$$

então

$$X_2(0^+) = 0 \quad (4.32)$$

Os valores iniciais das variáveis  $X_1$  e  $V_R$  dependem das constantes de tempo  $T_R$  e  $T_A$ . Ou seja;

$$X_1(0) = V_{REF} \quad \text{se } T_R \neq 0$$

$$X_1(0) = V_T(0^+) \quad \text{se } T_R = 0$$

e

$$V_R(0^+) = 0 \quad \text{se } T_R \neq 0$$

$$V_R(0^+) = 0 \quad \text{se } T_A \neq 0 \quad (4.34)$$

$$V_R(0^+) = K_A (V_{REF} - V_T(0^+)) \quad T_R = 0 \quad T_A = 0$$

o que pode ser melhor visualizado pelo diagrama de blocos da Figura (4.7).

#### 4.5. Descontinuidades

Os instantes de descontinuidades considerados são os instantes de ocorrência ( $t=0$ ) e eliminação ( $t=t_E$ ) do defeito. As variáveis da rede variam instantaneamente, sendo então necessário o cálculo de fluxo de carga nos instantes  $t=0^+$  e

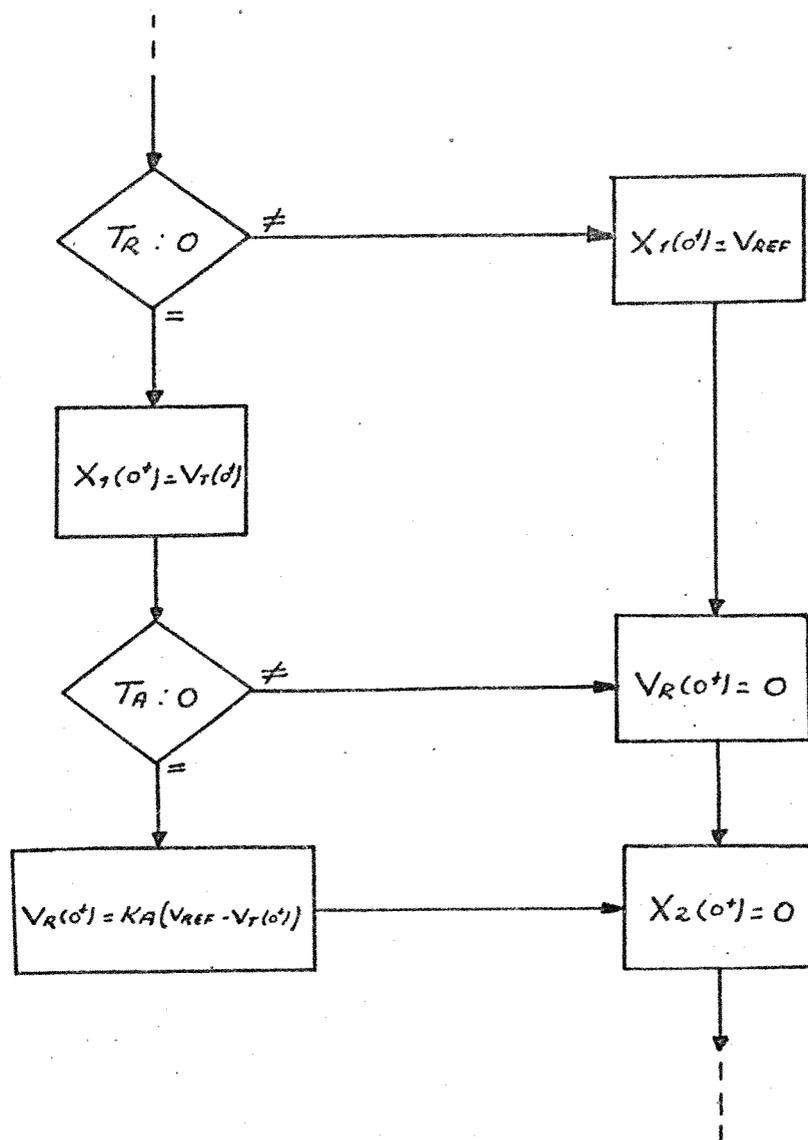


Figura 4.7 - Instante  $t=0^+$ .

$t = t_E^+$ . Desta forma, são determinadas as correntes, potências e tensões terminais das máquinas. Com relação às variáveis da máquina às seguintes considerações são feitas:

- a - Desde que o fluxo concatenado com o enrolamento de campo não varia instantaneamente

$$E'_q(0^+) = E'_q(0^-)$$

$$E'_q(t_E^+) = E'_q(t_E^-)$$

- b - Devido a inércia do rotor, tem-se que

$$\delta(0^+) = \delta(0^-)$$

$$\delta(t_E^+) = \delta(t_E^-)$$

- c - Devido as constantes de tempo do sistema de excitação

$$E_{FD}(0^+) = E_{FD}(0^-)$$

$$E_{FD}(t_E^+) = E_{FD}(t_E^-)$$

- d - Como o valor de  $E_{FD}$  permanece inalterado nos instantes de descontinuidades, então

$$X_2(0^+) = X_2(0^-)$$

$$X_2(t_E^+) = X_2(t_E^-)$$

As variáveis  $X_1$  e  $V_R$  serão alteradas ou não nestes instantes, dependendo das constantes de tempo  $T_R$  e  $T_A$ , como ilustrado na Figura (4.8).

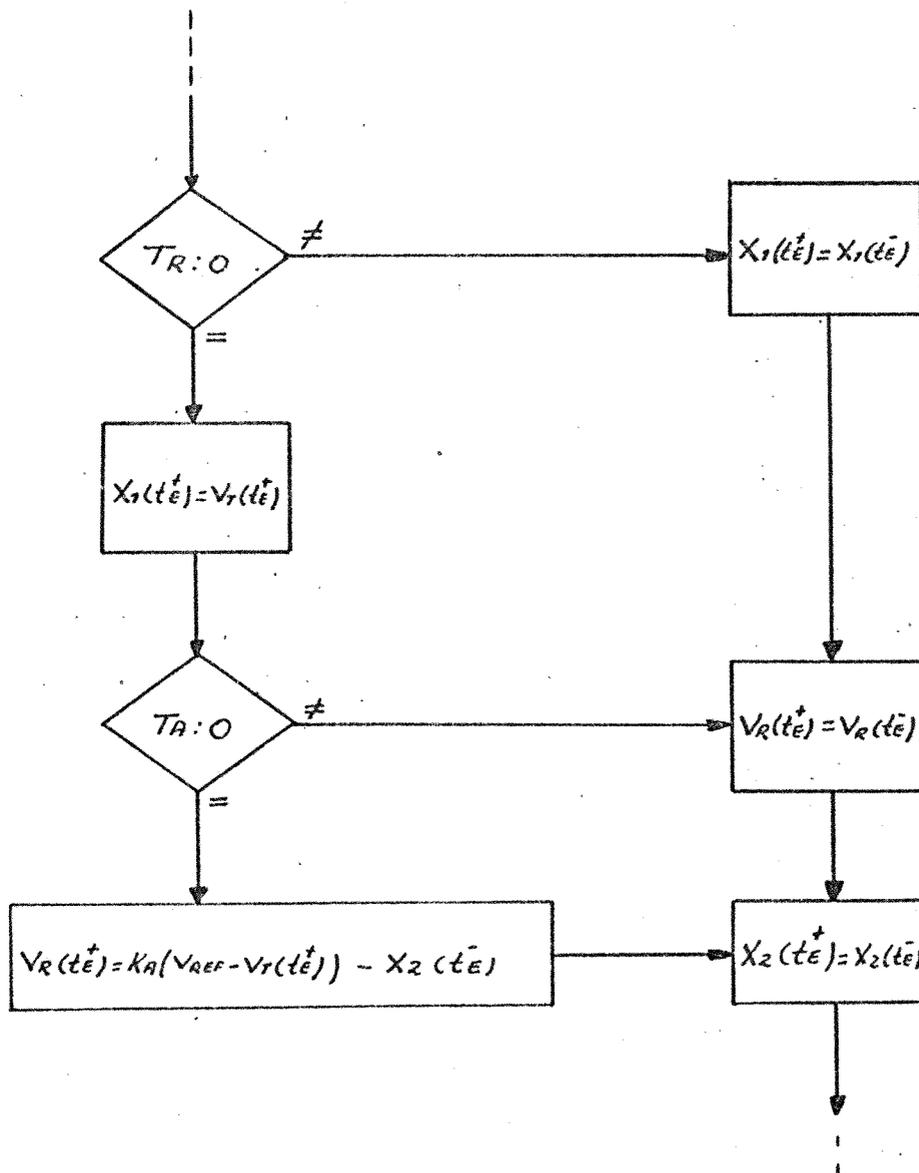


Figura 4.8 - Instante  $t = t_E^+$ .

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os testes efetuados e os resultados obtidos com a aplicação do Programa de estabilidade transitória desenvolvido, em dois sistemas reais. Para cada um dos sistemas testes os resultados foram obtidos considerando-se os dois tipos de modelagem dos geradores, Modelo I e II, como descritos no CAPÍTULO III. Os dois sistemas testados diferem principalmente na sua dimensão sendo o primeiro, (chamado aqui de Sistema I) composto de 9 barras e 3 geradores, enquanto que o segundo (chamado de Sistema II) é composto de 320 barras e 44 geradores.

Os resultados obtidos em testes efetuados com o Sistema I são discutidos em maiores detalhes pois permitem um entendimento mais fácil dos fenômenos físicos associados. Por outro lado, os testes com o Sistema II são importantes para se avaliar o desempenho do Programa em situações reais.

#### 5.1. Sistema I

Este sistema, extraído da referência [3] consiste de 9 barras, 9 linhas, 3 geradores e 3 cargas como mostrado na Figura(5.1). Os dados dos geradores são fornecidos pela tabela (5.1) mostrada a seguir.

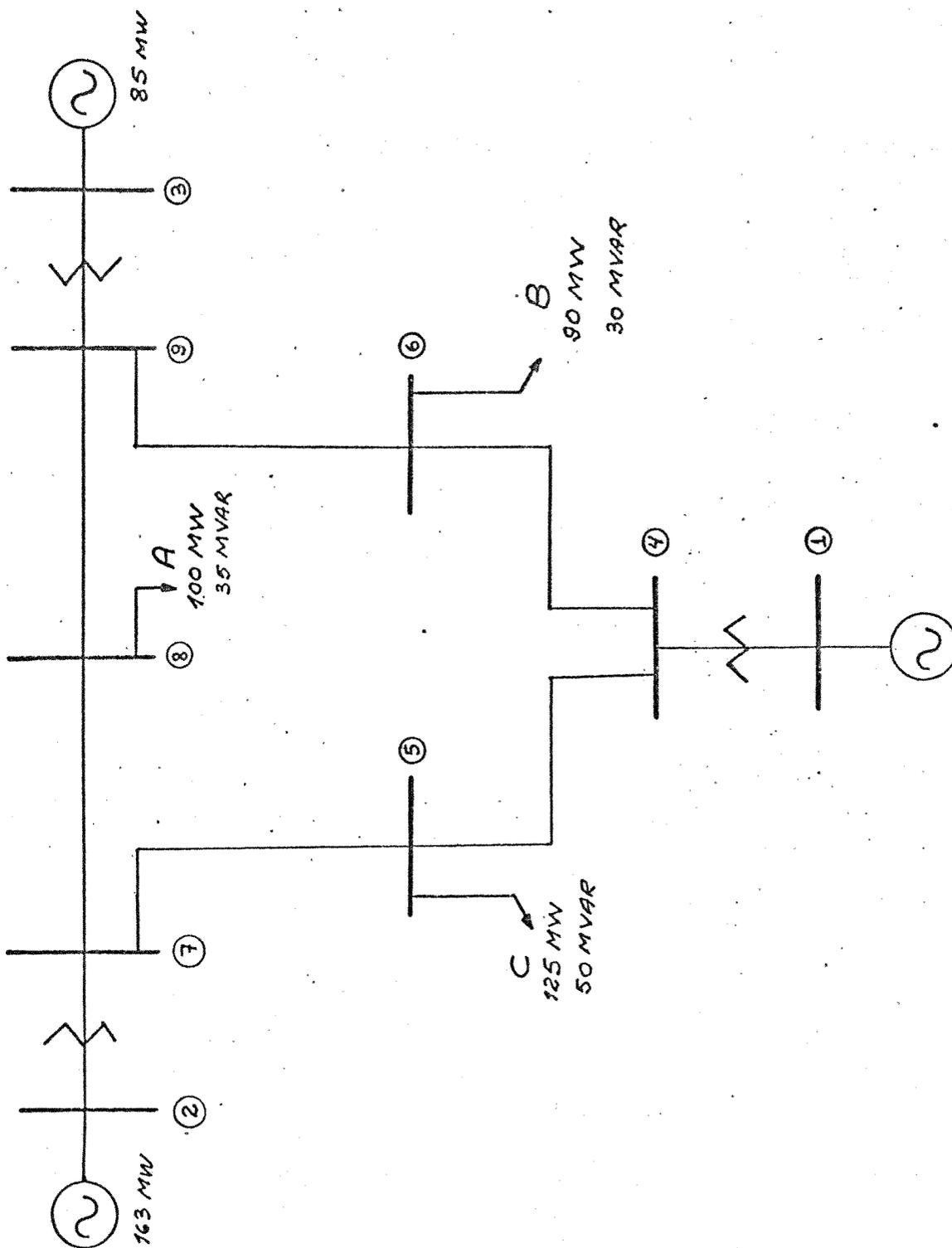


Figura 5.1 - Sistema I

TABELA 5.1

Gerador	1	2	3
$X'_d$	0.068	0.1198	0.1813
$X'_q$		0.1969	
$X_q$		0.8645	
$T'_{do}$		6.0 s	
$H$	2.364 s	6.4 s	3.07 s

Os valores das reatâncias estão em pu. na base de 100 MVA. Nos testes realizados com este sistema foram considerados dois casos chamados aqui de Caso 1 e Caso 2 conforme mostrado na Tabela (5.2).

TABELA 5.2 - SISTEMA I

CASO 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Modelo I para os 3 geradores.</li> <li>. Modelo de impedância constante para as cargas A,B,C.</li> </ul>
CASO 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Modelo I para os geradores 1 e 3</li> <li>. Modelo II para o gerador 2.</li> <li>. Modelo de impedância constante para as cargas A e C.</li> <li>. Modelo de impedância/corrente/potência constante para a carga B.</li> </ul>

Tanto no Caso 1 como no Caso 2, a resistência do estator  $A_e$  (armadura) é considerada como sendo nula. Para ambos os casos a perturbação considerada é um curto-trifásico ocorrendo próximo a barra 7, no final da linha 5-7 no instante  $t = 0$  segundos. O defeito é eliminado no instante  $t = 0.08$  segundos (5 ciclos aproximadamente) pela abertura da linha 5-7.

### CASO 1

Na Figura (5.2a) são apresentados os ângulos dos rotores dos três geradores, para o transitório em estudo com o tempo de simulação sendo de 2 segundos. Como se pode notar os 3 geradores possuem os mesmos modos de oscilação, o que significa que o sistema é estável para a perturbação dada. Isto pode ser mais facilmente verificado pela diferença angular entre os mesmos, ou seja, se a diferença angular entre dois geradores quaisquer crescer indefinidamente o sistema é considerado instável, pois pelo menos para um gerador o sincronismo será perdido. Caso a diferença seja limitada, o sistema é considerado estável.

Na Figura (5.2b) são mostradas as diferenças angulares para os três geradores durante 2 segundos de simulação. Como se pode notar o sistema é estável para o transitório considerado.

