

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA

ESTUDO DA ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS
ATRAVÉS DO CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA
REALIZADO PELA MÁQUINA DE INDUÇÃO

Autor: Carlos Henrique Salerno

Orientadores: Mauro Sérgio Miskulin†
Luciano Martins Neto†

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Elétrica da Universidade Estadual de Cam-
pinas, UNICAMP, como parte dos requisitos
exigidos para obtenção do título de DOUTOR
EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Dezembro 1992

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Este exemplar corresponde à defesa de	Seal da tese
defendida por	<i>Carlos Henrique Salerno</i>
<i>Salerno</i>	Comissão
Julgadora em	<i>15 12 92</i>
	<i>[Signature]</i>
	Orientador

A minha esposa Rosana

AGRADECIMENTOS

Ao Professor PhD. Mauro Sérgio Miskulin pela orientação e apoio recebidos no desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores Luciano Martins Neto, Adélio José de Moraes e Geraldo Caixeta Guimarães da Universidade Federal de Uberlândia pelas valiosas discussões sobre partes específicas do trabalho.

Ao Engenheiro Marcos Ferreira Rezende pelo apoio técnico na realização dos ensaios em laboratório.

A CAPES pelo indispensável apoio financeiro.

Essencialmente, agradeço a Deus que nos dá paz e conforto em todos os momentos de dificuldades.

RESUMO

O emprego de pequenas máquinas de indução em determinados pontos estratégicos de um sistema elétrico, pode representar uma melhoria na estabilidade do referido sistema. Assim este trabalho trata da implementação de um modelo dinâmico da máquina de indução com seu regulador de velocidade em um programa de estabilidade. Através de simulações computacionais pode-se fazer uma análise da estabilidade transitória de um sistema elétrico observando-se os efeitos da máquina de indução no sistema fazendo a regularização do fluxo de potência ativa diferentemente do método tradicional que trata da regularização da potência reativa. São também realizados ensaios em laboratório com os mesmos objetivos. Uma análise de parâmetros é feita com intuito de observar seus efeitos na máquina de indução durante as simulações. Os resultados obtidos nas simulações bem como nos testes laboratoriais comprovam a idéia apresentada.

ABSTRACT

The improvement of the stability of a large power systems can be obtained through small induction generators, which are employed in strategic points of the system. In this work, to illustrate this fact, a power system stability program is used, in which is included a dynamic model for induction generator with speed governor and also experimental tests are made. The following operation condition of the power system is analysed. Assuming that one of these induction generators is on a certain busbar of the power system, a system disturbance occurs in such a way to require a transient increase of active power. Due to of the intrinsic characteristics of any induction machine, and particularly in this case, the reduced size of the induction generator employed, this machine will take the lead regarding to the synchronous generators and it will supply part of the active power demanded. Since this fact represents a relief for the synchronous generation, an improvement of the system stability is obtained. For this operational condition theoretic and experimental results are shown. The analysis of this results confirm the effectiveness of the idea here presented.

INDICE

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO	01
CAPITULO 2 - ASPECTOS DA ESTABILIDADE	
2.1 - Introdução	06
2.2 - Formas de estabilidade	07
2.2.1 - Estabilidade de Regime Permanente	07
2.2.2 - Estabilidade de Regime Transitório	11
2.2.3 - Estabilidade de Regime Dinâmico	14
2.3 - Comentários	14
CAPITULO 3 - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UM SISTEMA ELEMENTAR	
3.1 - Introdução	15
3.2 - Modelo dinâmico da máquina síncrona conectada a um barramento infinito	16
3.3 - Modelo dinâmico da máquina de indução conectada a um barramento infinito	26
3.3.1 - Avaliação dos parâmetros da máquina de indução	35
3.4 - Análise dos efeitos da máquina de indução no comportamento da máquina síncrona	38
3.5 - Resultado das simulações	46
3.6 - Comentários	53
CAPITULO 4 - PROGRAMA DE ESTABILIDADE TRANSITORIA (PET)	
4.1 - Introdução	55
4.2 - Características do programa	56
4.3 - Arquivo de dados	58
4.3.1 - Entrada de dados	58
4.3.2 - Saída de dados	59

4.4 - Cálculo das condições iniciais	60
4.5 - Técnicas de solução das equações	61
4.6 - Método trapezoidal Implícito	63
4.7 - Solução do algoritmo adotado	67
4.7.1 - Extrapolação	68
4.8 - Aplicações do método trapezoidal implícito	69
4.8.1 - Solução dos sistemas de primeira ordem	69
4.8.2 - Generalização da regra trapezoidal	72
9 - Comentários	75
CAPITULO 5 - MODELAMENTO DO GERADOR DE INDUÇÃO COM REGULADOR DE VELOCIDADE E SUA IMPLEMENTAÇÃO NO "PET"	
5.1 - Introdução	76
5.2 - Modelamento da máquina de indução	77
5.2.1 - Modelo utilizando o circuito equivalente de de regime permanente	78
5.2.2 - Modelo incluindo os transitórios mecânicos e elétricos do rotor	80
5.2.3 - Modelo incluindo todos os transitórios da máquina	83
5.3 - Representação do modelo de gaiola dupla	83
5.3.1 - Fator de gaiola	85
5.4 - Características do torque de carga	87
5.5 - Condições iniciais	88
5.6 - Descrição do programa e solução das equações diferenciais	93
5.6.1 - Entrada de dados	93
5.6.2 - Solução das equações diferenciais	95
5.6.2.1 - Equações mecânicas	96
5.6.2.2 - Equações de tensão	99

5.7 - Subrotinas para resolução das equações	102
5.8 - Reguladores de velocidade	103
5.8.1 - Introdução	103
5.8.2 - Aspectos Gerais	103
5.8.3 - Regulador de velocidade utilizado no PET ...	105
5.8.4 - Regulação de velocidade para a máquina de indução	108
5.9 - Modificação na entrada de dados	113
5.9.1 - Dados da máquina de indução	113
5.9.2 - Dados da máquina síncrona e do regulador de velocidade	114
5.10 - Parâmetros das máquinas de indução e dos reguladores de velocidade	115
5.11 - Resultado das simulações	116
5.12 - Comentários e conclusões	148
CAPITULO 6 - ANÁLISE DO DESEMPENHO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO EM FUNÇÃO DE SEUS PARÂMETROS E DE SUA POTÊNCIA COM RELAÇÃO A POTÊNCIA DA MÁQUINA SÍNCRONA	
6.1 - Introdução	149
6.2 - Equações que relacionam os parâmetros e os valores utilizados na simulação	150
6.3 - Resultados das simulações mostrando a influência dos parâmetros da máquina de indução	162
6.4 - Resultados das simulações mostrando a influência da potência da máquina de indução	176
6.5 - Comentários e conclusões	186
CAPITULO 7 - ENSAIOS EM LABORATÓRIO	
7.1 - Introdução	188
7.2 - Montagem do protótipo	188

7.2.1 - Monitoração das grandezas elétricas e mecânicas	192
7.2.1.1-Monitoração das grandezas elétricas ...	192
7.2.1.2-Monitoração das grandezas mecânicas ...	194
7.3 - Procedimento e resultado dos ensaios	195
CAPITULO 8 - CONCLUSÕES	213
REFERÊNCIAS	216
BIBLIOGRAFIA	221
APÊNDICE A - MODELO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE	222
APÊNDICE B - OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DA MÁQUINA EQUIVALENTE PARA MODELAGEM EM PROGRAMAS DE ESTABILIDADE..	227

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

O conceito de estabilidade requer que todas as oscilações de um sistema sejam amortecidas após um dado distúrbio. Tendo em mente este conceito pode-se então afirmar que um sistema elétrico é estável se após um transitório haja um amortecimento tal que todas as máquinas interconectadas retornem a um determinado ponto de operação com mesma frequência.

Com o crescimento natural dos sistemas de energia elétrica, o problema da estabilidade de frequência acentua-se uma vez que em um sistema elétrico a relação geração/carga se torna bastante susceptível aos distúrbios provocados no sistema. Fica claro então a necessidade de estudos nesta área visando o desenvolvimento de novas técnicas e dispositivos com capacidade de melhoria da estabilidade do sistema.

Existem dispositivos frequentemente utilizados baseando-se no princípio do controle de potência reativa, tais como: capacitores, indutores, compensadores síncronos e mais recentemente os compensadores estáticos. No entanto supondo que o sistema esteja carregado a tal ponto que o controle de potência reativa não seja mais suficiente para manter a

estabilidade em níveis aceitáveis, pode-se então melhorar este nível através do controle da potência ativa. Isto seria feito através de um dispositivo que aliviasse as variações de potência ativa (entrada e saída de carga) no sistema de geração. Este dispositivo seria uma unidade auxiliar de geração de pequeno porte que ficaria conectada a barra geradora e atuaria no momento dos transitórios de entrada e saída de carga, de tal forma que quando entrasse carga no sistema e o gerador da barra tivesse que aumentar o fluxo de potência ativa, o dispositivo entraria em operação como gerador ficando com a variação de carga aliviando totalmente ou parcialmente o gerador principal. Por outro lado quando ocorresse um alívio de carga, e o gerador principal ficasse com potência ativa sobrando, o dispositivo atuaria como motor evitando que esta variação de carga fosse sentida totalmente pelo gerador. Tanto em um caso como no outro a variação de potência ativa ocorrida é transferida de forma gradual do dispositivo auxiliar para o gerador principal de tal forma que em regime permanente ele fique responsável pela geração.

Dada as características mencionadas, o dispositivo em questão deve ser uma máquina elétrica rotativa, e a máquina que será estudada será a máquina de indução. Isto porque ela sobrepuja as demais em vários aspectos, tais como: robustez, menor volume, menor custo, não requer operações de sincronização, confiabilidade etc. No entanto a principal característica da máquina de indução que faz com que ela seja

adequada para utilização neste processo de controle de potência ativa, é que seus transitórios são extremamente rápidos, sendo portanto uma máquina mais ágil do que as demais. O controle da máquina de indução é realizado pelo seu regulador de velocidade especialmente projetado para este fim. Desta forma a transferência de potência para o gerador síncrono, caracterizado por transitórios subsequentes, é feita de forma extremamente rápida, confiável e com reduzidas oscilações de tensão, frequência etc.

Os estudos de estabilidade de sistemas elétricos dependem da simulação digital do comportamento dinâmico do sistema. Assim neste trabalho um estudo teórico da estabilidade de um sistema elétrico que possui uma unidade auxiliar de geração representada por uma máquina de indução, será feito através da simulação digital complementado por verificações experimentais em laboratório.

No capítulo 2 é visto, de forma resumida aspectos da estabilidade de um sistema de energia elétrica, assim como sua classificação quanto ao tipo de estudo a ser realizado, ficando mais clara a idéia de estabilidade.

Um estudo dinâmico de um sistema simples é realizado no capítulo 3. Este sistema é composto apenas de um gerador síncrono e de uma máquina de indução conectados a um barramento infinito através de uma linha de transmissão.

