

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RESSONÂNCIA SUBSÍNCRONA
DETERMINAÇÃO DE MODOS RESSONANTES
EM EIXOS DE TURBOGERADORES

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

JORGE JOHNNY ROCHA ECHEVERRIA


FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 1985.

RESSONÂNCIA SUBSÍNCRONA
DETERMINAÇÃO DE MODOS RESSONANTES
EM EIXOS DE TURBOGERADORES

JORGE JOHNNY ROCHA ECHEVERRIA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA, ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.

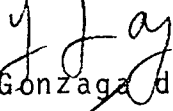

Prof. Cornelio Celso de Brasil Camargo, M.Sc.
Orientador



Prof. Antonio Jose Alves Simoes Costa, Ph.D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA


Prof. Cornelio Celso de Brasil Camargo, M.Sc.


Prof. Renato Carlson, Dr. Ing.


Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.


Prof. Edgar Pereira, Ph.D.

À meus pais

Victoriano e Peregrina

À minha esposa

Betina

À meus filhos

Pablo e Alejandro

AGRADECIMENTO

Ao Prof. C.Celso de Brasil Camargo (M.Sc), da UFSC, por sua amizade e pela orientação durante o decorrer desta pesquisa.

Ao prof. Edgar Pereira (Dr), da UFRGS, por sua efetiva contribuição para que esta investigação fosse realizada.

Ao Prof. Samir N.Y.Gerges (Dr), da UFSC, pelos seus preciosos ensinamentos concernentes a vibrações.

Ao Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca (Dr), da UFSC, que dispos-se a discutir esta pesquisa durante a sua elaboração e a analisar os originais.

Ao Prof. Renato Carlson (Dr), da UFSC, que aceitou participar do julgamento da validade desta pesquisa.

Ao Prof. Juarez Sagebin (M.Sc.), da PUC-RS, por ter oportunizado o emprego do micro-computador e por sua disponibilidade em discutir a teoria da modulação.

Ao acadêmico Alexandre Peña pela valiosa assessoria no que se refere a operação do Maxxi.

Aos colegas do Departamento de Eletrotécnica da PUC-RS, pelo incentivo e apoio durante a realização deste trabalho.

A Eletrosul, Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A., por ter colocado suas instalações a disposição e permitido utilizar seus recursos computacionais.

A todos aqueles que de uma forma ou outra contribuíram para que este empreendimento pudesse ser realizado.

S U M Á R I O

	Página
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Histórico do Fenômeno.....	2
1.2 - Conclusão.....	7
CAPÍTULO 2 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	8
2.1 - Ressonância no Sistema Elétrico.....	8
2.2 - Ressonância no Sistema Mecânico.....	10
2.3 - A Interação Torcional Eletromecânica.....	10
2.4 - A Ressonância Torcional Subsíncrona (SSR).....	15
2.4.1 - Perigo da SSR.....	17
2.4.2 - Perdas Econômicas Conseqüentes a um Incidente de SSR.....	17
2.4.3 - Causas dos Incidentes de SSR.....	18
2.4.4 - O Mecanismo da SSR.....	18
2.5 - Os Regimes da SSR.....	19
2.6 - SSR nas Centrais Hidráulicas.....	20
2.7 - Alternativas para a Compensação-Série.....	21
2.8 - Medidas de Proteção da SSR.....	22
2.9 - Conclusão.....	23
CAPÍTULO 3 - MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA ELETROMECAÂNICO..	24
3.1 - Modelagem do Eixo.....	26
3.2 - Modelagem do Alternador.....	29
3.3 - Modelagem da Linha de Transmissão.....	35
3.4 - Associação dos Modelos do Alternador e da Rede.....	37
3.5 - Associação dos Sistemas Elétrico e Mecânico.....	38
3.6 - Simulações Numéricas.....	41
3.6.1 - Normalização das equações.....	42

	Página
3.6.2 - Simulação Dinâmica.....	44
3.6.3 - Simulação Transitória.....	46
3.7 - Conclusão.....	47
CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO A UM CASO BASE E ANÁLISE.....	48
4.1 - Simulação Dinâmica.....	50
4.2 - Simulação Transitória.....	52
4.3 - Equipamento Utilizado.....	52
4.4 - Análise dos Resultados.....	53
4.5 - Conclusão.....	55
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	63
5.1 - Conclusões.....	63
5.2 - Sugestões.....	63
5.3 - Utilização dos resultados obtidos.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
ANEXOS.....	68

SIMBOLOGIA

f_{er}	- frequência elétrica de ressonância
f_{rm}	- frequência de ressonância mecânica
f_s	- frequência da rede elétrica
X_c	- reatância capacitiva
X_L	- reatância indutiva
X_g	- reatância subtransitória
HP	- turbina de alta pressão
IP	- turbina de pressão intermediária
LPA	- turbina de baixa pressão A
LPB	- turbina de baixa pressão B
GEN	- gerador
EXC	- excitatriz
θ	- deslocamento angular
J	- constante de inércia
D	- coeficiente de amortecimento
K	- coeficiente de elasticidade
ΔT	- torque acelerante
T_m	- torque mecânico
T_e	- torque elétrico
ψ	- fluxo no estator
W	- fluxo no rotor
r	- resistência
S	- escorregamento
ω	- velocidade angular
δ	- ângulo de carga

LISTAS DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 - Sistema eletromecânico típico	11
Figura 2.2 - Efeito do motor de indução (auto amortecido) ...	13
Figura 2.3 - Efeito de gerador de indução	14
Figura 2.4 - Modelo elementar do gerador de indução	15
Figura 2.5 - Característica típica da fadiga do eixo	20
Figura 3.1 - Sistema eletromecânico (a) e modelo mecânico do eixo do turbogerador (b)	25
Figura 3.2 - Máquina síncrona de dois polos	29
Figura 3.3 - Distribuição espacial dos enrolamentos e circuito equivalente do alternador	31
Figura 3.4 - Linha de transmissão com compensação	35
Figura 4.1 - Modelo para estudos de SSR	48
Figura 4.2 - Deformações modais	51
Figura 4.3 - Frequência de ressonância da linha da linha de transmissão em função da percentagem de compensação	56
Figura 4.4 - Transformada de Fourier da corrente da fase A do gerador	57
Figura 4.5 - Transformada de Fourier da tensão sobre o capa- citor da fase A	58
Figura 4.6 - Torque elétrico em função do tempo	59
Figura 4.7 - Torque elétrico em função da frequência	60
Figura 4.8 - Torque mecânico GEN-EXC no domínio do tempo	61
Figura 4.9 - Torque mecânico GEN-EXC no domínio da frequência	62

RESUMO

~~Este trabalho tem por objetivo apresentar~~ ^o fenômeno e o mecanismo da ressonância subsíncrona, ~~bem como expor~~ ^a modelagem e simulação de um sistema eletromecânico que permita verificar, tanto a manifestação da interação torcional eletromecânica, de inergia, como as frequências naturais dominantes, de forma a se verificar a adequação do emprego de capacitores série em sistemas que possuam turbogeradores.

A modelagem e a simulação foram feitas para um turbogenerador de 892,4 MVA e uma linha de transmissão de 500 kV com compensação série.

Estuda-se o fenômeno através da simulação de um curto-circuito trifásico envolvendo as fases e a terra por intermédio de uma reatância de falta.

O processo de simulação transitória, tanto no domínio do tempo como no da frequência, permitiu a confirmação dos modos de ressonância torcional, obtidos através de uma simulação dinâmica.

Outrossim, a simulação transitória no domínio da frequência facilita a formação de um conceito e a compreensão do fenômeno da ressonância subsíncrona.

ABSTRACT

The purpose of this study is to present the phenomena and the way subsynchronous resonance works, as well as to show the modeling and the simulation of an electromechanical system that allows verifying not only the torsional-electromechanical energy interaction as well as the dominant natural frequencies, so that the usefulness of the employment of series capacitors in turbine-generator systems can be verified.

Modeling and simulation were made for a turbine generator of 892,4 MVA and a 500 kV transmission line with series compensation.

The phenomena is studied by means of a three phase short circuit simulation, involving the phases and ground through a fault reactance.

The transient simulation process, either in time or frequency domain led to the confirmation of the torsional resonance modes obtained through a dynamical simulation.

The transient simulation in the frequency domain allows the creation of a concept and the understanding of the subsynchronous resonance phenomena.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com o crescimento dos sistemas de transmissão e o surgimento de interligações entre sistemas, fez-se necessária a utilização de linhas de transmissão cada vez mais extensas. Como consequência, as reatâncias indutivas de tais linhas cresceram consideravelmente. Então, de forma a transmitir mais potência pensou-se em diminuir tais reatâncias, mediante a utilização da técnica de compensar os reativos indutivos com os reativos capacitivos através do uso de capacitores em série com a linha de transmissão, técnica esta mais conhecida como "compensação-série".

O seu uso se difundiu rapidamente devido às suas vantagens econômicas; seus benefícios eram de reconhecimento geral e até fazia parte integrante dos programas de expansão de redes de várias empresas.

Porém, longe estavam os peritos de imaginar as consequências que esta nova técnica traria consigo.

Isto ficou claro quando aconteceram duas ocorrências na estação geradora de Mohave, nos EUA, com sérias consequências para os eixos dos turbogeradores (TG's) envolvidos. A primeira no dia 9 de dezembro de 1970 e a segunda no dia 26 de outubro de 1971. Como posteriormente se demonstrou, ambos os incidentes foram resultados de "oscilações torcionais auto-excitadas" do eixo do TG, causadas por um acoplamento bilateral instável entre a compensação-série do sistema elétrico e o sistema mecânico do eixo do TG; fenômeno este que se popularizou com o nome de ressonância subsíncrona e mais conhecido pela sigla SSR (SSR = Subsynchronous resonance).

A partir destes acontecimentos, estudiosos de diferentes países têm dado especial atenção à investigação da SSR, estabelecendo critérios e medidas de segurança, que permitam utilizar a compensação-série sem riscos para o sistema.

No Brasil, seguindo o curso natural de expansão de um sistema de geração e transmissão de energia elétrica, a utilização da técnica de compensação-série vem se tornando, cada vez mais, uma necessidade real, haja visto o seu uso no sistema de 750 kV, CA, de Itaipū.

É frente a esta realidade, que a presente investigação tem por objetivo contribuir à compreensão, modelagem e avaliação da SSR.

Com esta intenção é que no capítulo 1 faz-se uma revisão bibliográfica e histórica da origem do fenômeno e sua manifestação em diferentes países. Apresenta-se no capítulo 2, uma exposição objetivando transmitir os conhecimentos fundamentais sobre a origem e o mecanismo da SSR. Já no capítulo 3, fala-se sobre os métodos de estudo do fenômeno que, no capítulo 4, terão aplicação a um caso exemplo. Finalmente, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões obtidas no curso da elaboração desta pesquisa e recomendam-se futuras investigações em torno do fenômeno em questão.

1.1 - Histórico do fenômeno

O sistema físico associado ao eixo de TG's consiste de uma série de massas girantes, acopladas entre si, representando uma estrutura elástica complexa. Em TG's convencionais, esta estrutura pode exceder os 50 m de comprimento e várias toneladas de peso. Impactos torcionais podem excitar, torques oscilatórios nestas estruturas e, devido à falta de um amortecimento torcional signifi-

cativo, estas oscilações mecânicas decaem de forma relativamente lenta. Podem, também, ocorrer impactos torcionais capazes de excitar algumas das frequências naturais do eixo, como consequência de variações no torque do eletromagnético do gerador. Tais torques têm muitos componentes, entre elas a unidirecional, o decaimento exponencial e as oscilações do torque que vão, desde frequências subsíncronas, até múltiplos da frequência da rede. Ainda são possíveis se desenvolverem amplificações de torque, devido a ressonância entre frequências oscilatórias do torque elétrico, e as frequências oscilatórias do torque elétrico, e as frequências naturais torcionais do eixo; tal coincidência de frequências (ressonância torcional) é rara mas extremamente perigosa. {1,2,3,4}

O principal mecanismo de excitação torcional deve-se a variações bruscas da corrente, como ao que podem ocorrer durante falhas, chaveamento de linhas de transmissão, rejeições de carga, sincronizações mal executadas, limpeza automática de falhas e religamentos automáticos. O intervalo de tempo entre impactos repetitivos, tais como limpeza de falhas e religamentos automáticos, são de importância capital, pois sob condições adversas tais impactos sucessivos podem reforçar significativamente a oscilação torcional inicial.

Por décadas, os TG's foram projetados para resistir a curtos circuitos nos seus terminais, de acordo com padrões normalizados pelas recomendações da IEC 34-3. Este critério também foi aplicado para o projeto dos acoplamentos e eixos, não só do gerador, mas também das turbinas a ele associadas {4}.

O rápido aumento da capacidade das centrais de geração, no decorrer da década passada, resultou num grande crescimento, tan-

to nos momentos de inércia das turbinas, como nas reatâncias transitórias dos geradores. Ao mesmo tempo, a capacidade de curto circuito da rede de transmissão elétrica cresceu sensivelmente, devido a interconecções cada vez mais requeridas pela expansão do sistema.

No início da década de 70, compreendeu-se que a combinação de grandes unidades geradoras, sistemas de transmissão de extra-alta tensão (com algumas linhas saindo de centrais de potência), e redes elétricas malhadas, fizeram com que alguns distúrbios elétricos fossem capazes de infligir esforços torcionais mais severos que o curto circuito nos terminais da máquina, sendo esta até então projetada para suportar este último distúrbio, por critério.

A visão completa do fenômeno só foi possível com a ajuda da moderna tecnologia de computadores, que permitiu análises precisas da complexa interação instantânea entre os sistemas elétrico e o mecânico dos TG's interconectados, sob condições de distúrbios transitórios. Além disso, o progresso feito na pesquisa de materiais e técnicas de cálculo de esforços, considerando esforços cíclicos aplicados às secções dos eixos, proveram a base para a avaliação da fadiga do material ou a perda de vida do eixo como resultado de qualquer incidente operante.

Incidentes severos, em diferentes países, levaram a investigações das causas de excitações torcionais em TG's e à análise dos efeitos das oscilações estimuladas no eixo e acoplamentos da máquina. Mais conhecidas nos EUA são as duas falhas de eixo ocorridas na estação de Mohave, em Nevada, entre 1970 e 1971. Estas falhas foram causadas por SSR. Estes foram os últimos incidentes com colapso de eixo recentes nos EUA que podem ser diretamente atribuídos à interação entre a unidade geradora e a rede elétrica. É

muito importante enfatizar que estas falhas foram causadas por oscilações sustentadas devido a SSR entre o sistema do eixo do TG e a compensação-série do sistema de transmissão. Por causa do fenômeno da ressonância, torques transitórios que excediam o limite de fadiga do eixo, foram sustentados, por bastante tempo, produzindo assim danos ao mesmo^{5}.

Estas falhas chamaram a atenção das indústrias e estimularam o desenvolvimento de métodos analíticos avançados e sofisticados programas computacionais para simular e analisar estas interações sob condições transitórias. Naturalmente, uma crescente preocupação se desenvolveu em torno de eventos de chaveamentos, como limpeza de faltas e religamentos rápidos na ausência do fenômeno de SSR, que podem causar danos por acumulação de fadiga e eventuais falhas em alguns pontos do eixo durante a vida útil da unidade geradora.

Grupos de trabalho foram formados nos EUA entre as sociedades de engenheiros eletricitistas (IEEE) e mecânicos (ASME) para investigar este problema.

A saída de fase de um TG de 630 MW, sob condições bastante desfavoráveis, na República Federal da Alemanha (em 1973) resultou em deformações localizadas em alguns dos acoplamentos e marcas de cisalhamento nos parafusos dos mesmos. Este incidente levou a uma investigação intensiva do fenômeno de esforços torcionais devido a distúrbios elétricos. Ao mesmo tempo, foram desenvolvidos estudos abrangentes de estabilidade, para avaliar os efeitos de religamentos automáticos que se seguem aos diferentes tipos de falhas no sistema. Aperfeiçoamento de modelos e técnicas de simulação permitiram estender o campo de ação dos estudos de

cálculo, além das considerações de estabilidade, para incluir uma análise do acompanhamento de esforços torcionais no eixo. Isso levou à identificação do fenômeno, que consiste numa resincronização com um grande potencial de diferença de fase angular, que ocorre quando toda a tensão é subitamente restaurada à barra de alta tensão como resultado da limpeza de uma falha no sistema.

No mesmo período, na URSS, as condições transitórias em redes elétricas, conseqüentes de severos curto-circuitos, foram estudadas em considerável profundidade. O trabalho levou ao reconhecimento do mesmo fenômeno de tensão de resincronização antes descrito. Estes estudos foram evidentemente feitos para explicar ocorrências observadas no curso de operações de centrais geradoras.

Desde a metade da década de 70, após várias publicações serem editadas, não só nos EUA, mas também na Alemanha, sobre esforços torcionais de TG's devido a transitórios elétricos, o problema tem recebido considerável atenção, o que é evidenciado pela abrangente literatura publicada pelos muitos peritos envolvidos neste tema num grande número de países.

Muitas destas contribuições foram compiladas na bibliografia do IEEE. ^{1,2} O fato de que problemas de estabilidade são menos agudos na Europa que nos EUA, permite aos europeus fazer a limpeza da falta de maneira mais lenta que a praticada pelos americanos. Tais tempos de limpeza, mais lentos, podem agravar o impacto torcional conseqüente de desligamentos de linhas com falhas. Religamentos atrasados e rápidos são muito frequentemente empregados nos EUA, como conseqüência de diferentes filosofias de sistema e aceitação geral dos benefícios de tais operações de religamento automático para a segurança do sistema. A preocupação nos

EUA, em consequência, situa-se em torno das implicações torcionais de religamentos tri-polares rápidos nas linhas de transmissão.

As diversas condições e práticas de operação, em numerosos países, dão lugar a diferentes pontos de ênfase sobre os muitos aspectos da interação torcional entre o sistema elétrico e as unidades geradoras a ele conectadas, resultando em várias soluções propostas para aliviar as imposições a que é submetido um turbogerador.

1.2 - Conclusão

Neste capítulo, se fez uma exposição introdutória sobre as causas e perigos da SSR, bem como sobre a origem histórico do mesmo. Isto se fez com a intenção de familiarizar o leitor com o fenômeno em questão.

CAPÍTULO 2

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O fenômeno de ressonância subsíncrona (SSR), motivo deste estudo, resulta da presença de capacitores instalados em série com a linha de transmissão de energia elétrica. Apesar do perigo que pode representar para as instalações, sua utilização firmou-se em virtude das vantagens técnicas e econômicas que apresenta.

No curso deste capítulo, após descrever as ressonâncias elétrica e mecânica, comenta-se a interação eletromecânica, com ênfase na sua forma mais severa, chamada "Ressonância subsíncrona de torção", mais conhecida como "Ressonância subsíncrona" (SSR).

2.1 - Ressonância no Sistema Elétrico

Hoje em dia já existem em operação linhas de transmissão radiais que permitem o transporte de potências maiores que 500 MW a distâncias superiores a 300 km, assegurando o trânsito de energia entre as centrais de geração e os grandes centros de consumo, bem como entre regiões e mesmo entre nações. Foi inicialmente para reduzir a reatância dessas linhas de grande comprimento, de forma econômica, que os capacitores eram colocados em série, mas os anos de experiência mostraram que a influência desses capacitores é importante para o bom funcionamento do sistema de energia elétrica, já que esta técnica assegura economicamente:

- i) Um aumento da capacidade de transporte de energia
- ii) Uma melhoria da estabilidade da rede.
- iii) Uma boa regulagem do nível de tensão.
- iv) O equilíbrio das potências reativas.
- v) Uma redução das perdas pelo efeito joule na rede.
- vi) Uma melhoria da confiabilidade.

Assim, certas companhias de eletricidade concluíram que a compensação-série deve fazer parte integrante de seus programas de construção de redes atuais e futuras.

No entanto, o emprego da capacitância-série colocava em risco a integridade do sistema, visto facilitar o aparecimento do fenômeno conhecido como ressonância subsíncrona.

Para expor a atividade ressonante no sistema eletromecânico, torna-se necessário definir o conceito de ressonância, desta forma:

Um fenômeno de ressonância pode ser definido como um processo de intercâmbio mútuo e oscilatório de energia entre os diferentes componentes de um sistema, quando o mesmo atinge uma das suas frequências naturais.

A ressonância num sistema elétrico, contendo capacitores de compensação em série, é caracterizada, para cada uma das suas linhas, pela frequência elétrica de ressonância^{6}

$$f_{er} = f_s \sqrt{\frac{X_c}{X_L + X_g}} \quad (2.1)$$

onde:

f_{er} é a frequência elétrica de ressonância (Hz)

f_s a frequência de sincronização (60 ou 50 Hz)

X_c a reatância dos capacitores em série com a linha

X_L a reatância indutiva da linha, incluindo o transformador de saída da máquina

X_g é a reatância subtransitória do alternador.

A percentagem (ou taxa) de compensação X_c/X_L vai, no máximo a 70%, com o que f_{er} é inferior a f_s e esta na ordem de 10 a 40 Hz.

Em outras palavras, a ressonância no sistema elétrico acontece quando a frequência é de tal ordem que as reatâncias capacitivas e indutivas se anulam mutuamente, fazendo com que a impedância da linha de transmissão seja puramente resistiva.

2.2 - Ressonância no Sistema Mecânico

O sistema mecânico dos TG's é composto de grandes massas girantes, acopladas entre si por eixos adequadamente dimensionados. Quando o sistema está em estado de equilíbrio, estas massas vibram em uníssono, isto é, elas deslocam-se tangencialmente com a mesma frequência. No instante em que acontece um desequilíbrio nas forças que agem sobre o sistema girante, estas enormes massas vibram desordenadamente em torno da frequência de deslocamento angular dominante no instante do evento. Desta forma, o intercâmbio de energia entre as massas girantes, que no estado de equilíbrio era mínimo, aumenta de intensidade, atingindo o seu ápice quando as massas vibram tangencialmente em torno de frequências dominantes, chamadas "frequências naturais de torção". Assim, um sistema mecânico de massas girantes é dito estar em ressonância quando o mesmo vibra em torno de uma das suas frequências naturais e o intercâmbio de energia entre massas é máximo.

Um sistema com n massas terá $n-1$ frequências naturais de torção que serão denotadas por f_{rm} (frequência de ressonância mecânica), as mesmas estando situadas entre 5 e 45 Hz para as centrais térmicas e menores que 10 Hz para as hidráulicas.

2.3 - A Interação Torcional Eletromecânica

Para tratar deste tema é mister fazer alguns comentários sobre a equação de oscilação que descreve o comportamento do sistema eletromecânico de um turbogerador.