Na Figura (5.3a) são mostradas a diferença angular  $\delta_{21}$  e a potência terminal do gerador 2, para um tempo de simulação de 5 segundos. Pode-se notar por esta Figura o forte acoplamento da diferença angular com a potência ativa. Na Figura (5.3b) é mostrada a variação da tensão terminal do gerador 2 (é traçado na mesma Figura o valor de  $E'_q$ , que permanece constante pois é adotado o Modelo Clássico). Como pode ser veri

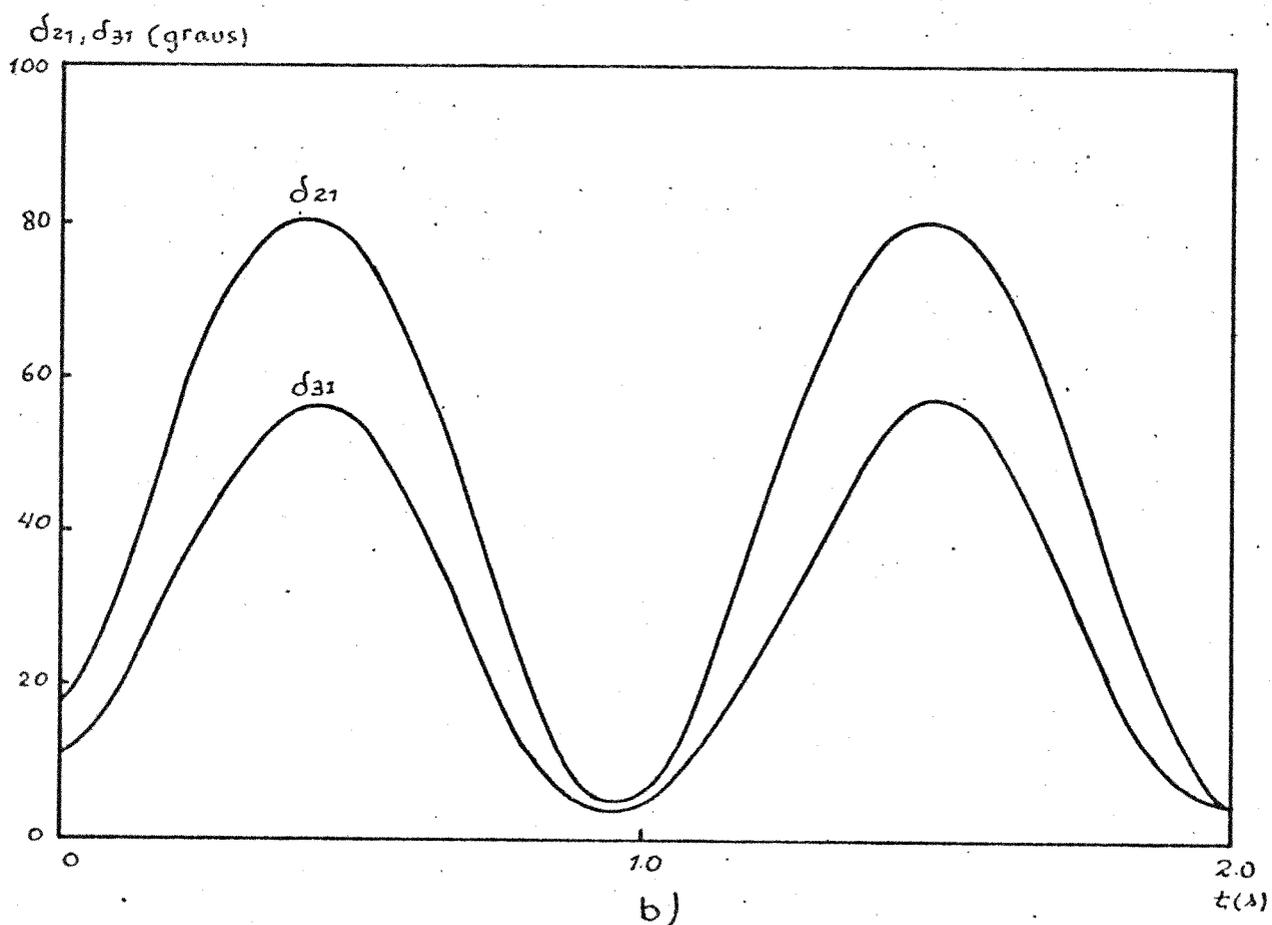
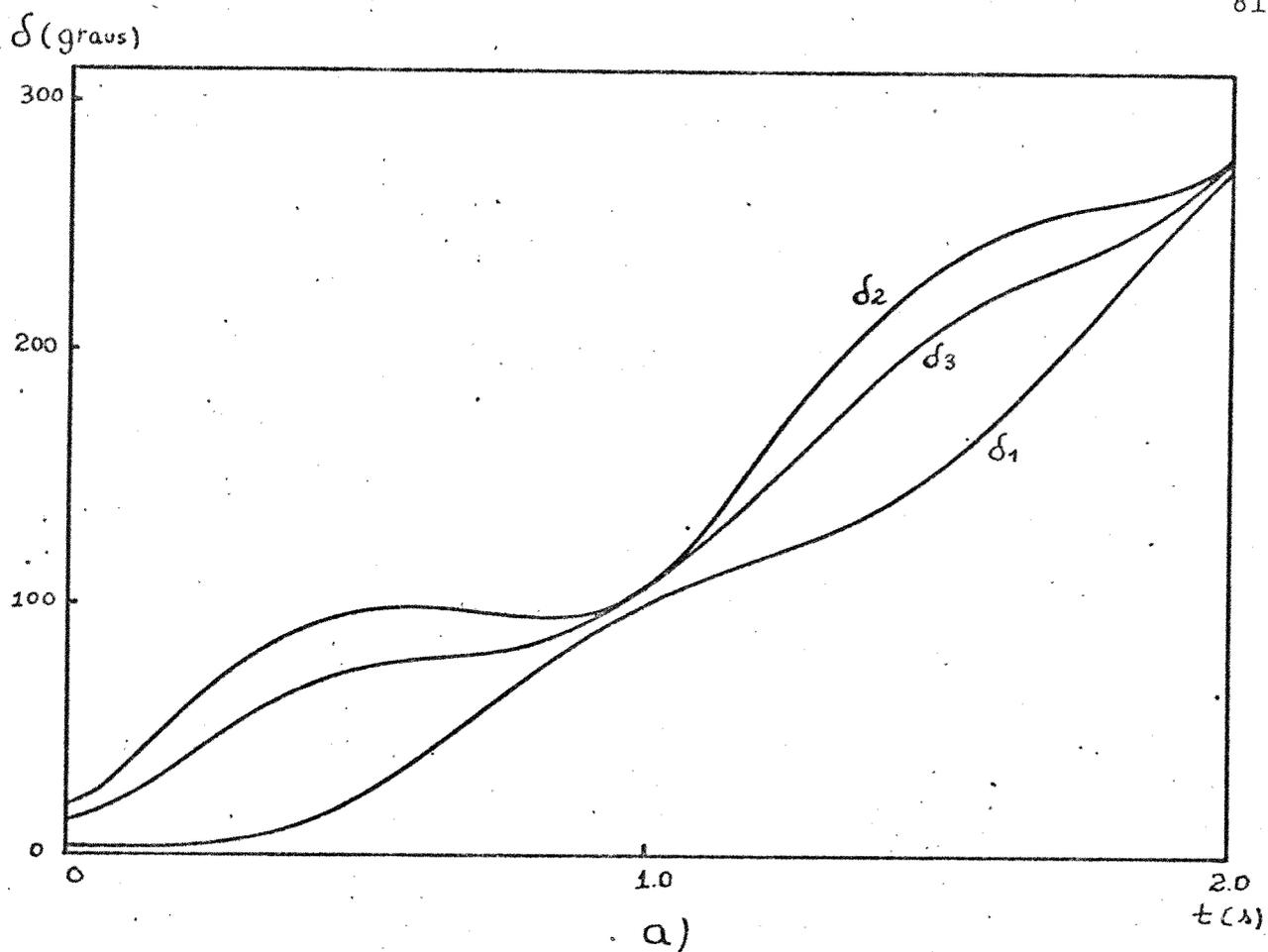


Figura 5.2 - a) Ângulo dos geradores 1,2,3. b) Diferenças angulares  $\delta_{21}$  e  $\delta_{31}$ .

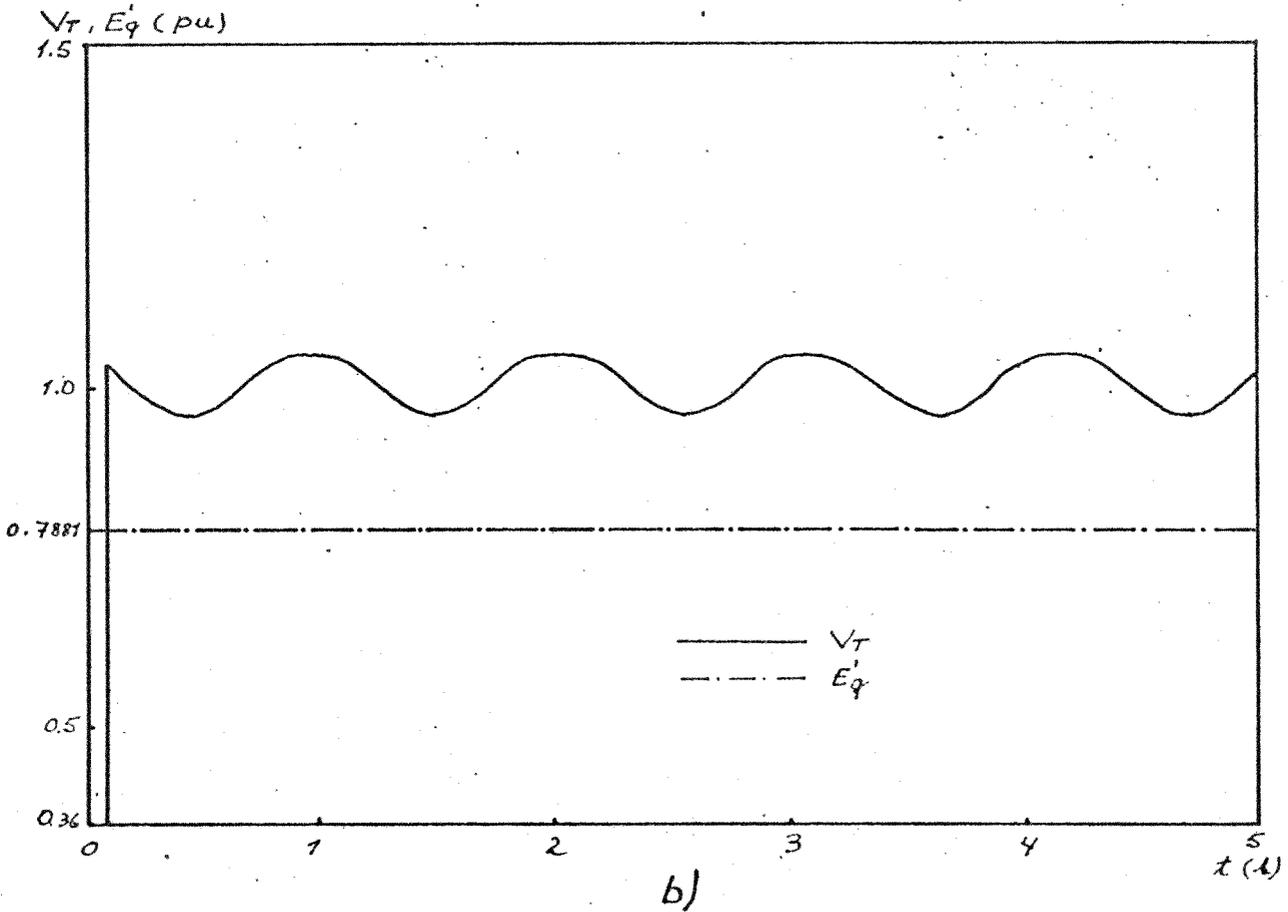
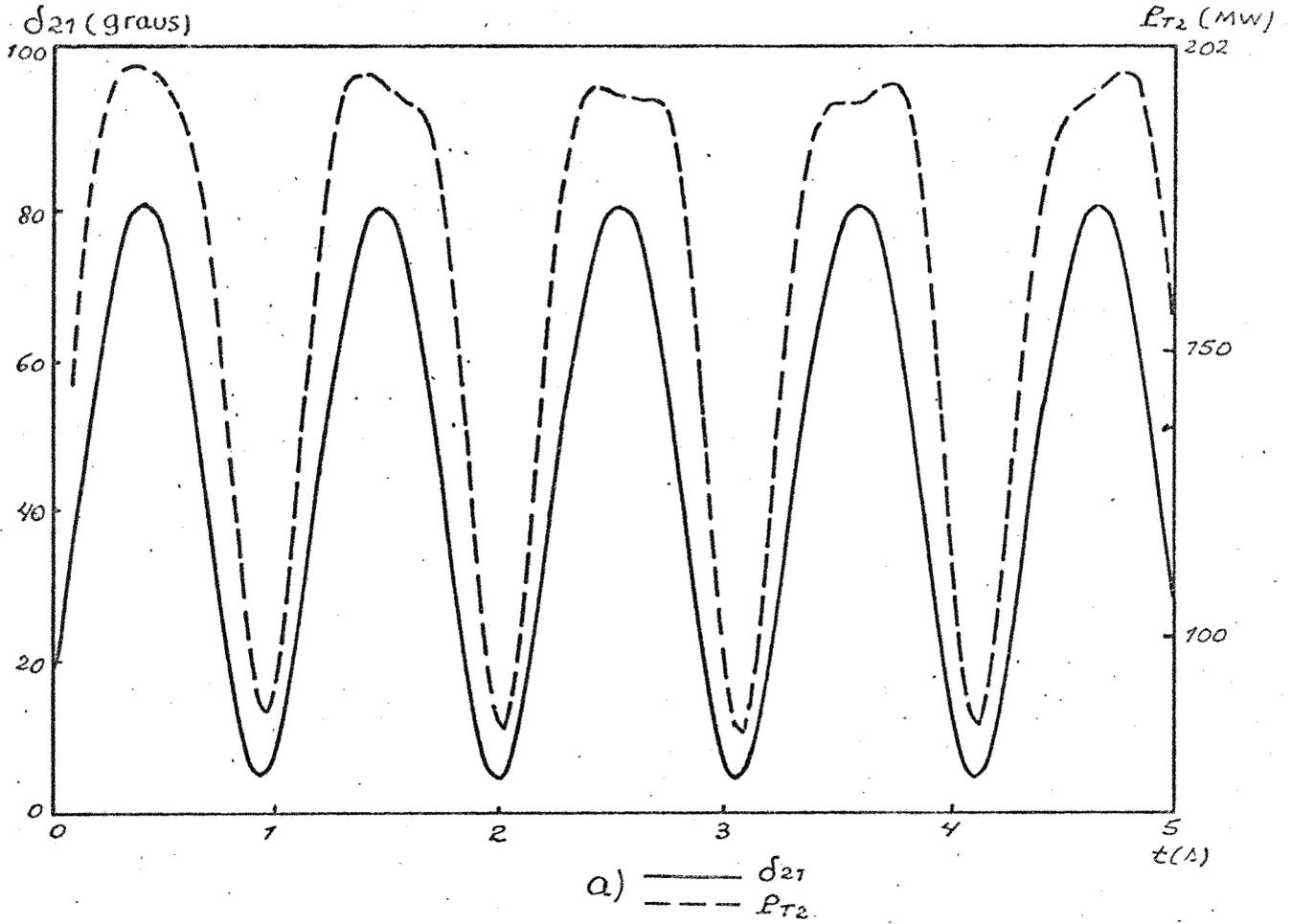


Figura 5.3 - a) e b) Resultados obtidos considerando-se Modelo I (clássico).

ficado na mesma Figura, a tensão é aproximadamente nula durante o defeito, oscilando em torno de  $1.025 pu$  (que é o valor anterior à perturbação) após o mesmo ser eliminado. Note-se que os picos da potência ativa terminal tem uma pequena distorção que pode ser relacionada com os mínimos da tensão terminal lembrando que  $P_t = \frac{E'_q V_t}{X} \sin \delta$ .

Com o objetivo de se mostrar a eficiência e precisão do Método Trapezoidal Implícito na integração numérica, é mostrado na Figura (5.4) o resultado obtido (diferença angular  $\delta_{21}$ ) com este método considerando-se passos de integração de 0.02 e 0.08 segundos. É ainda mostrado na mesma Figura, o resultado obtido utilizando-se o Método Euler Modificado para um passo de integração de 0.08 segundos. Pode-se verificar então que mesmo com passo de 0.08 segundos, que é relativamente grande em termos dos programas industriais hoje usados, o Método Trapezoidal Implícito mantém-se satisfatoriamente preciso, ao contrário do Método Euler Modificado.

## CASO 2

Neste caso em que é considerado o efeito da saliência (Modelo II da Máquina Síncrona) e o sistema de excitação é considerado como uma fonte de tensão constante para o gerador 2, os resultados obtidos são mostrados na Figura (5.5). O valor de  $E_{FD}$  permanece constante no seu valor inicial ( $1.78 pu$ ) obtido após a solução do fluxo de carga inicial (pré-perturbação).

Na Figura (5.5a) é mostrado a variação da potência terminal do gerador 2 e da diferença angular  $\delta_{21}$  para um tempo de simulação de 5 segundos.