Realiza-se uma análise separada do gerador e da máquina de indução sendo apresentado resultados das simulações onde ficará evidenciado o que já foi mencionado quanto à maior rapidez de resposta da máquina de indução. Posteriormente faz-se uma análise conjunta das máquinas visando atender aos objetivos deste trabalho, ou seja observar a influência da máquina de indução na estabilidade da máquina síncrona. O controle através de reguladores de velocidade não é levado em conta neste capítulo. O CSMP (Continuous System Modeling Program) é utilizado na realização das simulações.

É necessário utilizar um programa computacional confiável para a implementação das equações, quando um estudo mais completo envolvendo a máquina de indução e seu regulador de velocidade, for feito. No capítulo 4 é mostrado com detalhes o PET (Programa de Estabilidade Transitória) evidenciando todas as suas características tais como: entrada e saída de dados, métodos de integração, etc. Tal programa é utilizado por órgãos de pesquisa, concessionárias de energia elétrica e universidades, sendo portanto funcional e seguro.

O desenvolvimento das equações da máquina de indução e de seu regulador de velocidade é realizado no capítulo 5 com finalidades de implementação no PET. Um estudo detalhado é feito tanto da máquina como do regulador, de forma a se obter um modelo matemático confiável. O método de integração trapezoidal implícito é evidenciado, sendo mostradas todas as

suas vantagens com relação aos outros métodos. São descritas as subrotinas que envolvem as equações da máquina de indução e do regulador de velocidade, assim como a entrada de dados do programa, alterada pela implementação realizada. Finalmente os resultados das simulações em forma de gráficos são mostrados no final do capítulo onde se pode observar os efeitos da máquina de indução na estabilidade de sistemas reais.

Uma análise de parâmetros da máquina de indução é feita no capítulo 6, dada a necessidade de se conhecer quais os melhores parâmetros da máquina para os objetivos propostos neste trabalho. Os resultados são mostrados no final do capítulo em forma de gráficos.

Finalmente para complementar o trabalho, no capítulo 7 são mostrados os ensaios laboratoriais. O esquema utilizado no laboratório é detalhado, assim como todo o procedimento utilizado nos testes. O sistema de monitoração das grandezas elétricas e mecânicas é explicado de forma resumida, porém compreensível. Todos os resultados estão também em forma de gráficos.

As conclusões são feitas no capítulo 8, fechando o trabalho.

CAPITULO 2

ASPECTOS DA ESTABILIDADE

2.1 - Introdução

O problema da estabilidade de um sistema elétrico esta relacionado diretamente com o comportamento das máquinas síncronas e seus reguladores, cargas, assim como a topologia do próprio sistema. Após uma perturbação, que não envolva mudanças na topologia ou na potência do sistema, as máquinas devem retornar ao seu estado original de operação. Se houver um desbalanceamento entre geração e carga (suprimento e demanda) causada pela mudança da carga, geração ou nas condições do circuito, um novo ponto de operação deve ser atingido pelas máquinas geradoras. Em qualquer caso todas as máquinas síncronas conectadas devem permanecer em sincronismo se o sistema for estável, ou seja, permanecem operando na mesma frequência. Assim pode-se afirmar que se a resposta de um sistema de potência durante um periodo transitório que se segue a um distúrbio é amortecida, e o sistema retorna em um tempo finito a uma nova condição de operação, o sistema é estável, caso isto não ocorra o sistema é instável.

Para a análise correta da estabilidade de um sistema, as condições sobre as quais a estabilidade é examinada devem estar bem estabelecidas. Isto inclui as condições de operação, assim como o tipo de perturbação ao qual o sistema é

submetido. Estas condições se tornam de vital importância à medida que o sistema elétrico cresce e a estabilidade fica mais comprometida. Outro aspecto importante a ser analisado é o período transitório que pode ser definido como o tempo entre a ocorrência do distúrbio e o reestabelecimento da operação normal do sistema. O principal critério para que o sistema seja estável é que as máquinas síncronas mantenham seu sincronismo desde o início até o fim do período transitório.

2.2 - Formas de Estabilidade

Costuma-se separar o estudo de estabilidade em três fases ou formas diferentes; estabilidade de regime permanente, estabilidade de regime transitório, estabilidade de regime dinâmico, analisadas a seguir:

2.2.1 - Estabilidade de Regime Permanente

Durante o período normal de operação do sistema elétrico a carga total sofre pequenas, graduais e lentas variações e os geradores se ajustam de forma a manter a frequência especificada. Quando a carga se torna maior do que a do regime normal de trabalho do sistema, as flutuações se tornam mais significativas. Um limite é alcançado quando a transferência de potência do gerador para a carga não pode mais ser aumentada e qualquer acréscimo por menor que seja, pode causar a perda de sincronismo entre os geradores. A estabilidade

de regime permanente visa justamente analisar o caso descrito acima, onde se verifica que um limite de estabilidade pode ser atingido. Em sistemas elétricos, na prática a perda de estabilidade sob este aspecto é possível, porém pouco provável, devido a capacidade de geração e da interligação dos sistemas elétricos de potência.

A figura 2.1 mostra o diagrama unifilar de uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito através de uma linha de transmissão com impedância $Z = R + jX$.

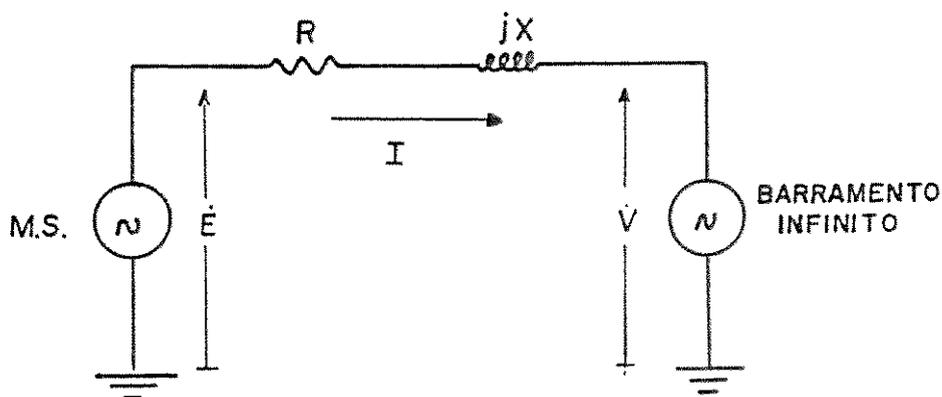


Figura 2.1 - Diagrama unifilar de uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito.

onde:

- R é a Resistência elétrica da linha
- X é a Reatância indutiva da linha
- \dot{E} é a Tensão terminal do gerador
- \dot{V} é a Tensão no barramento infinito
- \dot{I} é a Corrente elétrica na linha

As equações das tensões \dot{E} e \dot{V} na forma polar são dadas por:

$$\dot{E} = |\dot{E}| e^{j\theta_1} \quad (2.1)$$

$$\dot{V} = |\dot{V}| e^{j\theta_2} \quad (2.2)$$

A figura 2.2 mostra o diagrama fasorial do sistema da figura 2.1:

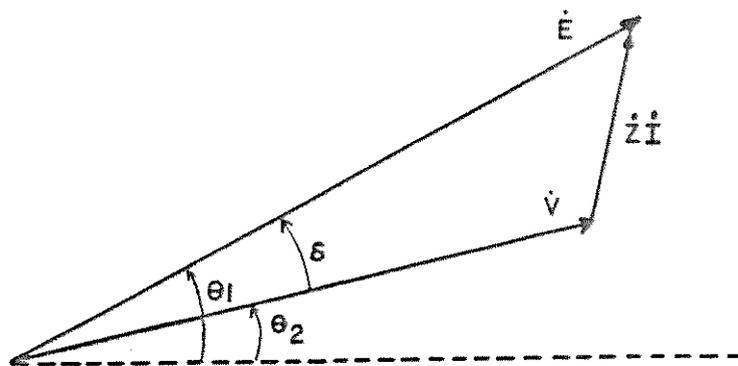


Figura 2.2 - Diagrama fasorial do sistema visto na figura 2.1.

A potência transferida da máquina síncrona para o barramento infinito pode ser dada para $X \gg R$ por:

$$P = \frac{E \cdot V}{X} \text{sen}(\delta) \quad (2.3)$$

sendo:

$$\delta = \theta_1 - \theta_2 \quad (2.4)$$

definido como ângulo de potência.

A figura 2.3 mostra a curva de transferência de potência da máquina síncrona para o barramento infinito em função do ângulo de potência. O limite de estabilidade é atingido para valores de δ em torno de 90° ou na máxima potência que pode ser transferida ($\text{sen } 90^\circ = 1.0$). Assim pode-se melhorar a estabilidade do sistema diminuindo a reatância de

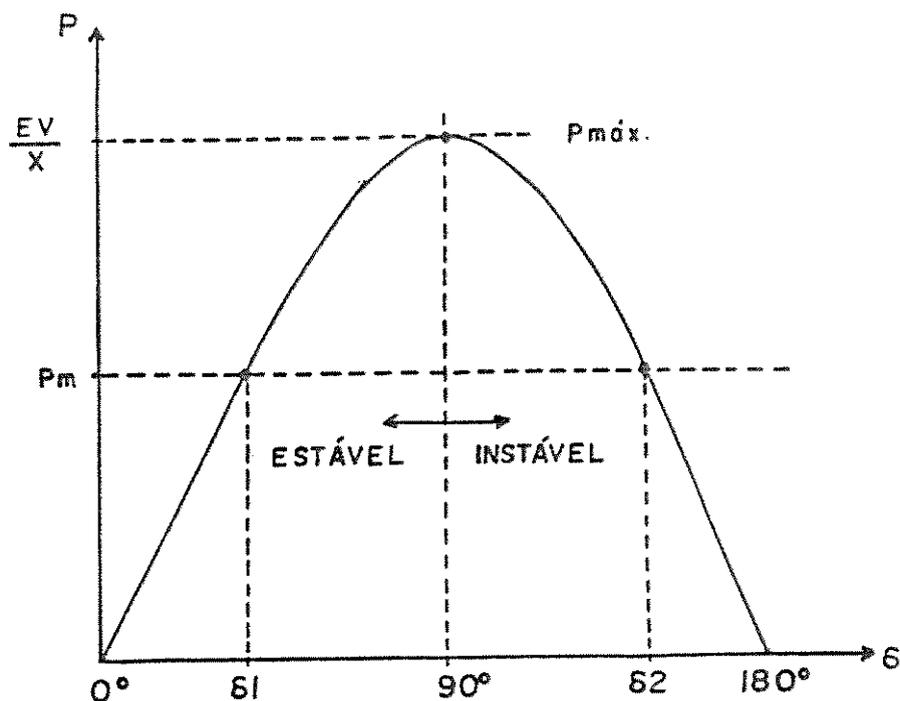


Figura 2.3 - Diagrama de potência transferida x ângulo de potência em regime permanente.

transferência, reduzindo assim o ângulo de potência para uma dada potência transferida. Deve-se observar que P_m (Potência mecânica do eixo do gerador) intercepta P em δ_1 e δ_2 , sendo que apenas δ_1 é o ângulo de equilíbrio do sistema máquina síncrona e barramento infinito.