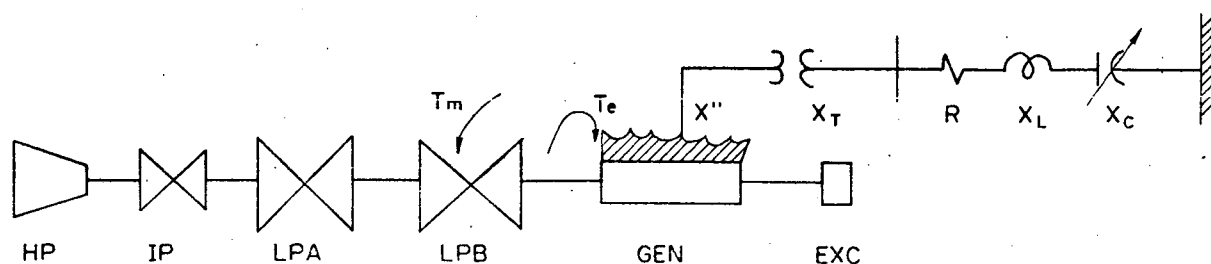


Figura 2.1 - Sistema Eletromecânico Típico

onde:

HP é a turbina de alta pressão

IP a turbina de pressão intermediária

LPA a turbina de baixa pressão A

LPB a turbina de baixa pressão B

GEN o gerador

EXC a excitatriz

Para isto, tomando como referência a figura 2.1, pode-se escrever:

$$J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + K\theta = \Delta T = T_m - T_e \quad (2.2)$$

onde:

θ é o deslocamento angular

J a constante de inércia

D a constante de amortecimento

K a constante elasticidade

ΔT o torque acelerante

T_m o torque mecânico

T_e o torque elétrico

Analisando a equação 2.2, conclui-se facilmente que se ΔT se

mantém invariável, θ adquire um comportamento similar. Quando ΔT altera seu valor ou mesmo oscila em torno de um valor definido, o deslocamento angular também se altera ou adquire um movimento oscilatório. Desta forma, oscilações de velocidade e aceleração aparecem nas massas do eixo.

Para que aconteça uma variação em ΔT , surgem duas alternativas: a) variação no torque mecânico e b) variação no torque elétrico.

Uma variação no torque mecânico se dá de forma relativamente lenta, comparada com as constantes de tempo das variações elétricas. O seu efeito é facilmente controlável e dificilmente desencadeará uma interação torcional.

Já uma variação no torque elétrico se dá de forma rápida e é um evento mais provável de aparecer. Quando isto acontece, surge simultaneamente a interação torcional. Variações no torque elétrico são conseqüências de mudanças no fluxo do entreferro do gerador, causadas por variações na corrente do estator.

Para se fazer uma análise mais detalhada do efeito das mudanças na corrente do estator, pode-se separar esta corrente nas suas componentes simétricas de seqüência zero, negativa e positiva:

- a componente de seqüência zero não produz qualquer onda de fluxo magnético no entreferro da máquina.
- a componente de seqüência negativa estabelece um campo girante no estator da máquina em sentido contrário ao sentido de rotação do rotor, com uma freqüência maior que a de sincronização (supersíncrona), agindo como um freio no ro

tor, absorvendo energia e ajudando no amortecimento da própria componente de seqüência negativa; a máquina síncrona, nestas condições, opera como um motor de indução.

O torque elétrico gerador é função da soma das freqüências do campo magnético do rotor e do estator; esta situação está descrita na figura 2.2.

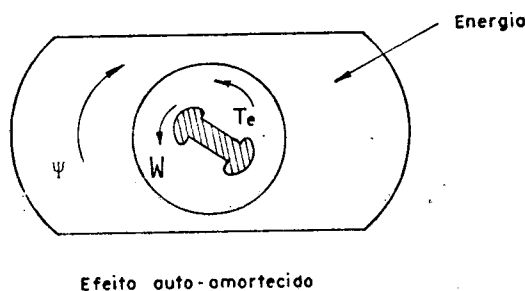


Figura 2.2 - Efeito de motor de indução (auto-amortecido)

com:

$$f > f_s$$

$$\frac{f - f_s}{f_s} > 0$$

$$T_e = F(f_s - (-f)) = F(f_s + f)$$

onde:

Ψ é o fluxo no estator com freqüência f

W é o fluxo do rotor com freqüência f_s

- A componente de seqüência positiva estabelece um campo girante no estator da máquina no mesmo sentido de rotação do rotor, com uma freqüência inferior a de sincronização (freqüência subsíncrona), enquanto que o rotor gi-

ra na frequência síncrona. Neste caso, a máquina se comporta como um gerador de indução, fornecendo energia ao sistema na frequência subsíncrona. Esta componente, de seqüência positiva, pode ou não ser amortecida, de acordo com a energia que a máquina entrega ao sistema.

O torque elétrico gerado é função da diferença das frequências do campo magnético do rotor e do estator, que giram com o mesmo sentido, esta situação está descrita na figura 2.3.

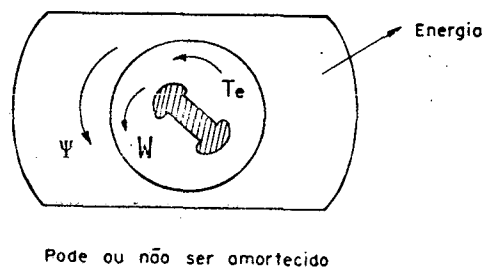


Figura 2.3 - Efeito de gerador de indução (podendo ou não ser amortecido).

onde: $f < f_s$

$$\frac{f - f_s}{f_s} < 0$$

$$T_e = F(f_s - f)$$

Um gerador de indução é visto pelo sistema de transmissão como uma resistência negativa. Se esta resistência negativa não for superada pela resistência positiva do sistema, vista dos terminais da máquina, teremos uma entrega de energia, na frequência subsíncrona, superior à absorvida pelo sistema. Neste caso, ter-se-á um caso evidente de instabilidade.

Pode-se observar que o efeito de gerador de indução será mais acentuado quanto maior for o grau de compensação-série nas linhas de transmissão, pois a frequência natural de oscilação subsíncrona será bastante alta, levando a um escorregamento menor e, portanto, a valores altos de resistência negativa do gerador de indução. Veja-se a figura 2.4^{7}

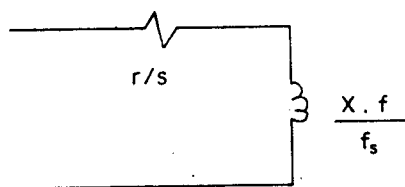


Figura 2.4 - Modelo elementar de gerador de indução.

onde: r é a resistência equivalente da máquina

X a reatância equivalente

S o escorregamento = $(f - f_s)/f_s$

Do exposto até aqui, compreende-se que, quando ocorre um distúrbio no sistema de transmissão, podem resultar torques no entreferro do gerador, com frequências supersíncronas ($f_s + f$) ou subsíncronas ($f_s - f$), que excitarão oscilações torcionais entre as massas girantes. Este comportamento é chamado de "interação torcional".

2.4 - A Ressonância Torcional Subsíncrona (SSR)

Quando o torque elétrico, conseqüente de uma modificação do sistema de transmissão, oscila com uma frequência subsíncrona, tal que $f_s - f$ seja igual a uma das frequências de ressonân

cia mecânica f_{rm} , e ainda a frequência do sistema elétrico f seja igual à frequência de ressonância elétrica f_{er} da linha de transmissão, se terá uma situação flagrante de ressonância torcional subsíncrona.

$$f_{rm} = f_s - f_{er} \quad \text{ou} \quad f_{er} = f_s - f_{rm} \quad (2.3)$$

Nesta situação, a ressonância elétrica se comporta como um amortecimento negativo para a oscilação torcional e a oscilação torcional age como uma resistência negativa para o sistema elétrico ressonante. {8}

Ainda, o intercâmbio de energias entre massas do sistema mecânico, entre indutores e capacitores do sistema elétrico, e entre os sistemas elétrico e o mecânico (mutuamente acoplados através do rotor do gerador síncrono) atingirá o seu máximo. {9}

Pode acontecer que a oscilação torcional de ressonância dê origem a torques torcionais que excedam o amortecimento inerente do sistema mecânico. Como consequência, as diversas seções do gerador serão submetidas a esforços crescentes e as massas por ele interligadas sofrerão severos desvios de velocidade e ângulo, que poderão danificá-lo sensivelmente.

Foi em 1970, devido a dois incidentes na central térmica de Mohave nos Estados Unidos, que se descobriu a SSR. Desde então, se

estuda métodos de avaliar o perigo e as perdas econômicas consequentes deste fenômeno, assim como se trata de entender a causa e o mecanismo da SSR.

2.4.1 - Perigo da SSR

A SSR é perigosa por duas razões:

- Primeiramente, os equipamentos habituais de comando e proteção não podem nem detectar nem atenuar o fenômeno. Assim, a Central de Mohave teve que ser desligada manualmente; nenhuma proteção automática funcionou;
- Em segundo lugar, as oscilações do SSR são tão violentas, que chegam a danificar gravemente o eixo do grupo girante. Os isoladores do coletor da escitatriz da Central de Mohave foram queimados em consequência do desprendimento excessivo de calor, proveniente das oscilações do eixo. Isto causou um curto-circuito que provocou uma deformação parcial do eixo no local do coletor. Além disso, os acoplamentos mecânicos, entre massas no eixo, foram avariados.^{10}

2.4.2 - Perdas Econômicas Conseqüentes a um Incidente de SSR

As estimativas do montante das perdas econômicas, devidas a um incidente de SSR, foram feitas numa central a carvão, a central de Navajo, situada no mesmo sistema elétrico que a central de Mohave (2310 MW).

Essas estimativas mostraram que tal incidente causou a paralisação da central e suas linhas, o que corresponde a um investimento em torno de um milhão de dólares por dia, durante dois meses. Além disso, o custo da indisponibilidade da central a carvão pode elevar-se a mais de um milhão de dólares, por causa do

custo diferencial de energia das fontes auxiliares funcionando a combustíveis derivados de petróleo.^{11}

2.4.3 - Causas dos Incidentes de SSR

Os estudos foram feitos partindo dos conhecimentos relativos ao incidente da central de Mohave. As correntes registradas pelos oscilógrafos foram analisadas, afim de determinar as frequências de ressonância elétrica f_{er} . Por outro lado, as frequências mecânicas naturais f_{mr} do eixo também foram calculadas. Comparando os valores obtidos, se constatou que um modo de torsão f_{mr} satisfaz a equação 2.3, provando, de uma forma prática, que esta equação é a condição necessária para que a SSR se manifeste.

Em continuação, os ensaios mecânicos foram feitos sobre um modelo na escala 1/10 do eixo avariado. Esse modelo foi submetido a esforços de torção na frequência de ressonância mecânica que deu origem à SSR. Ao final de alguns segundos, uma grande quantidade de calor foi produzida pela amostra, com o que ficou provado que as oscilações torcionais da SSR são capazes de avariar seriamente os eixos dos turbogeradores^{12}.

2.4.4 - O Mecanismo da SSR

A teoria da modulação de fase permite dar uma explicação mais clara do processo da SSR. A distribuição do fluxo principal B_f do indutor é da forma:

$$B_f = B_{\max} \cos(\theta - 2\pi ft. + \theta_r) \quad (2.4)$$

onde θ_r é o ângulo entre a referência de θ e o eixo do indutor quando o tempo t é igual a zero. Para poder modular a equação 2.4, se assumirá que as oscilações do rotor na f_{mr} , são de pequena amplitude, $\theta_{\max} (|B_{\max}| > |\theta_{\max}|)$, e que elas podem ser ex-

pressas por:

$$\theta_r = \theta_{\max} \cos(2\pi f_{rm} t) \quad (2.5)$$

Nestas condições, a teoria da modulação fornece: ^{26}

$$B_f = B_{\max} \left\{ \cos(\theta - 2\pi f t) - \frac{\theta_{\max}}{2} \cdot \left[\text{sen}(\theta - 2\pi(f + f_{rm})t) \right] - \frac{\theta_{\max}}{2} \cdot \left[\text{sen}(\theta - 2\pi(f - f_{rm})t) \right] \right\} \quad (2.6)$$

As componentes de B_f de frequências $(f - f_{rm})$ geram as tensões nos bornes do estator. Se esta frequência tem o mesmo valor que a frequência f_{er} da rede, correntes de grandes intensidades circularão dentro do estator. Estas correntes agirão sensivelmente sobre o fluxo principal do rotor (de frequência f_s), produzindo um torque de frequência f_{rm} no eixo. Assim, o sistema mecânico recebe energia do sistema elétrico. Desde que f_{rm} é uma frequência natural do eixo, este intercâmbio ressonante de energia corresponde ao processo da SSR.

Este processo se reforça por causa do pequeno valor do amortecimento mecânico e, por conseguinte, se produzem as ampliações dos torques mecânicos; assim que estes torques mecânicos ultrapassem o limite da fadiga, o eixo estará avariado.

2.5 - Os Regimes da SSR

Os regimes da SSR são:

- O regime dinâmico, concernente, às pequenas perturbações;
- O regime transitório, concernente às grandes perturbações.

Para o estudo desses regimes, a questão da estabilidade ou da instabilidade não é a maior questão. O cuidado principal está

em conhecer os torques transitórios cujos valores elevados poderão avariar o eixo e/ou reduzir o seu tempo de vida. Os danos podem ser apresentados, em função dos torques de torção do eixo, pela curva típica da figura 2.5.

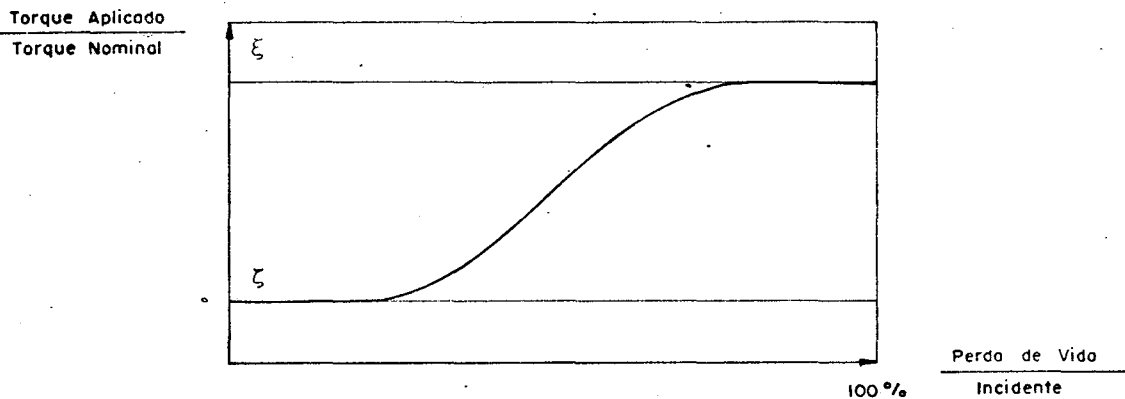


Figura 2.5 - Característica típica da fadiga do eixo.

De acordo com esta figura, um único incidente com torque de valor ξ é fatal para o eixo, ξ é da ordem de 4,5 vezes o valor nominal do torque. Entre os valores ξ e ζ , uma redução do tempo de vida deve ser levado em conta.

É indispensável levar em consideração estas características mecânicas nos programas de simulação dinâmica e transitória da SSR, caso queira-se fazer um planejamento confiável das centrais térmicas associadas às redes compensadas pelos capacitores em série. Por exemplo, as investigações dos regimes transitórios da central de Navajo, mostravam a existência de valores de torque de torção da ordem de 2,5 a 10ξ .^{27}

2.6 - SSR nas Centrais Hidráulicas

Se for se analisar inicialmente, os valores da taxa de compensação-série utilizável na prática, concluir-se-á que a possibilidade de acontecer SSR nas centrais hidráulicas é menor que nas

térmicas. Isto significa que a condição de SSR indicada pela equação 2.3 não pode existir, a não ser que a taxa de compensação ultrapasse os limites práticos, pois a frequência de torção nas centrais hidráulicas é pequena.

Embora a pequena possibilidade da SSR, para as centrais hidráulicas, possa aumentar nas redes de transmissão mais complexas, onde poderão aparecer as baixas frequências elétricas complementares ($f_s - f_{er}$) coincidindo com as baixas frequências de torção (f_{rm}) que caracterizam estas centrais. Além disso, as baixas frequências existentes entre o alternador e a turbina, poderão ser acompanhadas por uma outra componente de frequência de torção mais elevada, quando o eixo comporta a massa, relativamente mais leve, de uma excitatriz girante.

2.7 - Alternativas para a Compensação-Série

As vantagens da aplicação da técnica da compensação por capacitores em série foram expostas anteriormente. Apesar disto, é possível propor-se técnicas para conseguir o mesmo efeito que a compensação-série, tais como:

- Linhas múltiplas em paralelo.
- Transmissão em Extra Alta Tensão.
- Transmissão por corrente contínua.
- Linhas de Alta Tensão com reatâncias em derivação (compensação derivada).
- Utilização de compensadores estáticos.

Ainda assim, os estudos recentes de planejamento mostraram, em muitos casos, que a compensação-série tem um melhor desempenho e é mais econômica que as outras soluções alternativas, apesar da

despesa adicional proveniente dos custos de estudos da SSR e dos equipamentos necessários para limitar o perigo.

Um estudo completo da SSR impõe, por esta razão, a pesquisa de uma proteção eficiente, pois a mesma é de importância capital.

2.8 - Medidas de Proteção da SSR

Diferentes medidas de proteção são discutidas na literatura, e aqui serão brevemente expostas.^{13}

- a) Geração de amortecimento total pelo controle da excitação (conhecido como SEDC - Supplementary Excitation Damping Control - excitação suplementar para o controle do amortecimento).

A excitação do gerador é controlada com uma frequência apropriada (20 a 40 Hz) e com um conveniente ângulo de fase em relação as oscilações do eixo; assim, o amortecimento negativo (amplificação da oscilação) produzido pelo gerador desaparece ou se torna positivo. Em consequência, o SEDC é um dispositivo para operar no regime permanente. Entretanto, o seu comportamento durante os transitórios ainda não tem sido definido. Se o SEDC é utilizado sem cuidado, é possível que o amortecimento negativo do gerador se torne ainda maior.

- b) Estabilização da tensão nos terminais do gerador pelo controle de compensadores estáticos de fase. Tais artifícios são muito eficientes em anular os efeitos da interação durante a SSR.
- c) Monitoração da oscilação do eixo. O gerador é desconectado do sistema quando um determinado limiar de oscilação é excedido.

- d) Monitoração da corrente de armadura. Se sobrevem correntes com frequências diferentes da nominal, que implicariam em SSR, o gerador é desconectado do sistema.
- e) Um enrolamento amortecedor robusto. Isto anula a interação, ou seja, anula a amplificação das oscilações do gerador.
- f) Introdução de filtros ou elementos amortecedores passivos que permitam evitar as frequências iguais às naturais do eixo.

Este elemento pode ser instalado no neutro dos transformadores e, dependendo do seu desenho, pode estar permanentemente em operação ou ser ligado instantaneamente por um relê de corrente/frequência no surgimento da falta. Estes dispositivos são efetivos, tanto durante o transitório, como no regime permanente.

2.9 - Conclusão

Neste capítulo se tratou da exposição do problema do mecanismo, das causas e das diferentes formas de manifestação da SSR. Para este fim, abordou-se, em separado, as ressonâncias elétrica e mecânica, posteriormente se expos o mecanismo da interação eletromecânica, salientando a sua forma particular mais perigosa que é a SSR.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA ELETROMECHANICO

Para investigar o comportamento de um sistema elétrico é necessário estabelecer as equações diferenciais que descrevam o seu funcionamento; para facilitar o seu tratamento, as mesmas deverão ser escritas na forma canônica de equações de estado:

$$\dot{X} = F(X, U) \quad (3.1)$$

onde:

\dot{X} é a derivada primeira do vetor de estado;

X o vetor de estado e

U o vetor de comandos.

Esta formulação, em particular, se adapta bem ao tratamento por métodos numéricos efetuados via computador digital. Tal tratamento é que constitui a "simulação" do funcionamento do sistema, enquanto que o estabelecimento da formulação, em si mesma, é o processo de "modelagem" do sistema.

Neste capítulo, se apresentará o modelo de um sistema típico de energia elétrica, utilizando as equações (3.1) na sua forma não-linear. Este modelo, na sua forma final, incorpora as equações dos sistemas elétrico e mecânico de maneira tal que permita a manifestação da SSR.

A figura 3.1.a representa o sistema para o qual se desenvolveu esta modelagem. O mesmo está composto por um alternador e uma linha de transmissão com compensação-série; esta linha interliga o TG a um barramento de potência infinita cuja tensão é V_{∞} . A parte mecânica deste sistema é um eixo com seis massas.

As equações serão escritas utilizando a redução das grande-

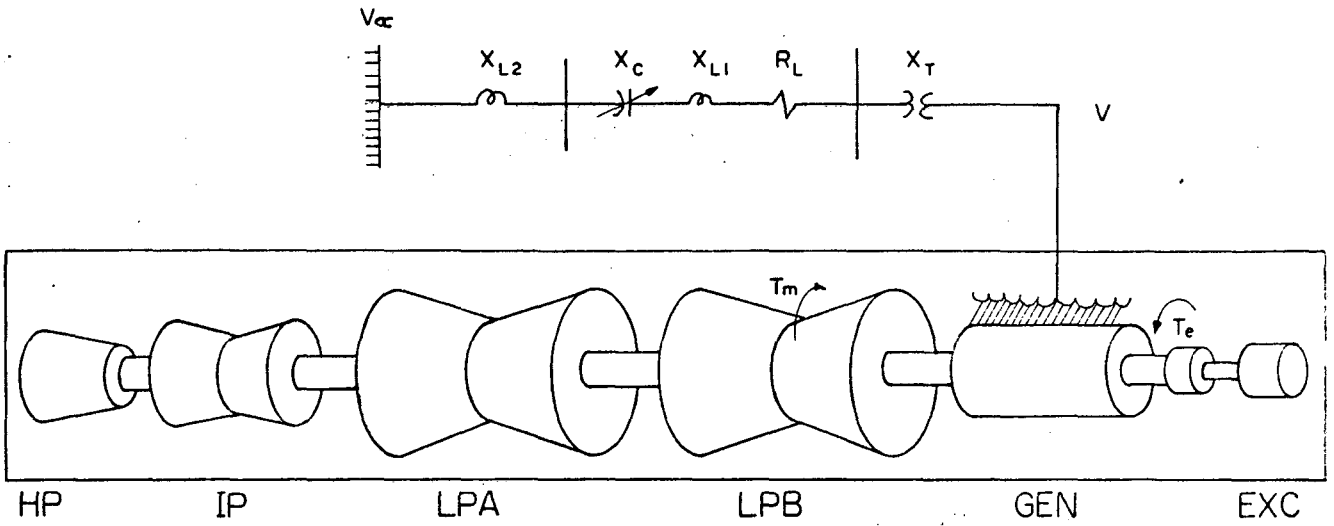


Figura 3.1.a - Sistema eletromecânico do turbogerador.