Na Figura (5.5b) é mostrada a variação da tensão ter-

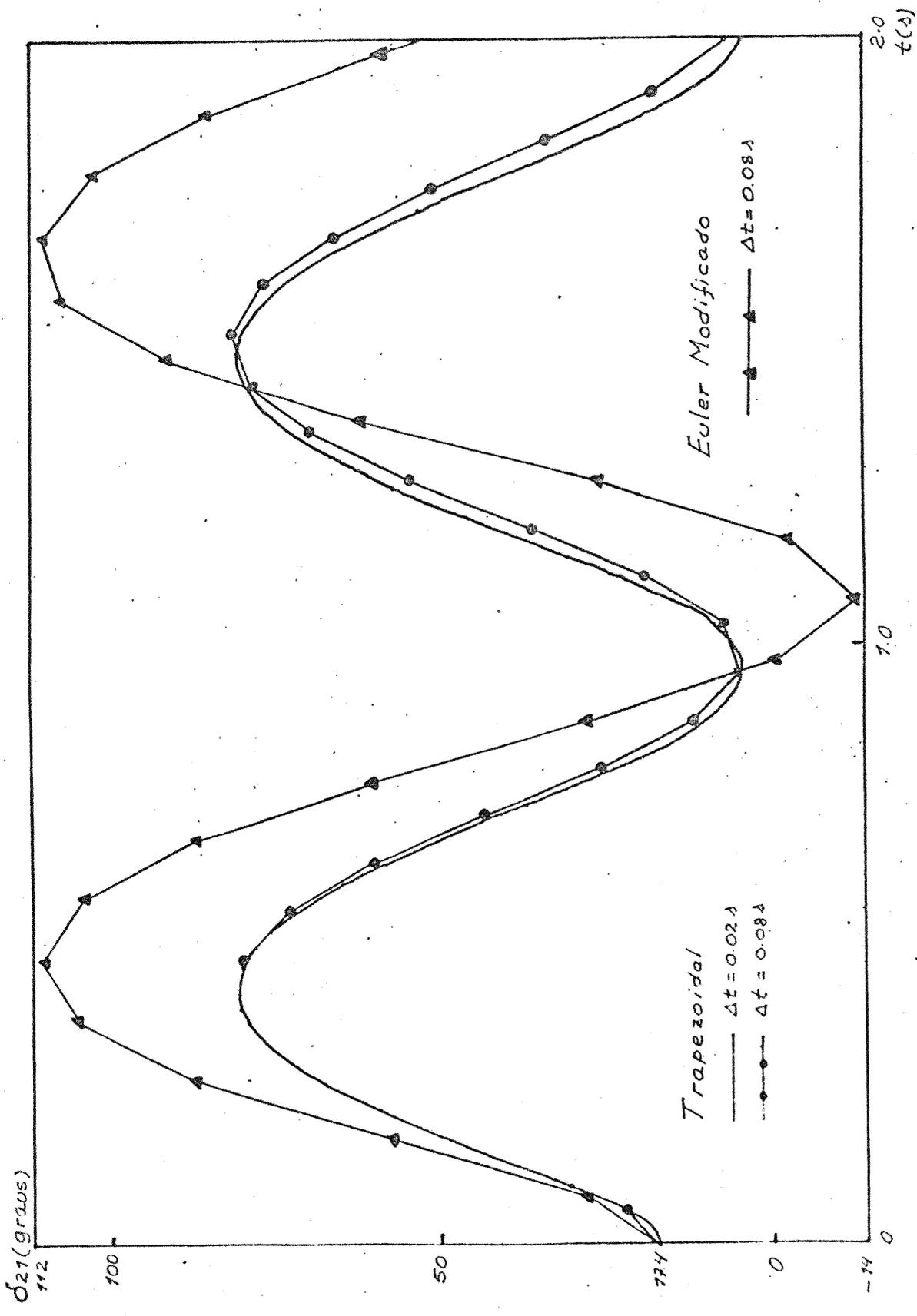


Figura 5.4 - Desempenho dos Métodos Trapezoidal Implícito e Euler Modificado com diferentes passos.

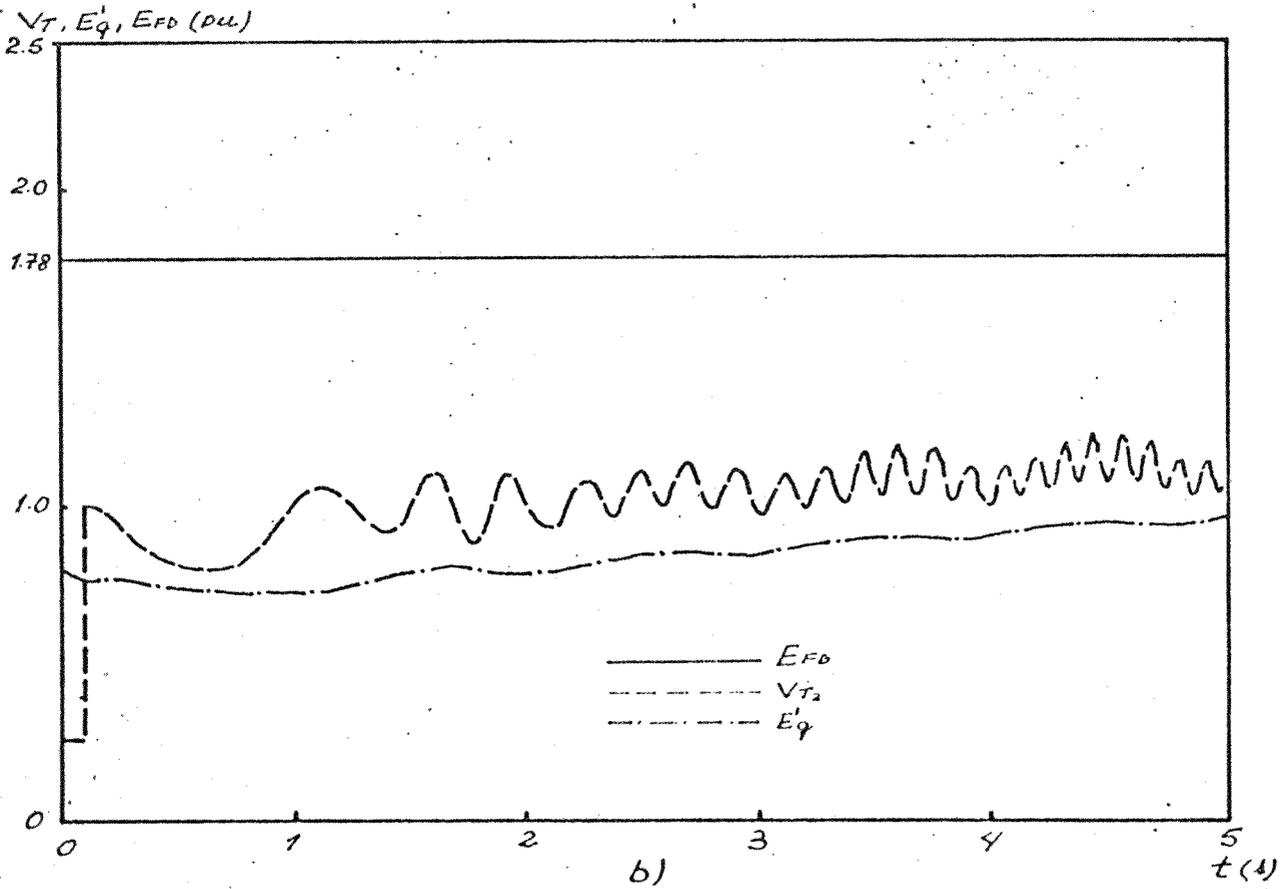
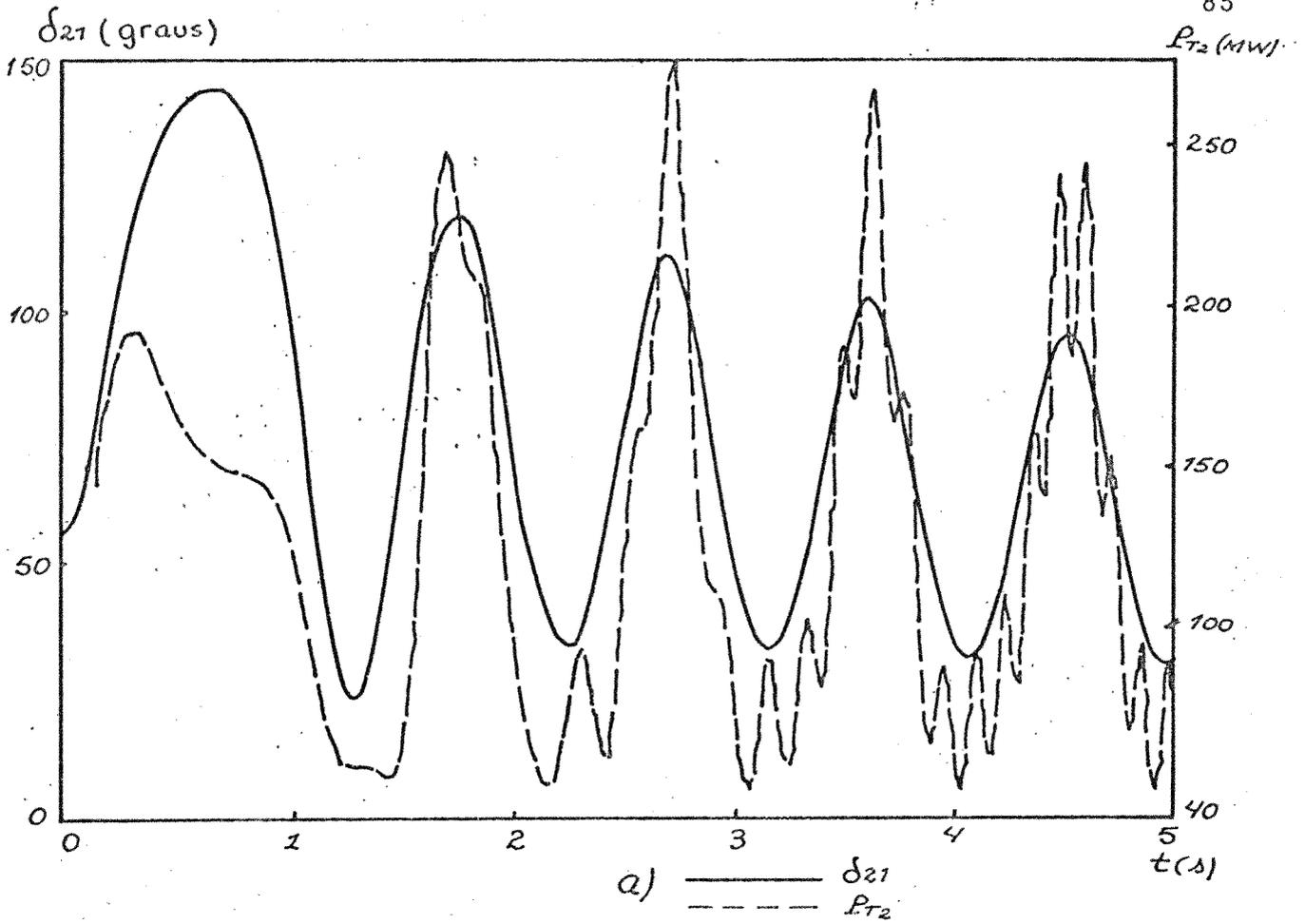


Figura 5.5 - a) e b) Resultados obtidos considerando-se Modelo II e  $E_{FD} = cte.$

minal do gerador 2 e da tensão  $E'_q$ . Pode-se notar que  $E'_q$  varia muito pouco (e portanto o fluxo concatenado com o enrolamento de campo também), podendo ser considerado como aproximadamente constante durante o primeiro "swing".

Os resultados obtidos considerando-se o sistema de excitação Tipo 1 são mostrados na Figura (5.6). Os dados deste sistema fornecido pela referência [3], são mostrados na Tabela (5.2) dada a seguir:

TABELA 5.3

Dados do Sistema de Excitação

$T_R$	$T_A$	$T_E$	$T_F$	$K_A$	$K_E$	$K_F$	$S_{75MAX}$	$S_{EMAX}$	$E_{FDMIN}$	$E_{FDMAX}$
0.06	.2	.314	.35	20.	0	.063	.104	.293	-3.984	3.984

Pode-se notar pela Figura (5.6a) que a representação do sistema de excitação faz aumentar a potência de saída do gerador após o primeiro "swing" e que o sistema é estável para o caso em estudo. Na Figura (5.6b) são mostradas as variações de  $E_{FD}$ ,  $V_{t2}$  e  $E'_q$  durante a simulação. Comparando-se a variação de  $E'_q$  com a do caso anterior ( $E_{FD} = cte$ ), nota-se que  $E'_q$  (e portanto o fluxo concatenado com o enrolamento de campo) decresce mais lentamente durante o primeiro "swing", sendo este efeito explicado pela reação ( $E_{FD}$  cresce rapidamente) do sistema de excitação controlado por um regulador de tensão automático (Tipo 1).

No intuito de observar o efeito da malha de estabilização do sistema de excitação Tipo 1, é mostrado na Figura(5.7)

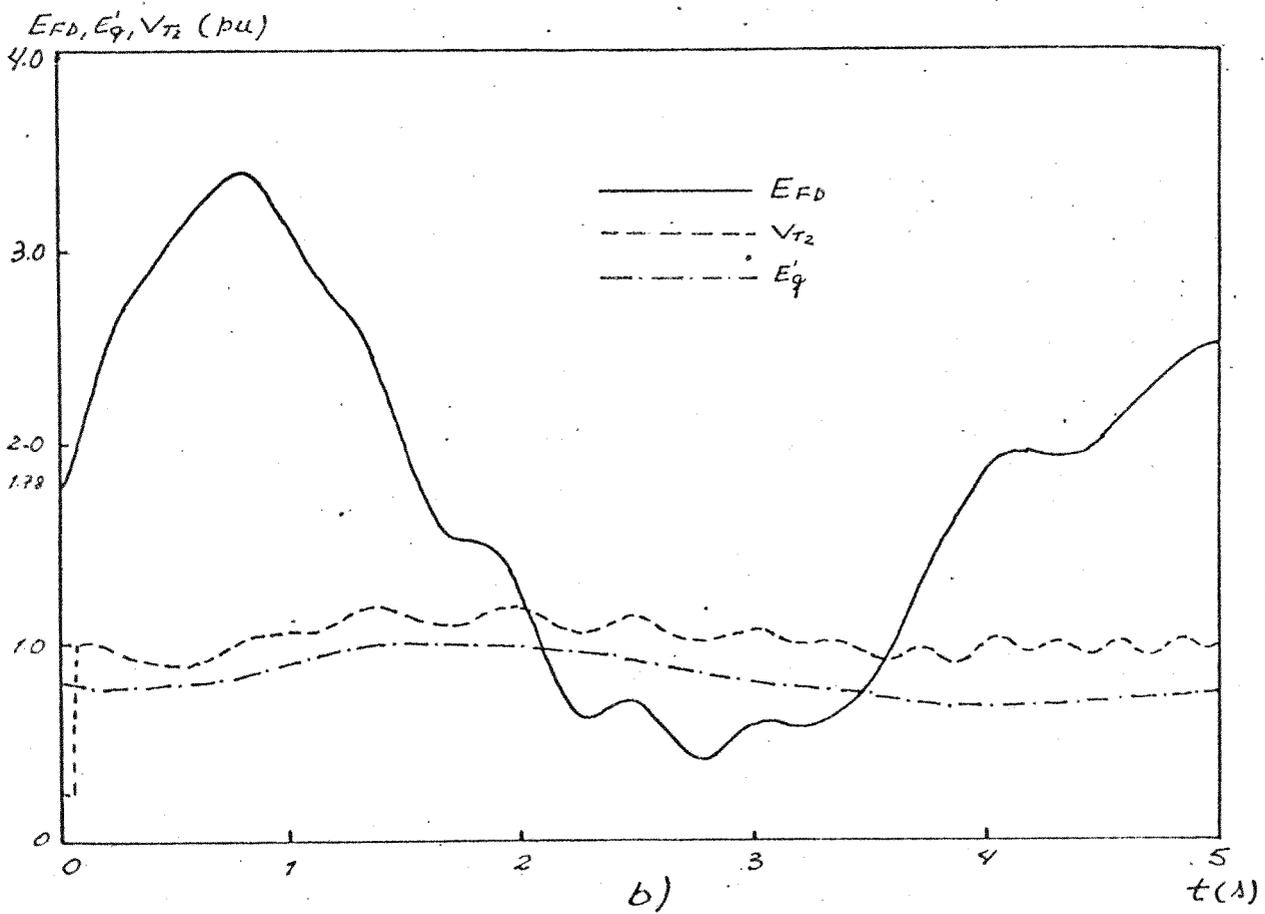
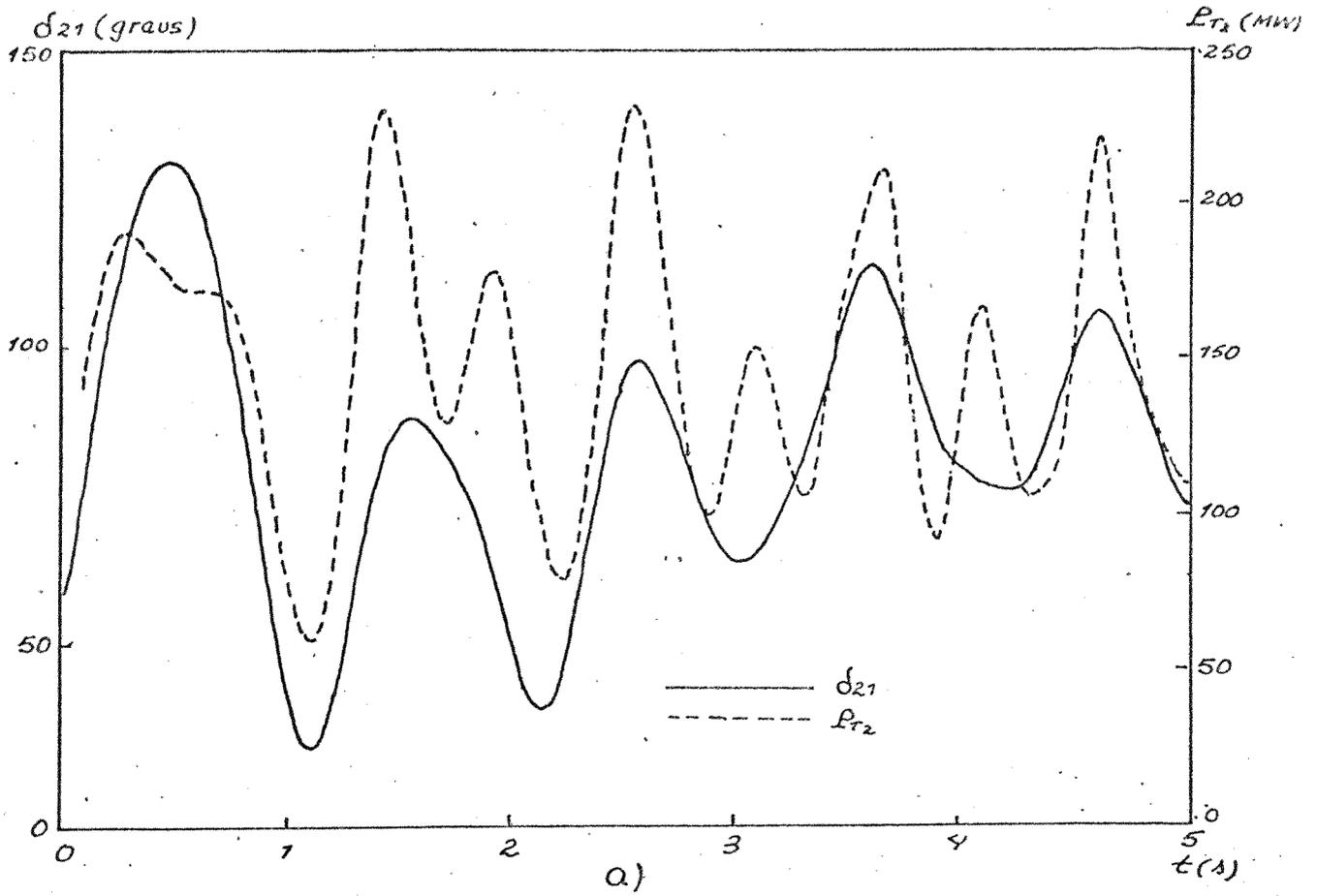