O amortecimento do gerador é também um importante fator na manutenção da estabilidade. O amortecimento é inerente a máquinas de rotores sólidos, com o aparecimento de correntes parasitas produzindo conjugados amortecedores; desta forma enrolamentos amortecedores são comuns nas máquinas síncronas. Outra forma de melhorar a estabilidade da máquina seria com o uso de reguladores automáticos de tensão. Isto porque a tensão

de saída da máquina pode ser variada pelo controle de excitação, podendo-se assim interferir em mais uma variável da potência de transferência. A figura 2.4 mostra o diagrama de potência transferida x ângulo de potência com o efeito da excitação.

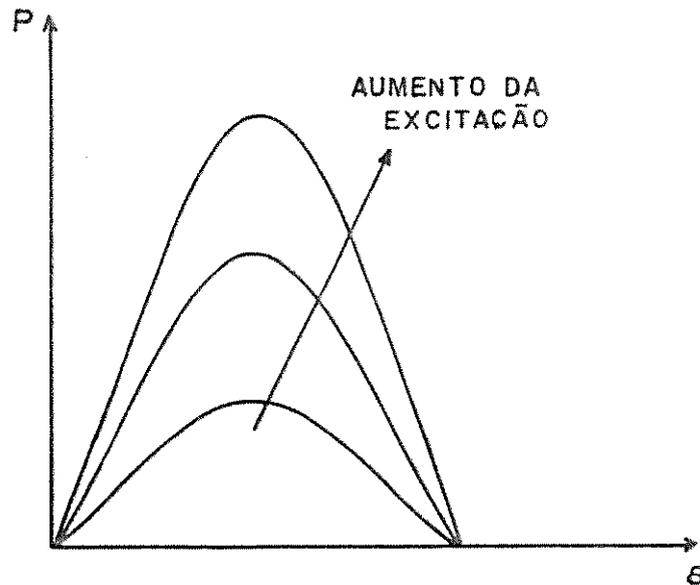
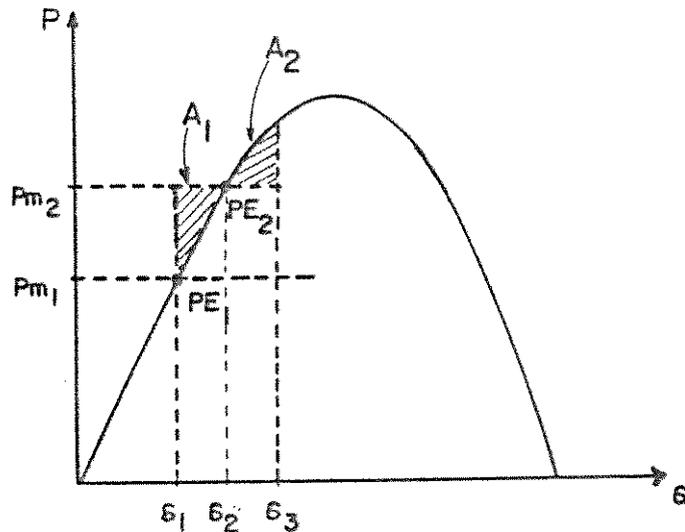


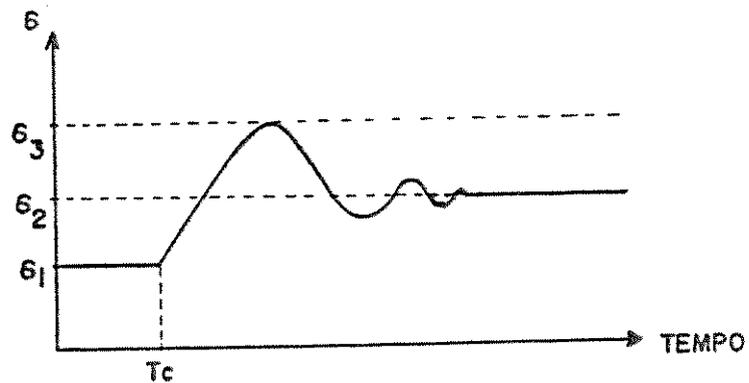
Figura 2.4 - Diagrama de potência transferida x ângulo de potência com o efeito da excitação

2.2.2 - Estabilidade de Regime Transitório

Quando uma grande e súbita perturbação ocorre no sistema, a máquina não responde imediatamente ao distúrbio devido à inércia das massas rotativas acopladas ao eixo; assim ela irá oscilar em torno de um novo valor de regime permanente. A figura 2.5 mostra esta oscilação do ângulo de potência da máquina síncrona, devido à mudança na potência do sistema. Em regime permanente a máquina fornece potência elétrica $P_{E1} = P_{M1}$, sendo P_{M1} a potência mecânica fornecida à máquina síncrona com ângulo de carga δ_1 . P_{E2} associada com δ_2 é o estado final



a) Diagrama Potência x ângulo de carga



b) Diagrama ângulo de potência x tempo

Figura 2.5 - Diagramas mostrando o transitório devido a uma variação na potência transferida.

ou seja, a nova posição em regime permanente e δ_3 é o ângulo máximo atingido no transitório. A máquina se mantém estável enquanto a área A_2 puder ser feita igual a A_1 ; quando isto não mais for possível a máquina sai do sincronismo. Este critério é conhecido como critério de estabilidade das áreas iguais. A figura 2.6 mostra um diagrama onde se observa o valor máximo do ângulo de carga (δ_{max}) para que ainda exista estabilidade.

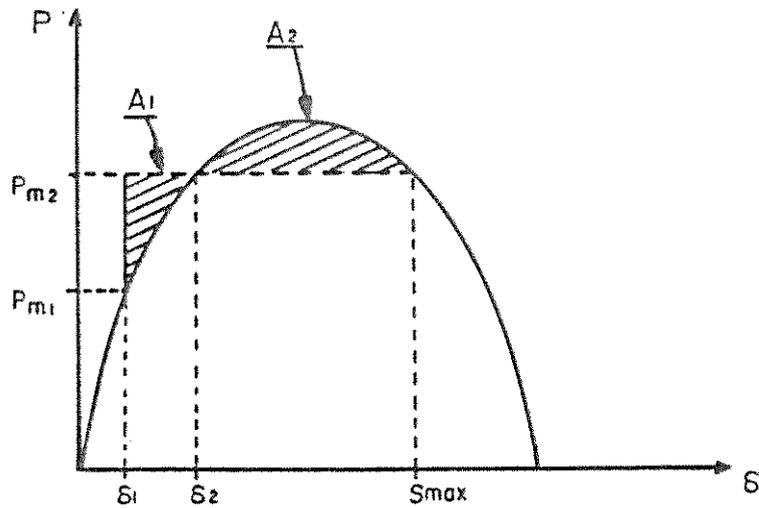


Figura 2.6 - Diagrama mostrando o máximo ângulo de carga que pode ser atingido para que a máquina permaneça estável.

O estudo da estabilidade em regime transitório é justamente o estudo feito quando da ocorrência de grandes perturbações, tais como: curto-circuitos, perdas de linhas, grandes variações de carga, perda de geração, etc; e é usualmente feito por poucos segundos após o distúrbio. Desta forma este estudo visa analisar se o sistema elétrico ou um gerador em particular irá ou não suportar este tipo de transitório, ou até onde um transitório desta natureza os afeta.

Três fatores afetam os resultados do estudo de estabilidade de regime transitório. Primeiramente o tipo de falta, em segundo lugar a posição ou seja, onde ocorre a falta e em terceiro lugar o tempo de duração da falta.

2.2.3 - Estabilidade de Regime Dinâmico

Quando um sistema está trabalhando próximo dos limites da estabilidade, pequenas perturbações podem eventualmente causar instabilidade. Esta situação se torna mais pronunciada a medida que o sistema cresce e as potências devam ser transmitidas a distâncias maiores. Assim a análise de estabilidade deve considerar agora componentes tais como reguladores de velocidade e de tensão. Este estudo é chamado de estudo de estabilidade dinâmico, se exigindo agora que os componentes sejam mais precisamente modelados, conseguindo com isto melhorar substancialmente as estabilidades de regime permanente e transitória já mencionadas. Uma outra característica deste tipo de estabilidade é que o tempo de estudo da estabilidade dinâmica é maior que os demais; chegando a ordem de minutos.

2.3 - Comentários

A análise da estabilidade pode se tornar longa e complexa dependendo do nível de compreensão que se deseja obter sobre o assunto. Para os objetivos deste trabalho este breve estudo será suficiente e, sempre, quando necessário, algum outro conceito poderá ser introduzido. As equações dinâmicas da máquina síncrona e de indução e os aspectos de estabilidade envolvidos com estas máquinas serão vistos com mais detalhes nos capítulos que envolvem o assunto.

CAPITULO 3

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UM SISTEMA ELEMENTAR

3.1 - Introdução

Deve-se entender como sistema elementar, um gerador síncrono e uma máquina de indução conectados a uma barra através de duas linhas de transmissão (L_{T1} e L_{T2}), que por sua vez está conectado ao barramento infinito através de uma terceira linha (L_{T3}), como pode ser visto na figura 3.1.

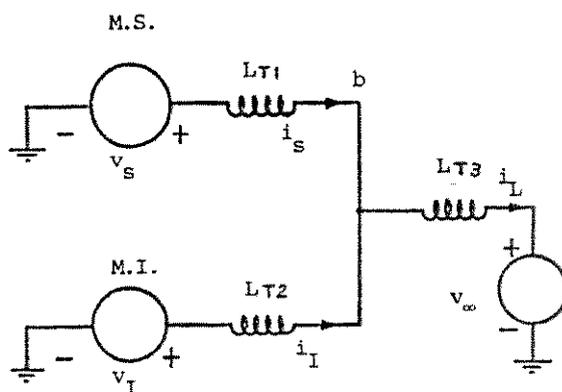


Figura 3.1 - Sistema de uma barra com as máquinas síncrona e de indução conectadas ao barramento infinito.

Os modelos matemáticos das máquinas síncronas e de indução serão mostradas de forma resumida, sendo que maiores detalhes quanto ao desenvolvimento matemático poderão ser consultados nas referências [1,2]. As máquinas serão analisadas como se estivessem conectadas isoladamente ao barramento infinito, de modo a se poder testar separadamente cada modelo

através de simulações computacionais.

Com o equacionamento das máquinas pronto, será possível desenvolver um modelo matemático geral, onde então os efeitos da máquina de indução no comportamento do gerador síncrono poderão ser analisados.

Uma avaliação dos parâmetros da máquina de indução será feita quando do desenvolvimento de suas equações, definindo assim critérios para um melhor desempenho da máquina.

Quanto às simulações, deve-se comentar que elas serão realizadas com o uso do CSMP (Continuous System Modelling Program); software que simula transitórios analogicamente de forma bastante precisa e eficaz utilizando o computador digital [7].