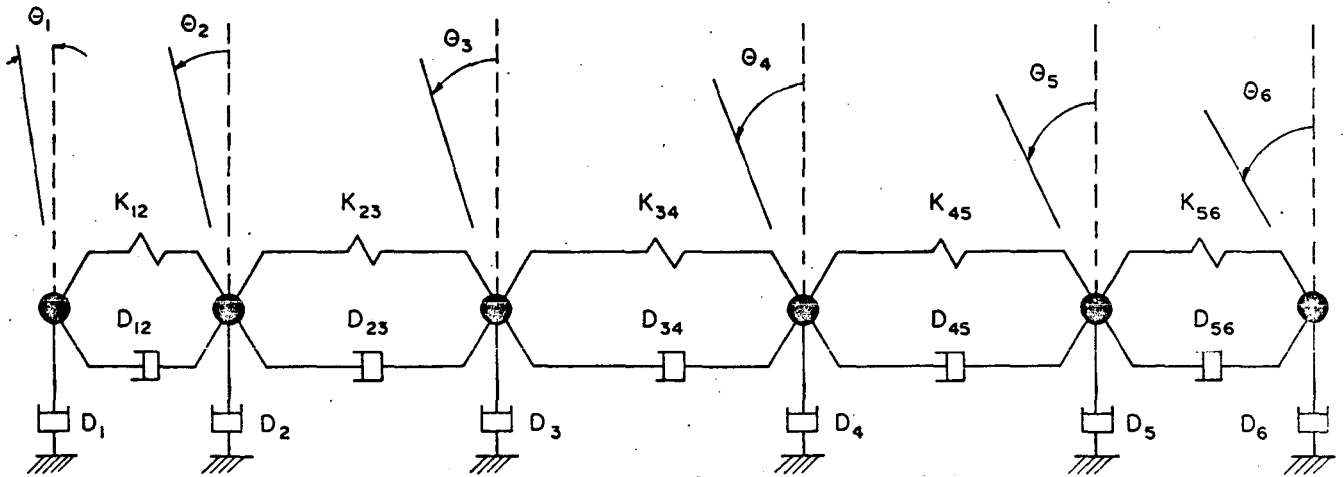


Figura 3.1.b - Modelo mecânico do eixo do turbogerador.

zas variáveis e constantes a valores em por unidade (pu). É importante observar que tanto o tempo como as constantes de inércia e a frequência terão também os seus valores normalizados em pu.

O processo de simulação se inicia com a obtenção das frequências de ressonância mecânica e as respectivas deformações modais que o eixo sofre quando alguma das f_{rm} se manifesta. O passo seguinte é a simulação transitória do sistema eletromecânico e sua análise, tanto no domínio do tempo como no da frequência.

3.1 - Modelagem do Eixo

O eixo é considerado como um sistema mecânico de seis massas pontuais acopladas entre si por molas e amortecedores ideais; além disto, cada massa está acoplada com a referência através de amortecedores ideais, esta situação estando descrita na figura 3.1.b.

Cada uma das massas pontuais representam respectivamente às massas dos quatro estágios da turbina, o alternador e a excitatriz. As molas e amortecedores representam o eixo que interliga às massas. Já o amortecedor que acopla a referência rígida com as massas girantes, representa o amortecimento viscoso entre as massas e o meio em que elas giram; este amortecimento é função do movimento da massa.

A equação 3.2 que descreve o sistema, trata-se de uma equação diferencial de segunda ordem e é função do deslocamento angular entre massas. Esta equação é também conhecida como "equação de oscilação".

$$\begin{aligned}
 J_i \ddot{\theta}_i + D_i \dot{\theta}_i + D_{i,i-1} (\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{i-1}) + D_{i,i+1} (\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{i+1}) + \dots \\
 \dots + K_{i,i-1} (\theta_i - \theta_{i-1}) + K_{i,i+1} (\theta_i - \theta_{i+1}) = \Delta T_i
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

onde:

J_i é a constante de inércia da massa i ;

D_i a constante de amortecimento próprio da massa i ;

$D_{i,j}$ a constante de amortecimento entre as massas i e j ;

$K_{i,j}$ a constante de elasticidade entre as massas i e j ;

θ_i o deslocamento angular da massa i ;

$\dot{\theta}_i$ a velocidade angular da massa i ;

$\ddot{\theta}_i$ a aceleração angular da massa i ; e

ΔT_i o torque acelerante agindo sobre a massa i .

ainda $K_{i,j} = K_{j,i}$ e $D_{i,j} = D_{j,i}$

Para um sistema com 6 massas a equação (3.2), depois de ordenada, adquire a sua forma mais conhecida, dada pela equação (3.3).

$$J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + K\theta = \Delta T = T_m - T_e \quad (3.3)$$

onde:

$$J = \text{DIAG} [J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6]$$

e DIAG indica matriz diagonal

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$$

e T indica matriz ou vetor transposto

$$\Delta T = [\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3, \Delta T_4, \Delta T_5, \Delta T_6]^T$$

$$D =$$

$D_1 + D_{12}$	$-D_{12}$				
$-D_{21}$	$D_{21} + D_2 + D_{23}$	$-D_{23}$			
	$-D_{32}$	$D_{32} + D_3 + D_{34}$	$-D_{34}$		
		$-D_{43}$	$D_{43} + D_4 + D_{45}$	$-D_{45}$	
			$-D_{54}$	$D_{54} + D_5 + D_{56}$	$-D_{56}$
				$-D_{65}$	$D_{65} + D_6$

$$K = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline K_{12} & -K_{12} & & & & \\ \hline -K_{21} & K_{21}+K_{23} & -K_{23} & & & \\ \hline & -K_{32} & K_{32}+K_{34} & -K_{34} & & \\ \hline & & -K_{43} & K_{43}+K_{45} & -K_{45} & \\ \hline & & & -K_{54} & K_{54}+K_{56} & -K_{56} \\ \hline & & & & -K_{65} & K_{65} \\ \hline \end{array}$$

Como se vê, a equação 3.3 ainda não está sob a forma de variáveis de estado, para se conseguir isto é útil empregar o artifício dado pela equação.

$$I\ddot{\theta} - I\dot{\theta} = 0 \quad (3.4)$$

onde:

I representa, a matriz de identidade.

que possibilita que a (3.3) seja escrita na sua forma matricial de variáveis de estado, como é mostrado a seguir:

$$\left[\begin{array}{c|c} -I & 0 \\ \hline 0 & J \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c|c} 0 & I \\ \hline K & D \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \theta \\ \dot{\theta} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 0 \\ \Delta T \end{array} \right] \quad (3.5)$$

A equação (3.5) incorpora a (3.3) e a (3.4), ainda se se manipular a (3.5) obtêm-se:

$$\left[\begin{array}{c} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} 0 & I \\ \hline -J^{-1}K & -J^{-1}D \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \theta \\ \dot{\theta} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} 0 \\ J^{-1}\Delta T \end{array} \right] \quad (3.6)$$

Este último arranjo da (3.3) está sob a forma de variáveis de estado proposto pela equação (3.1).

Desta forma, a equação (3.6) descreve o deslocamento angular das massas girantes do sistema mecânico do eixo de uma turbina e a experiência têm mostrado, que esta equação é um modelo suficientemente, preciso para os fins propostos. ^{4}

3.2 - Modelagem do Alternador

Tanto o alternador como a rede do sistema elétrico são modelados com o objetivo de obter-se, de uma forma precisa, o torque elétrico que interage com o mecânico sobre o eixo do TG, como pode ser observado na equação (3.3).

As equações dinâmicas do alternador serão deduzidas do modelo proposto por Park, que considera o circuito do rotor como sendo composto de três enrolamentos, dois fictícios representando as perdas pelos efeitos joule e Foucault, que são se manifestam no regime transitório e um terceiro que representa o enrolamento de campo. No estator, o modelo considera a presença de um circuito trifásico, representando os enrolamentos das fases A, B e C. Este modelo está mostrado na figura 3.2.

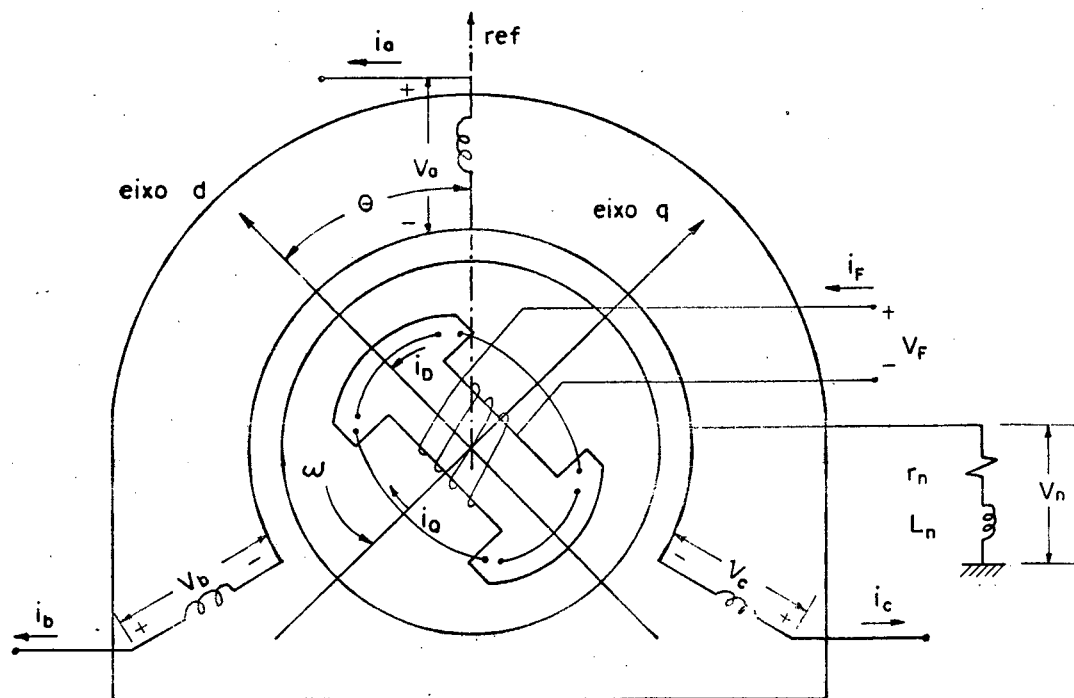


Figura 3.2 - Máquina síncrona de dois polos.

No modelo da figura (3.2) os enrolamentos amortecedores es-

tão em curto circuito, se assume que os três enrolamentos do estator estão conectados em "Y" e o neutro está aterrado por meio de uma resistência r_n e uma reatância L_n .

Para limitar os fenômenos que ocorrem dentro do alternador se fará uso de duas suposições:

i - toda indutância mútua e própria poderá ser escrita como a soma de uma constante e uma função senoidal da posição do rotor $\theta(t)$ e/ou $2\theta(t)$.

ii - A saturação será desprezada.

Desta forma a aplicação das leis de Kirchoff para tensões resulta num conjunto de equações diferenciais com coeficientes que variam com o tempo. Este sistema, variável no tempo, torna-se consideravelmente mais simples com a aplicação da transformada de Park (TP) que opera quantidades do tipo $X_{abc} = [x_a, x_b, x_c]^T$, referidas a um sistema a, b, c; transportando-as para um outro sistema de referências o, d, q. Onde se pode ser tanto uma corrente (i) como um enlace de fluxo (λ) ou uma tensão (v).

A relação entre o ângulo elétrico $\theta^e(t)$ e o ângulo mecânico $\theta^m(t)$ do rotor é dado por:

$$\theta^e(t) = \frac{P}{2} \theta^m(t) \quad (3.7)$$

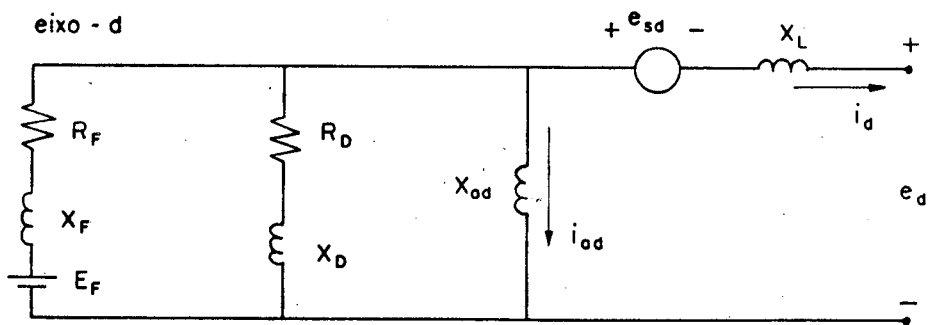
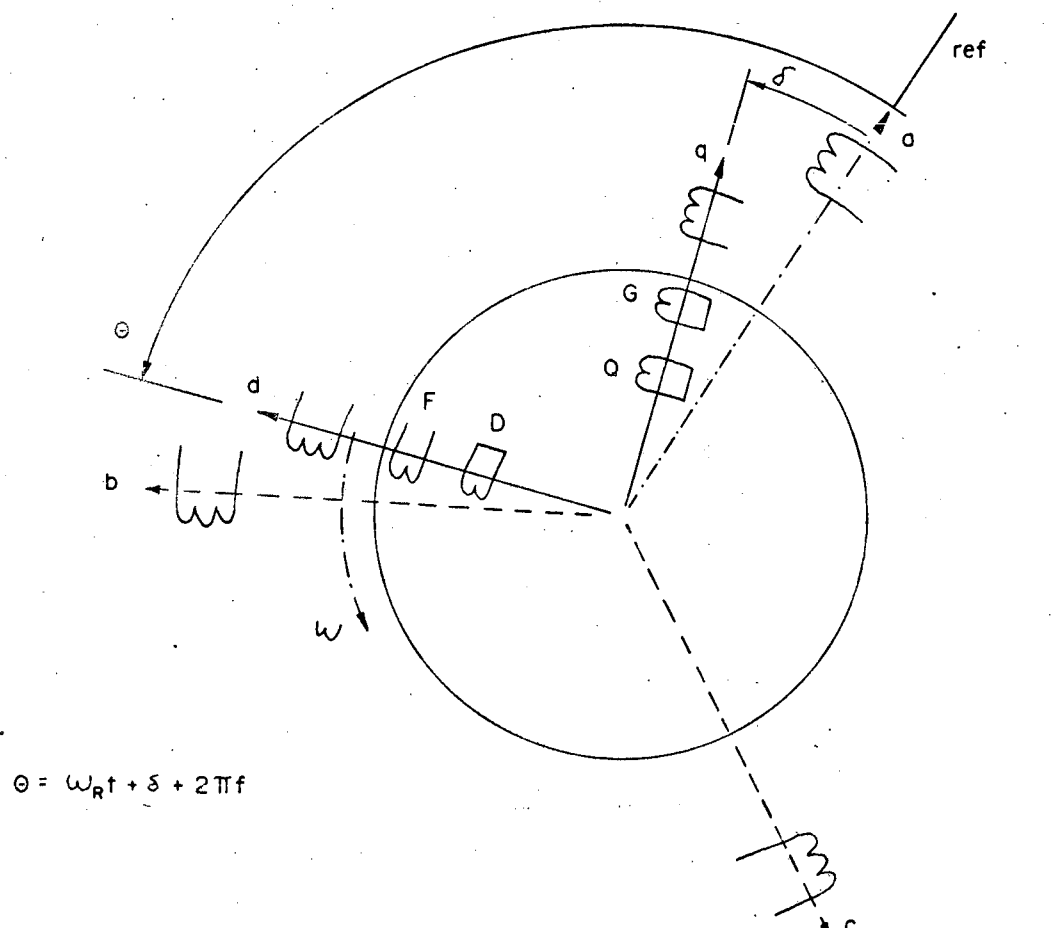
onde P é o número de polos.

Definiremos $\theta(t)$ ou simplesmente θ como sendo o ângulo dado por:

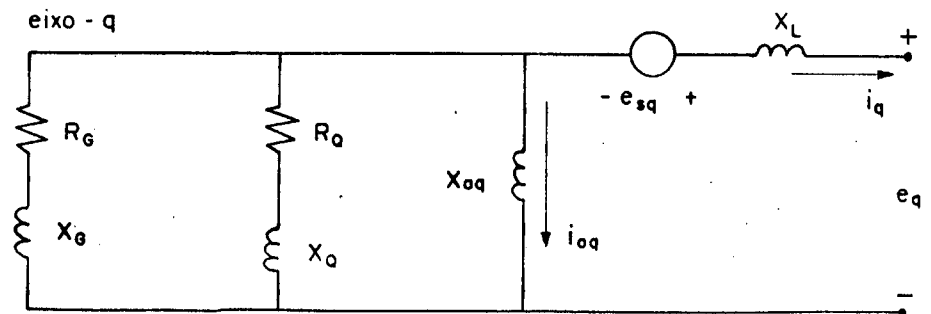
$$\theta \hat{=} \omega_s t + 2\pi + \delta \quad (3.8)$$

onde $\omega_s = 2\pi f_s$ é velocidade angular de sincronismo;

δ é o ângulo de carga, definida como o ângulo entre o eixo q é a referência fixa no estator, veja figura 3.3;



$$e_{sd} = (X_{oq} i_{oq} - X_L i_d) \omega$$



$$e_{sq} = (X_{od} i_{od} - X_L i_q) \omega$$

$$T_E = (X_{od} i_{od} i_q - X_{oq} i_{oq} i_d)$$

Figura 3.3 - Distribuição espacial dos enrolamentos e circuito equivalente do alternador.

t representa o instante em que é feita a observação.

Isto posto, o estado final das equações elétricas do estator ainda não operadas pela TP adquire a forma mostrada a seguir:

$$V = -R I - L \dot{I} + v_n \quad (3.9)$$

$$\text{onde } V = \left[v_a, v_b, v_c, -v_F, 0, 0, 0 \right]^T$$

$$I = \left[I_a, I_b, I_c, I_F, I_D, I_G, I_Q \right]^T$$

$$R = \text{DIAG} \left[r_a, r_b, r_c, r_F, r_D, r_G, r_Q \right]$$

$$v_n \hat{=} -r_n i_{abc} - L_n \dot{i}_{abc}$$

A matriz L é mostrada na Tabela 3.1.

As variáveis de estado escolhidas estão descritas pelo vetor I, cujos elementos indicam respectivamente: as correntes nas três fases dos enrolamentos do estator (i_a, i_b, i_c); a corrente no enrolamento de campo (i_F); a corrente no amortecedor de eixo direto (i_D) e as correntes nos amortecedores do eixo em quadratura (i_G, i_Q).

O leitor interessado em conhecer a dedução da (3.9), assim como a validade da aplicação da TP, poderá encontrar nas referências, 14, 15 e 16 o auxílio necessário.

A transformação de Park^{17} empregada neste trabalho é a modificada pelas sugestões de Lewis^{18} que é definida como:

$$TP \hat{=} \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta & \cos(\theta-120) & \cos(\theta+120) \\ \sin\theta & \sin(\theta-120) & \sin(\theta+120) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

que opera da forma mostrada a seguir

Indutâncias Mútuas

Indutâncias do Estator

a	$L_s + L_m \cos 2\theta$	$-M_s - L_m \cos 2(\theta + 30)$	$-M_s - L_m \cos 2(\theta + 150)$	$M_D \cos \theta$	$M_G \sin \theta$	$M_Q \sin \theta$
b	$-M_s - L_m \cos 2(\theta + 30)$	$L_s + L_m \cos 2(\theta - 120)$	$-M_s - L_m \cos 2(\theta - 90)$	$M_D \cos(\theta - 120)$	$M_G \sin(\theta - 120)$	$M_Q \sin(\theta - 120)$
c	$-M_s - L_m \cos 2(\theta + 150)$	$-M_s - L_m \cos 2(\theta - 90)$	$L_s + L_m \cos 2(\theta + 120)$	$M_D \cos(\theta + 120)$	$M_G \sin(\theta + 120)$	$M_Q \sin(\theta + 120)$
F	$M_F \cos \theta$	$M_F \cos(\theta - 120)$	$M_F \cos(\theta + 120)$	LF		
D	$M_D \cos \theta$	$M_D \cos(\theta - 120)$	$M_D \cos(\theta + 120)$	M_{RD}	L_D	
G	$M_G \sin \theta$	$M_G \sin(\theta - 120)$	$M_G \sin(\theta + 120)$		L_G	M_{RQ}
Q	$M_Q \sin \theta$	$M_Q \sin(\theta - 120)$	$M_Q \sin(\theta + 120)$		M_{RQ}	L_Q

Indutâncias Mútuas

Indutâncias do Rotor

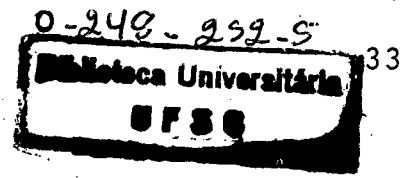
onde: L_s e M_s são as indutâncias própria e mútua do estator que não variam com θ ;

L_m é a indutância mútua que se modificará com a variação de θ ;

M_{RD} é a indutância mútua do rotor sobre o eixo d;

M_{RQ} é a indutância mútua do rotor sobre o eixo q.

Tabela 3.1 - Matriz de indutâncias de máquina síncrona.



$$X_{odq} = TP X_{abc} \text{ ou } X_{abc} = TP^{-1} X_{odq} \quad (3.11)$$

ainda é fácil mostrar que:

$$TP^{-1} = TP^T \quad (3.12)$$

O resultado da aplicação da TP à equação (3.9) fornece um sistema de equações com todos seus elementos relacionados a uma mesma referência. Esta referência é o eixo d, que gira junto com o rotor. É apresentada como:

$$V = -R(\omega) I - L\dot{I} \quad (3.13)$$

$$\text{onde: } V = [v_0, v_d, v_F, 0, v_q, 0, 0]^T$$

$$I = [i_0, i_d, i_F, i_D, i_q, i_G, i_Q]^T$$

$$R(\omega) =$$

$r+3r_n$						
	r			ωL_q	ωkM_G	ωkM_Q
		r_F				
			r_D			
	$-\omega L_d$	$-\omega kM_F$	$-\omega kM_D$	r		
					r_G	
						r_Q

$$L =$$

L_0+3L_n						
	L_d	kM_F	kM_D			
	kM_F	L_F	M_{RD}			
	kM_D	M_{RD}	L_D			
				L_q	kM_G	kM_Q
				kM_G	L_G	M_{RQ}
				kM_Q	M_{RQ}	L_Q

$$L_o \hat{=} L_s - 2M_s$$

$$L_d \hat{=} L_s + M_s + \frac{3}{2} L_m$$

$$L_q \hat{=} L_s + M_s - \frac{3}{2} L_m$$

$$k \hat{=} \sqrt{\frac{3}{2}}$$

$$\omega = 2\pi f$$

O circuito equivalente da equação (3.13) é mostrado na figura 3.3.

Para obter-se o modelo dinâmico do alternador na forma canônica de variáveis de estado, basta manipular a equação (3.13) como se mostra a seguir.

$$\dot{I} = -L^{-1}R(\omega)I - L^{-1}V \quad (3.14)$$

Desta forma tem-se um sistema de equações diferenciais que descrevem o comportamento das correntes do alternador. O vetor de comandos deste sistema é composto pelas tensões nos terminais dos enrolamentos de campo e das três fases do estator (V).