Figura 5.6 - a) e b) Resultados obtidos considerando-se a representação do sistema de excitação Tipo 1.

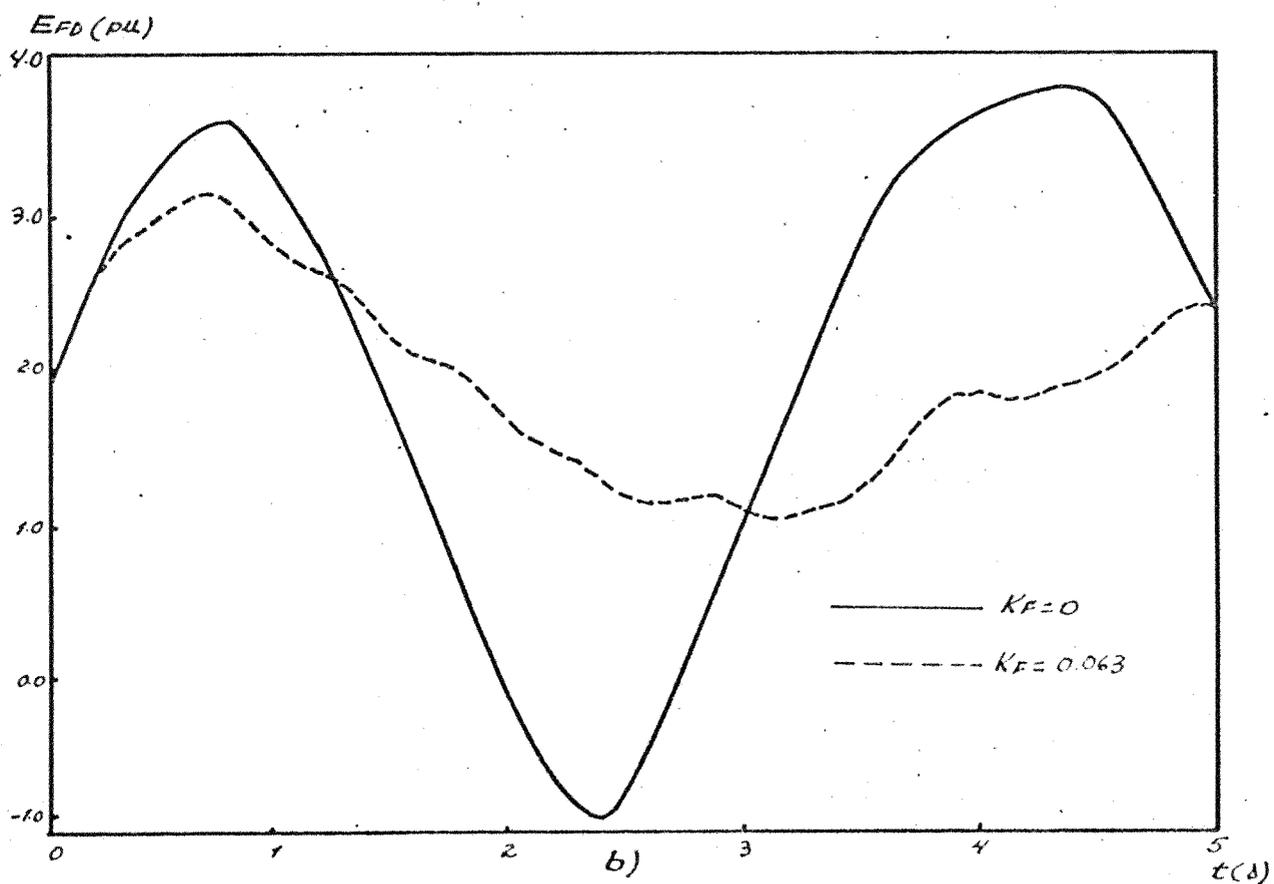
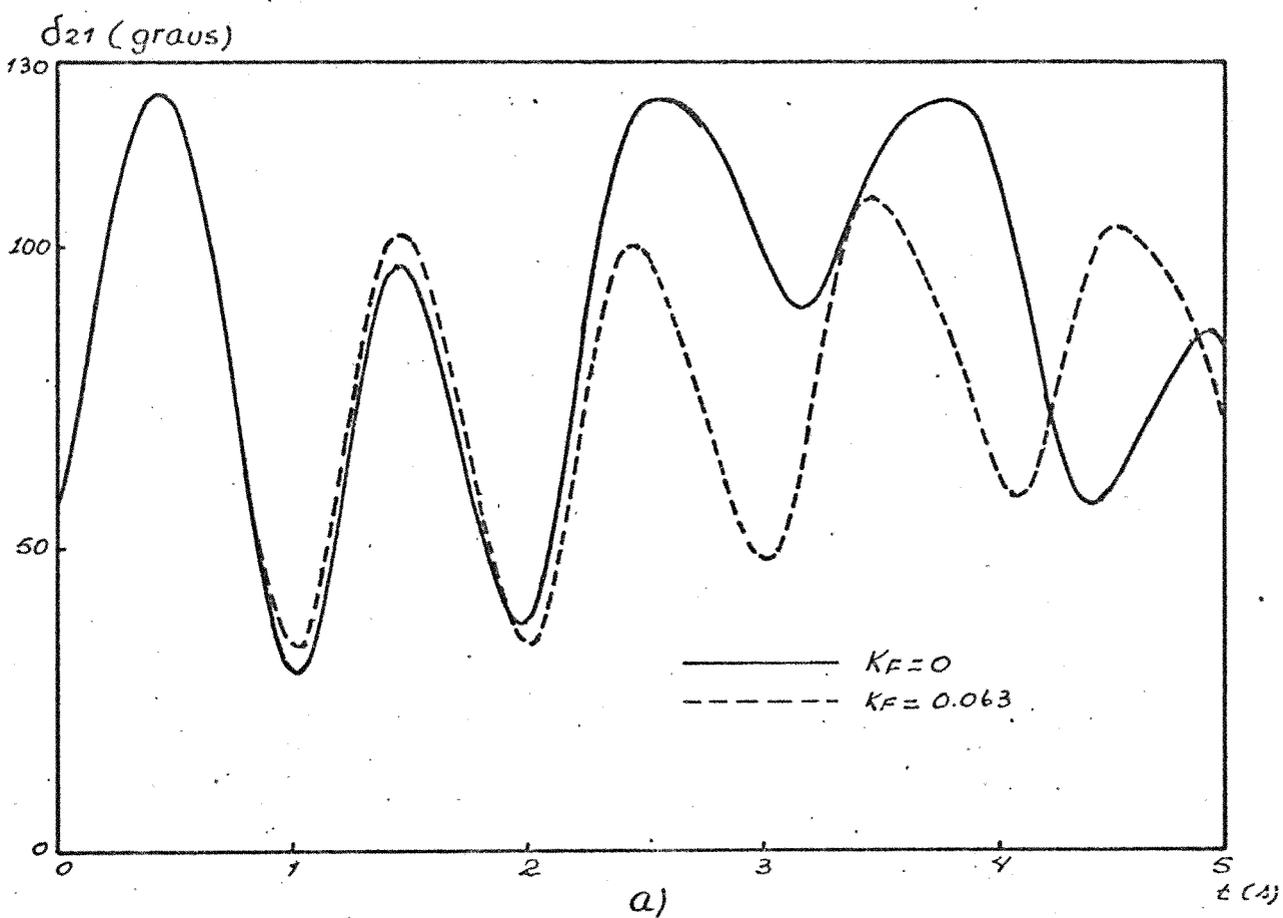


Figura 5.7 - a) e b) Resultados obtidos considerando-se valores diferentes de  $K_F$ .

o resultado obtido considerando-se  $K_F$  igual a zero e  $K_F$  igual a 0,063. Como o sistema de excitação utiliza um ganho elevado ( $K_A$ ) a fim de se obter uma resposta rápida, a tensão de saída do sistema de excitação  $E_{FD}$  está sujeita a oscilações pouco amortecidas. O efeito da malha de estabilização (sinal proporcional a variação de  $E_{FD}$ ) é justamente o de reduzir estas oscilações indesejadas de  $E_{FD}$ . Fato este que pode ser verificado pela Figura (5.7b), onde para  $K_F$  igual a zero (não há realimentação)  $E_{FD}$  oscila com pouco amortecimento, o que não ocorre para o caso em que  $K_F = 0,063$ .

Na Figura (5.8) são mostrados os resultados obtidos considerando-se para a carga B, os modelos de impedância, corrente e potência constante. O objetivo deste teste foi verificar o efeito na estabilidade do sistema, dos modelos de carga considerados. Como pode-se notar pela Figura (5.8a) (diferença angular  $\delta_{z1}$ ) e pela Figura (5.8b) (variação de  $E_{FD}$ ), quando o modelo de impedância constante é considerado aumenta o amortecimento das oscilações do sistema. Efeito oposto ocorre ao se considerar o modelo de potência constante, quando as oscilações do sistema tendem a ser amplificadas [14].

A fim de se verificar a eficiência do Método Trapezoidal Implícito na resolução das equações diferenciais, é mostrado na Figura (5.9) o resultado obtido considerando-se passos de integração de 0,02 e 0,08 segundos. Pode-se concluir que o aumento do passo de integração manteve o resultado aceitável sem ocorrer instabilidade numérica.

## 5.2. Sistema II

O segundo sistema no qual foram realizados testes com

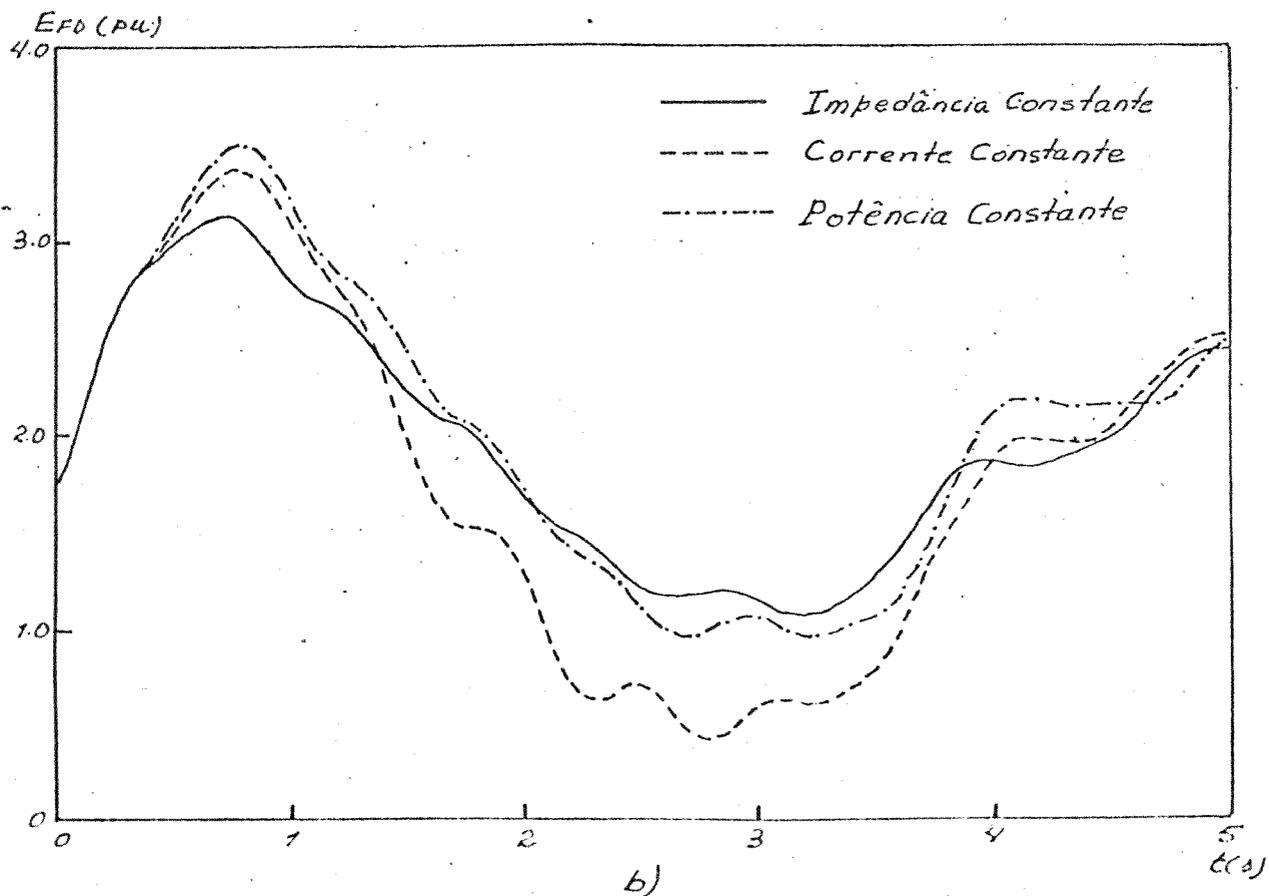
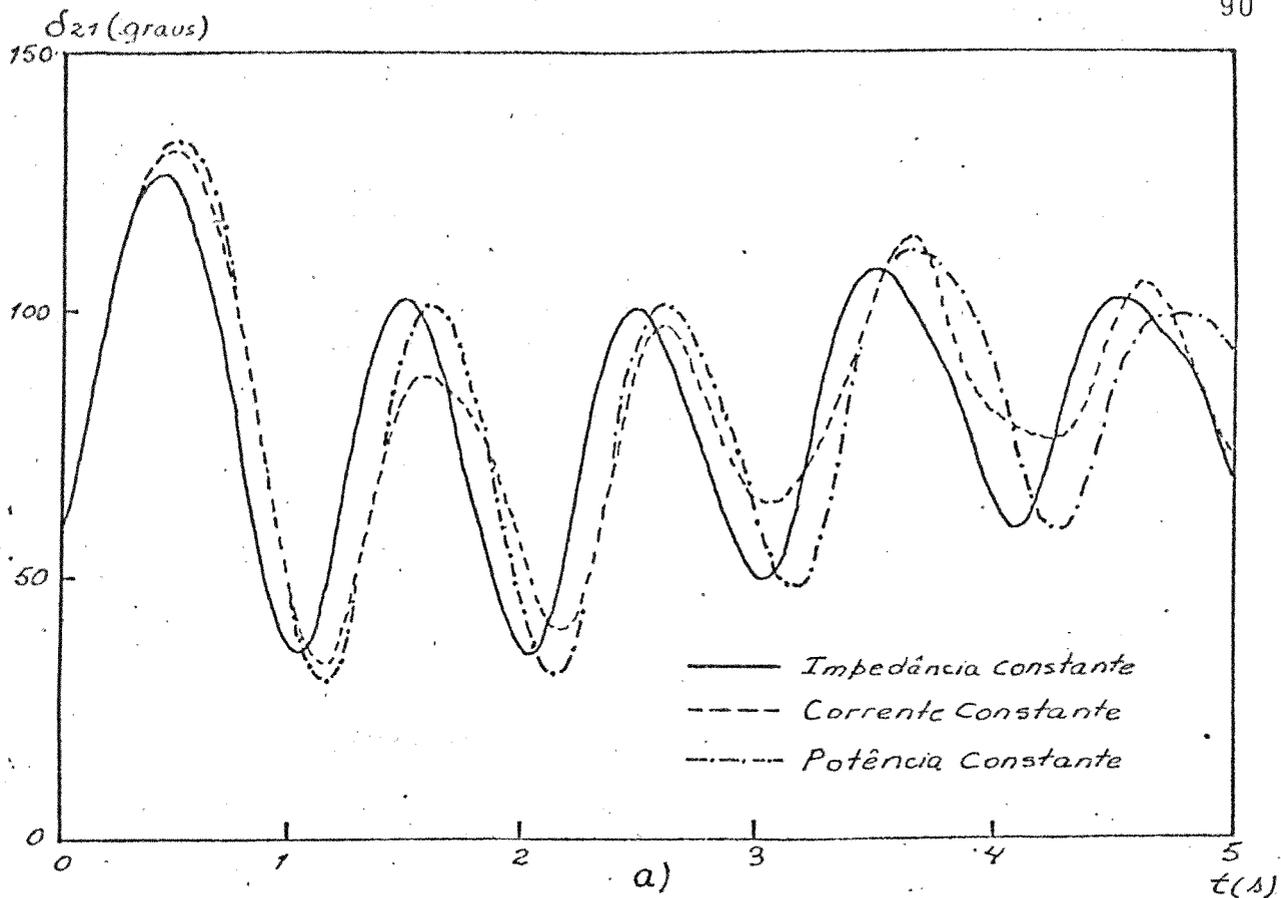


Figura 5.8 - a) e b) Resultados obtidos considerando-se diferentes modelos de carga.