3.2 - Modelo dinâmico da máquina síncrona conectada a um barramento infinito.

A figura 3.2 mostra um diagrama esquemático para a máquina síncrona. As indutâncias mútuas são omitidas para maior clareza na análise. As correntes tem valor positivo saindo da máquina se for considerada como gerador. Por inspeção da figura 3.2 e considerando as condições mencionadas, pode-se escrever a seguinte equação em notação matricial:

$$[V] = -[r][i] - \frac{d[\lambda]}{dt} + [V_n] \quad (3.1)$$

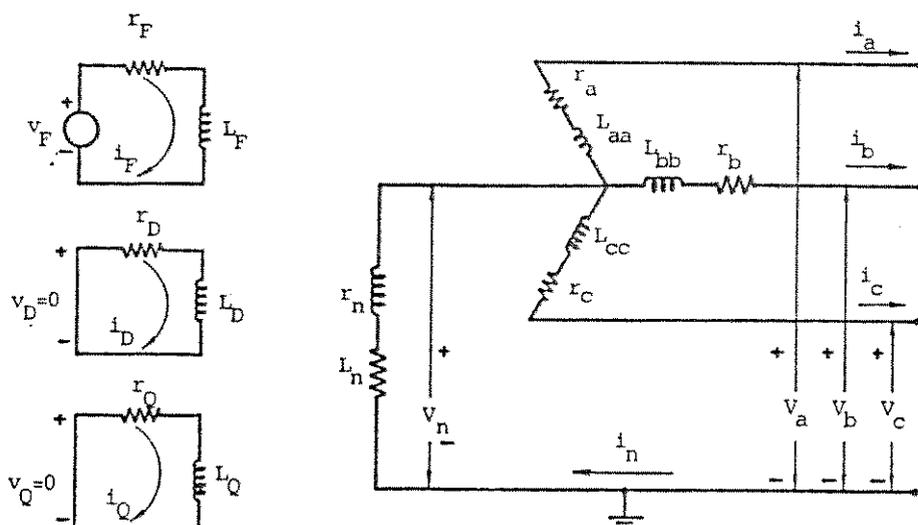


Figura 3.2 - Diagrama esquemático da máquina síncrona.

onde:

- [V] é o vetor das tensões terminais da máquina.
- [r] é a matriz das resistências elétricas dos enrolamentos do estator e rotor.
- [i] é o vetor das correntes elétricas dos enrolamentos do estator e rotor.
- [λ] é o vetor dos fluxos concatenados com os enrolamentos do estator e rotor.
- [V_n] é o vetor da tensão de neutro da máquina

Aplicando a transformação de Park [1] com o sistema de referência no rotor da máquina e supondo condições balanceadas, (3.1) se torna:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ \hline v_f \\ v_D \\ v_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \hline i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -W\lambda_q \\ W\lambda_d \\ \hline 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \\ \hline \lambda_f \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} \quad V \quad (3.2)$$

onde os índices minúsculos se referem às grandezas do estator e os índices maiúsculos às do rotor. A velocidade W é a velocidade do rotor da máquina síncrona dada em rad (elet)/seg e o termo $W\lambda$ é conhecido como tensão mocional.

Substituindo as equações de fluxo [1] em (3.2) e normalizando o resultado obtido; em notação matricial fica:

$$[V] = - ([R] + W [N])[i] - [L] \frac{d[i]}{dt} \quad \text{pu} \quad (3.3)$$

onde:

[R] é a matriz diagonal de resistências constantes.

[N] é a matriz dos coeficientes das indutâncias das tensões mocionais.

[L] é a matriz simétrica de indutâncias constantes.

Existindo a inversa de [L], pode-se escrever:

$$\frac{d[i]}{dt} = -[L]^{-1} ([R] + W [N])[i] - [L]^{-1} [V] \quad \text{pu} \quad (3.4)$$

que são as equações de corrente na forma de variáveis de

estado. Estas equações somadas ao conjunto de equações mecânicas expressam o comportamento completo da máquina síncrona.

A equação que governa o movimento do rotor da máquina síncrona relacionando com o torque acelerante é descrita abaixo:

$$J \frac{2}{p} \frac{dW}{dt} = T_a \quad \text{N.m} \quad (3.5)$$

onde:

J é o momento de inércia em Kg.m^2 das massas solidárias ao eixo.

p é o número de polos

T_a é o torque acelerante em N.m

Para uma máquina com ação geradora T_a é definido como:

$$T_a = T_m - T_e - T_d \quad \text{N.m} \quad (3.6)$$

onde:

T_m é o torque mecânico de acionamento da máquina

T_e é o torque elétrico causado pelas correntes de carga.

T_d é o torque de amortecimento = DW

D é a Constante de amortecimento

Normalizando (3.5), fica:

$$\tau_j \frac{dw}{dt} = T_a \quad \text{pu} \quad (3.7)$$

onde:

$$\tau_j = 2H W_n$$

sendo:

H a constante de inércia da máquina.

W_n a velocidade nominal em rad(elet)/seg.

A potência total de saída da máquina síncrona para condições balanceadas pode ser dada por [1]:

$$P_s = \frac{1}{3} [v_d i_d + v_q i_q] \quad \text{pu} \quad (3.8)$$

Substituindo v_d e v_q por (3.2) em pu e rearranjando, fica:

$$P_s = \frac{1}{3} [(i_d \frac{d}{dt} \lambda_d + i_q \frac{d}{dt} \lambda_q) + (i_q \lambda_d - i_d \lambda_q) W - r(i_d^2 + i_q^2)] \quad \text{pu} \quad (3.9)$$

O torque eletromagnético pode ser obtido derivando o segundo termo de (3.9) em relação a W [ver referência 1] e substituindo as equações de fluxo no resultado obtido. Assim fica:

$$T_e = \frac{1}{3} [L_d i_q \quad K M_F i_q \quad K M_D i_q \quad \left| \begin{array}{c} -L_q i_d \\ -K M_0 i_d \end{array} \right| \begin{array}{c} i_d \\ i_F \\ i_b \\ i_q \\ i_0 \end{array}] \quad \text{pu} \quad (3.10)$$

onde: M_F , M_D e M_0 são valores máximos de funções senoidais das indutâncias originais, L_d e L_q uma combinação destes valores e $K = \sqrt{3/2}$

$$[V]_{\infty} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \cos(Wnt + \alpha) \\ \cos(Wnt + \alpha - 120^{\circ}) \\ \cos(Wnt + \alpha + 120^{\circ}) \end{bmatrix} \quad V \quad (3.14)$$

Aplicando a transformação de Park na equação (3.14), normalizando e supondo que a linha de transmissão que conecta a máquina síncrona ao barramento infinito tenha resistência R_e e indutância L_e , pode-se através de alguma manipulação algébrica chegar na equação (3.15) que é o modelo matemático completo a ser simulado. Por meio das simulações poderá se verificar a eficácia do equacionamento mostrado.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \\ \hline W \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[\hat{L}]^{-1}([\hat{R}] + W[\hat{N}]) & [0] \\ \hline [K_{Mj}] & \begin{matrix} -\frac{D}{\tau_j} & 0 \\ 1 & 0 \end{matrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \\ \hline W \\ \delta \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} -[\hat{L}]^{-1} & [0] \\ [0] & \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -K_1 \operatorname{sen}(\delta - \alpha) \\ -V_F \\ 0 \\ K_1 \operatorname{cos}(\delta - \alpha) \\ 0 \\ \frac{T_m}{\tau_j} \\ -1 \end{bmatrix} \text{ pu} \quad (3.15)$$

onde:

$$K_1 = \sqrt{3} V_\infty$$

$[\hat{L}]$, $[\hat{R}]$ e $[\hat{N}]$ são as novas matrizes do sistema máquina síncrona conectada ao barramento infinito através de uma linha de transmissão, com os elementos:

$$\hat{r} = r + R_e \quad , \quad \hat{L}_d = L_d + L_e \quad \text{e} \quad \hat{L}_q = L_q + L_e$$

As figuras(3.3)-(3.6) mostram através de gráficos o comportamento da máquina síncrona para uma variação de +10% no torque mecânico (T_m).

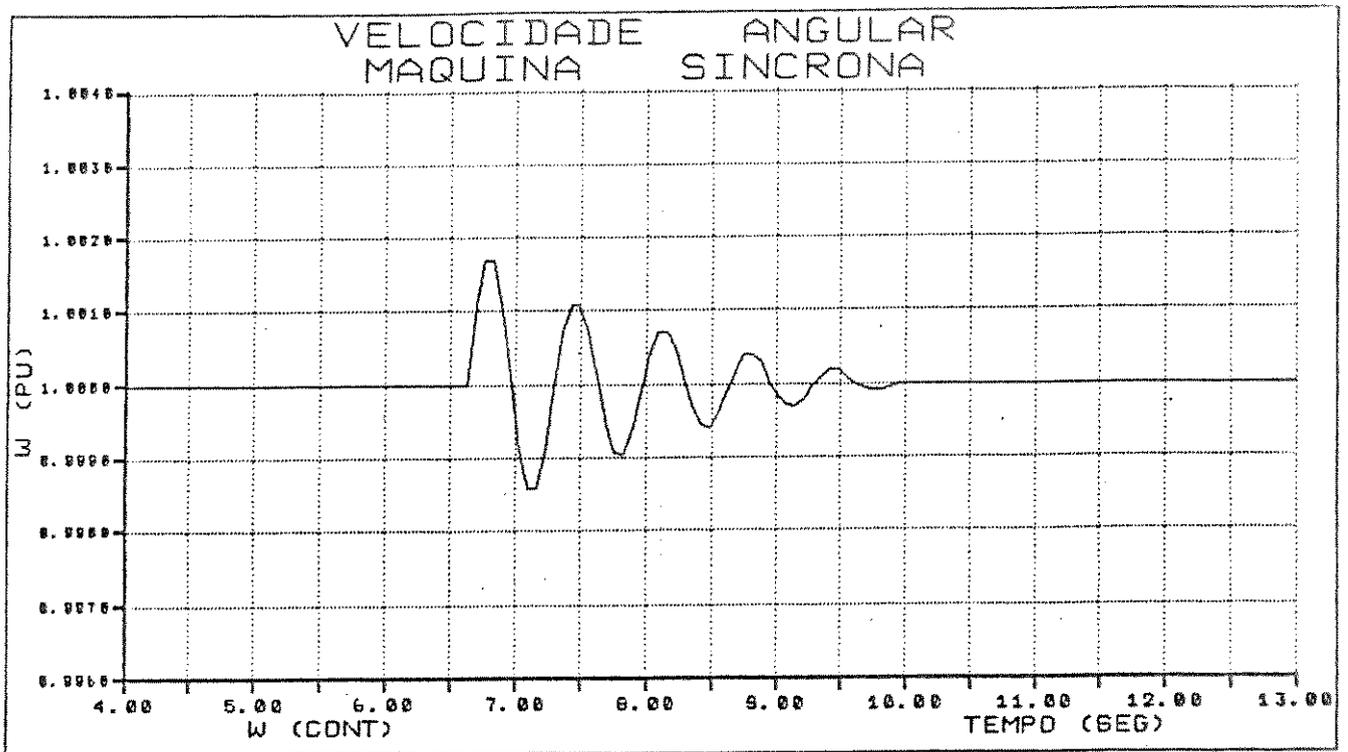


Figura 3.3 - Velocidade angular da máquina síncrona em resposta a uma variação de +10% em T_m .