3.3 - Modelagem da Linha de Transmissão

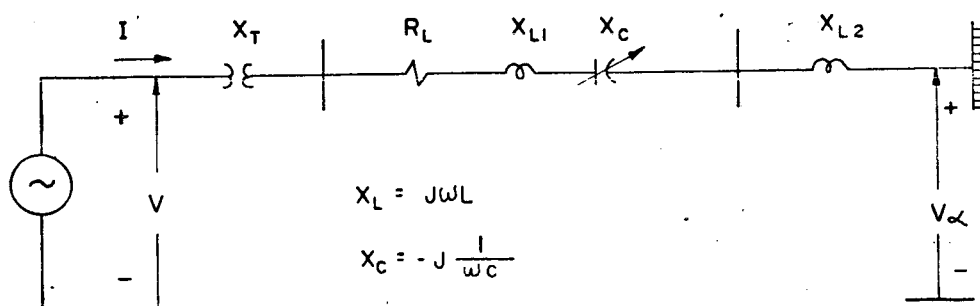


Figura 3.4 - Linha de transmissão com compensação-série.

A linha de transmissão da figura 3.4 é uma representação apro-

ximada pela composição-série de grandezas equivalentes, R_L , X_L e X_C .

O fenômeno transitório desta linha é descrito para as fases a, b, c pelas equações diferenciais das correntes I e das tensões V , que podem ser escritas como:

$$\text{se } X_L = X_T + X_{L1} + X_{L2} \quad (3.14)$$

$$\text{então: } V = R_L I + V_L + V_C + V_{\infty} \quad (3.15)$$

$$\text{onde: } V_L = L \dot{I}$$

$$\dot{V}_C = \frac{1}{C} I$$

$$e \quad V_{\infty} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} v_a^{\infty} \cos(\omega_s t) \\ v_b^{\infty} \cos(\omega_s t - 120) \\ v_c^{\infty} \cos(\omega_s t + 120) \end{bmatrix}$$

Na equação 3.15, V é a tensão nos terminais do gerador. O outro lado da equação descreve o comportamento das tensões sobre a linha de transmissão. Esta equação ainda está relacionada à referência a, b, c do estator, logo a mesma deverá ser operada pela TP para relacioná-la com a referência o, d, q do rotor. Então aplicando a TP na 3.15 obtêm-se:

$$v_d = R_L i_d + L \dot{i}_d + \omega L i_q + v_d^C + v_d^{\infty} \quad (3.16.a)$$

$$v_q = R_L i_q + L \dot{i}_q - \omega L i_d + v_q^C + v_q^{\infty} \quad (3.16.b)$$

$$\text{ainda: } \left. \begin{aligned} v_d^C &= -\frac{1}{\omega C} i_q \\ v_q^C &= \frac{1}{\omega C} i_d \end{aligned} \right\} \quad (3.17.a)$$

$$\left. \begin{aligned} v_d^{\infty} &= -\sqrt{3} v_d^{\infty} \sin s \\ v_q^{\infty} &= \sqrt{3} v_q^{\infty} \cos s \end{aligned} \right\} \quad (3.17.b)$$

O fato das tensões v_d^c e v_q^c aparecerem na equação 3.16 dá origem a duas novas variáveis de estado que descrevem o comportamento das tensões sobre os capacitores da compensação-série, cujas equações se fornecem a seguir:

$$\dot{v}_d^c - \frac{1}{c} i_d + \omega v_q^c = 0 \quad (3.18.a)$$

$$\dot{v}_q^c - \frac{1}{c} i_q - \omega v_d^c = 0 \quad (3.18.b)$$

A componente "0" da transformação da 3.15, não tem valor significativo, por isso sua exclusão.

3.4 - Associação dos Modelos do Alternador e da Rede

A formação do modelo final do sistema elétrico é resultado da introdução da equação 3.15 na 3.13, com ambos os modelos relacionados a referência do rotor, como se faz a seguir:

$$V_{cc} + V_c + V_L + R_L I = -R(\omega) I - L \dot{I} \quad (3.19)$$

Rearranjando a equação matricial 3.19, obtêm-se:

$$\hat{V}_{cc} = -\hat{R}(\omega) \hat{I} - \hat{L} \dot{\hat{I}} \quad (3.20)$$

onde:

$$\hat{V}_{cc} = [-\sqrt{3}V_d^{\text{oc}} \sin\delta, -v_F, 0, \sqrt{3}V_q^{\text{oc}} \cos\delta, 0, 0, 0, 0]^T$$

$$\hat{I} = [i_d, i_F, i_D, i_q, i_G, i_Q, v_d^c, v_q^c]^T$$

$$\hat{R}(\omega) =$$

$r+R_L$			$\omega(L_q+L)$	$\omega.kM_G$	$\omega.kM_Q$	1	
	r_F						
		r_D					
$-\omega(L_d+L)$	$-\omega.kM_F$	$-\omega.kM_D$	$r+R_L$				1
				r_G			
					r_Q		
$1/c$							$-\omega$
			$1/c$			ω	

$$\hat{L} =$$

$L_d + L$	kM_F	kM_D					
kM_F	L_F	M_{RD}					
kM_D	M_{RD}	L_D					
			$L_q + L$	kM_G	kM_Q		
			kM_G	L_G	M_{RQ}		
			kM_Q	M_{RQ}	L_Q		
						-1	
							-1

A equação do torque eletromagnético será dada por

$$T_e = -\frac{1}{3} \left[(-L_d i_d - kM_F i_F - kM_D i_D) i_q + (L_q i_q + kM_G i_G + kM_Q i_Q) i_d \right] \quad (3.21)$$

A equação 3.20 descreve o comportamento do sistema elétrico que terá a sua manifestação mais importante na forma do torque eletromagnético. Como pode ser observado, a 3.20 pode facilmente ser escrita sob a forma de variáveis de estado:

$$\dot{\hat{I}} = -\hat{L}^{-1} \hat{R}(\omega) - \hat{L}^{-1} \hat{V}_\alpha \quad (3.22)$$

Mas esta equação só poderá descrever o comportamento do sistema elétrico se se conhecerem os valores do ângulo de carga σ ao longo do tempo de observação. O ângulo δ é determinado pelo comportamento rotacional do eixo em relação a carga. Será a respeito desta relação que versará o próximo item.

3.5 - Associação dos Sistemas Elétrico e Mecânico

Até agora, fez-se um tratamento particular de cada sistema; como já se viu, o sistema elétrico e o sistema mecânico estão relacionados, no comportamento dinâmico de um TG, por meio dos seus

torques representantes, que interagem para manter o TG numa situação estável.

As equações 3.5 e 3.20, como se mostrou, descrevem, respectivamente, os sistemas mecânico e elétrico. Com o intuito de relacioná-las, é que serão reescritas, a seguir, com algumas modificações de representação.

$$- \hat{L} \dot{\hat{I}} - \hat{R}(\omega) \hat{I} = \hat{V}_{\infty} \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} -I & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & I \\ K & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ T_m - T_e \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Na realidade o torque elétrico só agirá sobre a massa do gerador ou massa 5. O torque mecânico terá a sua atuação restrita às massas das turbinas, distribuídas em percentagens. Finalmente o efeito dos torques sobre a excitatriz será considerado nulo.

Levando em conta estas considerações é que se escreve a seguir as equações diferenciais que modelam o sistema eletromecânico:

$$- \begin{bmatrix} \hat{L} & & \\ & I & \\ & & -J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\hat{I}} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{R}(\omega) & & \\ & & -I \\ -T_e & -K & -D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{V}_{\infty} \\ 0 \\ T_m \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

ou de forma simplificada:

$$- [LJ] [I\ddot{\theta}] - [RT] [I\dot{\theta}] = [VT] \quad (3.26)$$

Onde todos os termos já foram anteriormente definidos, exceto a sub-matriz $-T_e$ e duas identidades que serão salientadas:

- A velocidade angular ω da sub-matriz $\hat{R}(\omega)$ será:

$$\omega = \dot{\theta}_5 \quad (3.27)$$

- O ângulo de carga δ do sub-vetor de comando \widehat{V}_{oc} , será

$$\delta = \theta_5 \quad (3.28)$$

- E a sub-matriz $-T_e$, que será toda nula exceto na linha 5, os elementos das colunas 1 a 6, que terão os valores da equação 3.21, como se mostra a seguir.

$$[RT] = \begin{array}{c|cccccc|c} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & \dots \\ \hline 19 & \frac{-L_d i_q}{3} & \frac{-kM_F i_q}{3} & \frac{-kM_D i_q}{3} & \frac{L_q i_d}{3} & \frac{kM_G i_d}{3} & \frac{kM_Q i_d}{3} & \dots \\ \hline 20 & & & & & & & \dots \end{array} \quad (3.29)$$

O sistema de equações dado em (3.26) descreve o comportamento das correntes e dos deslocamentos angulares do sistema eletromecânico em estudo.

Também, pode ser escrito sob a forma preconizada na equação (3.1):

$$[I\dot{\theta}] = - [LJ]^{-1} [RT] [I\theta] - [LJ]^{-1} [VT] \quad (3.30)$$

Assim esta última equação constitui o modelo dinâmico não linear do sistema eletromecânico da figura 3.1, escrito sob a forma canônica de variáveis de estado.

Com isto, ficam estabelecidos modelos dinâmicos que descrevem todo o sistema, bem como os subsistemas que compõem o conjunto eletromecânico.

De posse dos modelos, a etapa seguinte será a da simulação, assunto este que será objeto dos próximos itens.

3.6 - Simulações Numéricas

O propósito das simulações numéricas é o de conseguir a solução das equações que descrevem o comportamento do modelo de um sistema. Por isso mesmo, quando se pretende simular um sistema, inicialmente, deve-se definir um objetivo; em consequência desta definição ter-se-ã condições de escolher o tipo de simulação e o método numérico mais apropriado.

Para conseguir o objetivo proposto, nesta investigação, se fez uso da simulação dinâmica e da transitória.

A simulação dinâmica se caracteriza pela obtenção dos valores próprios do sistema e análise da evolução dos mesmos, quando são introduzidas pequenas mudanças nos parâmetros intrínsecos do sistema.

A simulação transitória consiste na solução, passo a passo, das equações diferenciais que modelam o sistema e na avaliação do comportamento das variáveis de estado, à consequência de modificações impostas, tanto na matriz característica, como no vetor de comandos. Estas modificações podem ser efetuadas de forma simultânea ou não. O estudo do comportamento pode ser realizado no domínio do tempo e/ou no domínio da frequência, dependendo do comportamento resultante.

Nesta investigação o objetivo da simulação será o de identificar as frequências de ressonância natural do sistema eletromecânico. Para este fim determinar-se-ã os modos ressonantes do eixo, bem como as taxas de compensação da linha de transmissão capazes de excitar a SSR.

A obtenção destas frequências será feito através da simulação dinâmica e transitória.

3.6.1 - Normalização das Equações

Para o estudo do desempenho de sistemas dinâmicos é importante escolher um arranjo de bases que permita uma simulação conveniente.

A escolha das bases foi feita levando em consideração as seguintes diretrizes.^{18}

- 1 - Os sistemas de equações deverão permanecer iguais antes e depois da normalização.
- 2 - O sistema de equações de potência será exatamente o mesmo tanto no sistema mks como em pu.
- 3 - Todas as indutâncias mútuas deverão ter condições de ser representadas por circuitos 'T' depois de normalizadas. Este requisito é incluído para simplificar a simulação das equações em pu.
- 4 - Os principais valores de impedância, tradicionalmente fornecidos pelos fabricantes, deverão ser mantidos no sistema pu adaptado pelos fabricantes para conveniência dos usuários.

i - Quantidades de Base do Sistema Elétrico

- a) As quantidades de base do estator, denotadas pelo sub-índice SB, são:^{19}

S_{SB} $\hat{=}$ potência nominal r.m.s. por fase em VA

V_{SB} $\hat{=}$ tensão fase-neutro nominal r.m.s. em V

W_{SB} $\hat{=}$ velocidade síncrona nominal da máquina em rad/s

t_{SB} $\hat{=}$ $1/W_{SB}$ $\hat{=}$ base de tempo em s.

Em função destas 4 grandezas \hat{e} que são definidas as quantidades de base remanescentes (I_{SB} , L_{SB} , λ_{SB} e R_{SB}).

b) As quantidades de base do rotor, denotadas, pelo sub-índice RB, são as abaixo mostradas:

$$S_{RB} \hat{=} S_{SB}$$

$$W_{RB} \hat{=} W_{SB} \quad \text{ou} \quad t_{RB} = t_{SB}$$

$$I_{RB} \hat{=} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot L_{AD} I_{FI} \hat{=} \text{corrente de base do rotor em A}$$

As duas primeiras igualdades asseguram que, as indutâncias mútuas entre os circuitos do rotor e do estator, sejam recíprocas. L_{AD} é a indutância mútua de eixo d em pu. I_{FI} é a corrente de campo capaz de assegurar um valor de tensão nominal na linha do entreferro. I_{RB} assim definida, é tal que o fluxo mútuo que ela produz no eixo d, seja igual ao fluxo mútuo produzido pela I_{SB} circulando no enrolamento do estator do eixo d.

ii) Quantidades de Base do Sistema Mecânico

As quantidades mecânicas de base, denotadas pelo sub-índice MB, são:

$$t_{MB} \hat{=} t_{SB} \quad \text{ou} \quad W_{MB} \hat{=} W_{SB}$$

$$S_{MB} \hat{=} S_{SB}$$

$$T_{MB} \hat{=} 3 \frac{S_{MB}}{W_{MB}} = \text{base do torque em Nm}$$

$$\theta_{MB} \hat{=} W_{MB} t_{MB} = 1 \text{ rad} = \text{ângulo de base mecânica.}$$

$$J_{MB} \hat{=} \frac{T_{MB}}{W_{MB}^2} = \text{base do momento de inércia em Kg.m}$$

$$K_{MB} \hat{=} \frac{T_{MB}}{\theta_{MB}} = \text{base da constante de elasticidade em N}$$

$$D_{MB} \hat{=} \frac{T_{MB}}{W_{MB}} = \text{base do coeficiente de amortecimento em N.s.}$$

3.6.2- Simulação Dinâmica

O objetivo a se conseguir com esta simulação é o de obter os modos ressonantes do eixo (f_{rm}), bem como as deformações modais correspondentes. Cada frequência de ressonância mecânica contribui de forma característica ao movimento das massas do eixo; a esta contribuição de movimento que caracteriza cada modo torcional, chama-se de deformação nodal que também é conhecida como perfil do modo.

No estudo das vibrações livres considera-se a excitação do sistema como sendo nula, portanto o sistema de equação 3.5 deverá ser adequada a esta necessidade, então:

$$\begin{bmatrix} -I & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & I \\ K & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Escrevendo 3.31 sob a forma de variáveis de estado, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -J^{-1}K & -J^{-1}D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

que pode ser reescrita de maneira simplificada sob a forma

$$[\dot{X}] = [A][X] \quad (3.33)$$

onde A é a matriz de estados.

As expressões 3.32 e 3.33, constituem sistemas de equações diferenciais homogêneas.

Para obter os autovalores da equação (3.33) se requer que a solução para $[X]$ seja da forma

$$[X] = [\bar{X}] e^{\lambda t} \quad (3.34)$$

substituindo 3.34 em 3.33 obtem-se

$$[A - \lambda I] [\bar{X}] = 0$$

A equação 3.35 tem solução para $X \neq 0$ quando

$$[A - \lambda I] = 0$$

A solução de 3.36 constitui o problema dos autovalores, onde os λ 's são os autovalores do problema.

Os autovalores da matriz A fornecerão os modos naturais de torção do eixo e os autovetores as deformações nodais correspondentes. Todavia nesta aplicação o autovalor será um número complexo. A parte real do autovalor é a medida do amortecimento modal e a parte imaginária é a frequência natural do modo não amortecido^{12,28}.

Ainda demonstra-se que, se o amortecimento do sistema é nulo, os autovalores serão imaginários puros, isto é consequência da matriz A tornar-se simétrica sob estas condições.

Para obter os autovalores e autovetores da matriz A , se escreveu um programa computacional, que é apresentado no anexo I. Este programa é composto de três métodos numéricos que são:

- O método de Faddeev-Leverrier^{21} para obter as constantes do polinômio característico;

- O método de Bairstow ^{22} para calcular as raízes do polinômio característico e
- O método da eliminação de Gauss com pivotamento ^{22} para encontrar os autovetores correspondentes a cada autovalor.

3.6.3 - Simulação Transitória

O objetivo perseguido por esta simulação é o de poder observar o comportamento das variáveis de estado do sistema, quando o mesmo é submetido a variações de comando ou a mudanças dos seus parâmetros intrínsecos.

a) No domínio do tempo.

As respostas transitórias no domínio do tempo, são o resultado da solução, passo a passo, do sistema de equações diferenciais não lineares 3.30, que descreve o comportamento do sistema eletromecânico. Para este fim utilizou-se o método de integração numérica de Runge-Kutta Gill de 4.^a ordem ^{23}, cujo programa computacional está mostrado no anexo II.

b) No domínio da frequência

As respostas obtidas no domínio do tempo são transformadas para o domínio da frequência por meio da transformada rápida de Fourier ^{24} (ver anexo II).

Os resultados desta transformação são as amplitudes dos diferentes modos ressonantes em função de sua frequência. Estes resultados ajudam a compreender melhor o fenômeno da SSR e a determinar, de uma maneira segura, os modos responsáveis pelo surgimento deste fenômeno.

3.7 - Conclusão

Neste capítulo, realizou-se uma modelagem não linear que permite levar em consideração o fenômeno da SSR dentro de um sistema eletromecânico típico. Para este fim, modelou-se o sistema elétrico e o mecânico de forma a permitir uma precisão aceitável.

O modelo elétrico (sistema matricial de 8ª ordem) é incorporado ao modelo mecânico (sistema matricial 12ª ordem), resultando num sistema de 20 equações de estado sob uma forma que facilita a sua simulação por meio de computador digital. O modelo, assim obtido, permite estudar o comportamento transitório da SSR, em particular aqueles conseqüentes as grandes perturbações.

Todavia, os métodos de simulação propostos neste capítulo permitem analisar o fenômeno, tanto no domínio do tempo como da frequência.

CAPÍTULO 4

APLICAÇÃO A UM CASO BASE E ANÁLISE

O propósito deste capítulo é aplicar a teoria anteriormente exposta a um caso específico. Para este fim, tomou-se o modelo para simulação computacional de ressonância subsíncrona proposto, na referência 25, pelo grupo de peritos do IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, EUA (Ver Anexo III).

Se trata de um TG de 892,4 MVA e de uma linha de transmissão de 500 kV, disposta como se mostra na figura 4.1.

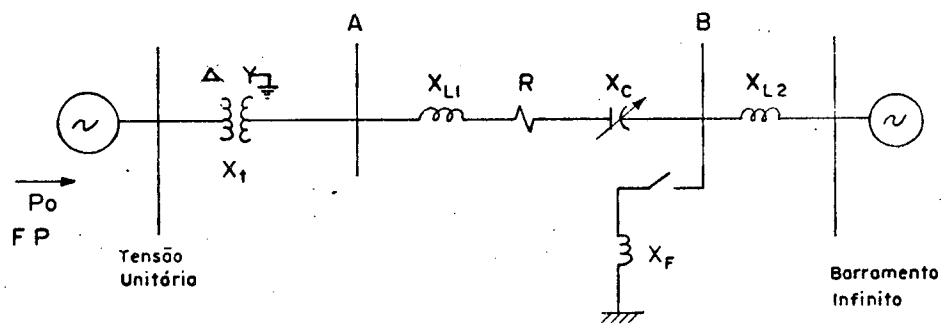


Figura 4.1 - Modelo para estudo de SSR

onde:

P_0 é a potência de saída do gerador

FP o fator de potência do gerador

Os dados do sistema eletromecânico mostrados a seguir, estão normalizados no sistema pu conforme exposto na seção 3.6.1.

Dados da linha de transmissão

$$x_t = j0,14 \quad \text{pu}$$

$$x_{L1} = j0,50 \quad \text{pu}$$

$$x_{L2} = j0,06 \quad \text{pu}$$

$$R = 0,02 \quad \text{pu}$$

Impedâncias e constantes de tempo do gerador

Reatâncias:

- Síncrona de eixo d = 1,79 pu
- Síncrona de eixo q = 1,71 pu
- Transitória de eixo d = 0,169 pu
- Transitória de eixo q = 0,228 pu
- Subtransitória de eixo d = 0,135 pu
- Subtransitória de eixo q = 0,200 pu
- De dispersão de armadura = 0,13 pu

Constantes de tempo a circuito aberto em segundos:

- Transitória de eixo d = 4,3 s
- Transitória de eixo q = 0,85 s
- Subtransitória de eixo d = 0,032 s
- Subtransitória de eixo q = 0,050 s

Resistência do estator = 0 pu

Dados da turbina

De acordo com a equação 3.3, os dados da turbina são os seguintes:

constantes de inércia (J) em pu:

$$J(\text{HP}) = J(1) = 70,044338 \text{ pu}$$

$$J(\text{IP}) = J(2) = 117,314106 \text{ pu}$$

$$J(\text{LPA}) = J(3) = 647,43718 \text{ pu}$$

$$J(\text{LPB}) = J(4) = 666,69811 \text{ pu}$$

$$J(\text{GEN}) = J(5) = 654,84523 \text{ pu}$$

$$J(\text{EXC}) = J(6) = 25,799241 \text{ pu}$$

Constantes de elasticidade (K) em pu torque/rad.

$$(\text{HP} , \text{IP}) = K(1,2) = 19,303 \text{ pu}$$

$$K(IP, LPA) = K(2,3) = 34,929 \text{ pu}$$

$$K(LPA, LPB) = K(3,4) = 52,038 \text{ pu}$$

$$K(LP.B, GEN) = K(4,5) = 70,858 \text{ pu}$$

$$K(GEN, EXC) = K(5,6) = 2,822 \text{ pu}$$

Coeficientes de amortecimento (D) em pu torque/(rad/s).

No modelo proposto são considerados desprezíveis^{25}.

Distribuição percentual dos torques no eixo:

$$T(HP) = T(1) = 30\%$$

$$T(IP) = T(2) = 26\%$$

$$T(LPA) = T(3) = 22\%$$

$$T(LP.B) = T(4) = 22\%$$

Dados de operação:

$$P_o = 0,9 \text{ pu}$$

$$FP = 0,9 \text{ (indutivo)}$$

Tanto a reatância capacitiva x_c como a indutiva de falta X_F , serão especificadas conforme o percentual de compensação de linha, cuja influência queira se observar. Do mesmo modo, o tempo de duração da falta será fixado segundo as necessidades do estudo.

4.1 - Simulação Dinâmica

Como o eixo, do sistema em questão, apresenta coeficientes de amortecimento nulos, deve-se esperar resultados pertencentes ao conjunto dos números imaginários.

O processamento, do programa mostrado no anexo I, fornece os resultados esperados e são apresentados na tabela 4.1.

À interpretação gráfica dos autovetores dá-se o nome de: gráfico de deformações modais, cujo objetivo é salientar o comporta-

mento do deslocamento angular das massas, uma em relação às outras, quando acontece uma ressonância mecânica. Para fazer este gráfico dispõe-se, de traços ou pontos igualmente espaçados, sobre uma linha horizontal, representando as massas do eixo. Sobre cada traço ou ponto, marca-se na vertical os valores do autovetor, depois unem-se as marcas por meio de retas; assim obtêm-se o perfil do modo ressonante correspondente. A diferença entre duas marcas representa um adiantamento ou atraso (conforme referência) do deslocamento angular entre as massas relacionadas. Esta representação gráfica se mostra na figura 4.2 (Comparar com o anexo IV).