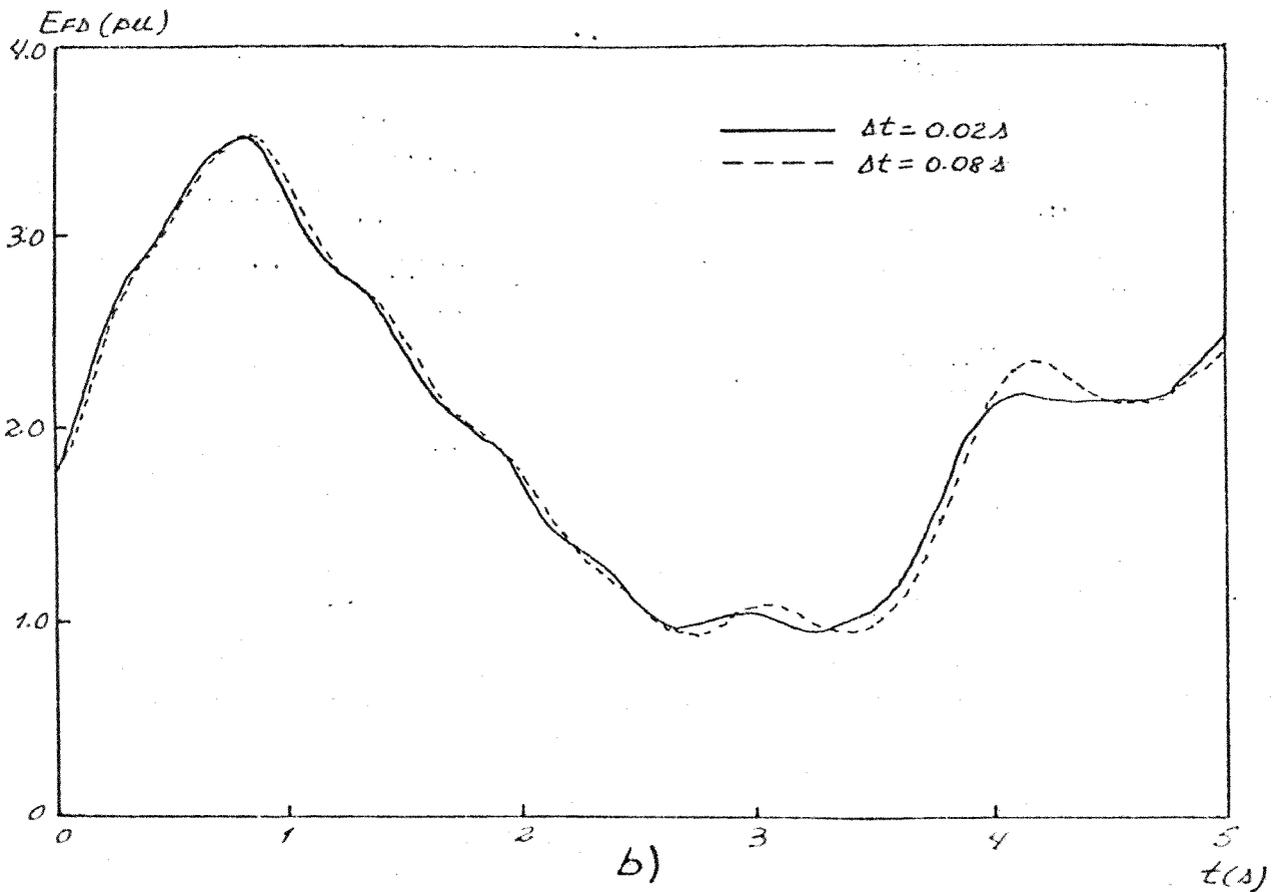
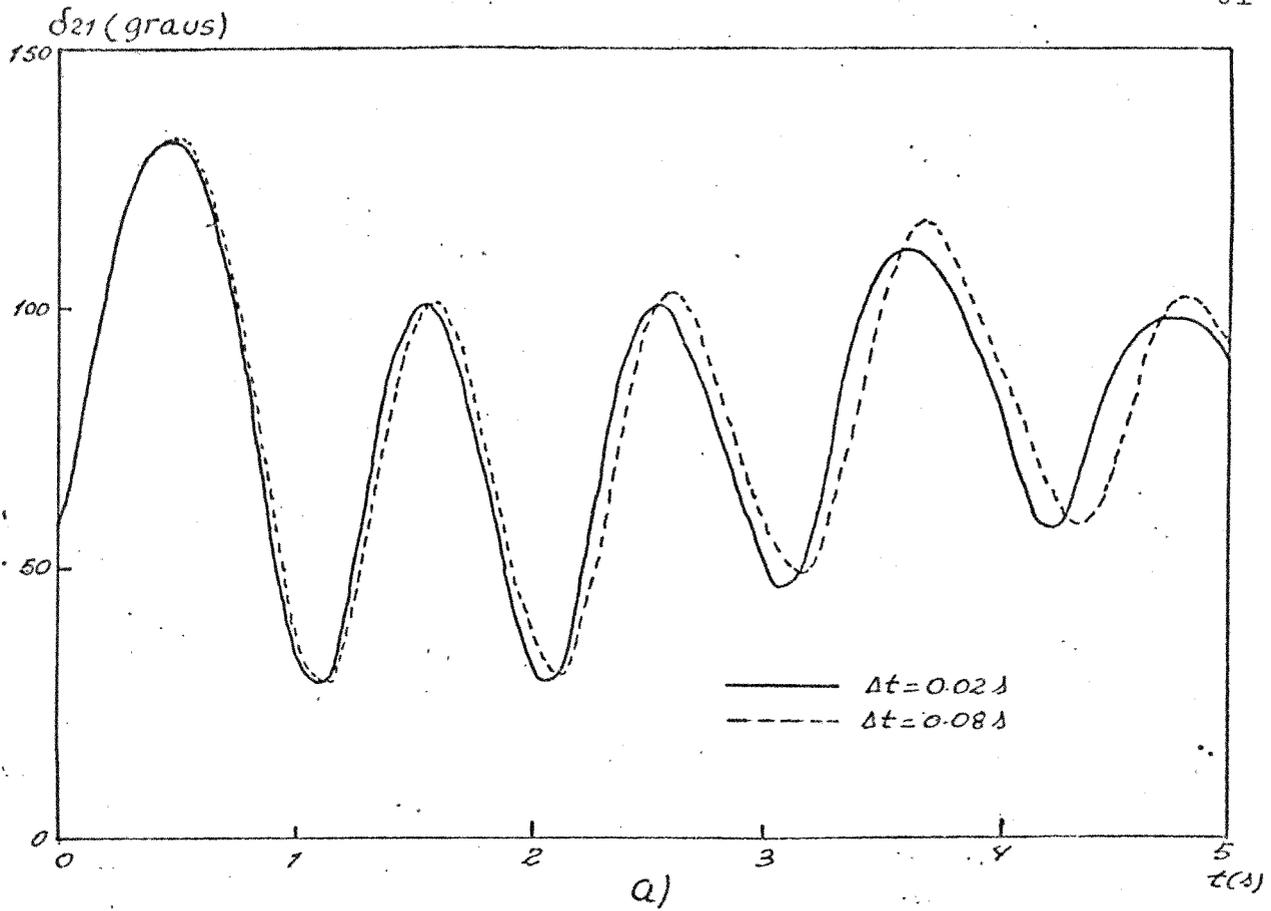


Figura 5.9 - a) e b) Desempenho do Programa para diferentes passos.

o Programa desenvolvido, é o sistema mostrado na Figura (5.10) que cobre as regiões Sul e Sudeste do Brasil. Este sistema é composto de 320 barras, 470 linhas e 44 geradores. A perturbação considerada é um curto-trifásico ocorrendo próximo ao gerador 54 (Capivara), com um tempo de eliminação do defeito de 0.06 segundos. Como no sistema anterior foram considerados dois casos, de acordo com a modelagem dos geradores.

#### CASO 1

Neste caso, o Modelo I (clássico) é adotado para todos os geradores. Na Figura (5.11) são mostradas as diferenças angulares entre os geradores 52, 54 e 60 para um tempo de simulação de 2 segundos. Pode-se concluir pelas Figura (5.11a) e (5.11b), que o sistema é estável para o caso considerado.

#### CASO 2

Neste caso, foi adotado o Modelo II para 25 geradores e o Modelo I para os restantes. Por falta de informações não foi considerado a saturação da excitatriz, na representação dos sistemas de excitação.

Como no caso anterior, são mostradas na Figura (5.12) as diferenças angulares entre os geradores 52, 54 e 60 para um tempo de simulação de 5 segundos, de onde se pode concluir que o sistema é estável para o caso em estudo.

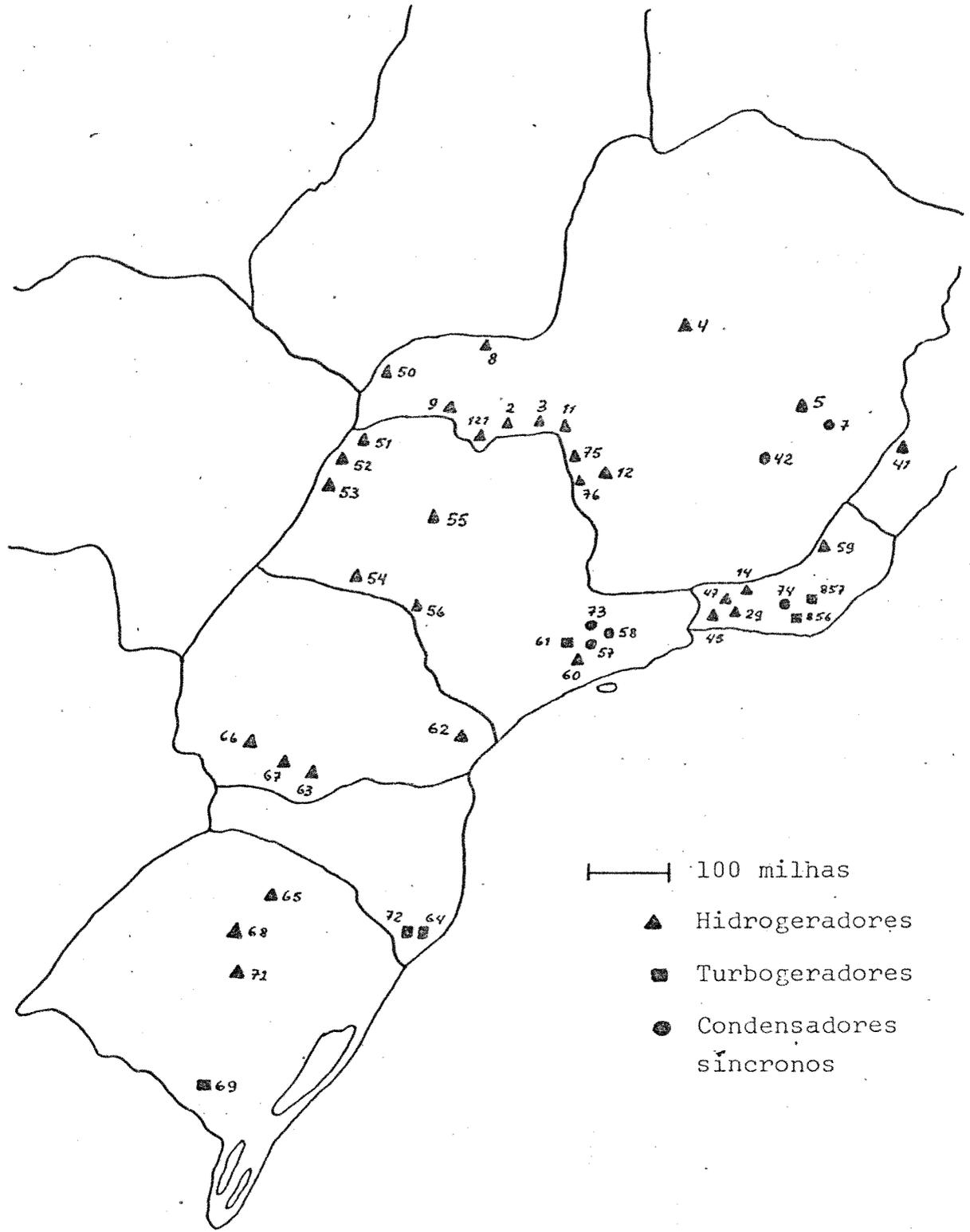


Figura 5.10 - Sistema II (Sul-Sudeste)