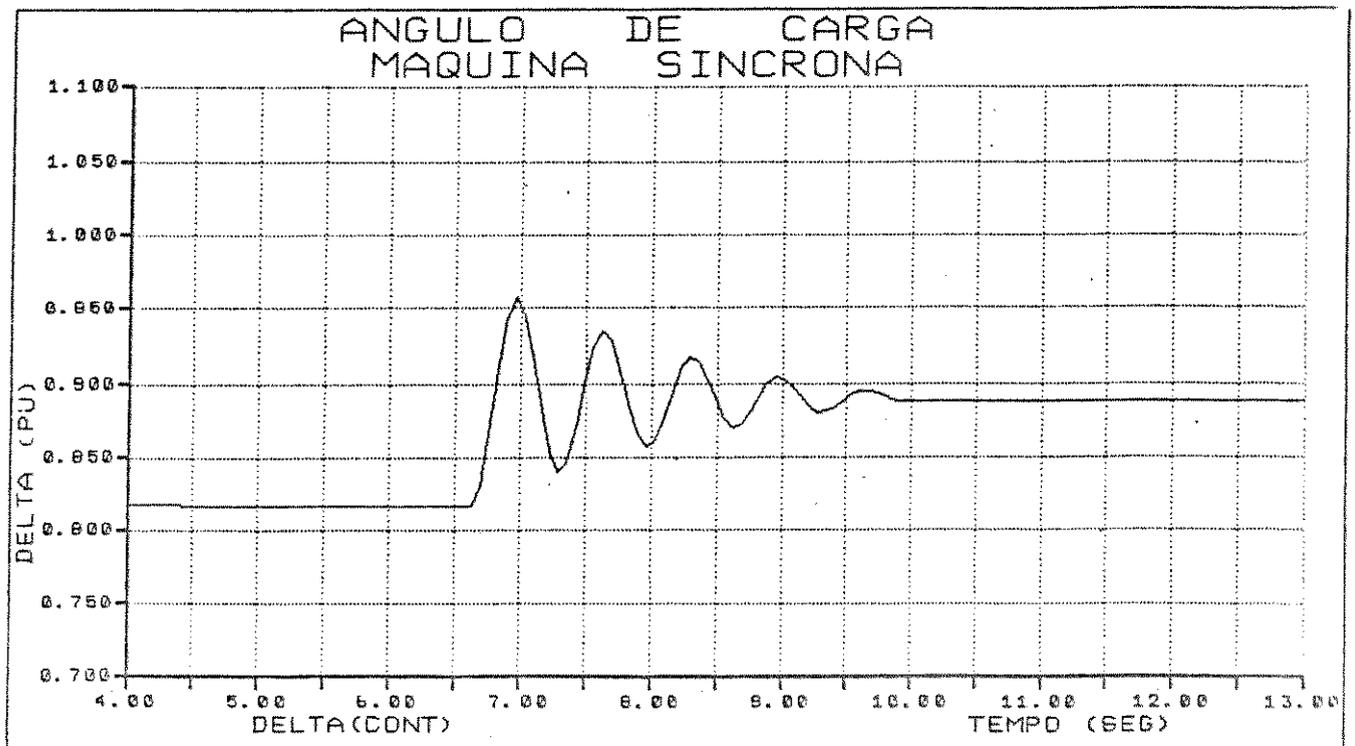


Figura 3.4 - Ângulo de potência da máquina síncrona em resposta a uma variação de +10% em T_m .

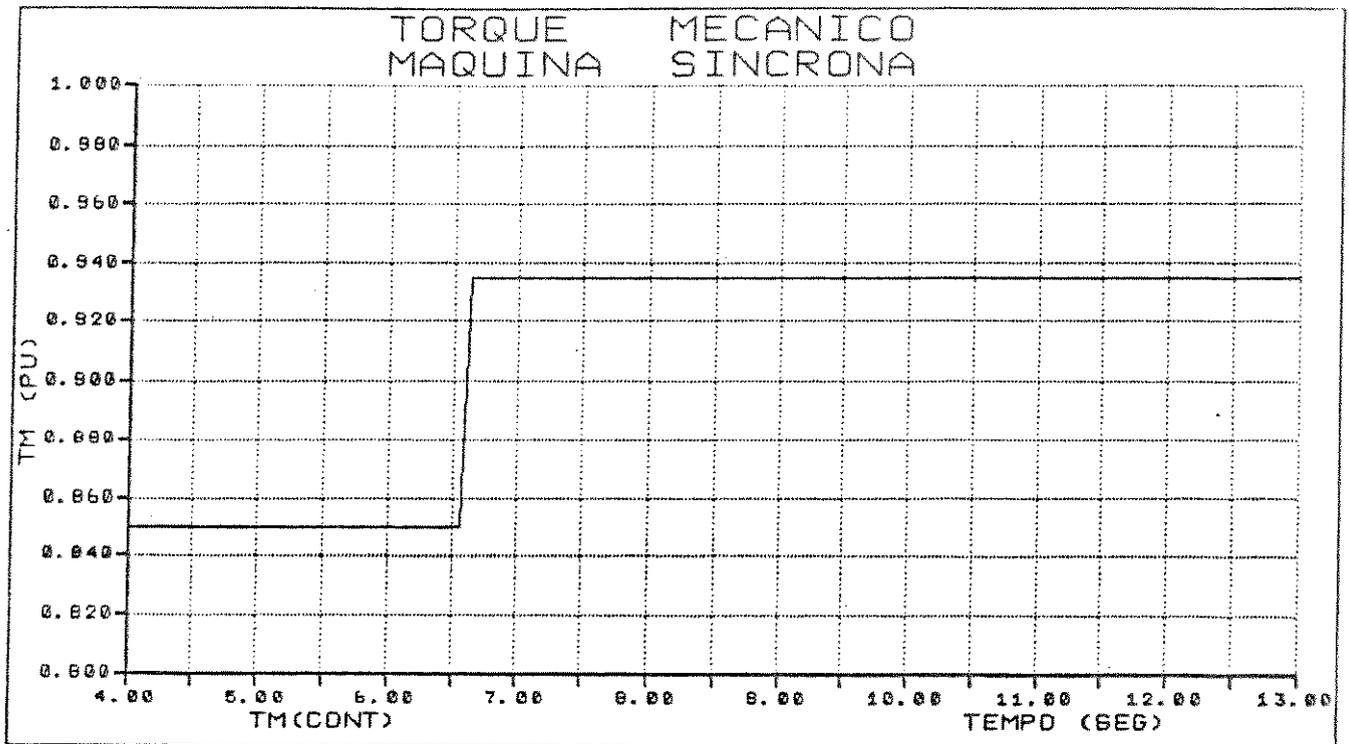


Figura 3.5 - Torque mecânico (T_m) com variação de +10%.

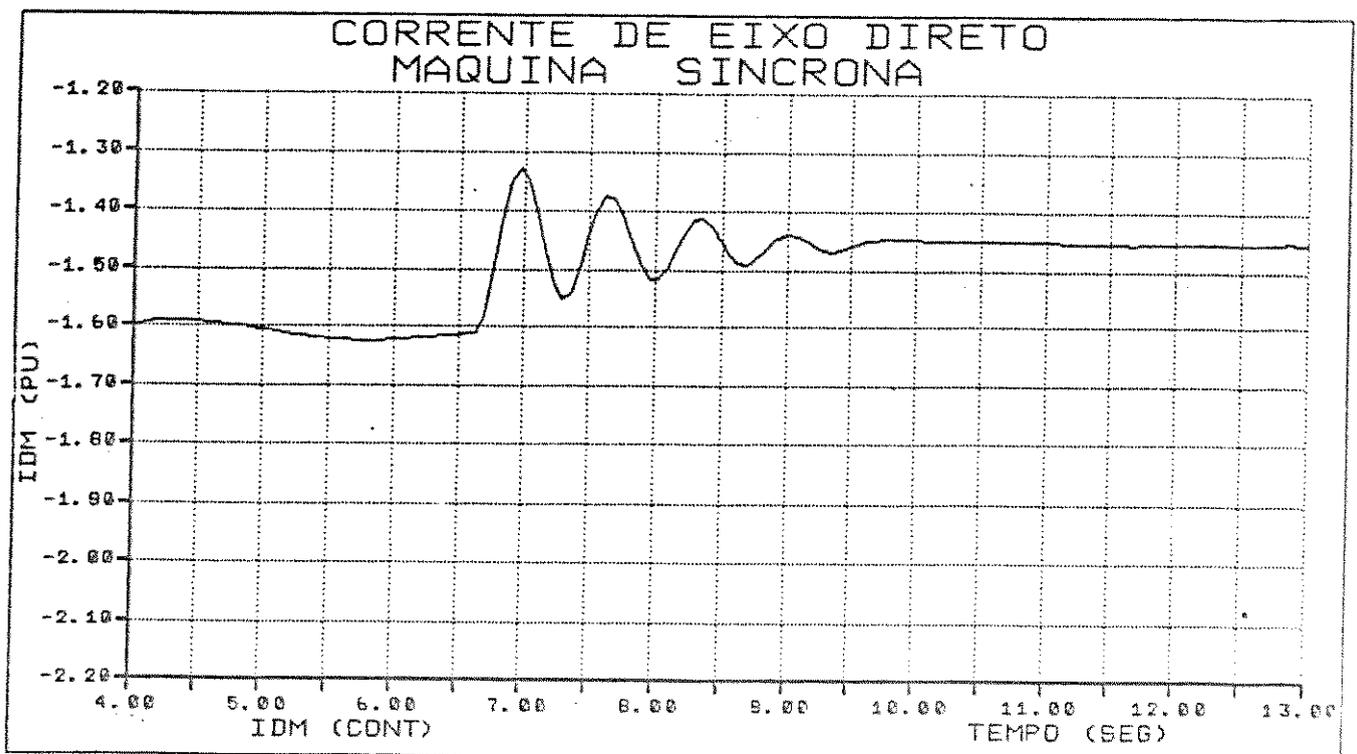


Figura 3.6 - Corrente de eixo direto da máquina síncrona em resposta a +10% de variação em T_m .

3.3 - Modelo dinâmico da máquina de indução conectada a um barramento infinito.

O modelo da máquina de indução é mostrado de maneira esquemática na figura 3.7, sendo considerada como tendo três enrolamentos no estator iguais entre si e três enrolamentos no rotor da mesma forma. Apesar de existirem três enrolamentos no rotor, este não é necessariamente do tipo bobinado, pois pode-se ter um rotor em gaiola de esquilo equivalente. Todos os seis enrolamentos estão magneticamente acoplados, sendo que a indutância mútua entre estator e rotor é função da posição do rotor. Embora a figura não mostre as indutâncias mútuas, elas serão levadas em consideração no desenvolvimento do modelo matemático.