Frequência modal		0,003	15,712	20,212	25,547	32,285	47,456	Hz
Deformações Modais	HP	1,000	-0,777	0,110	1,000	0,834	-0,787	Pu
	IP	1,000	-0,584	0,065	0,342	-0,044	1,000	
	LPA	1,000	-0,342	0,015	-0,230	-0,507	-0,113	
	LPB	1,000	0,112	-0,039	-0,095	1,000	0,021	
	GEN	1,000	0,373	-0,037	0,166	-0,620	-0,004	
	EXC	1,000	1,000	1,000	-0,252	0,377	0,001	

Tabela 4.1 - Frequências e deformações modais.

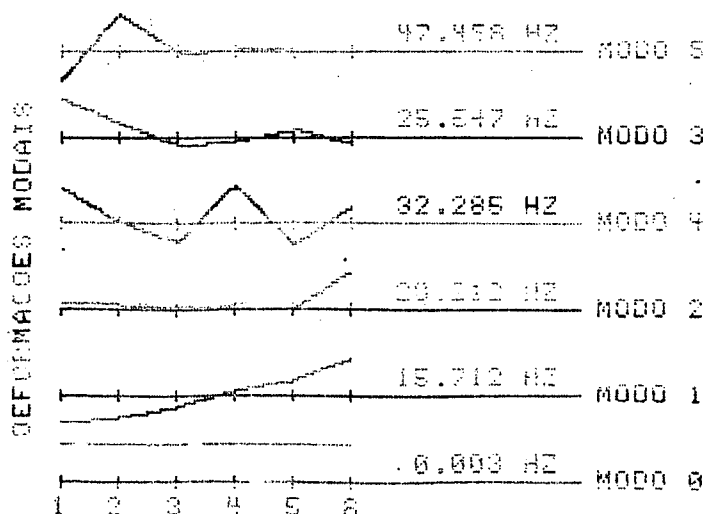


Figura 4.2 - Deformações modais.

4.2 - Simulação Transitória

a) No domínio do tempo

A integração numérica da equação 3.30, realizou-se com o auxílio dos programas do anexo II. Os parâmetros que se usaram para esta simulação foram:

$$X_F = j0,04 \text{ pu}$$

$$X_C = -j0,371 \text{ pu ou } 53\% \text{ de compensação}$$

$$\text{Início da falta} = 0,010 \text{ s}$$

$$\text{Duração da falta} = 0,075 \text{ s}$$

$$\text{Passo de integração} = 1 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Os resultados podem ser apreciados nas figuras 4.3 e 4.12.

b) No domínio da frequência

Dado o caráter oscilatório das respostas, fez-se necessário o uso da transformada rápida de Fourier (programa do anexo II) com os seguintes parâmetros.

$$\text{Discretização da amostragem} = 0,005 \text{ s.}$$

$$\text{Número de amostras tomadas} = (2)^8 = 256$$

4.3 - Equipamento Utilizado

Para o cálculo dos autovalores e autovetores fez-se uso de um micro-computador MAXXI, equipado com 64kbytes de memória, dois drives e a impressora MÔNICA.

Para a simulação transitória utilizou-se um computador IBM 4341.

4.4 - Análise dos Resultados

De posse do gráfico de deformações modais e juntamente com as curvas que descrevem o comportamento transitório das variáveis de estado, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, tem-se uma imagem mais clara do que vem a ser o fenômeno da SSR.

Para se dar início à análise ter-se-á, inicialmente, que calcular a frequência de ressonância elétrica correspondente à percentagem de compensação da linha de transmissão (PC). Assim com auxílio da equação 2.1 e definindo formalmente a PC, obtêm-se:

$$PC = 100 \cdot \frac{X_c}{X_L} \% \quad (4.1)$$

$$e \quad f_{er} = f_s \sqrt{\frac{PC \cdot X_L}{100 \cdot (X_L + X_g)}} \quad (4.2)$$

A equação 4.2 permite calcular a f_{er} em função da PC ou mesmo traçar o gráfico da f_{er} x PC, este gráfico é mostrado na figura 4.3; foi traçado com os dados fornecidos no início deste capítulo.

Desta forma a f_{er} é igual a 40,0 Hz.

Segundo exposto na seção 2.3 e 2.4, o complemento da f_{er} deverá ativar a interação torcional, e se o mesmo corresponder à alguma das f_{rm} , ter-se-á ativado, também, a ressonância torcional subsíncrona.

A verificação dos complementos das f_{er} , conduz a 20,0 Hz conforme pode-se verificar na figura 4.2 este valor de frequência está próximo do segundo modo, cujo valor é 20,2 Hz, então deve se esperar que a análise das curvas transitórias, mostre a excitação deste modo ressonante.

A figura 4.4 que mostra o gráfico da transformada de Fourier da corrente da fase A do gerador, apresenta duas componentes de frequência: a fundamental com 60,94 Hz e a f_{er} com 40,63 Hz. Esta mesma situação é observada na figura 4.5 que apresenta o gráfico da transformada de Fourier da tensão sobre o capacitor da fase A.

Nos gráficos do torque elétrico tanto no domínio do tempo como da frequência, figuras 4.6 e 4.7, verifica-se a frequência de 21,88 Hz que está próximo do complemento da f_{er} .

O fato do torque elétrico oscilar em torno da f_{rm} do segundo modo torcional (20,2 Hz) deve resultar no efeito auto amplificador do modo ressonante, como pode se ver na figura 4.8 que mostra a ação do torque mecânico entre as massas do gerador e da excitatriz no domínio do tempo. Por sua vez a transformada de Fourier deste sinal, figura 4.9, apresenta um valor de frequência igual ao do torque elétrico, verificando-se desta forma o fenômeno de SSR.

Os resultados obtidos estão de acordo com os da literatura clássica, apresentada no anexo III, cujos gráficos são resultados de uma modelagem trifásica do sistema elétrico conectado aos terminais do gerador, dando assim pequenas diferenças com os resulta-

dos obtidos neste trabalho, Todavia, a modelagem unifilar que se utiliza nesta pesquisa se mostra adequada para os objetivos aqui propostos.

4.5 - Conclusão

Neste capítulo, pôs-se em prática a teoria apresentada nos capítulos 2 e 3. Os resultados, tanto no domínio do tempo como da frequência, se apresentaram na forma de gráficos.

A modelagem e os métodos de simulação, mostraram ser eficientes, pois os resultados obtidos satisfizeram os conceitos propostos na teoria.

Se demonstrou a necessidade dos estudos dinâmico e transitório para melhor compreensão do fenômeno da SSR, bem como para a obtenção dos modos de ressonância torcional dominantes, para uma determinada percentagem de compensação da linha de transmissão. Isto fica evidenciado com o auxílio da transformada rápida de Fourier, que permite analisar a resposta transitória no domínio da frequência.

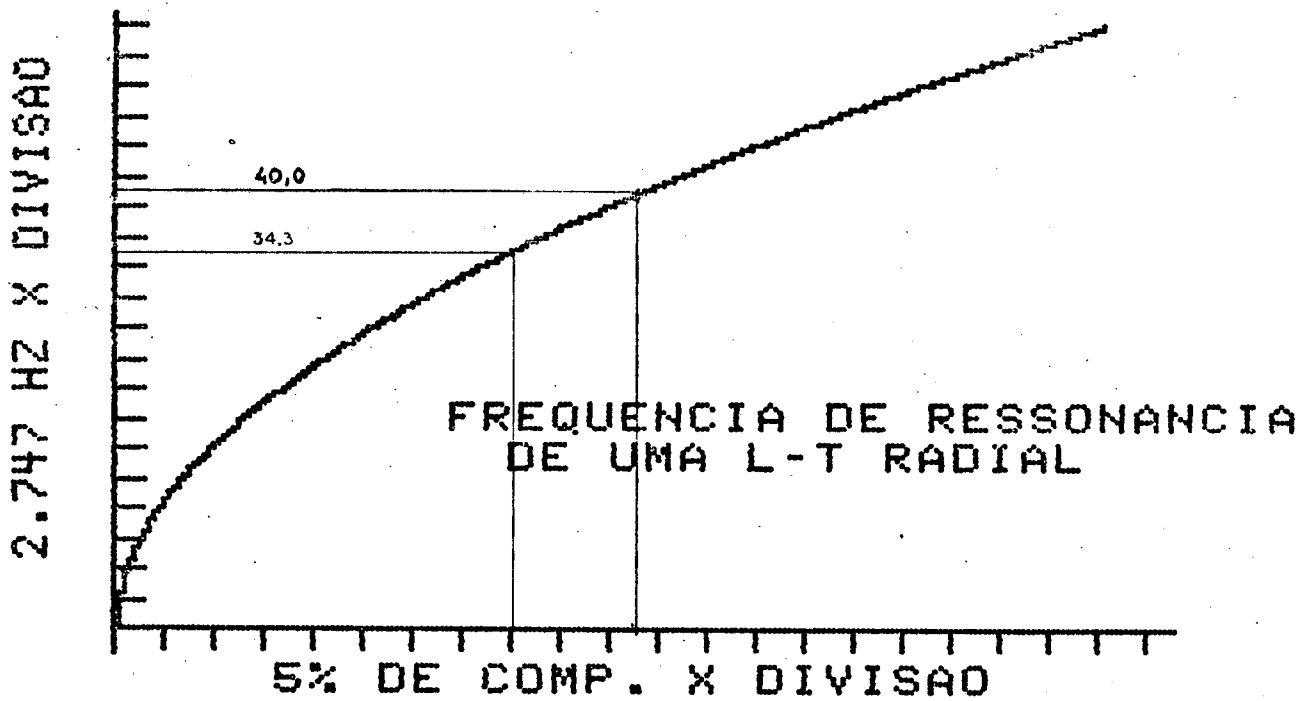


Figura 4.3 - Frequência de ressonância da linha de transmissão em função da percentagem de compensação.

CORRENTE DO GERADOR, FASE A

MINIMO = 0.000429 MAXIMO = 0.361277

X	F(X)
0.781	2.463D-02
1.561	6.893D-02
2.341	3.370D-02
3.121	8.814D-02
3.901	4.910D-02
4.681	9.485D-02
5.461	8.273D-02
6.241	1.591D-01
7.021	3.274D-01
7.801	2.595D-01
8.581	8.619D-02
9.361	9.279D-02
10.141	3.076D-02
10.921	7.038D-02
11.701	1.281D-02
12.481	9.055D-02
13.261	6.650D-02
14.041	2.616D-01
14.821	3.376D-01
15.601	1.836D-01
16.381	5.132D-02
17.161	9.356D-02
17.941	3.615D-02
18.721	6.458D-02
19.501	1.804D-02
20.281	2.548D-02
21.061	1.534D-02
21.841	1.456D-02
22.621	1.570D-02
23.401	8.375D-03
24.181	1.503D-02
24.961	8.867D-03
25.741	1.537D-02
26.521	8.372D-03
27.301	7.643D-03
28.081	1.098D-02
28.861	5.408D-03
29.641	1.138D-02
30.421	8.366D-03
31.201	1.064D-02
31.981	1.258D-02
32.761	8.847D-03
33.541	1.974D-02
34.321	3.346D-03
35.101	1.611D-02
35.881	5.956D-03
36.661	3.178D-02
37.441	1.367D-02
38.221	4.896D-02
39.001	5.117D-02
39.781	1.098D-01
40.561	9.445D-02
41.341	3.613D-01
42.121	3.174D-01
42.901	5.142D-02
43.681	1.145D-01
44.461	1.225D-02
45.241	6.026D-02
46.021	1.183D-02
46.801	4.209D-02
47.581	1.677D-02
48.361	3.198D-02
49.141	2.099D-02
49.921	2.397D-02
50.701	2.083D-02
51.481	1.399D-02
52.261	2.392D-02
53.041	8.070D-03
53.821	2.567D-02
54.601	1.735D-03
55.381	2.424D-02
56.161	4.748D-03
56.941	1.623D-02
57.721	3.035D-02
58.501	3.870D-02
59.281	3.053D-02
60.061	4.147D-02
60.841	7.211D-02
61.621	1.692D-01
62.401	1.165D-01
63.181	3.824D-03
63.961	2.940D-02
64.741	6.560D-03
65.521	1.447D-02
66.301	8.486D-03
67.081	8.318D-03
67.861	6.053D-03
68.641	5.219D-03
69.421	7.425D-03
70.201	2.405D-03
70.981	5.339D-03
71.761	2.178D-03
72.541	4.695D-03
73.321	7.745D-04
74.101	4.926D-03
74.881	1.996D-03
75.661	2.957D-03
76.441	1.932D-03
77.221	3.410D-03
78.001	1.426D-03
78.781	2.376D-03
79.561	1.538D-03
80.341	4.287D-04
81.121	8.740D-04
81.901	3.140D-03
82.681	2.251D-03
83.461	6.588D-03
84.241	1.048D-02
85.021	2.370D-02
85.801	3.712D-02
86.581	3.537D-02
87.361	2.352D-02
88.141	1.644D-02
88.921	1.484D-02
89.701	1.213D-02
90.481	1.253D-02
91.261	9.847D-03
92.041	1.077D-02
92.821	3.719D-03
93.601	9.589D-03
94.381	8.281D-03
95.161	9.195D-03
95.941	9.424D-03
96.721	7.977D-03
97.501	9.027D-03
98.281	7.405D-03
99.061	8.425D-03
99.841	7.732D-03

Figura 4.4 - Corrente do gerador, fase A, no domínio da frequência.

VOLTAGEM NO CAPACITOR, FASE A

MINIMO = 0.003230 MAXIMO = 0.155945

X	FIX11
0.781	9.8300-03 1.....2
1.461	4.8750-03 1..2
2.341	1.5170-02 1.....2
3.191	2.4940-02 1.....2
3.911	5.9660-03 1..2
4.651	3.7040-02 1.....2
5.451	2.2220-02 1.....2
6.251	6.2580-02 1.....2
7.051	1.5590-01 1.....2
7.811	1.4780-01 1.....2
8.591	7.0460-02 1.....2
9.381	4.0420-02 1.....2
10.161	4.6240-02 1.....2
10.941	1.6790-02 1.....2
11.721	3.8870-02 1.....2
12.501	2.9270-02 1.....2
13.281	3.4190-02 1.....2
14.061	8.2380-02 1.....2
14.841	1.0620-01 1.....2
15.631	7.4240-02 1.....2
16.411	1.8190-02 1.....2
17.191	4.1330-02 1.....2
17.971	2.0510-02 1.....2
18.751	1.9910-02 1.....2
19.531	1.9360-02 1.....2
20.311	1.2400-02 1.....2
21.091	1.7570-02 1.....2
21.871	8.0570-03 1.....2
22.651	1.5740-02 1.....2
23.431	5.2670-03 1..2
24.211	1.3810-02 1.....2
24.991	4.8690-03 1..2
25.771	1.0670-02 1.....2
26.551	6.3080-03 1..2
27.331	1.0230-02 1.....2
28.111	5.7000-03 1..2
28.891	9.0460-03 1.....2
29.671	5.7520-03 1..2
30.451	8.2100-03 1.....2
31.231	8.0000-03 1.....2
32.011	6.0910-03 1..2
32.791	7.9550-03 1.....2
33.571	4.6890-03 1..2
34.351	7.2590-03 1.....2
35.131	7.1880-03 1.....2
35.911	9.4110-03 1.....2
36.691	8.0560-03 1.....2
37.471	1.3560-02 1.....2
38.251	1.1280-02 1.....2
39.031	2.4470-02 1.....2
39.811	3.2630-02 1.....2
40.591	3.9160-02 1.....2
41.371	1.2600-01 1.....2
42.151	1.1750-01 1.....2
42.931	2.3400-02 1.....2
43.711	4.1810-02 1.....2
44.491	1.1600-02 1.....2
45.271	2.4180-02 1.....2
46.051	5.0660-03 1..2
46.831	1.8850-02 1.....2
47.611	3.9830-03 1..2
48.391	1.5170-02 1.....2
49.171	6.7640-03 1..2
49.951	1.2560-02 1.....2
50.731	8.4040-03 1.....2
51.511	1.1420-02 1.....2
52.291	8.9030-03 1.....2
53.071	9.3000-03 1.....2
53.851	9.7250-03 1.....2
54.631	6.7690-03 1..2
55.411	1.0660-02 1.....2
56.191	4.0390-03 1..2
56.971	8.1010-03 1.....2
57.751	9.1660-03 1.....2
58.531	2.0470-02 1.....2
59.311	9.7440-03 1.....2
60.091	2.4010-02 1.....2
60.871	3.3530-02 1.....2
61.651	9.6060-02 1.....2
62.431	7.1850-02 1.....2
63.211	3.2300-03 1..2
63.991	2.7360-02 1.....2
64.771	6.7320-03 1..2
65.551	1.3920-02 1.....2
66.331	8.2250-03 1.....2
67.111	1.0280-02 1.....2
67.891	7.7220-03 1.....2
68.671	7.2340-03 1..2
69.451	9.3240-03 1.....2
70.231	5.4900-03 1..2
71.011	8.4680-03 1.....2
71.791	5.1570-03 1..2
72.571	7.5330-03 1.....2
73.351	4.7700-03 1..2
74.131	7.2350-03 1.....2
74.911	5.7470-03 1..2
75.691	6.6250-03 1.....2
76.471	8.1430-03 1.....2
77.251	6.4000-03 1..2
78.031	6.3320-03 1.....2
78.811	6.3820-03 1.....2
79.591	6.1970-03 1..2
80.371	6.7560-03 1.....2
81.151	7.7950-03 1.....2
81.931	6.8690-03 1.....2
82.711	8.1960-03 1.....2
83.491	8.9800-03 1.....2
84.271	1.1030-02 1.....2
85.051	1.5410-02 1.....2
85.831	1.7210-02 1.....2
86.611	1.3550-02 1.....2
87.391	6.4710-03 1.....2
88.171	4.6770-03 1..2
88.951	5.1620-03 1..2
89.731	3.6120-03 1..2
90.511	4.4880-03 1..2
91.291	3.7680-03 1..2
92.071	4.3410-03 1..2
92.851	3.6720-03 1..2
93.631	4.2760-03 1..2
94.411	3.9590-03 1..2
95.191	3.7160-03 1..2
95.971	4.1800-03 1..2
96.751	3.8950-03 1..2
97.531	4.1200-03 1..2
98.311	3.8410-03 1..2
99.091	4.0490-03 1..2
99.871	3.4700-03 1..2

Figura 4.5 - Voltagem no capacitor, fase A, no domínio da frequência.

Id	Nome	Valor	Unidade
0.001	0.0000-01		
0.002	0.0000-01		
0.003	0.0000-01		
0.004	0.0000-01		
0.005	0.0000-01		
0.006	0.0000-01		
0.007	0.0000-01		
0.008	0.0000-01		
0.009	0.0000-01		
0.010	0.0000-01		
0.011	0.0000-01		
0.012	0.0000-01		
0.013	0.0000-01		
0.014	0.0000-01		
0.015	0.0000-01		
0.016	0.0000-01		
0.017	0.0000-01		
0.018	0.0000-01		
0.019	0.0000-01		
0.020	0.0000-01		
0.021	0.0000-01		
0.022	0.0000-01		
0.023	0.0000-01		
0.024	0.0000-01		
0.025	0.0000-01		
0.026	0.0000-01		
0.027	0.0000-01		
0.028	0.0000-01		
0.029	0.0000-01		
0.030	0.0000-01		
0.031	0.0000-01		
0.032	0.0000-01		
0.033	0.0000-01		
0.034	0.0000-01		
0.035	0.0000-01		
0.036	0.0000-01		
0.037	0.0000-01		
0.038	0.0000-01		
0.039	0.0000-01		
0.040	0.0000-01		
0.041	0.0000-01		
0.042	0.0000-01		
0.043	0.0000-01		
0.044	0.0000-01		
0.045	0.0000-01		
0.046	0.0000-01		
0.047	0.0000-01		
0.048	0.0000-01		
0.049	0.0000-01		
0.050	0.0000-01		
0.051	0.0000-01		
0.052	0.0000-01		
0.053	0.0000-01		
0.054	0.0000-01		
0.055	0.0000-01		
0.056	0.0000-01		
0.057	0.0000-01		
0.058	0.0000-01		
0.059	0.0000-01		
0.060	0.0000-01		
0.061	0.0000-01		
0.062	0.0000-01		
0.063	0.0000-01		
0.064	0.0000-01		
0.065	0.0000-01		
0.066	0.0000-01		
0.067	0.0000-01		
0.068	0.0000-01		
0.069	0.0000-01		
0.070	0.0000-01		
0.071	0.0000-01		
0.072	0.0000-01		
0.073	0.0000-01		
0.074	0.0000-01		
0.075	0.0000-01		
0.076	0.0000-01		
0.077	0.0000-01		
0.078	0.0000-01		
0.079	0.0000-01		
0.080	0.0000-01		
0.081	0.0000-01		
0.082	0.0000-01		
0.083	0.0000-01		
0.084	0.0000-01		
0.085	0.0000-01		
0.086	0.0000-01		
0.087	0.0000-01		
0.088	0.0000-01		
0.089	0.0000-01		
0.090	0.0000-01		
0.091	0.0000-01		
0.092	0.0000-01		
0.093	0.0000-01		
0.094	0.0000-01		
0.095	0.0000-01		
0.096	0.0000-01		
0.097	0.0000-01		
0.098	0.0000-01		
0.099	0.0000-01		
0.100	0.0000-01		

Figura 4.6 - Torque elétrico, no domínio do tempo.