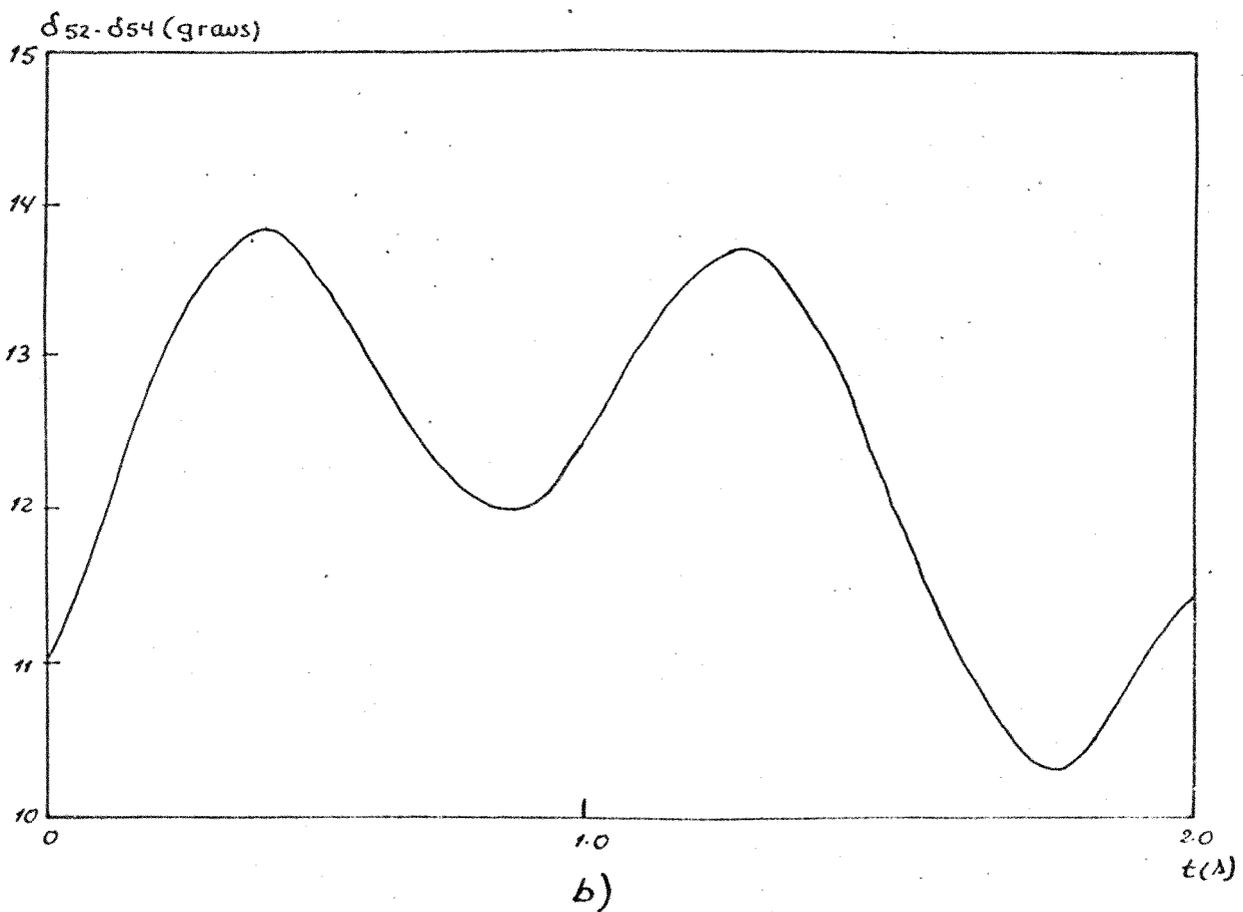
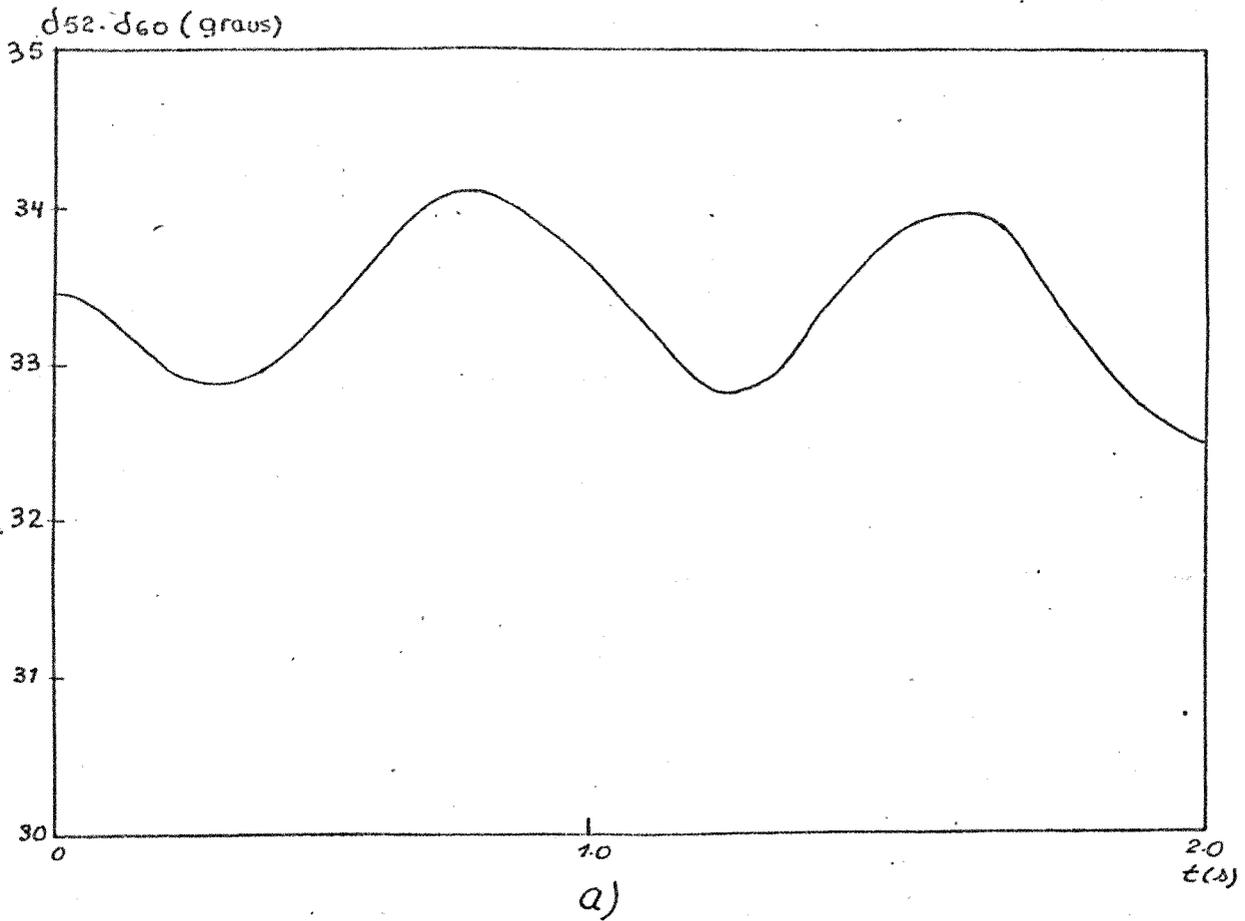


Figura 5.11 - a) e b) Resultados obtidos considerando-se  
Modelo I.

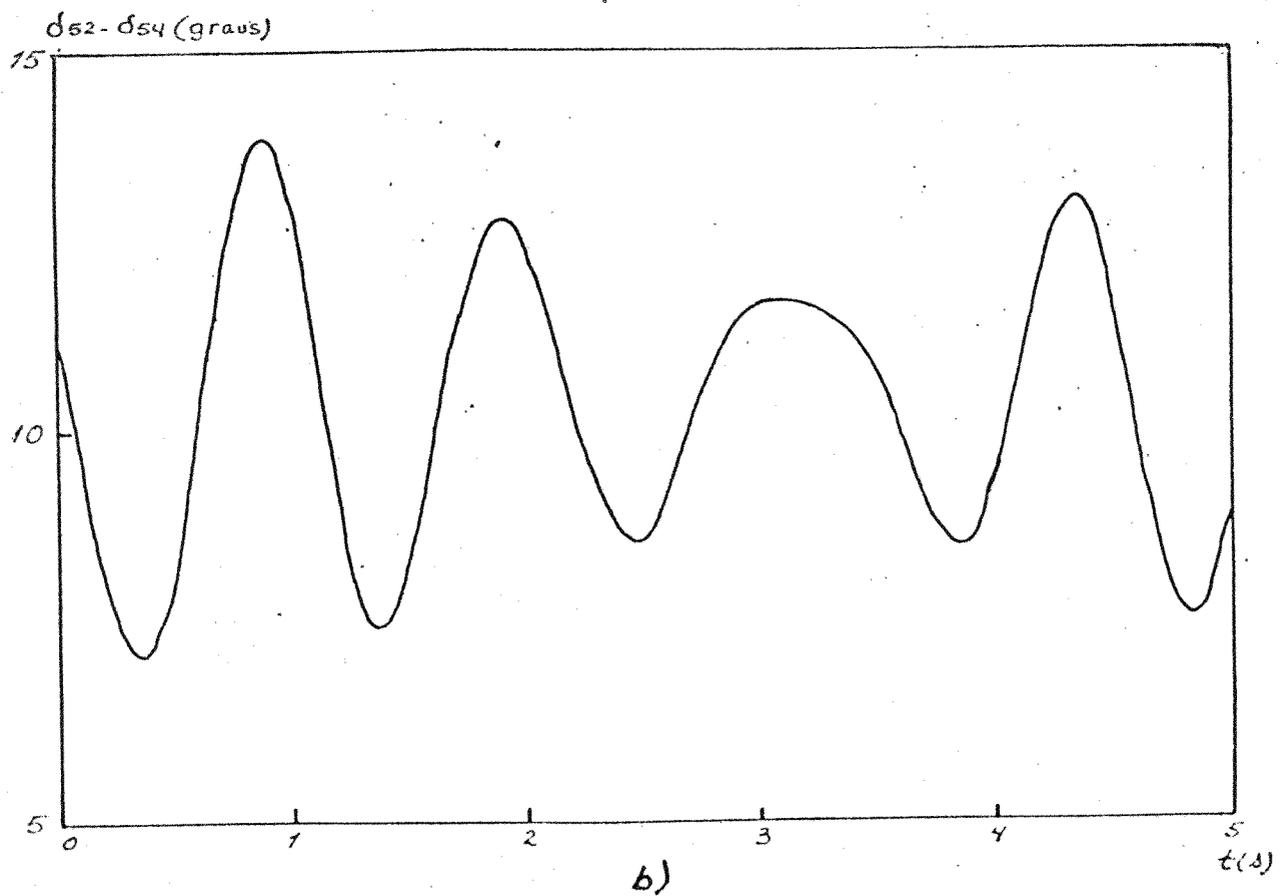
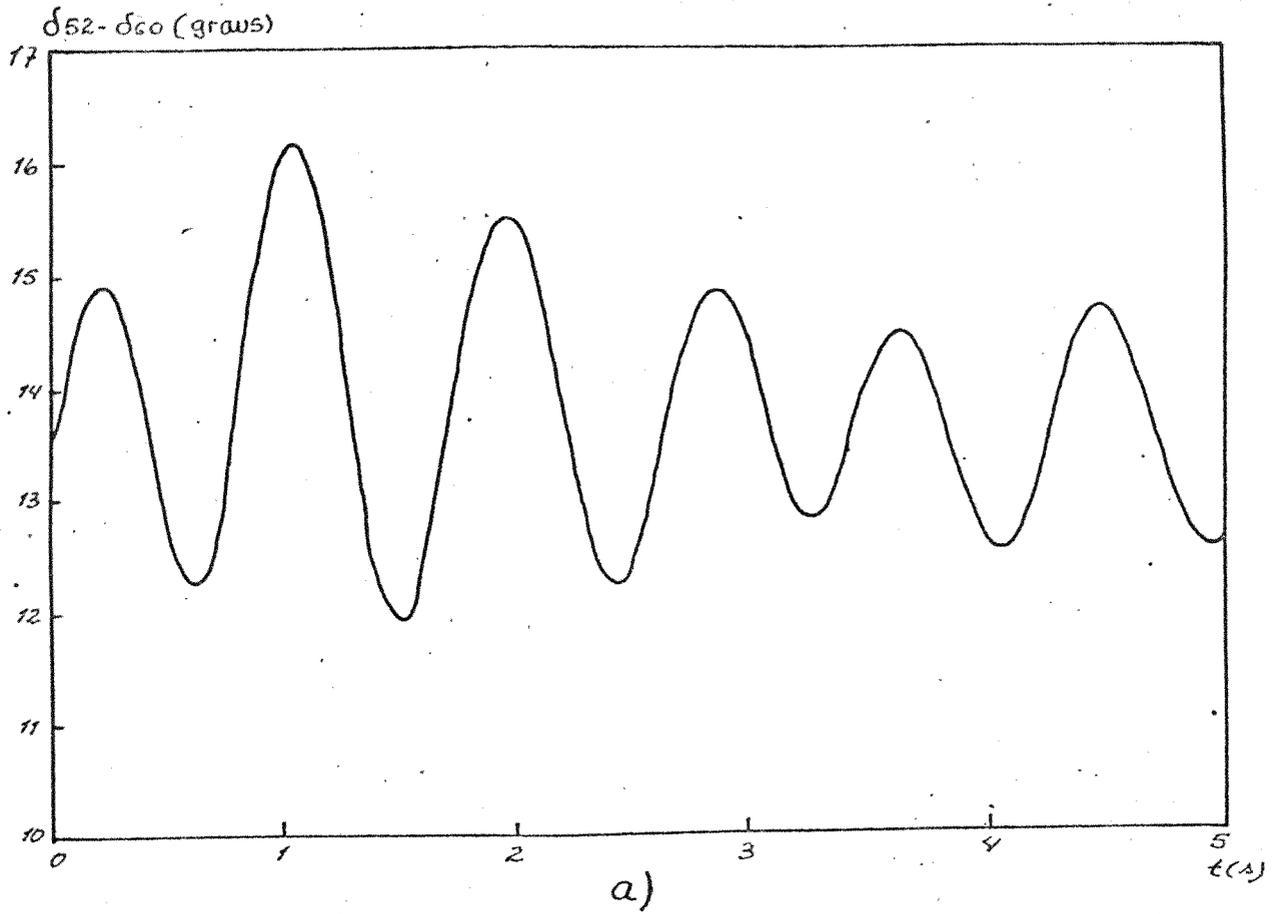


Figura 5.12 - a) e b) Resultados obtidos considerando-se Modelo II.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um Programa de Estabilidade Transitória utilizando-se o esquema de resolução Alternado dos sistemas de equações algébricas e diferenciais e o método Trapezoidal Implícito para a integração numérica.

O Programa comporta dois tipos de modelos dos geradores, Modelo I e Modelo II de acordo com a classificação dada pela referência [12]. Quando o modelo considerado para os geradores é o Modelo II, é incluída a representação do sistema de excitação dos mesmos sendo considerado na modelagem o sistema de excitação Tipo 1 dado pela referência .

Os resultados obtidos em dois sistemas testes, sendo um deles (sistema interligado Sul-Sudeste) de grande dimensão, demonstraram um bom desempenho do programa bem como a viabilidade da opção feita pelo esquema de resolução Alternado. A flexibilidade deste esquema foi demonstrada pela facilidade na implementação de certos detalhes críticos da modelagem dos geradores como, por exemplo, a inclusão do efeito da saliência e a representação do sistema de excitação.

A eficiência do método Trapezoidal Implícito utilizado na integração numérica foi comprovada pelos resultados obtidos, inclusive quando grandes passos de integração foram considerados. Além disso ele permite que detalhes como, por exemplo, os limites a que estão sujeitos a variável  $\sqrt{R}$  do sistema de excitação, sejam considerados de maneira eficiente.

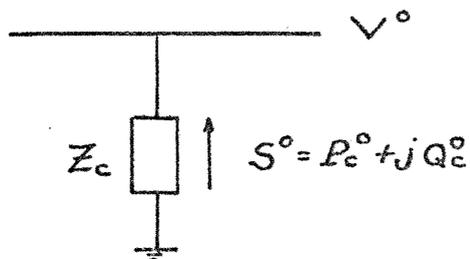
Em termos de desenvolvimentos futuros o programa é flexível para implementação de modelagens mais detalhadas, como:

- representação dos enrolamentos amortecedores;
- tipos diferentes de representação do sistema de excitação;
- representação do estabilizador de sistemas de potência.

Outro objetivo futuro será o desenvolvimento de um programa com um esquema de resolução Simultâneo dos sistemas de equações algébricas e diferenciais. Desta forma, será possível a comparação dos resultados obtidos com dois esquemas diferentes.

APÊNDICE AMODELAGEM DE CARGA POR IMPEDÂNCIA CONSTANTE

Considere-se uma barra com tensão  $V^{\circ}$  (caso básico), e carga  $P_c^{\circ} + jQ_c^{\circ}$  representada por uma impedância para a terra, como ilustrado na figura abaixo.