Algumas considerações com o objetivo de simplificar as equações são feitas na análise da máquina de indução. A saturação, histerese e correntes de Foucault serão ignoradas, assim como os efeitos da distribuição das bobinas, das ranhuras e dos dentes. Desta forma a máquina pode ser considerada como um grupo de circuitos lineares acoplados.

Por inspeção da figura 3.7, pode-se escrever a equação:

$$[V_I] = [r_I] \cdot [i_I] - \frac{d[\lambda_I]}{dt} + [V_{NI}] \quad (3.16)$$

ou:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ \dots \\ V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_c \\ \dots & \dots & \dots \\ r_F & 0 & 0 \\ [0] & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \dots \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \dots \\ \lambda_A \\ \lambda_B \\ \lambda_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [V_n] \\ \dots \\ [V_N] \end{bmatrix} \quad V \tag{3.17}$$

As equações de fluxo podem ser consultadas na referência [2] e as variáveis restantes ficam definidas pela própria figura.

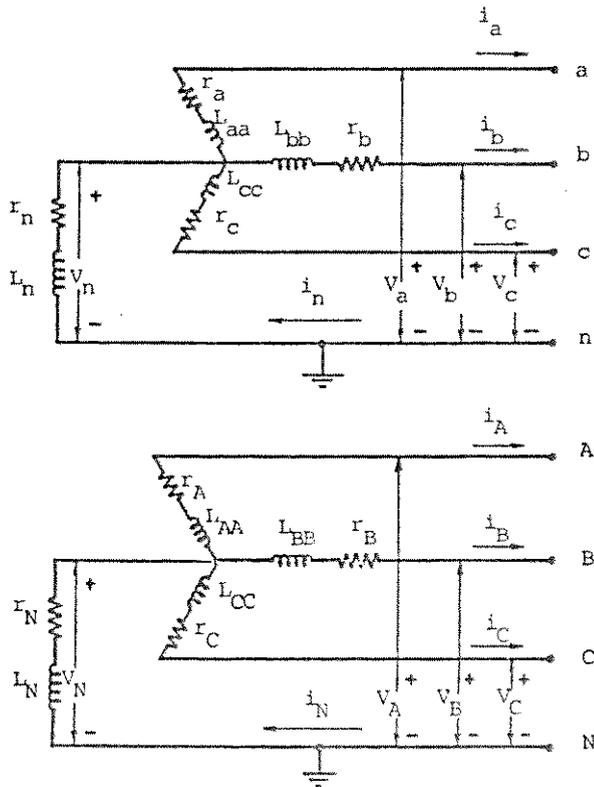


Figura 3.7 -Diagrama esquemático da máquina de indução

Aplicando a transformação de Park (com a referência no campo girante) na equação (3.17) e normalizando o resultado com a utilização de valores base convenientemente escolhidos [8], tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_{1d} \\ V_{1q} \\ \text{---} \\ V_{2d} \\ V_{2q} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & W_n L_{11} & 0 & W_n L_{12} \\ -W_n L_{11} & r & -W_n L_{12} & 0 \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ 0 & S W_n L_{12} & 0 & S W_n L_{22} \\ -S W_n L_{12} & 0 & -S W_n L_{22} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ \text{---} \\ i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} L_{11} & 0 & L_{12} & 0 \\ 0 & L_{11} & 0 & L_{12} \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ L_{12} & 0 & L_{22} & 0 \\ 0 & L_{12} & 0 & L_{22} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ \text{---} \\ i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \quad \text{pu} \quad (3.18)$$

onde:

Os índices "1d", "1q" e "2d", "2q" referem-se a grandezas projetadas no eixo direto e em quadratura do estator e rotor, respectivamente.

S é o escorregamento do rotor

$$L_{11} = L_{aa} - L_{ab}$$

$$L_{22} = L_{AA} - L_{AB}$$

$$L_{12} = 3/2 L_{aA}$$

L_{aa} é a indutância própria dos enrolamentos do estator

L_{AA} é a indutância própria dos enrolamentos do rotor

L_{ab} é a indutância mútua entre os enrolamentos do estator

L_{AB} é a indutância mútua entre os enrolamentos do rotor

L_{aA} é o valor máximo da indutância mútua entre os enrolamentos do estator e rotor.

A equação (3.18) pode ser colocada na forma de variáveis de estado, como foi feito para a máquina síncrona, desde que a matriz indutância possua inversa. Assim:

$$\frac{d[i_I]}{dt} = - [L_I]^{-1} ([R_I] + W_n [N_I]) [i_I] - [L_I]^{-1} [V_I] \text{ pu} \quad (3.19)$$

onde:

$[L_I]$ é a matriz simétrica de indutâncias constantes.

$[N_I]$ é a matriz de indutâncias coeficientes das tensões macionais.

$[R_I]$ é a matriz diagonal de resistências constantes.

A equação que governa o movimento do rotor da máquina relacionando com o torque de inércia é mostrado:

$$J_I \frac{2}{p_I} \frac{d[W_R]}{dt} = T_{aI} \quad \text{N.m} \quad (3.20)$$

onde:

J_I é o momento de inércia de todas as massas solidárias ao eixo da máquina de indução. $(\text{Kg.m})^2$

W_R é o velocidade angular do rotor em rad(elet)/seg.

T_{aI} é o torque de inércia necessário para acelerar as massas acopladas ao eixo da máquina de indução.

O torque T_{aI} pode ser definido da mesma forma como em (3.6), assim como a potência de saída da máquina pode ser definida como em (3.8). Deste modo o torque elétrico pode

ser dado como:

$$T_{eI} = \frac{P_{eI}}{W_R} = \frac{i_{1q} \lambda_{1d} - i_{1d} \lambda_{1q}}{(1 - S)} \quad \text{pu} \quad (3.21)$$

onde:

P_{eI} é a potência elétrica ativa desenvolvida no estator da máquina de indução.

Utilizando as equações (3.20) e (3.21) pode-se chegar na equação diferencial para a velocidade do rotor,

$$\frac{d[W_R]}{dt} = \frac{T_{mI}}{\tau_I} + \left[\begin{array}{c|cc} [L_{KI}] & 0 & 0 \\ \hline & D_I & \\ & \tau_I & \end{array} \right] \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ \hline i_{2d} \\ i_{2q} \\ \hline W_R \end{bmatrix} \quad \text{pu} \quad (3.21)$$

onde:

$$[L_{KI}] = \left[\frac{L_{12}}{3\tau_{Ij}} i_{2q} - \frac{L_{12}}{3\tau_{Ij}} i_{2d} \right] \quad (3.22)$$

$$\tau_I = 2M W_h \quad (3.23)$$

$$\tau_{Ij} = (1 - S)\tau_I \quad (3.24)$$

sendo:

M é a constante de inércia da máquina de indução

O escorregamento pode ser dado por:

$$\frac{dS}{dt} = - \frac{d[W_R]}{dt} \quad \text{pu} \quad (3.25)$$

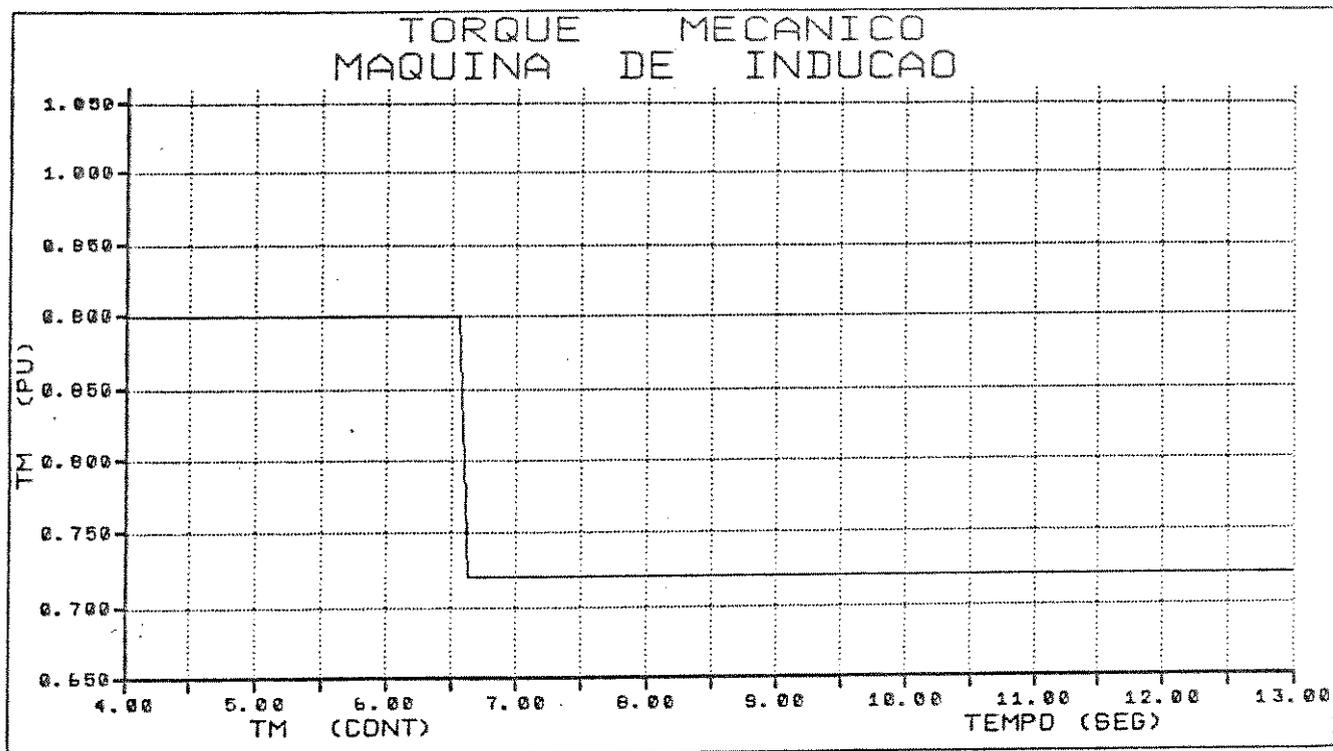


Figura 3.9 - Torque mecânico da máquina de indução com variação de -20%.