TORQUE ELETRICO

MINIMO =

0.000047

MAXIMO =

0.908386

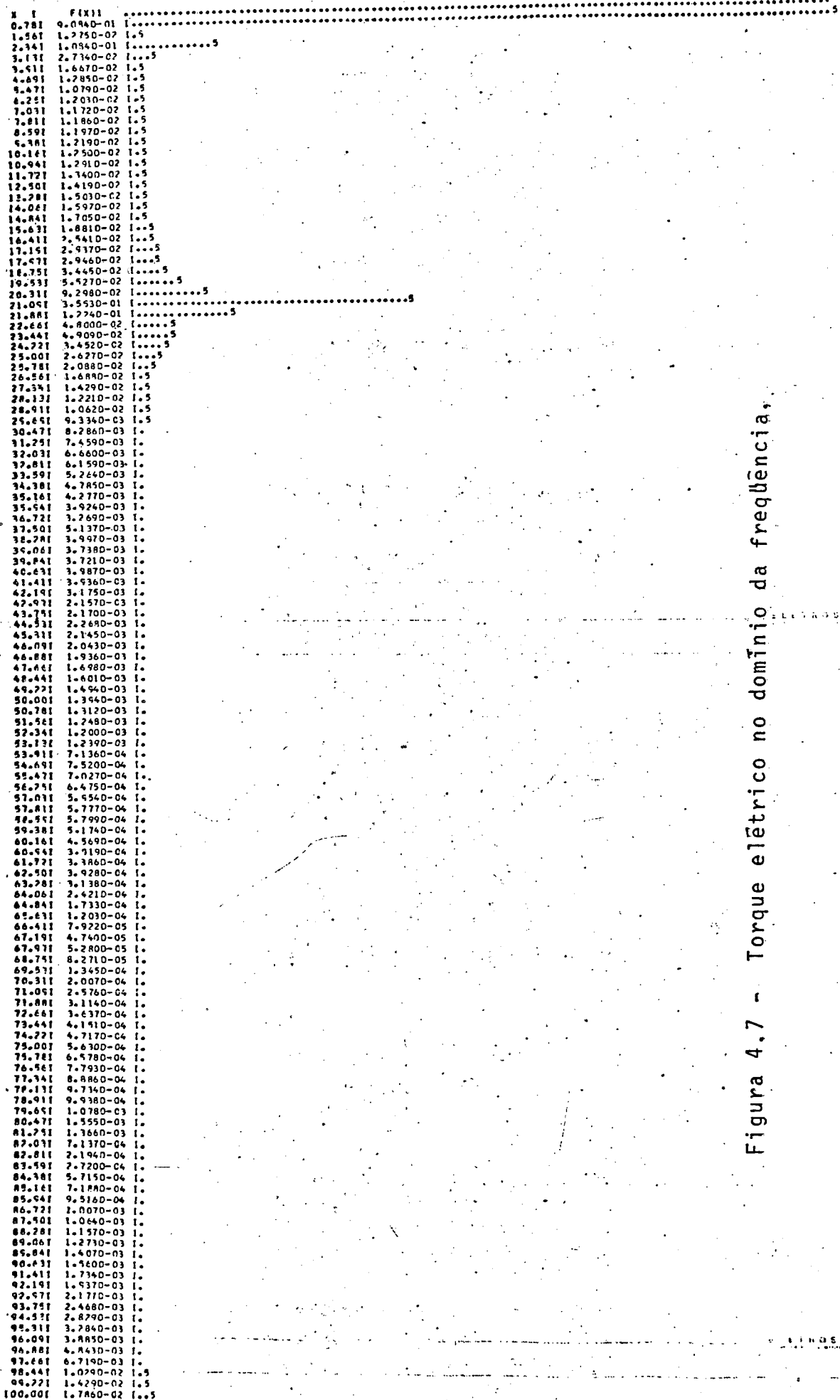


Figura 4.7 - Torque elétrico no domínio da frequência.

N	TORQUE	GEN	EXC
0.001	0.0000-01		
0.002	0.0000-01		
0.003	0.0000-01		
0.004	0.0000-01		
0.005	0.0000-01		
0.006	0.0000-01		
0.007	0.0000-01		
0.008	0.0000-01		
0.009	0.0000-01		
0.010	0.0000-01		
0.011	0.0000-01		
0.012	0.0000-01		
0.013	0.0000-01		
0.014	0.0000-01		
0.015	0.0000-01		
0.016	0.0000-01		
0.017	0.0000-01		
0.018	0.0000-01		
0.019	0.0000-01		
0.020	0.0000-01		
0.021	0.0000-01		
0.022	0.0000-01		
0.023	0.0000-01		
0.024	0.0000-01		
0.025	0.0000-01		
0.026	0.0000-01		
0.027	0.0000-01		
0.028	0.0000-01		
0.029	0.0000-01		
0.030	0.0000-01		
0.031	0.0000-01		
0.032	0.0000-01		
0.033	0.0000-01		
0.034	0.0000-01		
0.035	0.0000-01		
0.036	0.0000-01		
0.037	0.0000-01		
0.038	0.0000-01		
0.039	0.0000-01		
0.040	0.0000-01		
0.041	0.0000-01		
0.042	0.0000-01		
0.043	0.0000-01		
0.044	0.0000-01		
0.045	0.0000-01		
0.046	0.0000-01		
0.047	0.0000-01		
0.048	0.0000-01		
0.049	0.0000-01		
0.050	0.0000-01		
0.051	0.0000-01		
0.052	0.0000-01		
0.053	0.0000-01		
0.054	0.0000-01		
0.055	0.0000-01		
0.056	0.0000-01		
0.057	0.0000-01		
0.058	0.0000-01		
0.059	0.0000-01		
0.060	0.0000-01		
0.061	0.0000-01		
0.062	0.0000-01		
0.063	0.0000-01		
0.064	0.0000-01		
0.065	0.0000-01		
0.066	0.0000-01		
0.067	0.0000-01		
0.068	0.0000-01		
0.069	0.0000-01		
0.070	0.0000-01		
0.071	0.0000-01		
0.072	0.0000-01		
0.073	0.0000-01		
0.074	0.0000-01		
0.075	0.0000-01		
0.076	0.0000-01		
0.077	0.0000-01		
0.078	0.0000-01		
0.079	0.0000-01		
0.080	0.0000-01		
0.081	0.0000-01		
0.082	0.0000-01		
0.083	0.0000-01		
0.084	0.0000-01		
0.085	0.0000-01		
0.086	0.0000-01		
0.087	0.0000-01		
0.088	0.0000-01		
0.089	0.0000-01		
0.090	0.0000-01		
0.091	0.0000-01		
0.092	0.0000-01		
0.093	0.0000-01		
0.094	0.0000-01		
0.095	0.0000-01		
0.096	0.0000-01		
0.097	0.0000-01		
0.098	0.0000-01		
0.099	0.0000-01		
0.100	0.0000-01		

Figura 4.8 - Torque mecânico, GEN-EXC, domínio do tempo.

TORQUE MECANICO, GEN - EXC

MINIMO = 0.000735 MAXIMO = 0.613313

X	F	F(X)
0.781	7.3490-04	1.
1.561	8.4760-04	1.
2.341	1.0990-03	1.
3.121	1.7500-03	1.
3.901	2.0650-03	1.
4.681	2.5170-03	1.
5.461	3.0270-03	1.
6.241	3.5520-03	1.
7.021	4.1190-03	1.
7.801	4.7450-03	1.
8.581	5.4370-03	1.
9.361	6.2130-03	1.
10.141	7.0510-03	1.0
10.921	8.1030-03	1.0
11.701	9.2910-03	1.0
12.481	1.0720-02	1.0
13.261	1.2500-02	1.0
14.041	1.4810-02	1.0
14.821	1.8170-02	1.0
15.601	2.4010-02	1.0
16.381	4.9080-02	1.0
17.161	7.0390-03	1.0
17.941	2.4050-02	1.0
18.721	3.8710-02	1.0
19.501	6.7920-02	1.0
20.281	1.2320-01	1.0
21.061	6.1330-01	1.0
21.841	1.0290-01	1.0
22.621	6.6640-02	1.0
23.401	4.7710-02	1.0
24.181	3.7700-02	1.0
24.961	3.1450-02	1.0
25.741	2.8220-02	1.0
26.521	1.8560-02	1.0
27.301	1.9210-02	1.0
28.081	1.7680-02	1.0
28.861	1.6250-02	1.0
29.641	1.4990-02	1.0
30.421	1.3830-02	1.0
31.201	1.2820-02	1.0
31.981	1.1640-02	1.0
32.761	8.1420-03	1.0
33.541	1.3210-02	1.0
34.321	1.1570-02	1.0
35.101	1.0800-02	1.0
35.881	1.0230-02	1.0
36.661	9.7520-03	1.0
37.441	9.4390-03	1.0
38.221	9.0770-03	1.0
39.001	8.7530-03	1.0
39.781	8.4690-03	1.0
40.561	8.2210-03	1.0
41.341	7.9660-03	1.0
42.121	7.6490-03	1.0
42.901	7.4310-03	1.0
43.681	7.2400-03	1.0
44.461	7.0650-03	1.0
45.241	6.9040-03	1.0
46.021	6.7500-03	1.0
46.801	6.6050-03	1.0
47.581	6.4700-03	1.0
48.361	6.3390-03	1.0
49.141	6.2150-03	1.0
49.921	6.0980-03	1.0
50.701	5.9860-03	1.0
51.481	5.8810-03	1.0
52.261	5.7810-03	1.0
53.041	5.6860-03	1.0
53.821	5.5940-03	1.0
54.601	5.5070-03	1.0
55.381	5.4240-03	1.0
56.161	5.3450-03	1.0
56.941	5.2700-03	1.0
57.721	5.1970-03	1.0
58.501	5.1290-03	1.0
59.281	5.0630-03	1.0
60.061	5.0000-03	1.0
60.841	4.9400-03	1.0
61.621	4.8820-03	1.0
62.401	4.8270-03	1.0
63.181	4.7750-03	1.0
63.961	4.7240-03	1.0
64.741	4.6750-03	1.0
65.521	4.6280-03	1.0
66.301	4.5840-03	1.0
67.081	4.5400-03	1.0
67.861	4.4990-03	1.0
68.641	4.4600-03	1.0
69.421	4.4220-03	1.0
70.201	4.3850-03	1.0
70.981	4.3500-03	1.0
71.761	4.3170-03	1.0
72.541	4.2840-03	1.0
73.321	4.2530-03	1.0
74.101	4.2240-03	1.0
74.881	4.1950-03	1.0
75.661	4.1680-03	1.0
76.441	4.1420-03	1.0
77.221	4.1170-03	1.0
78.001	4.0930-03	1.0
78.781	4.0700-03	1.0
79.561	4.0490-03	1.0
80.341	4.0270-03	1.0
81.121	4.0070-03	1.0
81.901	3.9890-03	1.0
82.681	3.9720-03	1.0
83.461	3.9550-03	1.0
84.241	3.9390-03	1.0
85.021	3.9240-03	1.0
85.801	3.9090-03	1.0
86.581	3.8940-03	1.0
87.361	3.8800-03	1.0
88.141	3.8710-03	1.0
88.921	3.8590-03	1.0
89.701	3.8490-03	1.0
90.481	3.8390-03	1.0
91.261	3.8300-03	1.0
92.041	3.8220-03	1.0
92.821	3.8150-03	1.0
93.601	3.8090-03	1.0
94.381	3.8020-03	1.0
95.161	3.7960-03	1.0
95.941	3.7910-03	1.0
96.721	3.7860-03	1.0
97.501	3.7810-03	1.0
98.281	3.7710-03	1.0
99.061	3.7580-03	1.0
99.841	3.7480-03	1.0
100.001	3.7480-03	1.0

Figura 4.9 - Torque mecânico, GEN-EXC, domínio da frequência.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 - Conclusões

Consoante aos objetivos propostos no início desta investigação e com base na análise dos resultados do caso base, conclui-se que:

- 1 - Tanto a modelagem elétrica como mecânica se adaptam às necessidades do estudo da SSR. Sendo que o modelo elétrico está limitado à representação de sistemas de transmissão equilibrados.
- 2 - Os resultados obtidos, tanto na simulação dinâmica como na transitória, estão de acordo com os obtidos pelos autores clássicos, em particular com os das referências 9 e 25.
- 3 - A simulação transitória no domínio da frequência é um método muito eficiente para a análise da SSR, pois além de mostrar os modos torcionais excitados, permite estabelecer qual o modo mais solicitado.
- 4 - Para uma simulação eficiente da SSR, se necessita tanto da simulação dinâmica como da transitória, pois assim, se poderão detectar com segurança os modos torcionais sensíveis a uma determinada compensação da rede.

5.2 - Sugestões

Para dar continuidade a esta linha de pesquisa, sugere-se o

estudo dos temas abaixo relacionados.

- 1 - Um aprofundamento maior na teoria da interação torcional eletromecânica.
- 2 - Um estudo mais detido na simulação dinâmica seguindo a proposta da referência 9. Onde se estuda a influência da variação dos parâmetros intrínsecos do sistema sobre a SSR. Isto é feito analisando a evolução dos valores próprios do modelo linear do sistema eletromecânico, composto pelo turbogerador e a rede de transmissão.
- 3 - Desenvolvimento de um programa computacional que inclua uma modelagem trifásica da rede elétrica, conforme a referência 19.
- 4 - Aplicação da metodologia exposta neste trabalho a um caso real no sistema brasileiro.
- 5 - Estudo e desenvolvimento de dispositivos de proteção contra a SSR.
- 6 - Avaliação dos riscos associados as oscilações torcionais devido a SSR no que tange a integridade dos turbogeradores.
- 7 - Desenvolvimento de programas com maior eficiência computacional que permitam viabilizar o seu uso comercial.

5.3 - Utilização dos resultados obtidos

O resultado obtido nesta investigação é o conhecimento das frequências de ressonância tanto elétrica como mecânica, cuja principal aplicação é a de permitir o projeto de dispositivos de proteção contra a SSR.

Tem também importante aplicação na operação de linhas de transmissão compensadas com capacitores-série, servindo como apoio para se evitar, percentagens de compensação que possam ativar a SSR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - IEEE Committee Report. "A bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems", IEEE Trans., Vol.PAS-95, nº 1, 1976. p. 216.
- 2 - IEEE Committee Report. "First supplement to a bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems", IEEE Trans., Vol.PAS-98, nº 5, 1979. p.1872.
- 3 - RUSCHE P.A. "Turbine-generator shaft stresses due to network disturbances a bibliography with abstracts", IEEE Trans., Vol.PAS-99, nº 6, 1980. p.2146.
- 4 - DUNLOP, R.D., JOYCE, J.S. e LAMBRECHT, D. "Torsional oscillations an fatigue of steam turbine-generator shafts caused by system disturbances and switching events", CIGRE 11-06, Aug.1980 session.
- 5 - BALLANCE, John W. & GODLBERG, Saul. "Subsynchronous resonances in series compensated transmission lines", IEEE Trans., Vol. PAS-92, nº 5, 1973. p.1649.
- 6 - IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. "Proposed terms and definitios for subsynchronous oscillatios", IEEE Trans., Vol.PAS-92, nº5, 1973. p.1649.
- 7 - AGRAWAL, B.L. & FARMER, R.G. "Use of frequêncy scanning techniques for subsynchronous resonance analysis", IEEE Trans., Vol.PAS-88, nº 2, 1979.
- 8 - KILGORE, L.A., RAMAY, D.G. & HALL, M.C., "Simplified transmission and generation system analysis procedures for subsynchronous resonance problems", IEEE Trans. PAS, 1977.
- 9 - FOUAD, A.A. & KHU, K.T., "Subsynchronous resonance zones in in the IEEE BENCHMARK power system", IEEE Trans., Vol. PAS-97, nº 3, 1978. p.754.
- 10 - CONCORDIA, C. & FISCHER, G.A., Discussão da referência 5.
- 11 - MORONG, T.M. "Conception et essais de la centrale Navajo filtres de protection contre les oscillations Hyposynchrones", Paper 31-06, CIGRE, 1976.
- 12 - GOLDBERG, S & SCHMUS, M.R. "Subsynchronous resonance and torsional stresses in turbine-generator shafts", IEEE Trans., Vol.PAS-98, nº 4, 1979. p.1233.
- 13 - CANAY, Baden M. "Subsynchronous resonance - An explanation of the physical relationships", Brown Boveri Rev. 8/9, 1981. p.348.
- 14 - ANDERSON, P.M. & FOUAD, A.A., "Power System Control and Stability", the Iowa State University Press, AMES, IOWA, USA, 1982.

- 15 - FITZGERALD, A.E. & KINGSLEY, Charles Jr. "Electric Machinery", McGraw-Hill Book Company, INC., New York, USA, 1961.
- 16 - DE MELLO, F.P., "Dinâmica das máquinas elétricas - I", ELE-TROBRÁS, Rio de Janeiro, Brasil, 1979.
- 17 - PARK, R.H., "Two-reactions theory of synchronous Machines - Generalized Method of analysis", AIEE Trans., July 1929. p.716.
- 18 - LEWIS, W.A., "A basic analysis of synchronous machines - Part I", AIEE Trans., August 1958. p.436.
- 19 - GROSS, G. & HALL, M.C., "Synchronous machine and torsional dynamics simulation in the computation of eletromagnetic transients", IEEE Trans., Vol.PAS-97, nº 4, 1978. p.1074.
- 20 - THOMSON, Willian T., "Teoria da vibração com aplicações", Editora Interciência Ltda., Rio de Janeiro, Brasil, 1978.
- 21 - PACITTI, Tércio & ATKINSON, Cyril P., "Programação e métodos computacionais", Volume 2, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, Brasil, 1976.
- 22 - JAMES, M.L., SMITH, G.M. & WOLFORD, J.C., "Applied Numerical Methodo for digital computation with FORTRAN and CSMP", Second Edition, Thomas Y. Crowell Company, Inc. New York, USA., 1977.
- 23 - ARRILLAGA, J., ARNOLD, C.P. & HARKER, B.J., "Computer modelling of electrical Power Systems", John Wiley & Sons Ltd., New York, USA, 1983.
- 24 - NEWLAND, D.E. "An Introduction to randon vibrations and spectral analysis", Longman Group Limited, London, 1980.
- 25 - IEEE Subsynchronous Resonance task Force, "First Benchmark model for computer simulation of Subsynchronous resonance", IEEE Trans., Vol.PAS-96, nº 5, 1977. p.1565
- 26 - LATHI, B.P., "sistemas de comunicação", Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, Brasil, 1979.
- 27 - ABEDLAAL ABDELREHIM M., "Contribution a L'Etude de la resonance subsynchrone dans les systemes d'energie electrique simples ou multimachines. Determination d'un procede de stabilisation du phenomene", Tese de Doutorado, Grenoble, 1982.
- 28 - BOWLER, E.J. COLLIN, EWART N. DONALD & CONCORDIA, CHARLES, "Self excited torsional, frequency oscillations with series capacitors"; IEEE Trans., Vol.PAS 92, nº5, 1973, p.1688.

A N E X O S

ANEXO I

LIST

```

10 REM 'CALCULO DE AUTOVALORES E AUTOVETORES'
20 HOME : CLEAR
30 INPUT "NUMERO DE MASSAS GIRANTES ";N
40 D = N:T = 0:K1 = 0:D1 = 0:D5 = CHR$(4)
50 INPUT " O SISTEMA TEM ATRITO (S/N) ";SNE
60 IF SNE = "S" THEN T = N:D = 2 * N
70 INPUT " TOLERANCIA ADMISIVEL = ";E5: PRINT : PRINT
80 PRINT "      2HM(I)          K(I,J)"
90 PRINT "      D(I)          O(I,J)": PRINT "-----": PRINT
100 DIM A(20,20),AI(20,20),F(20,20),VS(20),H(20)
110 FOR I = 1 TO N
120 I1 = I + 1:I2 = I - 1
130 PRINT I;".-";
140 INPUT " ";J
150 A(T + I,I) = - K1 / J
160 IF T ( ) 0 THEN PRINT I;".-";: INPUT " ";D:A(T + I,T + I) = (- D - D1) / J
170 IF I1 > N THEN K = 0: GOTO 200
180 PRINT TAB( 20);" ";: INPUT " ";K
190 A(T + I,I1) = K / J
200 A(T + I,I2) = K1 / J:K1 = K
210 A(T + I,I) = A(T + I,I) - K / J
220 IF T = 0 GOTO 300
230 IF I1 > N THEN D = 0: GOTO 260
240 PRINT TAB( 20);" ";: INPUT " ";D
250 A(T + I,T + I1) = D / J
260 A(T + I,T + I) = A(T + I,T + I) - D / J
270 A(I,T + I) = 1
280 IF I2 ( ) 0 THEN A(T + I,T + I2) = D1 / J
290 D1 = D
300 NEXT I
310 IF T ( ) 0 THEN N = 2 * N
320 HOME : PRINT " MATRIZ IA! "
330 FOR I = 1 TO N
340 FOR J = 1 TO N
350 A(I,J) = 377 * A(I,J)
360 PRINT "A(";I;";";J;")= ";A(I,J);"---";
370 NEXT J,I
380 FOR I = 1 TO N: FOR J = 1 TO N
390 F(I,J) = A(I,J):AI(I,J) = A(I,J)
400 NEXT J,I
410 FOR L = 1 TO N:C = 0
420 FOR I = 1 TO N:C = C + F(I,I) / L
430 NEXT I
440 H(L) = C
450 FOR I = 1 TO N:F(I,I) = F(I,I) - C
460 NEXT I
470 FOR I = 1 TO N
480 FOR K = 1 TO N:VS(K) = F(K,I):F(K,I) = 0
490 NEXT K
500 FOR J = 1 TO N: FOR K = 1 TO N
510 F(J,I) = F(J,I) + A(J,K) * VS(K)
520 NEXT K,J,I,L
530 H(0) = (- 1) ^ N
540 FOR I = 1 TO N:H(I) = - H(I) * H(0)
550 NEXT I
560 HOME : PRINT : PRINT " CONSTANTES DE !DXI=0"
570 FOR I = 0 TO N
580 PRINT "H";I;"=" ";H(I)

```



```

0 NEXT I
0 IF H(0) > 0 GOTO 520
0 FOR I = 0 TO N:H(I) = - H(I): NEXT I
0 DIM B(20),C(20),RE(20),IM(20),VR(20,20),VI(20,20)
0 C5 = 0:C1 = N / 2
0 C4 = 2 * INT (C1)
0 IF C4 = N THEN C1 = 2: GOTO 670
0 C1 = 1
0 FOR M = N TO C1 STEP - 2
0 IF C5 = 0 GOTO 720
0 FOR I = 1 TO M
0 H(I) = B(I)
0 NEXT I
0 C5 = 1:C2 = 0
0 IF M = 1 THEN RE(M) = - H(1): GOTO 1020
0 IF M = 2 THEN U = H(1):V = H(2): GOTO 950
0 U = H(M - 1) / H(M - 2)
0 V = H(M) / H(M - 2)
0 IF C2 = 1 THEN U = RND ( ABS (U)):V = RND ( ABS (V))
0 CI = 0:B(0) = 1:C(0) = 1
0 CI = CI + 1
0 B(1) = H(1) - U
0 FOR K = 2 TO M
0 B(K) = H(K) - U * B(K - 1) - V * B(K - 2)
0 NEXT K
0 C(1) = B(1) - U
0 FOR K = 2 TO M - 1
0 C(K) = B(K) - U * C(K - 1) - V * C(K - 2)
0 NEXT K
0 DD = C(M - 1) * C(M - 3) - C(M - 2) * C(M - 2)
0 IF DD = 0 THEN PRINT "DENOMINADOR = 0.0": END
0 DU = (B(M) * C(M - 3) - C(M - 2) * B(M - 1)) / DD
0 DV = (C(M - 1) * B(M - 1) - B(M) * C(M - 2)) / DD
0 U = U + DU:V = V + DV
0 IF .ABS (DU) + .ABS (DV) > E5 AND CI < = 200 GOTO 790
0 IF CI > 200 THEN C2 = 1: GOTO 770
0 S = U * U - 4 * V
0 RZ = SQR ( ABS (S))
0 IF S > = 0 THEN RE(M) = (RZ - U) / 2:RE(M - 1) = (- RZ - U) / 2: GOTO 1000
0 RE(M) = - U / 2:IM(M) = RZ / 2
0 RE(M - 1) = - U / 2:IM(M - 1) = - RZ / 2
000 PRINT "RZ / CI / RZ REAL / RZ IMAG /"
010 PRINT M - 1;" / ";CI;" / ";RE(M - 1);" / ";IM(M - 1)
020 PRINT M;" / ";CI;" / ";RE(M);" / ";IM(M)
030 NEXT M
040 FOR I = 01 TO N
050 IF ABS (RE(I)) < = E5 THEN RE(I) = 0
060 IF ABS (IM(I)) < = E5 THEN IM(I) = 0
070 NEXT I
080 FOR LL = 1 TO N
090 FOR I = 1 TO N
100 FOR J = 1 TO N
110 IF I = J THEN F(I,I) = A1(I,I) - RE(LL): GOTO 1130
120 F(I,J) = A1(I,J)
130 NEXT J
140 NEXT I
150 FOR I = 1 TO N
160 FOR J = 1 TO N