A potência  $S^{\circ}$  é dada por:

$$S^{\circ} = V^{\circ} I^{*} \quad (\text{A.1})$$

com

$$I = \frac{0 - V^{\circ}}{Z_c}$$

Logo;

$$S^{*\circ} = V^{*\circ} I = V^{*\circ} \left( \frac{0 - V^{\circ}}{Z_c} \right) \quad (\text{A.2})$$

e portanto

$$Z_c = - \frac{|V^o|^2}{S^*} \quad (A.3)$$

Assim, a admitância constante utilizada para representar a carga é dada por:

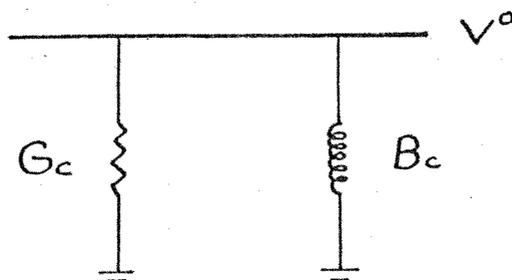
$$Y_c = - \frac{S^*}{|V^o|^2} = - \frac{P_c^o}{|V^o|^2} + j \frac{Q_c^o}{|V^o|^2} \quad (A.4)$$

sendo a condutância  $G_c$  e a susceptância  $B_c$  dadas por:

$$G_c = - \frac{P_c^o}{|V^o|^2} \quad (A.5)$$

$$B_c = \frac{Q_c^o}{|V^o|^2}$$

como ilustrado na figura seguinte:



APÊNDICE B

FORMA DAS EQUAÇÕES COM A SALIÊNCIA CONSIDERADA

B.1 - Equação de tensão do estator

Considere-se a equação (3.6), onde se desenvolvendo as operações indicadas, obtêm-se:

$$\begin{array}{|c|} \hline E'_{re} - V_{re} \\ \hline E'_{im} - V_{im} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline R_e + (X'_d - X'_q) \text{sen} \delta \text{cos} \delta & -X'_q \text{cos}^2 \delta - X'_d \text{sen}^2 \delta \\ \hline X'_d \text{cos}^2 \delta + X'_q \text{sen}^2 \delta & R_e + (X'_d - X'_q) \text{sen} \delta \text{cos} \delta \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline I_{re} \\ \hline I_{im} \\ \hline \end{array} = Z_e \cdot \begin{array}{|c|} \hline I_{re} \\ \hline I_{im} \\ \hline \end{array} \quad (B.1)$$

Desta forma, como se pode notar pela equação (B.1), se  $X'_d \neq X'_q$  a matriz impedância  $Z_e$  não é simétrica e portanto, a equação (B.1) não pode ser representada em uma forma complexa. A impedância  $Z_e$  é não-bilateral e função do ângulo  $\delta$ . No entanto, se  $X'_d = X'_q$  da equação (B.1) tem-se:

$$\begin{array}{|c|} \hline E'_{re} - V_{re} \\ \hline E'_{im} - V_{im} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline R_e & -X'_d \\ \hline X'_d & R_e \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline I_{re} \\ \hline I_{im} \\ \hline \end{array} = Z_e \cdot \begin{array}{|c|} \hline I_{re} \\ \hline I_{im} \\ \hline \end{array} \quad (B.2)$$

Desenvolvendo-se as operações indicadas, tem-se:

$$E'_{re} - V_{re} = R_e I_{re} - X'_d I'_{im} \quad (B.3)$$

$$E'_{im} - V_{im} = X'_d I_{re} + R_e I'_{im} \quad (B.4)$$

Multiplicando-se a equação (B.4) por  $j$  e adicionando-se (B.3), tem-se:

$$E'_{re} + jE'_{im} - (V_{re} + jV_{im}) = (R_e + jX'_d)(I_{re} + jI'_{im}) \quad (B.5)$$

onde se podem escrever as seguintes variáveis complexas, como sendo:

$$E' = E'_{re} + jE'_{im}$$

$$V = V_{re} + jV_{im} \quad (B.6)$$

$$I = I_{re} + jI'_{im}$$

$$Z_e = R_e + jX'_d$$

e portanto a equação (B.5) é escrita na seguinte forma complexa:

$$E' - V = Z_e I \quad (B.7)$$

onde  $Z_e$  passa a ser um número complexo em vez de uma matriz.

### B.2 - Forma expandida da equação matricial da rede

Quando a saliência da máquina é considerada, a equação (3.12),

$$\underline{I} = Y \underline{V}$$

deve ser escrita em uma forma expandida nas partes real e imaginária. Isto corresponde estruturalmente, que cada elemento da matriz  $Y^e$ , é substituído por um bloco real  $2 \times 2$  na matriz  $Y^e$ .

Considerando-se um sistema de  $N$  nós, a equação (3.13)

$$\underline{I}^e = Y^e \underline{V}^e$$

é escrita na forma:

$I_{re}^1$		$G_{11}$	$-B_{11}$	$G_{12}$	$-B_{12}$		$G_{1N}$	$-B_{1N}$	$V_{re}^1$
$I_{im}^1$		$B_{11}$	$G_{11}$	$B_{12}$	$G_{12}$		$B_{1N}$	$G_{1N}$	$V_{im}^1$
$I_{re}^2$		$G_{21}$	$-B_{21}$	$G_{22}$	$-B_{22}$		$G_{2N}$	$-B_{2N}$	$V_{re}^2$
$I_{im}^2$		$-B_{21}$	$G_{21}$	$B_{22}$	$G_{22}$		$B_{2N}$	$G_{2N}$	$V_{im}^2$
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮
$I_{re}^N$		$G_{N1}$	$-B_{N1}$	$G_{N2}$	$-B_{N2}$		$G_{NN}$	$-B_{NN}$	$V_{re}^N$
$I_{im}^N$		$B_{N1}$	$G_{N1}$	$B_{N2}$	$G_{N2}$		$B_{NN}$	$G_{NN}$	$V_{im}^N$

(B.8)

Nesta matriz cada componente  $K-l$  do sistema (transformadores, linhas, máquinas, etc.) são representados através de subsistemas do tipo:

$$\begin{array}{|c|} \hline I_{Kl}^{re} \\ \hline I_{Kl}^{im} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline R_{Kl} & -\bar{X}_{Kl} \\ \hline X_{Kl} & R_{Kl} \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline V_K^{re} - V_l^{re} \\ \hline V_K^{im} - V_l^{im} \\ \hline \end{array} \quad (B.9)$$

No caso de transformadores, linhas e máquinas onde a saliência é ignorada tem-se  $\bar{X}_{Kl} = X_{Kl}$ . A representação expandida (B.8) é obtida a partir de (B.9) e da primeira lei de Kirchoff, ou seja:

$$I_K^{re} = \sum_{l \in \Omega_K} I_{Kl}^{re} \quad ; \quad I_K^{im} = \sum_{l \in \Omega_K} I_{Kl}^{im}$$

onde  $\Omega_K$  é o conjunto de todos os nós vizinhos do nó  $K$  inclusive a terra.

APÊNDICE C

INCLUSÃO DA SALIÊNCIA NA MODELAGEM DA MÁQUINA

C.1 - Impedância  $Z_e$  aproximada

A fim de se poder representar a equação (3.6) na forma complexa e portanto, utilizar a equação (3.12) para a solução da rede, quando  $X'_d \neq X'_q$ , é feita a seguinte aproximação, tomando-se a média aritmética de  $X'_d$  e  $X'_q$ , para a impedância  $Z_e$ .

$$Z_e = R_e + j \frac{1}{2} (X'_d + X'_q) \quad (C.1)$$

Assim, a admitância  $Y_e$  é dada por:

$$Y_e = \frac{R_e - j \frac{1}{2} (X'_d + X'_q)}{R_e^2 + \frac{1}{4} (X_d'^2 + X_q'^2 + 2X'_d X'_q)} \quad (C.2)$$

Na referência [5] é sugerida a aproximação:

$$Y_e = \frac{R_e - j \frac{1}{2} (X'_d + X'_q)}{R_e^2 + X'_d X'_q} \quad (C.3)$$

que equivale a substituir a média aritmética de  $X'_d$  e  $X'_q$  que aparece no denominador de (C.3) pela média geométrica. Isto simplifica a expressão resultante e não afeta significativa-

mente os resultados.

### C.2 - Dedução da expressão (3.16)

De acordo com o circuito equivalente da máquina mostrado na Figura (3.5), onde o efeito da saliência  $\bar{e}$  é considerado, tem-se que:

$$I_{\text{saliência}} = I_t - Y_e E' + Y_e V = I_t - Y_e (E' - V) \quad (\text{C.4})$$

Substituindo-se a expressão (C.3) em (C.4) e considerando-se a corrente  $I_t$ , no sistema de referência  $d, q$  do rotor, obtêm-se:

$$I_{\text{saliência}} = (I_d + jI_q) e^{j\delta} - \frac{R_e (E' - V)}{R_e^2 + X_d' X_q'} + \frac{j \frac{1}{2} (X_d' + X_q') (E' - V)}{R_e^2 + X_d' X_q'} \quad (\text{C.5})$$

Substituindo-se em (C.6), para  $I_d$  e  $I_q$  as expressões dadas em (3.7), obtêm-se:

$$I_{\text{saliência}} = \frac{1}{R_e^2 + X_d' X_q'} \left[ \frac{1}{2} j (X_q' - X_d') \left[ (E_d' - jE_q') e^{-j\delta} - (V_d - jV_q) e^{-j\delta} \right] e^{j2\delta} \right] \quad (\text{C.6})$$

Como, de acordo com a transformação (3.4):

$$\begin{aligned} (E_d' - jE_q') e^{-j\delta} &= E'^* \\ (V_d - jV_q) e^{-j\delta} &= V^* \end{aligned} \quad (\text{C.7})$$

tem-se portanto:

$$I_{\text{saliência}} = j \frac{1}{2} \frac{X'_q - X'_d}{R_e^2 + X'_d X'_q} (E'^* - V^*) e^{j2\delta} \quad (\text{C.8})$$

APÊNDICE D

MÉTODO TRAPEZOIDAL IMPLÍCITO

D.1 - Equações Dinâmicas do Rotor

Integrando-se as equações (3.18) e (3.19) no intervalo  $t - \Delta t$  a  $t$ , pelo método Trapezoidal Implícito, obtêm-se:

$$\omega(t) - \omega(t - \Delta t) = \frac{[P_m - P_e(t)] + [P_m - P_e(t - \Delta t)]}{4H} \omega_s \Delta t \quad (D.1)$$

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

Substituindo-se (D.1) em (D.2), tem-se:

$$\delta(t) = -\frac{(\Delta t)^2 \omega_s}{8H} P_e(t) + \delta(t - \Delta t) + [\omega(t - \Delta t) - \omega_s] \Delta t + \frac{(\Delta t)^2 \omega_s}{8H} [2P_m - P_e(t - \Delta t)] \quad (D.3)$$

Definindo-se:

$$\alpha(t - \Delta t) = \delta(t - \Delta t) + [\omega(t - \Delta t) - \omega_s] \Delta t + \frac{(\Delta t)^2 \omega_s}{8H} [2P_m - P_e(t - \Delta t)] \quad (D.4)$$

na equação (D.3), obtêm-se:

$$\delta(t) = -\frac{(\Delta t)^2 \omega_s}{8H} P_e(t) + \alpha(t - \Delta t) \quad (D.5)$$

Da equação (D.2), tem-se para  $\omega(t)$ :

$$\omega(t) = \frac{2}{\Delta t} \left[ \delta(t) - \delta(t-\Delta t) \right] - \left[ \omega(t-\Delta t) - 2\omega_s \right] \quad (D.6)$$

## D.2 - Equações Diferenciais Elétricas do Rotor

Aplicando-se o método Trapezoidal Implícito, no intervalo  $t-\Delta t$  a  $t$  à equação (3.20), obtêm-se:

$$\begin{aligned} E'_q(t) - E'_q(t-\Delta t) = & -\frac{1}{T'_{d0}} \left[ \frac{E'_q(t) + E'_q(t-\Delta t)}{2} \right] \Delta t - \frac{X_d - X'_d}{T'_{d0}} \left[ \frac{I_d(t) + I_d(t-\Delta t)}{2} \right] \Delta t \\ & + \frac{1}{T'_{d0}} \left[ \frac{E_{FD}(t) + E_{FD}(t-\Delta t)}{2} \right] \end{aligned} \quad (D.7)$$

que resulta em:

$$\begin{aligned} E'_q(t) = & -\frac{\Delta t}{\Delta t + 2T'_{d0}} (X_d - X'_d) I_d(t) + E'_q(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{\Delta t + 2T'_{d0}} \left[ E_{FD}(t) + \right. \\ & \left. E_{FD}(t-\Delta t) - 2E'_q(t-\Delta t) - (X_d - X'_d) I_d(t-\Delta t) \right] \end{aligned} \quad (D.8)$$

Definindo-se na equação (D.8):

$$Q_d = \frac{\Delta t}{\Delta t + 2T'_{d0}}$$

e

$$F_q = Q_d \left[ E_{FD}(t-\Delta t) + E_{FD}(t) - 2E'_q(t-\Delta t) - (X_d - X'_d) I_d(t-\Delta t) \right]$$

obtem-se:

$$E'_q(t) = -a_d(X_d - X'_d)I_d(t) + F_q \quad (\text{D.9})$$

Analogamente, para a equação (3.21), tem-se:

$$E'_d(t) = a_q(X_q - X'_q)I_q(t) + F_d \quad (\text{D.10})$$

onde

$$F_d = E'_d(t - \Delta t) - a_q \left[ 2E'_d(t - \Delta t) + (X_q - X'_q)I_q(t - \Delta t) \right]$$

$$a_q = \frac{\Delta t}{\Delta t + 2T'_{q0}}$$

APÊNDICE E

SISTEMA DE EXCITAÇÃO

Neste apêndice será deduzida a expressão algébrica (4.14) que dá a saída  $E_{FD}(t)$  do sistema de excitação como uma função da entrada  $V_T(t)$ . Isto será feito através da algebrização das equações que constituem o modelo da excitatriz Tipo 1, utilizando-se o método Trapezoidal Implícito. Em seguida são calculados os limites dinâmicos a que está sujeito o valor calculado de  $E_{FD}(t)$ .

E.1 - Dedução da Expressão (4.14)

Seja a função de transferência da excitatriz Tipo 1 da da na Figura (3.7), onde o efeito da saturação é considerado linearizando-se a realimentação  $S_E E_{FD}$  em torno do ponto de solução no passo anterior  $t - \Delta t$ . O resultado desta linearização é uma equação na forma:

$$S_E E_{FD} = K_1 E_{FD} - K_2 \quad (E.1)$$

com  $K_1$  e  $K_2$  sendo conhecidos.

Desta maneira, a função de transferência da excitatriz fica dada por:

$$\frac{E_{FD}}{V_R - K_1 E_{FD} + K_2} = \frac{1}{K_E + S T_E} \quad (E.2)$$

que transformando para o domínio do tempo, tem-se:

$$\frac{d}{dt} E_{FD} = \frac{V_R}{T_E} - \left( \frac{K_E + K_1}{T_E} \right) E_{FD} + \frac{K_2}{T_E} \quad (E.3)$$

Aplicando-se o método Trapezoidal Implícito à equação (E.3) no intervalo  $t - \Delta t$  a  $t$ , obtêm-se:

$$E_{FD}(t) - E_{FD}(t - \Delta t) = \frac{\Delta t}{2} \left[ \frac{V_R(t) + V_R(t - \Delta t)}{2} \right] - \left[ \frac{K_E + K_1}{T_E} \right] \Delta t \quad (E.4)$$

$$\cdot \left[ \frac{E_{FD}(t) + E_{FD}(t - \Delta t)}{2} \right] + \frac{2K_2}{2T_E} \Delta t$$

e ainda,

$$\left[ \frac{2T_E}{\Delta t} + (K_E + K_1) \right] E_{FD}(t) = \left[ \frac{2T_E}{\Delta t} - K_E - K_1 \right] E_{FD}(t - \Delta t) + V_R(t - \Delta t) + 2K_2 + V_R(t) \quad (E.5)$$

onde, definindo-se

$$a_E = \frac{2T_E}{\Delta t} + K_E + K_1 \quad (E.6)$$

e

$$b_E = \left[ \frac{2T_E}{\Delta t} - K_E - K_1 \right] E_{FD}(t - \Delta t) + V_R(t - \Delta t) + 2K_2 \quad (E.7)$$

obtêm-se:

$$E_{FD}(t) = (b_E + V_R(t)) / a_E \quad (\text{E.8})$$

Sejam respectivamente, as funções de transferência correspondentes na Figura (3.7) ao filtro, malha de estabilização e regulador:

$$\frac{X_1}{V_T} = \frac{1}{1 + S T_R} \quad (\text{E.9})$$

$$\frac{X_2}{E_{FD}} = \frac{S K_F}{1 + S T_F} \quad (\text{E.10})$$

$$\frac{V_R}{V_{REF} - X_1 - X_2} = \frac{K_A}{1 + S T_A} \quad (\text{E.11})$$

Transformando para o domínio de tempo as equações (E.9), (E.10) e (E.11), obtêm-se:

$$\frac{d}{dt} X_1 = \frac{1}{T_R} (V_T - X_1) \quad (\text{E.12})$$

$$\frac{d}{dt} E_{FD} = \frac{X_2}{K_F} + \frac{T_F}{K_F} X_2 \quad (\text{E.13})$$

$$\frac{d}{dt} V_R = \frac{K_A}{T_A} (V_{REF} - X_1 - X_2) - \frac{V_R}{T_A} \quad (\text{E.14})$$

Aplicando-se às equações (E.12), (E.13) e (E.14), o método Trapezoidal Implícito no intervalo  $t-\Delta t$  a  $t$ , obtêm-se:

$$X_1(t) = \frac{1}{Q_R} \left[ V_T(t) + V_T(t-\Delta t) \right] + \left[ \frac{2T_R - \Delta t}{2T_R + \Delta t} \right] X_1(t-\Delta t) \quad (E.15)$$

$$X_2(t) = \left[ \frac{2K_F}{2T_F + \Delta t} \right] \left[ E_{FD}(t) - E_{FD}(t-\Delta t) \right] + \left[ \frac{2T_F - \Delta t}{2T_F + \Delta t} \right] X_2(t-\Delta t) \quad (E.16)$$

$$V_R(t) = \frac{K_A}{Q_A} \left[ 2V_{REF} - X_1(t) - X_1(t-\Delta t) - X_2(t) - X_2(t-\Delta t) \right] + \frac{2T_A - \Delta t}{2T_A + \Delta t} V_R(t-\Delta t) \quad (E.17)$$

onde

$$Q_R = \frac{2T_R}{\Delta t} + 1$$

$$Q_A = \frac{2T_A}{\Delta t} + 1$$

Substituindo-se as equações (E.15) e (E.16) em (E.17), obtêm-se:

$$V_R(t) = \frac{K_A}{Q_A} \left[ 2V_{REF} - \frac{1}{Q_R} V_T(t-\Delta t) - \frac{4T_R}{2T_R + \Delta t} X_1(t-\Delta t) + \frac{2K_F}{2T_F + \Delta t} E_{FD}(t-\Delta t) - \frac{4T_F}{2T_F + \Delta t} X_2(t-\Delta t) \right] - \frac{K_A}{Q_A Q_R} V_T(t) - \frac{2K_A K_F}{Q_A (2T_F + \Delta t)} E_{FD}(t) + \frac{2T_A - \Delta t}{2T_A + \Delta t} V_R(t-\Delta t) \quad (E.18)$$