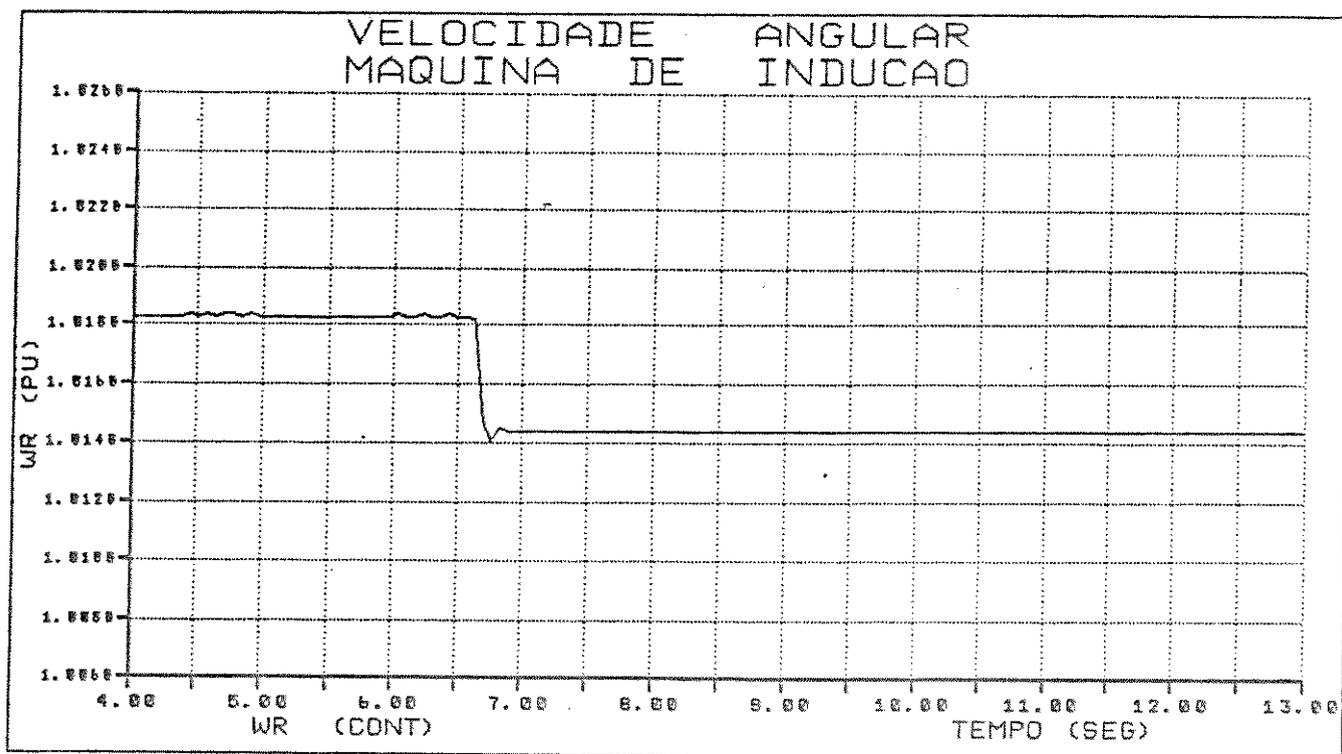


Figura 3.10 - Velocidade angular (WR) da máquina de indução com variação de -20% em T_{m1} .

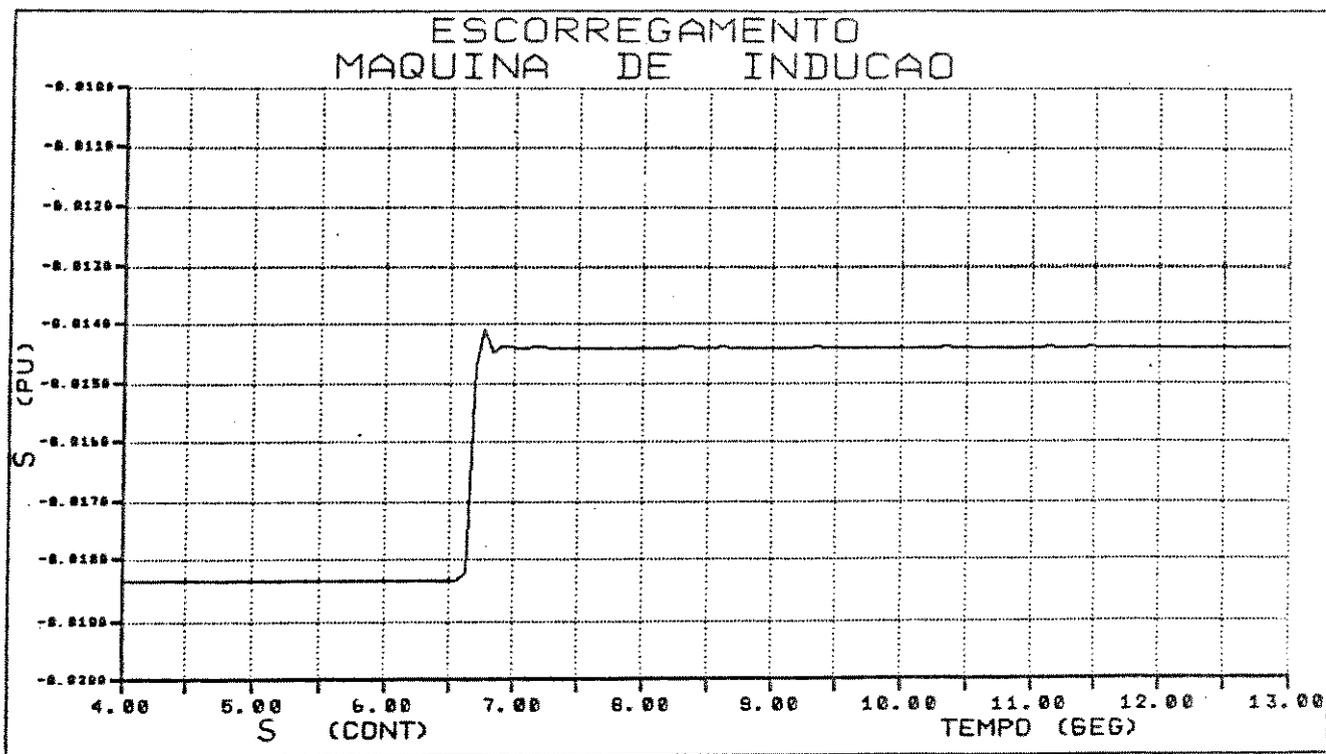


Figura 3.11 - Escorregamento da máquina de indução com -20% de variação em T_{m1} .

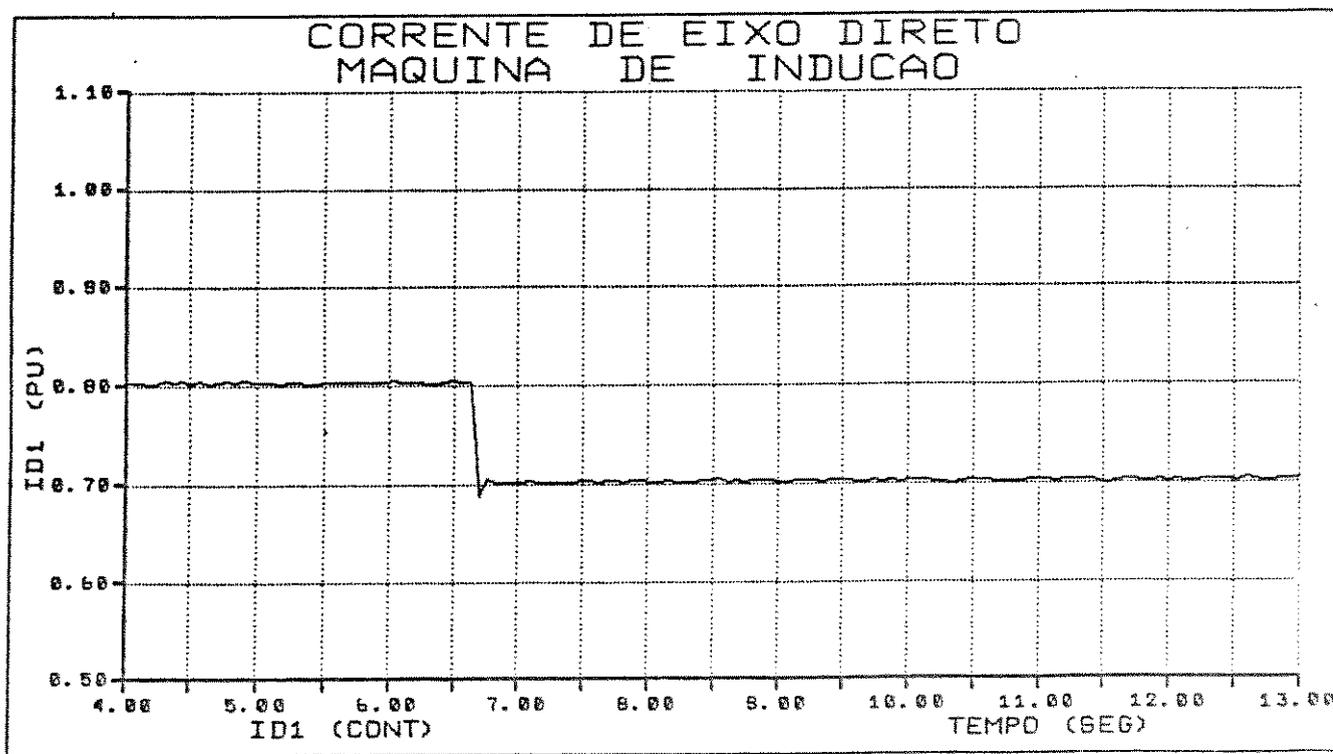


Figura 3.12 - Corrente de eixo direto da máquina de indução com -20% de variação em T_{m1} .

3.3.1 - Avaliação dos parâmetros da máquina de indução

Ficou claro através dos gráficos mostrados nas figuras (3.9)-(3.12) o perfeito comportamento da máquina de indução tanto transitoriamente como em regime permanente, mostrando a validade do modelo matemático desenvolvido. No entanto um outro aspecto deve ser levado em conta além do modelo implementado, que são os parâmetros utilizados nas simulações. Para mostrar isto, várias simulações foram feitas utilizando como referência os parâmetros de uma máquina de indução de 100 Hp, até se chegar a uma faixa de valores na qual a máquina demonstrou um comportamento satisfatório. A tabela 3.1 mostra os parâmetros da máquina de indução de 100 HP, conexão delta e 220 volts.

P_m (Hp)	X_1 (Ω)	X_2 (Ω)	X_m (Ω)	r (Ω)	R (Ω)
100	0.09579	0.09629	4.22828	0.02401	0.02766

Tabela 3.1 - Parâmetros da máquina de indução

onde:

X_1 é a reatância indutiva do estator

X_2 é a reatância indutiva do rotor referida ao estator

X_m é a reatância indutiva mútua

r é a resistência elétrica do estator

R é a resistência elétrica do rotor referida ao estator

Pode-se conseguir as indutâncias da máquina utilizando-se as expressões:

$$X_1 = W_n (L_{11} - L_{12}) \quad (3.30)$$

$$X_2 = W_n (L_{22} - L_{12}) \quad (3.31)$$

$$X_m = W_n L_{12} \quad (3.32)$$

A tabela 3.2 mostra as indutâncias e as resistências da máquina, já normalizadas. As equações de normalização são:

$$L_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base} W_{base}} \quad (3.33)$$

$$R_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} \quad (3.34)$$

sendo V_{base} e I_{base} a tensão e a corrente nominais por fase respectivamente, da máquina de indução, e W_{base} a velocidade angular do campo girante.