```

```

1170 A(I,J) = 0
1180 FOR K = 1 TO N
1190 A(I,J) = A(I,J) + F(I,K) * F(K,J)
1200 NEXT K
1210 IF I = J THEN A(I,I) = A(I,I) + IM(LL) ^ 2
1220 NEXT J,I
1230 FOR K = 1 TO N: B(K) = K: C(K) = 0: NEXT K
1240 FOR I = 1 TO N
1250 FOR J = I TO N
1260 IF I < J GOTO 1470
1270 Z = ABS(A(I,I)): L = I: C = I
1280 FOR R = I TO N
1290 FOR S = I TO N
1300 Y = ABS(A(R,S))
1310 IF Y > Z THEN L = R: C = S: Z = Y
1320 NEXT S,R
1330 IF L = I AND C = I GOTO 1410
1340 W = B(I): B(I) = B(C): B(C) = W
1350 FOR K = 1 TO N
1360 W = A(K,I): A(K,I) = A(K,C): A(K,C) = W
1370 NEXT K
1380 FOR K = 1 TO N
1390 W = A(I,K): A(I,K) = A(L,K): A(L,K) = W
1400 NEXT K
1410 IF A(I,I) = 0 GOTO 1540
1420 Z = A(I,I)
1430 FOR K = I TO N
1440 A(I,K) = A(I,K) / Z
1450 NEXT K
1460 GOTO 1520
1470 Z = A(J,I)
1480 FOR K = I TO N
1490 A(J,K) = A(J,K) - Z * A(I,K)
1500 IF ABS(A(J,K)) < = E5 THEN A(J,K) = 0
1510 NEXT K
1520 NEXT J
1530 NEXT I
1540 IF N - I > 2 THEN GOSUB 2040: GOTO 1760
1550 IF N = 2 GOTO 1580
1560 IF N - I > 1 THEN C(N - 2) = 0: A(N - 2, N - 2) = 1
1570 IF N - I = 1 THEN C(N - 1) = - 1: A(N - 1, N - 1) = 1
1580 C(N) = 1: A(N, N) = 1
1590 FOR I = N - 1 TO 1 STEP - 1
1600 J = I + 1
1610 FOR K = I TO 1 STEP - 1
1620 C(K) = C(K) - A(K, J) * C(J)
1630 IF ABS(C(K)) < = E5 THEN C(K) = 0
1640 A(K, J) = 0
1650 NEXT K
1660 NEXT I
1670 FOR K = 1 TO N
1680 VR(B(K), LL) = C(K)
1690 NEXT K
1700 IF IM(LL) = 0 GOTO 1760
1710 FOR I = 1 TO N
1720 VI(I, LL) = 0
1730 FOR K = 1 TO N
1740 VI(I, LL) = VI(I, LL) + F(I, K) * (- VR(K, LL) / IM(LL))

```

```

1750 NEXT K,I
1760 NEXT LL
1770 HOME : PRINT : PRINT "RESULTADOS FINAIS": PRINT
1780 FOR I = 1 TO N
1790 PRINT " AUTOVALOR DA MASSA M ":I
1800 PRINT RE(I);" ";
1810 IF IM(I) = 0 THEN PRINT "+";
1820 PRINT IM(I);"J": PRINT
1825 IF SNG = "N" THEN PRINT " FRE.DE RES.          COEF.DE AMORT.": GOTO 1840
1830 PRINT " COEF.DE AMORT.          FRE.DE RES.": PRINT
1840 W8 = SQR (RE(I) ^ 2 + IM(I) ^ 2):W9 = SQR (377 * W8):W7 = ATN (IM(I) / RE(I)):W9 = W9 / 2
1850 X8 = W8 * COS (W9):X9 = W8 * SIN (W9)
1860 PRINT X8,X9;" -RAD-"
1870 X8 = X8 / 6.283185:X9 = X9 / 6.283185
1880 PRINT : PRINT X8,X9;" -HZ-": PRINT
1890 PRINT "X----> AUTOVETOR CORRESPONDENTE"
1900 FOR J = 1 TO N
1910 PRINT TAB(10);VR(J,I);" ";
1920 IF VI(J,I) = 0 THEN PRINT "+";
1930 PRINT VI(J,I);"J"
1940 NEXT J,I
1960 PRINT D$;"OPEN AUTOVETORES"
1970 PRINT D$;"WRITE AUTOVETORES": PRINT N
1980 FOR I = 1 TO N: FOR J = 1 TO N
1990 D = VI(I,J)
1995 IF SNG = "N" THEN D = VR(I,J)
2000 PRINT D$;"WRITE AUTOVETORES": PRINT D
2010 NEXT : NEXT
2020 PRINT D$;"CLOSE"
2030 END
2040 HOME : PRINT : PRINT "X---->ERRO: LINHAS LD > 3": PRINT
2050 FOR II = 1 TO N: FOR JJ = 1 TO N
2060 PRINT "A(";I;",";J;") = ";A(II,JJ)
2070 NEXT JJ,II
2080 PRINT " ORDEN DAS VARIAVEIS"
2090 FOR II = 1 TO N
2100 PRINT B(II);" ";: NEXT II
2110 RETURN

```

ANEXO II

C *****
C INICIO DO PROGRAMA PRINCIPAL
C *****

```

0001 PROGRAM DE ANALISE DE RESONANCIA SUBSINCRONA
0002 DIMENSION FORMT1(3),FORMT2(9),EIXOX(132),TITULO(10,10),TO(6)
0003 REAL IL,KAJH(6),KI
      DOUBLE PRECISION DR2,DH1,DH2,DH3,DH4,DH5,DC1,DC2,DC3,DC4,DR3,DCITE
      * ,DH6,DANG,DP12,DSK,OSOMA,OV(20),DK(6,20),VEDEST(6,20)
      * ,DTQ(6),DVS(20),DY(20),DAM(6),DARO(1500,10),PREDIT(20)
      * ,A(20,20),C(20,20),CORRET(20),DEFFO,DCOR(20),DY35(5,20),KK(20,20)
      * ,AD,AO,L1,L3,L4,LG,L2,L4,LD,LQ,PD,RO,RF,RC,IA,IR,IX,OB,FI,IQ,ID,
      * ,VJ,EF,CF,MZ,AZ,ER,EI,V8,A8,VINF,VINFFA,TRQEL,T1,T2,T3,T4,CL
      * ,HH3,HH4,HH5,PE(20),MODIF(20)
      *
      COMPLEX CAL1030
      D1 = 0.
      K1 = 0.
      FALHA = 0.

```

C LEITURA DOS DADOS DO GERADOR
C REATANCIAS
C

```

0008 READ(5,10) XD,XO,X1,X2,X3,X4,XL
0009 FORMAT(7F5.3)
0010 WRITE(6,20)XD,XO,X1,X2,X3,X4,XL
0011 FORMAT(1H1,/,10X,REATANCIAS:/,22X,.- SINCRONA DE EIXO D = ,
      * F6.3,/,22X,.- SINCRONA DE EIXO C = ,F6.3,
      * /,22X,.- TRANSITORIA DE EIXO D = ,F6.3,
      * /,22X,.- TRANSITORIA DE EIXO Q = ,F6.3,
      * /,22X,.- SUBTRANSITORIA DE EIXO D = ,F6.3,
      * /,22X,.- SUBTRANSITORIA DE EIXO Q = ,F6.3,
      * /,22X,.- DE DISPERCAO DE ARMADURA = ,F6.3,///)

```

C CTES DE TEMPO A CKT ABERTO (S)
C

```

0012 READ(5,7)T1,T2,T3,T4,RA,N
0013 FORMAT(5F5.3,11)
0014 WRITE(6,20)T1,T2,T3,T4,RA,N
0015 FORMAT(/,10X,CONSTANTES DE TEMPO A CIRCUITO ABERTO (S):,
      * /,22X,.- TRANSITORIA DE EIXO D = ,F6.3,
      * /,22X,.- TRANSITORIA DE EIXO Q = ,F6.3,
      * /,22X,.- SUBTRANSITORIA DE EIXO D = ,F6.3,
      * /,22X,.- SUBTRANSITORIA DE EIXO Q = ,F6.3,
      * /// 10X,RESISTENCIA DO ESTATOR = ,F6.3,/,10X,
      * ,NJMERO DE MASSAS GIRANTES = ,11,///)

```

C DADOS DA TURBINA
C

```

0016 DO 50 I=1,N
0017 II=9+N+I
0018 III=I+1
0019 I1=I-1
0020 READ(5,11)JH(II),D
0021 FORMAT(D15.6,F5.2)

```

```

0022 WRITE(6,203)I,JH(I),D
0023 203 FORMAT(/,10X,' DADOS PROPRIOS ',14,1P015.6,F9.3)
0024 C(I,I,II)=DBLE(-JH(I))
0025 KK(I,I,II)=DRLE(-D)
0026 C(II-N,II-N)=1.000
0027 IF(II.GT.NIGOTO 360
0028 READ(5,12)KA,D
0029 12 FORMAT(2F7.3)
0030 WRITE(6,204)KA,D
0031 204 FORMAT(/,20X,' DADOS MUTUOS : ',2F10.3)
0032 KK(II,8+II)=DBLE(KA)
0033 KK(II,9+N+II)=DBLE(D)
0034 360 IF(N-II)370,380,380
0035 370 KA=0.
0036 D=0.
0037 KK(II,8+I2)=DBLE(KI)
0038 KK(II,8+I1)=DBLE(-KA-K1)
0039 KK(II,II)=KK(II,II)-01-D
0040 KK(II-N,II)=-1.000
0041 IF(I2.NE.0)KK(II,8+N+I2)=DBLE(D1)
0042 D1=D
0043 KI=KA
0044 50 CONTINUE

```

C C C DISTRIBUI AD DOS TORQUES

```

0045 READ(5,13)TO
0046 13 FORMAT(6F6.3)
0047 WRITE(6,205)
0048 205 FORMAT(/,30X,' DISTRIBUICAO DOS TORQUES NO EIXO',//)
0049 WRITE(6,206)TO
0050 206 FORMAT(25X,6F8.3,//)

```

C C C CALCULO DOS PARAMTROS ELETRICOS

```

0051 AD=DBLE(XD-XL)
0052 AQ=DBLE(XO-XL)
0053 LI=AD*(X1-XL)/(XO-X1)
0054 L3=AQ*(X2-XL)/(XO-X2)
0055 LF=L1+AD
0056 LG=L3+AQ
0057 L2=AD*LI/(X3-XL)/(AD*LI-LF*(X3-XL))
0058 L4=AQ*L3*(X4-XL)/(AQ*L3-LG*(X4-XL))
0059 LD=L2+AD
0060 LQ=L4+AQ
0061 T1=T1*377.000
0062 T2=T2*377.000
0063 T3=T3*377.000
0064 T4=T4*377.000
0065 RD=(LD-AQ*AD/LF)/T3
0066 RO=(LQ-AQ*AO/LG)/T4
0067 RF=LF/T1
0068 RG=LG/T2
0069 WRITE(6,23)XO,XO,AD,AO,LF,LG,LD,LO,RO,RO,RF,RG,RA
0070 23 FORMAT(/,10X,' PARAMETROS ELETRICOS DO GERADOR',//)
0071 *22X,' LC= ',F9.6/,
0072 *22X,' LO= ',F9.6/,
0073 *22X,' LAQ= ',F9.6/,

```

```

*22X, LAQ= ,F9.6,/
*22X, LF= ,F9.6,/
*22X, LG= ,F9.6,/
*22X, LKD= ,F9.6,/
*22X, LKO= ,F9.6,/
*22X, RKD= ,F9.6,/
*22X, RKQ= ,F9.6,/
*22X, RF= ,F9.6,/
*22X, RG= ,F9.6,/
*22X, RA= ,F9.6,/)

```

```

C
C
C
DADOS DA LINHA DE TRANSMICAO RADIAL

```

```

0071 READ(5,14)IL,RL,PC
0072 FORMAT(3F6.3)
0073 WRITE(6,207)IL,RL,PC
0074 207 FORMAT(/,10X,'DADOS DA LT SEM A FALHA',/)
*15X,'INDUTANCIA DA LT = ',F6.3,/
*15X,'RESISTENCIA DA LT = ',F6.3,/
*15X,'PERCENTAGEM DE COMPENSACAO = ',F6.3,'%',/)
CL=IL*PC/100.000
CL=1/CL

```

```

C
C
C
DADOS DE OPERACAO DA MAQUINA

```

```

0077 READ(5,15)FP,P0,VA
0078 15 FORMAT(3F6.3)
0079 WRITE(6,208)FP,P0,VA
0080 208 FORMAT(/,10X,'DADOS DE OPERACAO DO GERADOR',/)
*15X,'FATOR DE POTENCIA = ',F6.3,/
*15X,'POTENCIA NOMINAL DE OPERACAO = ',F6.3,/
*15X,'TENSAO NOMINAL NOS TERMINAIS DO GERADOR = ',F6.3,/)
W0=1.000

```

```

C
C
C
CALCULO DAS CONDICAOES INICIAIS

```

```

0082 IA=DBLE(P0/FP)
0083 IR=IA#FP
0084 FI=ARCS(FI)
0085 IX=-IA#DSIN(FI)
0086 W8=XQCIR+RA#IX
0087 W9=VA+RA#IR-XQ#IX
0088 DB=DATAN(W8/W9)
0089 IO=IA#DCOS(DB+FI)
0090 ID=-IA#DSIN(DB+FI)
0091 DF3=DSQRT(3.000)
0092 VQ=VA#DCOS(DB)
0093 EF=VQ+RA#IQ-XD#ID
0094 CF=DR3#EF/AD
0095 OCTTE=IL-1/CL
0096 MZ=DSQRT(RL#RL+DCTTE**2)
0097 AZ=DATAN(DCTTE/RL)
0098 FF=VA-MZ#IA#DCOS(AZ-FI)
0099 EI=-MZ#IA#DSIN(AZ-FI)
0100 V8=DSQRT(EI#EI+ER#ER)
0101 AB=DATAN(EI/ER)
0102 TT=OB-A8
0103 DY(1)=DR3#ID

```

```

0104 DY(2)=CF
0105 DY(3)=0.000
0106 DY(4)=DF3*I0
0107 DY(5)=0.000
0108 DY(6)=0.000
0109 DY(7)=-DR3*I0/CL
0110 DY(8)=DR3*ID/CL
0111 DV(2)=-CF*RF
0112 VINI=V8
0113
0114 WRITE(6,90)VINF
0115 90 FORMAT(2X,'X-----> TENSÃO NA BARRA INFINITA = ',F12.7,/)
0116 DAM(N-1)=TT
0117 W=8+2*N
0118 TRQEL=-((-XD*DY(I)-AD*DY(2)+XD*DY(4))*DY(I))/3
0119 WRITE(6,80)TRQEL
0120 80 FORMAT(2X,'X-----> TORQUE ELETRICO CALCULADO = ',F12.7,/)
0121 DO 70 I=1,N
0122 70 DTQ(I)=TO(I)+TRQEL
0123 DAM(N)=-(KK(W,N+7)*DAM(N-1))/KK(W,N+8)
0124 NM2=N-2
0125 DO 52 M=1,NM2
0126 I=N+7-M
0127 II=N+I+1
0128 DSK=KK(II,I+1)*DAM(I-7)+KK(II,I+2)*CAM(I-6)
0129 52 DAM(I-8)=- (DTQ(I-7)+DSK)/KK(II,I)
0130 DO 54 I=1,N
0131 DY(8+I)=DAM(I)
0132 54 DY(14+I)=1.000
0133 WRITE(6,24)
0134 24 FORMAT(///,'I,OX,CONDICÇÕES INICIAIS DO SISTEMA',//)
0135 DO 25 I=1,20
0136 DCOR(I)=DY(I)
0137 25 WRITE(6,26)I,DY(I)
0138 26 FORMAT(15X,'DY(',I2,') = ',I1015.8)
0139
0140
0141
0142
0143
0144
0145
0146
0147
0148
0149
0150
0151
0152
0153
0154
0155
0156
0157
0158
0159
0160
0161
0162
0163
0164
0165
0166
0167
0168
0169
0170
0171
0172
0173
0174
0175
0176
0177
0178
0179
0180
0181
0182
0183
0184
0185
0186
0187
0188
0189
0190
0191
0192
0193
0194
0195
0196
0197
0198
0199
0200

C C C
C (1,1)=DBLE(IL+XD)
C (1,2)=AD
C (1,3)=AD
C (2,1)=AD
C (2,2)=LF
C (2,3)=AD
C (3,1)=AD
C (3,2)=AD
C (3,3)=LD
C (4,4)=DBLE(IL+XD)
C (4,5)=AO
C (4,6)=AO
C (5,4)=AO
C (5,5)=LG
C (5,6)=AO
C (6,4)=AO
C (6,5)=AO
C (6,6)=LQ
C (7,7)=1.000
C (8,8)=1.000
DO 111 I=15,20

```



```

0159 DO 111 J=15,20
0160 111 C(I,J)=C(I,J)*377.000
C
MONTAGEM DA MATRIZ K
C

```

```

0161 KK(1,1)=DBLE(RA+RL)
0162 KK(1,4)=DBLE(XO+IL)
0163 KK(1,5)=AO
0164 KK(1,6)=AO
0165 KK(1,7)=1.000
0166 KK(2,2)=RF
0167 KK(3,3)=RD
0168 KK(4,1)=DBLE(-IL-XD)
0169 KK(4,2)=-AD
0170 KK(4,3)=-AD
0171 KK(4,4)=DBLE(RA+RL)
0172 KK(4,8)=1.000
0173 KK(5,5)=FG
0174 KK(6,6)=RO
0175 KK(7,1)=-1.000/CL
0176 KK(7,9)=1.000
0177 KK(8,4)=-1.000/CL
0178 KK(8,7)=-1.000
0179 KK(19,1)=DBLE(-XD/3.0)
0180 KK(19,2)=-AD/3.000
0181 KK(19,3)=-AD/3.000
0182 KK(19,4)=DBLE(XO/3.0)
0183 KK(19,5)=AO/3.000
0184 KK(19,6)=AO/3.000

```

```

C
MONTAGEM DO VETOR DE TENSORES " DV "
C

```

```

0185 DO 49 I=1,20
0186 IF(I.EQ.2)GOTO 49
0187 DV(I)=DBLE(0.0)
0188 IF(I.GT.9.AND.I.LT.15) DV(I)=1.000
0189 .IF(I.GT.14) DV(I)=DTQ(I-14)
0190 49 CONTINUE
0191 DV(19)=000
0192 WRITE(6,27)
0193 27 FORMAT(1H1,/,25X,M A T R I Z C(I,J)',//)
0194 WRITE(6,28)((C(I,J),J=1,10),I=1,20)
0195 28 FORMAT(10(1X,1PD11.4))
0196 WRITE(6,29)
0197 29 FORMAT(120(1_'),/)
0198 WRITE(6,28)((C(I,J),J=11,20),I=1,20)
0199 WRITE(6,30)
0200 30 FORMAT(1H1,/,25X,M A T R I Z KK(I,J)',//)
0201 WRITE(6,28)((KK(I,J),J=1,10),I=1,20)
0202 WRITE(6,29)
0203 WRITE(6,28)((KK(I,J),J=11,20),I=1,20)

```

```

C
INVERSAD DA MATRIZ " C "
C

```

```

0204 N=2*N+8
0205 DO 55 I=1,N
0206 DO 55 J=1,N
0207 55 A(I,J)=C(I,J)

```

```

0258
0259
0260
0261
0262
0263
0264
0265
0266
0267
0268
0269
0270
0271
0272
0273
0274
0275
0276
0277
0278
0279
0280
0281
31
32
33
34
35
36
37

```

C C

```

0282
0283
0284
0285
0286
0287
0288
0289
0290
0291
0292
0293
0294
0295
0296
0297
0298
0299
0300
0301
0302
0303
0304
0305
0306
0307
0308
0309
0310
0311
0312
0313

```

```

0314 DC3=(2.000+DR2)/6.000
0315 DC4=DC1
0316 DR2=DSQRT(2.000/3.000)
0317 DR3=DSQRT(3.000)
0318 DPI2=3.1415926535897932/2
C315 CG=0
0320 CG=0
0321 L=1
0322 JRE=1
0323
0324 DANG=377*T+DY(13)+DPI2
0325 WRITE(6,1220)(DY(IKJ),IKJ=1,10)
0326 WRITE(6,1220)(DY(IKJ),IKJ=11,20)
0327 WRITE(6,29)
0328 CALL FUNCAD(VEDEST,DY,DV,AFO,CO,VINF,JRE)
0329 WRITE(6,1220)(VEDEST(JRE,IKJ),IKJ=1,10)
0330 WRITE(6,1220)(VEDEST(JRE,IKJ),IKJ=11,20)
0331 DARO(L,1)=DP2*(DY(1)+DCOS(DANG)+DY(4)*DSIN(DANG))
0332 DARO(L,2)=DP2*(DY(7)+DCOS(DANG)+DY(10)*DSIN(DANG))
0333 DARO(L,3)=DY(13)
0334 DARO(L,4)=DY(19)
0335 DSOA=0.000
0336 DO 63 I=1,6
0337 IF(I-3)101,101,102
0338 101 DCTTE=DY(14)
0339 102 DCTTE=DY(1)
0340 63 DSOA=DSO+A*F0(19,I)*DCTTE#DY(I)
0341 DARO(L,5)=DSO*A*JH(5)*377.000
0342 DARO(L,6)=(DY(9)-DY(10))*19.30300
0343 DARO(L,7)=(DY(11)-DY(12))*34.92900
0344 DARO(L,8)=(DY(11)-DY(12))*52.03800
0345 DARO(L,9)=(DY(12)-DY(13))*70.85800
0346 DARO(L,10)=(DY(13)-DY(14))*2.82200

```

```

C
C
C
930 IF(T.GT.TE)GOTO 1540
IF(L.GE.1499)GOTO 1540
IF(T.GE.DF.AND.CC.EQ.1)CALL TROCA(CC,AFO,AF,CO,C,VINF,VINFFA)
IF(T.GE.CF.AND.CC.EQ.0)CALL TROCA(CC,AFO,AF,CO,C,VINF,VINFFA)
IF(T.GE.DF.AND.T.LT.DF+H)KONAD=0
IF(T.GE.CF.AND.T.LT.CF+H)KONAD=0
IF(KONAD.GE.4)GOTO 39
KONAD=KONAD+1
DO 1 I=1,20
1 DY35(KONAD,I)=DY(I)
C
C1219 WRITE(6,1219)KONAD,T
FORMAT(2X,'XXXXX'----->>> KONAD ',I4,F15.7)
CALL FUNCAD(VEDEST,DY,DV,AFO,CO,VINF,KONAD)
C
C1220 WRITE(6,1220)(VEDEST(KONAD,IKJ),IKJ=1,10)
C
C WRITE(6,1220)(VEDEST(KONAD,IKJ),IKJ=11,20)
IF(KONAD.LI.4)GOTO 8080
C
C REFINAMENTO DOS VALORES DO RKG
C
00 8081 I=1,20
DY35(2,I)=DY35(1,I)+(9.000#VEDEST(1,I)+19.000#VEDEST(2,I))-