Substituindo-se (E.18) em (E.8), chega-se a:

$$E_{FD}(t) = \frac{Q_A}{Q_A Q_E + \frac{2K_A K_F}{2T_F + \Delta t}} \left[ b_E + \frac{K_A}{Q_A} \left( 2V_{REF} - \frac{1}{Q_R} V_T(t-\Delta t) - \frac{4T_R}{2T_R + \Delta t} X_1(t-\Delta t) + \frac{2K_F}{2T_F + \Delta t} E_{FD}(t-\Delta t) - \frac{4T_F}{2T_F + \Delta t} X_2(t-\Delta t) \right) + \frac{2T_A - \Delta t}{2T_A + \Delta t} V_R(t-\Delta t) \right] - \frac{K_A / Q_R}{Q_A Q_E + K_F K_A / (T_F + \frac{\Delta t}{2})} V_T(t) \quad (E.19)$$

Definindo-se na equação (E.19);

$$E_0 = \frac{Q_A}{Q_A Q_E + \frac{2K_A K_F}{2T_F + \Delta t}} \left[ b_E + \frac{K_A}{Q_A} \left( 2V_{REF} - \frac{1}{Q_R} V_T(t-\Delta t) - \frac{4T_R}{2T_R + \Delta t} X_1(t-\Delta t) + \frac{2K_F}{2T_F + \Delta t} E_{FD}(t-\Delta t) - \frac{4T_F}{2T_F + \Delta t} X_2(t-\Delta t) \right) + \frac{2T_A - \Delta t}{2T_A + \Delta t} V_R(t-\Delta t) \right] \quad (E.20)$$

e

$$b = \frac{K_A / Q_R}{Q_A Q_E + K_F K_A / (T_F + \frac{\Delta t}{2})} \quad (E.21)$$

tem-se:

$$E_{FD}(t) = E_0 - b V_T(t) \quad (E.22)$$

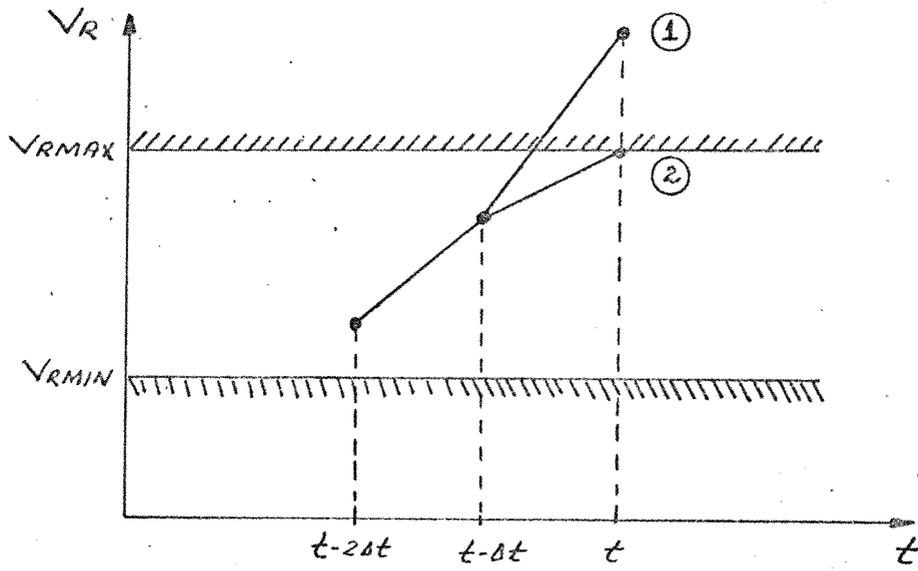
## E.2 - Limites $E_{HIGH}$ e $E_{LOW}$

Considere-se por exemplo, que ao término de um passo de integração, a variável de saída do regulador  $V_R$  tenha o seu limite superior  $V_{RMAX}$  violado, com o valor obtido correspondente ao ponto 1, conforme ilustrado na Figura (E.1a). Na Figura (E.1b) tem-se também para o ponto 1 o valor obtido de  $E_{FD}$  correspondente. Fixando-se simplesmente a variável  $V_R$  no limite  $V_{RMAX}$  (ponto 2 na Figura (E.1a)), tem-se que o valor de  $E_{FD}$  inicial para o passo de integração seguinte, não irá corresponder ao valor limite fixado de  $V_R$ , e sim ao valor violado. Como se pode notar pela equação (E.16), a variável  $X_2$  também não irá levar em conta o fato de  $V_R$  ter sido fixado no limite. Desta maneira, o efeito decorrente do fato de se fixar a variável  $V_R$  no limite irá se fazer sentir somente no próximo passo. Se passos grandes de integração são considerados, este procedimento não produzirá bons resultados.

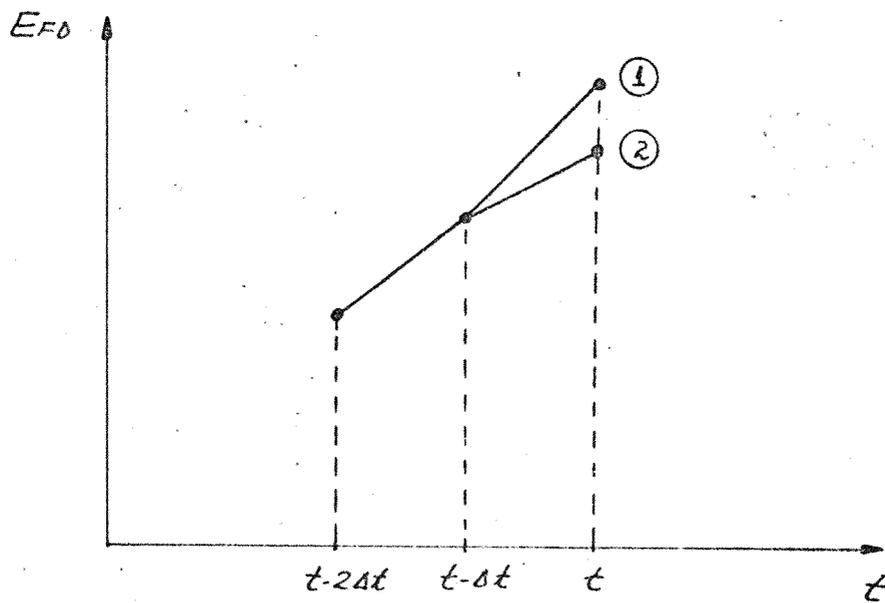
A alternativa adotada neste trabalho, consiste em se imporem limites à variável de saída da excitatriz  $E_{FD}$  sendo estes limites calculados de maneira tal que quando a variável  $V_R$  violar um dos seus limites, a variável  $E_{FD}$  é automaticamente fixada no valor correspondente. Isto corresponderia ao ponto 2 na Figura (E.1b), para o caso de ser violado o limite  $V_{RMAX}$ . Os limites impostos a variável  $E_{FD}$  são facilmente obtidos no início de cada passo de integração, através da equação (E.8):

$$E_{FD}(t) = (b_E + V_R(t)) / a_E \quad (E.23)$$

supondo-se que a variável  $V_R$  atinja seu limite superior ou



a)



b)

Figura E.1 - Violação do limite  $V_{RMAX}$  imposto a variável  $V_R$ .

inferior no final do passo. Desta maneira, de (E.8), se no final do passo  $V_R(t) = V_{RMAX}$  ou  $V_R(t) = V_{RMIN}$  os limites  $E_{HIGH}$  e  $E_{LOW}$  são definidos como sendo:

$$E_{HIGH} = (b_E + V_{RMAX}) / Q_E \quad (E.24)$$

$$E_{LOW} = (b_E + V_{RMIN}) / Q_E \quad (E.25)$$

Deve-se salientar que os limites  $E_{HIGH}$  e  $E_{LOW}$  são limites dinâmicos da excitatriz, sendo calculados no início de cada passo de integração.

### E.3 - Saturação da Excitatriz

Considere-se a curva de saturação da excitatriz  $S_E \times E_{FD}$  de acordo com a equação (E.1), linearizada com duas inclinações somente, uma para a região não-saturada e outra para a região saturada. Desta maneira, a curva  $S_E E_{FD} \times E_{FD}$  tem a forma mostrada na Figura (E.2), onde para a região não saturada

$$S_E E_{FD} = 0 \quad (E.26)$$

e para a região saturada

$$S_E E_{FD} = K_1 E_{FD} - K_2 \quad (E.27)$$

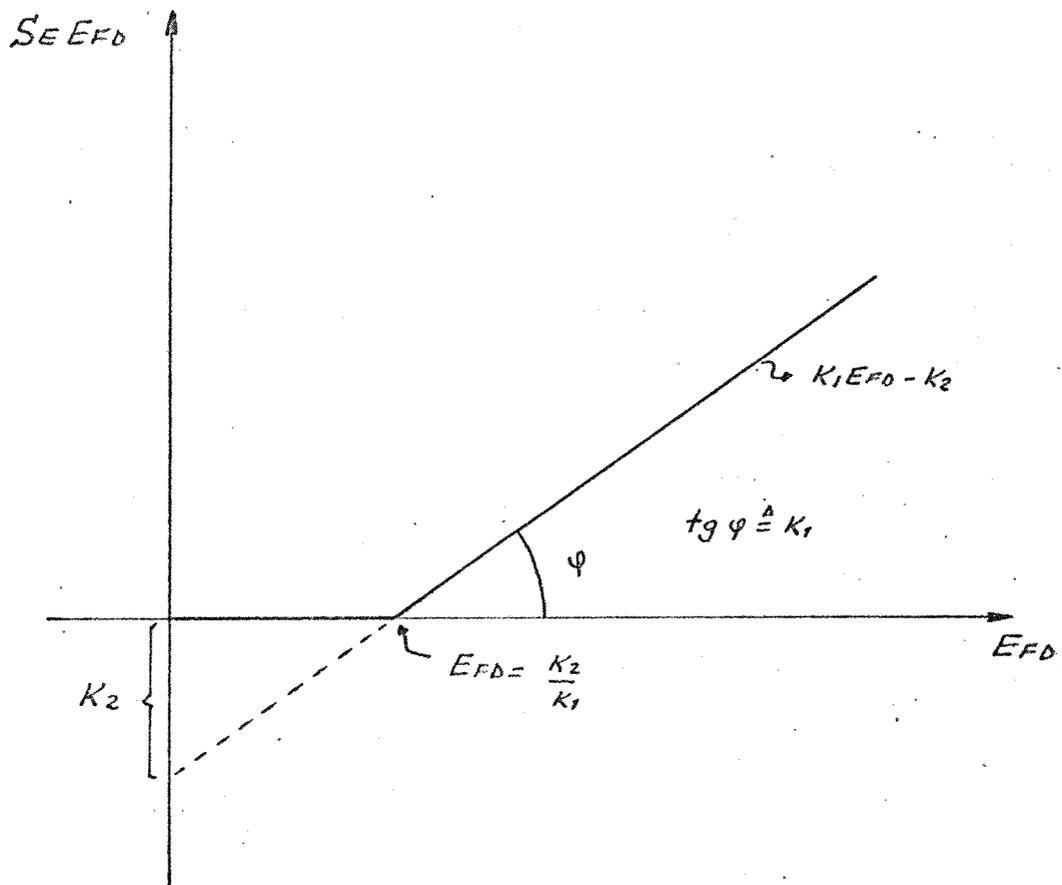


Figura E.2 - Curva  $S_{E_{FD}} \times E_{FD}$  linearizada por partes.

O valor de  $K_1$  é igual numericamente ao coeficiente angular da reta dada pela equação (E.27) e  $K_2$  sendo o valor obtido no eixo de ordenadas quando a reta encontra este mesmo eixo, como ilustrado na Figura (E.2). Tendo-se os valores de  $S_{EMAX}$ ,  $S_{E.75}$ ,  $E_{FDMAX}$  e  $E_{FD.75}$ , como dados de entrada do programa, tem-se pela equação (E.27) que:

$$S_{EMAX} \cdot E_{FDMAX} = K_1 E_{FDMAX} - K_2 \quad (E.28)$$

$$S_{E.75} \cdot E_{FD.75} = K_1 E_{FD.75} - K_2 \quad (E.29)$$

Portanto, de (E.28) e (E.29)  $K_1$  e  $K_2$  são determinados como sendo:

$$K_1 = S_{EMAX} E_{FDMAX} + \left[ \frac{S_{EMAX} - S_{E.75}}{E_{FDMAX} - E_{FD.75}} \right] E_{FDMAX} E_{FD.75} \quad (E.30)$$

$$K_2 = \left[ \frac{S_{EMAX} - S_{E.75}}{E_{FDMAX} - E_{FD.75}} \right] E_{FDMAX} E_{FD.75} \quad (E.31)$$

Como mostrado na Figura (E.2); no ponto em que a reta  $K_1 E_{FD} - K_2$  encontra o eixo de abscissa, tem-se:

$$E_{FD} = \frac{K_2}{K_1}$$

valor este, utilizado para se saber que região da curva de saturação deve ser considerada durante a simulação. Ou seja:

$$S_E E_{FD} = 0 \quad , \quad \text{para} \quad E_{FD} \leq \frac{K_2}{K_1}$$

e

$$S_E E_{FD} = K_1 E_{FD} - K_2 \quad , \quad \text{para} \quad E_{FD} > \frac{K_2}{K_1}$$

#### E.4 - Constante $K_E$ da função de transferência da excitatriz

Considere-se na Figura (3.7), o bloco representativo da excitatriz. Supondo-se condições de regime permanente com a saída do regulador  $V_R$  igual a zero, tem-se:

$$- \frac{S_E E_{FD}}{K_E} = E_{FD} \quad (E.32)$$

e portanto

$$K_E = - S_E \quad (E.33)$$

Desta forma,  $K_E$  é considerado como sendo igual em magnitude, a função de saturação para o valor inicial de  $E_{FD}$ , ou seja:

$$K_E = - S_E (E_{FD}(0)) \quad (E.34)$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- |1| KIMBAKK, E.W. Introduction to problems of power system stability. IEEE Tutorial Publication. 70M62 - PWR, p. 6-10, May 1970.
- |2| STOTT, B. Power system dynamic response calculations. Proc. IEEE, V. 67: 219-241, Feb. 1979.
- |3| BOEING Computer Services. Power system dynamic analysis phase I. EPRI EL-484 Project 670-1, Final Report, July 1977.
- |4| CONTE, S.D. Elementos de análise numérica. Porto Alegre, Editora Globo, 1975.
- |5| DOMMEL, H.W. & SATO N. Fast transient stability solutions. AIEE Trans. Power Apparatus Systems. V. 91: 1643-1650, July/Aug. 1972.
- |6| MONTICELLI, A., da COSTA, V.F. & FRANÇA, A.L.M. Modelagem de máquinas síncronas no estudo de estabilidade transitória. Publicação FEC-22/81, UNICAMP, Campinas, Novembro, 1980.
- |7| de MELLO, F.P. Power system dynamics-overview. Symposium on Adequacy and Philosophy of Modeling: Dynamic System Performance. IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting, 1975.

- [8] MONTICELLI, A.; DECKMANN, S.; GARCIA, A. & STOTT, B. Real-time external equivalents for static security analysis. AIEE Trans. Power Apparatus Systems. V. 98: 498-508, Mar/Apr. 1979.
- [9] IEEE COMMITTEE REPORT. Excitation system models for power system stability studies. AIEE Trans. Power Apparatus Systems. V. 100: 494-509, Feb. 1981.
- [10] IEEE COMMITTEE REPORT. Computer representation of excitation systems. AIEE Trans. Power Apparatus Systems. V. 87:1460-1468, June 1968.
- [11] KIMBARK, E.W. Power system stability: synchronous machines. New York, Dower Publications, Inc., 1968, Cap. 8, p. 137-213.
- [12] YOUNG, C.C. The synchronous machine. IEEE Tutorial Publication. 70M62-PWR, p. 11-24, May 1970.
- [13] ARIZONA State University Tempe. Midterm Simulation of Electric Power Systems. EPRI EL-596 Project 745, Final Report, June 1979.
- [14] McCrackin, F.G. & Schmus, W.R. The representation of system load in stability studies. IEEE Tutorial Publication. 70M62-PWR, p. 41-46, May 1970.