```

```

0355 5.000*VEDEST(3,I)+VEDEST(4,I)*H/24.000
0356 CALL FUNCAO(D5,DVS,DV,AFO,CO,VINF,JRE)
0357 DO 8082 I=1,20
0358 VEDEST(2,I)=D5(JRE,I)
0359 DY35(3,I)=DY35(1,I)+(VEDEST(1,I)+4.000*VEDEST(2,I)+VEDEST(3,I))*
      H/3.000
*
0360 DVS(I)=DY35(3,I)
0361 CALL FUNCAO(D5,DVS,DV,AFO,CO,VINF,JRE)
0362 DO 8083 I=1,20
0363 VEDEST(3,I)=D5(JRE,I)
0364 DY35(4,I)=DY35(1,I)+(VEDEST(1,I)+3.000*VEDEST(2,I)+
      3.000*VEDEST(3,I)+VEDEST(4,I))*H/8.000
*
0365 DVS(I)=DY35(4,I)
0366 CALL FUNCAO(D5,DVS,DV,AFO,CO,VINF,JRE)
0367 DO 8084 I=1,20
0368 VEDEST(4,I)=D5(JRE,I)
C
C*****
C IF(KONAD.GE.4)GOTO 39
C
C COMECO DA INTEGRACAO RKG
C
0370 J=1
0371 DO 64 I=1,N
0372 DO 69 IDK=1,4
0373 DK(IDK,I)=0.000
0374 DVS(I)=DY(I)
0375 CALL FUNCAO(DK,DVS,DV,AFO,CO,VINF,J)
      J=2
0376 DO 65 I=1,N
0377 DVS(I)=DY(I)+DH1*DK(1,I)
0378 CALL FUNCAO(DK,DVS,DV,AFO,CO,VINF,J)
      J=3
0379 DO 66 I=1,N
0380 DVS(I)=DY(I)+DH2*DK(1,I)+DH3*DK(2,I)
0381 CALL FUNCAO(DK,DVS,DV,AFO,CO,VINF,J)
      J=4
0382 DO 67 I=1,N
0383 DVS(I)=DY(I)+DH4*DK(2,I)+DH5*DK(3,I)
0384 CALL FUNCAO(DK,DVS,DV,AFO,CO,VINF,J)
      J=4
0385 DO 68 I=1,N
0386 DY(I)=DY(I)+(DC1*DK(1,I)+DC2*DK(2,I)+DC3*DK(3,I)+DC4*DK(4,I))*H
0387 GOTO 38
C
C "ADAM'S " PREDITOR - CORRETOR
C
0391 39 DO 211 I=1,20
0392 PREDIT(I)=DY(I)+(55.000*VEDEST(4,I)-59.000*VEDEST(3,I)+
      37.000*VEDEST(2,I)-9.000*VEDEST(1,I))*H/24.000
*
0393 226 CALL FUNCAO(D5,PREDIT,DV,AFO,CO,VINF,JRE)
0394 DO 222 I=1,20
0395 CORRET(I)=DY(I)+(9.000*D5(JRE,I)+19.000*VEDEST(4,I)-
      5.000*VEDEST(3,I)+VEDEST(2,I))*H/24.000
*
0396 IF(IRD=0)
0397 DO 223 I=1,20
0398 DERRJ=DABS(PREDIT(I))-CORRET(I)

```

```
0399 IF(DERR0.LE.0.00001)GOTO 223
0400 IF(JR0=1
0401 223 CONTINUE
0402 IF(IFUFO.E0.0)GOTO 221
0403 ITER=ITER+1
0404 DO 224 I=1,20
0405 224 PREDIT(I)=CORRET(I)
0406 IF(ITER.LE.10)GOTO226
0407 KONAD=0
0408 GOTO 930
0409 221 CALL FUNCAO(D5,CORRET,DV,AFO,CO,VINF,JRE)
0410 DO 217 I=1,20
0411 DO 2 I5=1,3
0412 2 VEDEST(I5,I)=VEDEST(I5+1,I)
0413 VEDEST(4,I)=D5(I,I)
0414 217 DY(I)=CORRET(I)
0415 T=T+H
0416 38
C ITER=0
0417 IF(T.LE.DF)GOTO 930
CG=CG+1
0418 IF(CG.LT.PG)GOTO 930
CG=0
0419 L=L+1
0420 GOTO 660
0421
C
C INTRODUCAO DOS DADOS PARA O TRACADOR DE FUNCOES
C
0422 1540 READ(5,19)((TITULO(I,J),J=1,10),I=1,10)
0423 19 FORMAT(10A4)
0424 READ(5,20)((EIXOX(I),I=1,5)
0425 20 FORMAT(5A4)
0426 READ(5,21)((FORMT1(I),I=1,3)
0427 21 FORMAT(3A4)
0428 READ(5,22)((FORMT2(I),I=1,9)
0429 22 FORMAT(9A4)
0430 NC=10
0431 NL=600
0432 NPJS=132
0433 NPEF=3
0434 ITF=0
0435 H=P*G*H/377
0436 CALL PLOTER(DARO,NC,NL,NPOS,FORMT1,FORMT2,EIXOX,NPER,H,TITULO,ITF)
C
C EXECUCAO DOS PREPARATIVOS PARA A " FFT "
C
0437 READ(5,22)((FORMT2(I),I=1,9)
0438 NB=2*#INEX
0439 IF(ITAU#L.LT.NB)GOTO 9090
0440 NRMINT=INIT+NB#ITAU
0441 NBD2=NR/2
0442 DO 71 I=1,10
0443 K=0
0444 DO 72 J=INIT,NBMINT,ITAU
0445 CREAL=DARO(J,I)
0446 K=K+1
0447 IF(K.GT.NR) GOTO 72
0448 CA(K)=CMPLX(CREAL,0.0)
0449 72 CONTINUE
```

```
0450 CALL FFT(CA,INEX,NB)
0451 DO 73 J=L,NB/2
0452   DARQ(J,I)=CABS(CA{J})
0453   71 CONTINUE
0454   H=ITAU*H
0455   NL=NB/2
0456   NPER=1
0457   ITF=1
0458   CALL PLOTTER(DARO,NC,NL,NPOS,FORMAT1,FORMAT2,EIXOX,NPER,H,TITULO,ITF)
0459   9090 STOP
0460   END
```

C ESTA SUBROTINA "PLOTA" AS FUNCOES DA MATRIZ DARQ(NL,NC)

```
0001 SUBROUTINE PLOTTER(DARQ,NC,NL,NPCS,FORMT1,FORMT2,EIXOX,NPER,H,  
0002 TITULO,ITF)  
0003 DIMENSION FORMT1(3),FORMT2(9),EIXOX(132),ITITULO(10,10),SIMBOL(10)  
0004 REAL MAX(10),MIN(10)  
0005 DOUBLE PRECISION DARQ(1500,10)  
DATA BRANCO' /,PONTO' /,SIMBOL/' /,2',3',4',5',6',7',8',  
* '9',0',XIS/'X' /
```

C OBTENCAO DOS MAXIMOS E DOS MINIMOS

```
0006 DO 10 I=1,NC  
0007 MAX(I)=DARQ(I,I)  
0008 10 MIN(I)=DARQ(I,I)  
0009 DO 11 I=1,NC  
0010 DO 11 J=1,NL  
0011 IF(DARQ(J,I).GT.MAX(I))MAX(I)=DARQ(J,I)  
0012 IF(DARQ(J,I).LT.MIN(I))MIN(I)=DARQ(J,I)  
0013 11 CONTINUE  
0014 A=6  
0015 C=NPOS-20.  
0016 IC=NPOS-20  
0017 TE=NL*H  
0018 DO 12 I=6,IC  
0019 12 EIXOX(I)=PONTO
```

C INICIO DAS IMPRECOES

```
0020 DO 13 I=1,NC  
0021 WRITE(6,20)(TITULO(I),J),J=1,10)  
0022 20 FORMAT(1H/,30X,10A4,/)   
0023 WRITE(6,28)MIN(I),MAX(I)   
0024 28 FORMAT(15X,MINIMO = ,F15.6,   
0025 WRITE(6,FORMT1)(EIXOX(K),K=1,IC)   
0026 IZERO=0   
0027 DO 14 K=6,IC   
0028 14 EIXOX(K)=BRANCO   
0029 IF(MAX(I).EQ.MIN(I))GOTO 56   
0030 IF(MAX(I).EQ.0.0.AND.MIN(I).EQ.0.0)GOTO 56   
0031 IF(MAX(I).GT.0.0.AND.MIN(I).GT.0.0)GOTO 55   
0032 IF(MAX(I).LT.0.0.AND.MIN(I).LT.0.0)GOTO 55   
0033 IZERO=INT((C*MIN(I)-A*MAX(I))/(MIN(I)-MAX(I)))   
0034 T=0.0   
0035 DO 15 J=1,NL,NPER   
0036 RIPOS=(C*MIN(I)-A*MAX(I)+(A-C)*DARQ(J,I))/(MIN(I)-MAX(I))   
0037 IPQS=INT(RIPOS)   
0038 EIXOX(IPQS)=SIMBOL(I)   
0039 IPQSMI=IPQS-1   
0040 DO 18 K=6,IPQSMI   
0041 18 EIXOX(K)=PONTO
```

```
0042 F=H*(J-1)
0043 IF(ITE.EQ.1)T=H*J
0044 IF(ITF.EQ.1)F=T/(2*TE*H)
0045 IF(IZERO.NE.0)EIXOX(IZERO)=XIS
0046 WRITE(6,FORMAT2)F,DARO(J,I),(EIXOX(K),K=6,IC)
0047 DO 19 K=6,IPOS
0048 19 EIXOX(K)=BRANCO
0049 15 CONTINUE
0050 56 DO 16 K=6,IC
0051 16 EIXOX(K)=PONTO
0052 13 CONTINUE
0053 RETURN
0054 END
```


C
C
C
C
C
C
C
C
C

SUBROTINA QUE CALCULA O VALOR DA FUNCAO QUE SE QUER INTEGRAR

SUBROUTINE FUNCAO(DK,DVS,DV,AFO,CO,VINF,JJ)
DOUBLE PRECISION DSOMA1,DSOMA2,CTTE,OW5,DIO,AF0(20,20),
* ARTE(8),DK(6,20),DVS(20),DV(20),CO(20,20),ARAF0(6,6),
† VINF,DR3

DR3=DSQRT(3.0D0)
OW5=DVS(19)
DIO=DVS(1)
DIO=DVS(4)
DV(1)=-DR3*VINF*DSIN(DVS(13))
DV(4)=DR3*VINF*DCOS(DVS(13))

DO 10 I=1,6
IF(I-3)21,21,22

21 K=4
KF=6

CTTE=DIO
GOTO 23

22 K=1
KF=3

CTTE=DIO
DO 24 L=K,KF

ARAF0(I,L)=AFO(I,L)
24 AFO(I,L)=AFO(I,L)*OW5

ARTE(1)=AFO(19,I)
10 AFO(19,I)=AFO(19,I)*CTTE

ARTE(7)=AFO(7,8)
ARTE(8)=AFO(8,7)
AFO(8,7)=AFO(8,7)*OW5
AFO(7,8)=AFO(7,8)*OW5
DO 11 I=1,20
DSOMA1=0.0D0
DSOMA2=0.0D0

WRITE(6,88)I,DVS(I),DV(I),VINF
88 FORMAT(2X,I - DVS - DV - DV * 12, 2(2X,1PD10.3),2X,F15.7)

DO 12 IK=1,20

DSOMA1=DSOMA1+AFO(I,IK)*DVS(IK)
DSOMA2=DSOMA2+CO(I,IK)*DV(IK)

12 CONTINUE
DK(J,I)=-DSOMA1-DSOMA2

11 CONTINUE
DO 20 I=1,6

IF(I-3)31,31,32
31 K=4

KF=6

CTTE=DIO
GOTO 33

32 K=1
KF=3

CTTE=DIO
DO 25 L=K,KF

25 AFO(I,L)=ARAF0(I,L)

0001
0002

0003
0004

0005
0006

0007
0008

0009
0010

0011
0012

0013
0014

0015
0016

0017
0018

0019
0020

0021
0022

0023
0024

0025
0026

0027
0028

0029

0030

0031

0032

0033

0034

0035

0036

0037

0038

0039

0047
0048
0049
0C5C
0051

20 AFO(19.1)=ARTE(1)
AFO(19.7)=ARTE(8)
AFO(17.8)=ARTE(7)
RETURN
END

C SUBROTINA QUE CALCULA A TRANSFORMADA RAPIDA DE FOURIER (FFT)

0001 SUBROUTINE FFT(A,N,NB)
0002 COMPLEX A(1030),U,W,T

C DIVIDE TODOS OS ELEMENTOS POR NB

0003 DO 1 J=1,NB
0004 1 A(J)=A(J)/NB

C REORDENA A SEQUENCIA DE ACORDO COM A BORBOLETA DA FFT

0005 NB2=NB/2
0006 NBM1=NB-1
0007 J=1
0008 DO 4 L=1,NBM1
0009 IF(L.GE.J)GOTO 2
0010 T=A(J)
0011 A(J)=A(L)
0012 A(L)=T
0013 2 K=NB2
0014 3 IF(K.GE.J)GOTO 4
0015 J=J-K
0016 K=K/2
0017 GOTO 3
0018 4 J=J+K

C CALCULO DA FFT

0019 PI=3.141592653589793
0020 DO 6 M=1,N
0021 U=CMPLX(1.0,0.0)
0022 ME=2**M
0023 K=ME/2
0024 W=CMPLX(COS(PI/K),-SIN(PI/K))
0025 DO 6 J=1,K
0026 DO 5 L=J,NB,ME
0027 LPK=L+K
0028 T=A(LPK)*U
0029 A(LPK)=A(L)-T
0030 5 A(L)=A(L)+T
0031 6 U=J*W
0032 RETURN
0033 END

C *****
 C ***** INICIO DA SUBROTINA " TROCA " *****
 C *****
 C *****
 C *****

C SUBROTINA QUE EFETUA A TROCA DE PARAMETROS DE REGIME PERMANENTE
 C PARA REGIME DE FALTA E VICE-VERSA
 C

```

0001 SUBROUTINE TROCA(CC,PRE,POS,PR1,PO1,VINF,VINFFA)
0002 DDJBLE PRECISION PRE(20,20),POS(20,20),PR1(20,20),PO1(20,20),
* VINF,VINFFA,CT
0003 DO 10 I=1,20
0004 DO 10 J=1,20
0005 CT=PRE(I,J)
0006 PRE(I,J)=POS(I,J)
0007 POS(I,J)=CT
0008 CT=PR1(I,J)
0009 PR1(I,J)=PO1(I,J)
0010 PO1(I,J)=CT
0011 CT=VINF
0012 VINF=VINFFA
0013 VINFFA=CT
0014 CC = CC + 1
0015 WRITE(6,16)CC
0016 16 FORMAT(2X,'X-----> CONTROLE DA TROCA : ',F4.2)
0017 RETURN
0018 END

```

ANEXO III

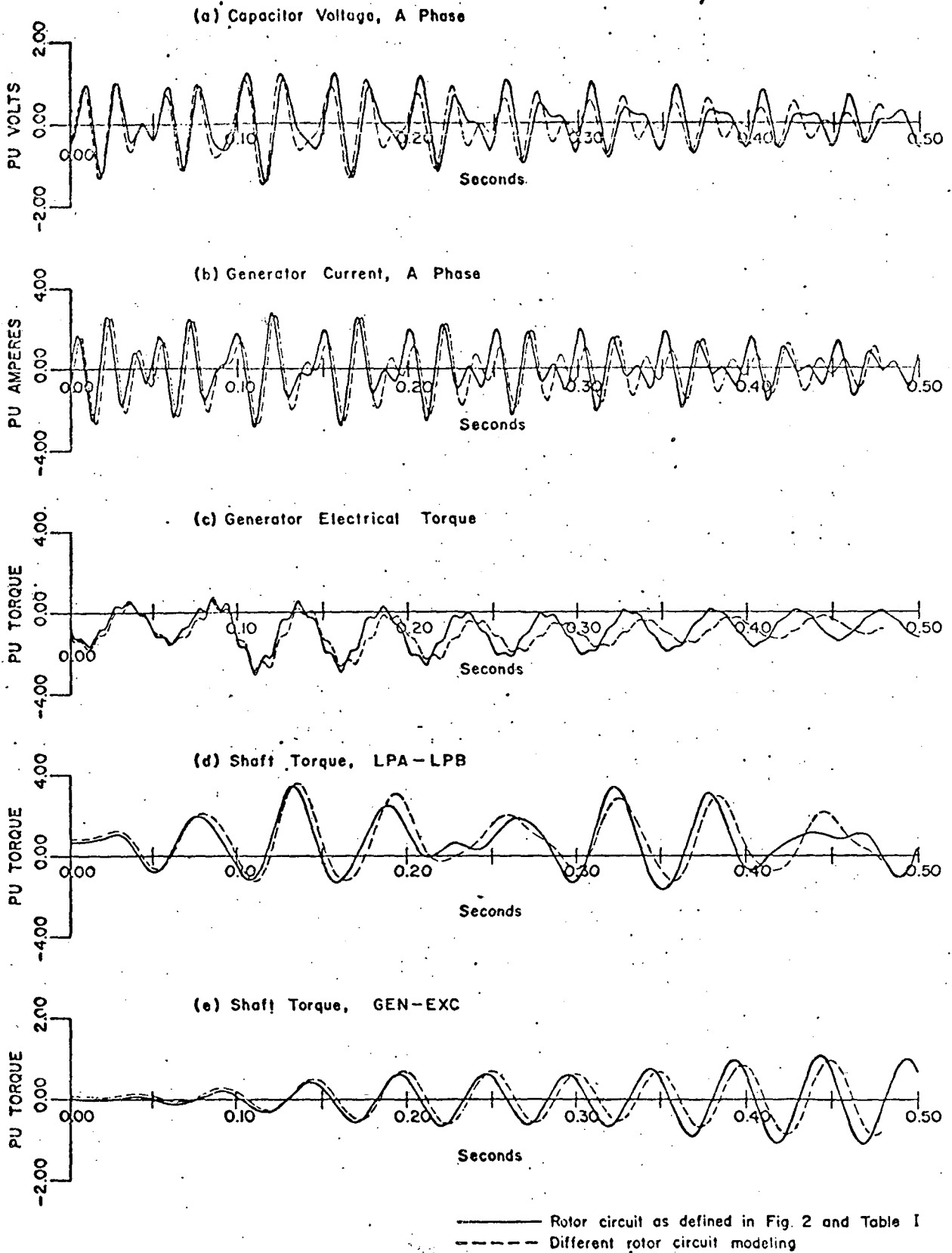


Fig. 5 Response Curves For Transient Case 1-T

Figura III.1 - Resultados apresentados na referência 25.

ANEXO IV

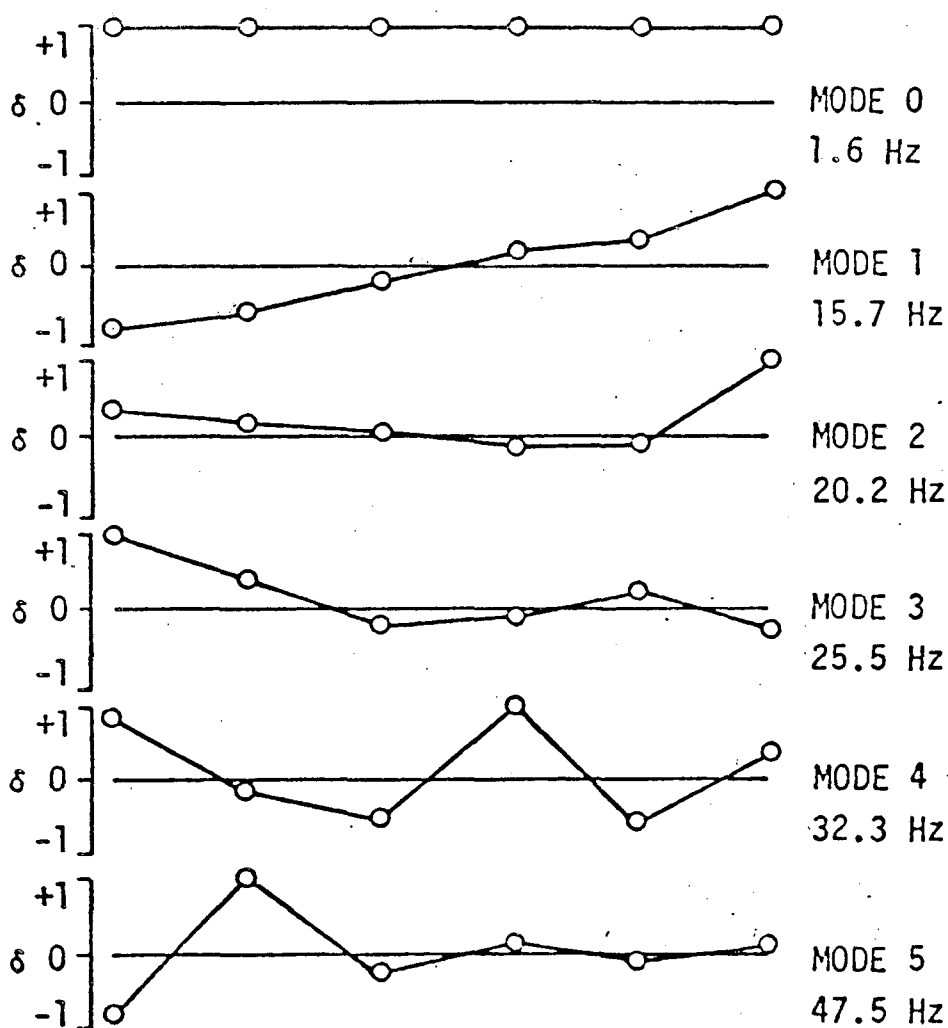
$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} 1 & -.7770 & .1099 & 1 & .8638 & -.7874 \\ 1 & -.5837 & .0646 & .3422 & -.0437 & 1 \\ 1 & -.3424 & .0150 & -.2297 & -.5027 & -.1133 \\ 1 & .1117 & -.0395 & -.0954 & 1 & .0211 \\ 1 & .3731 & -.0374 & .1660 & -.6205 & -.0045 \\ 1 & 1 & 1 & -.2525 & .3768 & .0009 \end{bmatrix}$$


Fig. 4. Mode shapes of the mechanical system of the IEEE benchmark model.

Figura IV.1 - Resultados apresentados na referência 9.