L_{11} (pu)	L_{22} (pu)	L_{12} (pu)	r (pu)	R (pu)
2.9791	2.9792	2.9117	0.01653	0.01904

Tabela 3.2 - Parâmetros normalizados da máquina de indução.

A tabela 3.3 mostra a faixa de valores na qual a máquina de indução tem um desempenho adequado. As figuras (3.13) e (3.14) mostram o comportamento da máquina de indução através dos gráficos de W_R e S quando simulada com valores fora do intervalo mostrado na tabela 3.3. Deve-se observar que a máquina não consegue se estabilizar.

PARÂMETRO	INTERVALO DOS VALORES (PU)
L11	2.0773 - 3.2874
L22	2.0833 - 3.4403
L12	2.0083 - 3.1324
r	0.0092 - 0.0368
R	0.0181 - 0.0905

Tabela 3.1 - Faixa de valores dos parâmetros da máquina de indução utilizados nas simulações.

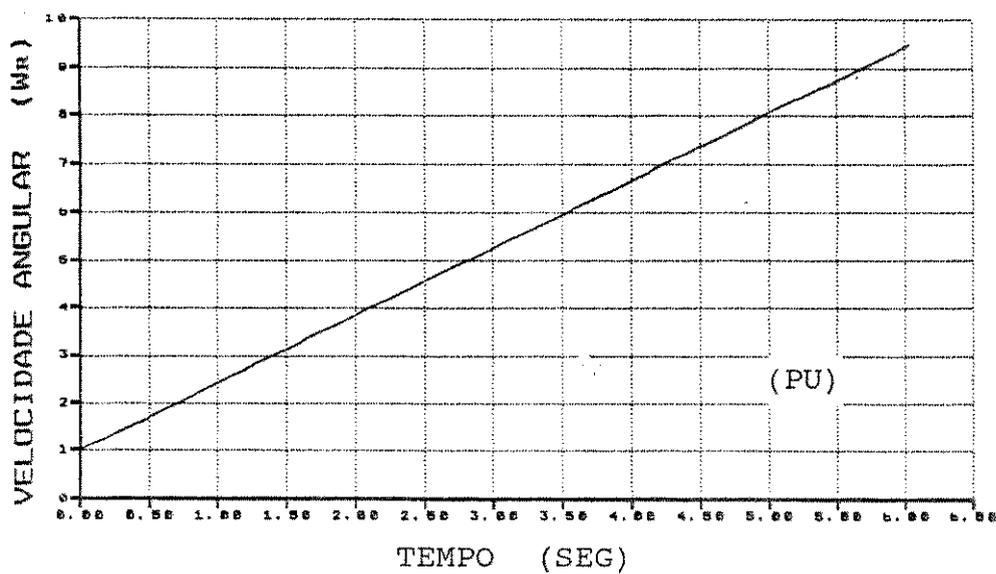


Figura 3.13 - Velocidade angular (W_r) da máquina de indução mostrando sua instabilidade.

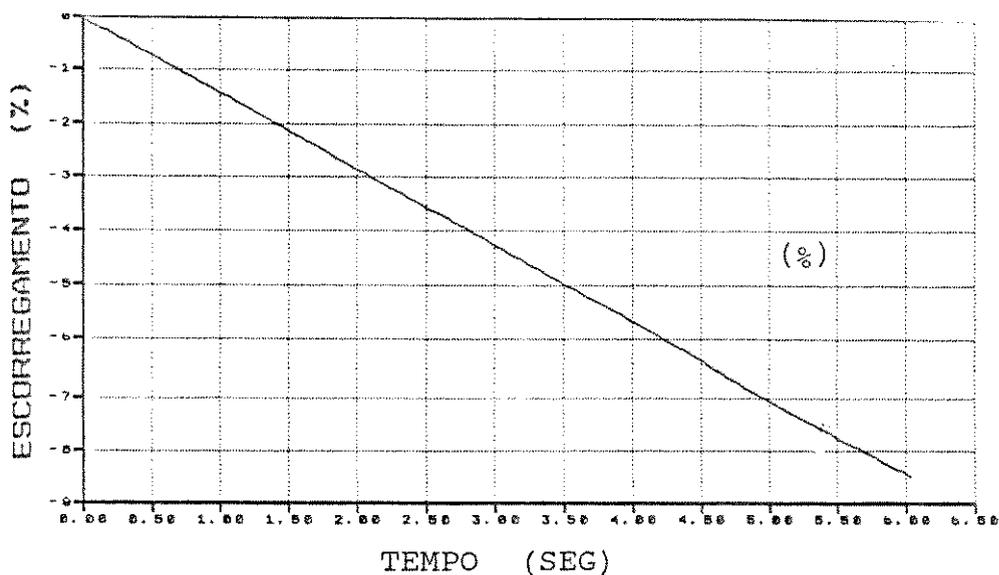


Figura 3.14 - Escorregamento da máquina de indução mostrando sua instabilidade.

3.4 - Análise dos efeitos da máquina de indução no comportamento da máquina síncrona.

Até aqui foram analisados o comportamento isolado das máquinas síncrona e de indução, conectadas ao barramento infinito através de uma linha de transmissão. Os resultados das simulações mostraram a validade dos modelos matemáticos apresentados e desenvolvidos, dando segurança na continuidade do trabalho. Desta forma é possível agora desenvolver um modelo geral para ambas as máquinas, trabalhando conjuntamente como pode ser visto na figura 3.1, e fazer uma análise dos efeitos da máquina de indução no desempenho da máquina síncrona.

Através da figura 3.1 pode-se escrever as equações:

$$v_s = v_b + L_{T1} \frac{d[i_s]}{dt} \quad \text{pu} \quad (3.35)$$

$$v_I = v_b + L_{T2} \frac{d[i_I]}{dt} \quad \text{pu} \quad (3.36)$$

$$v_b = v_\infty + L_{T3} \frac{d[i_L]}{dt} \quad \text{pu} \quad (3.37)$$

$$i_L = (i_s + i_I) \quad \text{pu} \quad (3.38)$$

Após algumas substituições e arranjo algébrico das equações pode-se escrever:

$$v_s = v_\infty + A_k \frac{d[i_s]}{dt} + L_L \frac{d[i_I]}{dt} \quad \text{pu} \quad (3.39)$$

$$v_I = v_\infty + L_L \frac{d[i_s]}{dt} + B_k \frac{d[i_I]}{dt} \quad \text{pu} \quad (3.40)$$

onde:

$$A_k = (L_{T3} + L_{T1}) ; \quad B_k = (L_{T3} + L_{T2})$$

3.4.1 - Relação entre os sistemas "dqo" das máquinas síncrona e de indução.

A transformação de Park utilizada até aqui é uma técnica que consiste em projetar grandezas senoidais em dois eixos em quadratura removendo todos os termos variantes com o tempo. Desta forma consegue-se uma grande simplificação matemática no equacionamento das máquinas. No entanto os

sistemas "dqo" utilizados pelas duas máquinas não estão na mesma referência, estando eles defasados de δ (ângulo de carga da máquina síncrona) [1,2]. Assim deve-se fazer uma adequação de referências no desenvolvimento matemático a ser feito, baseada na figura 3.15 [5].

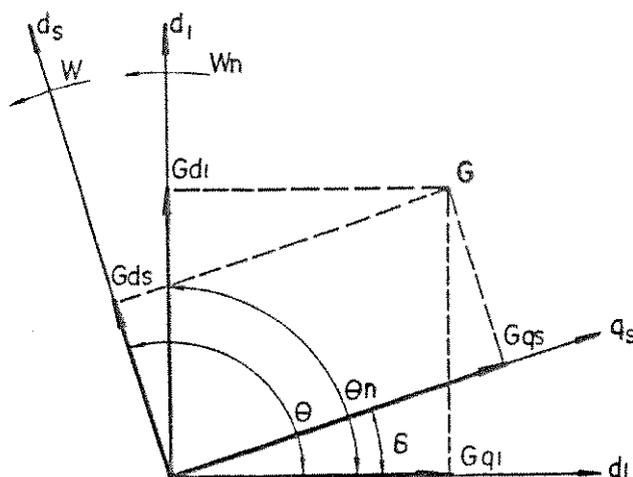


Figura 3.15 - Sistema "dqo" das máquinas síncrona e de indução

Através da figura (3.15) pode-se determinar as seguintes relações:

$$\begin{bmatrix} G_{qI} \\ G_{dI} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & -\text{sen}(\delta) \\ \text{sen}(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{qS} \\ G_{dS} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$\begin{bmatrix} G_{qS} \\ G_{dS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & -\text{sen}(\delta) \\ -\text{sen}(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{qI} \\ G_{dI} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

onde G é uma grandeza senoidal qualquer.

Assim aplicando a transformada de Park nas equações (3.39) e (3.40), fica:

$$V_{dsqs}^s = V_{dsqs}^\infty + A_k \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} - W A_k \begin{bmatrix} -i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} + L L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{I_{ds}} \\ i_{I_{qs}} \end{bmatrix} - W L L \begin{bmatrix} i_{I_{qs}} \\ i_{I_{ds}} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$V_{diqi}^I = V_{diqi}^\infty + L L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix} - W_n L L \begin{bmatrix} -i_{qi} \\ i_{di} \end{bmatrix} + B_k \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{I_{di}} \\ i_{I_{qi}} \end{bmatrix} - W_n B_k \begin{bmatrix} -i_{I_{qi}} \\ i_{I_{di}} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

As correntes i_{ds} , i_{qs} , i_{di} e i_{qi} podem ser substituídas de imediato pelas já conhecidas i_d , i_q , i_{1d} e i_{1q} respectivamente; no entanto as restantes devem ser relacionadas através das equações (3.41) e (3.42).

Conforme já foi mostrado as equações de tensão para a máquina síncrona pode ser escrita na forma:

$$-[L] \frac{d[i]}{dt} = ([R] + W [N])[i] + [V] \quad (3.45)$$

onde $[V]$ é o vetor tensão terminal da máquina síncrona. Assim substituindo (3.43) em (3.45), fica:

$$-[L] \frac{d[i]}{dt} = ([R] + W [N])[i] + \begin{bmatrix} v_{\infty d} + A_K \frac{d(i_d)}{dt} + W A_K i_q + [X_{dq}] \\ -V_F \\ 0 \\ v_{\infty q} + A_K \frac{d(i_q)}{dt} - W A_K i_d + [Y_{dq}] \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{pu} \quad (3.46)$$

onde:

$$[X_{dq}] = L_L \frac{d(i_{I_{ds}})}{dt} + W L_L i_{I_{qs}} \quad (3.47)$$

$$[Y_{dq}] = L_L \frac{d(i_{I_{qs}})}{dt} - W L_L i_{I_{ds}} \quad (3.48)$$

Aplicando a transformação de Park na equação (3.14) e substituindo em (3.46), fica:

$$-[\bar{L}] \frac{d[i]}{dt} = ([R] + W [\bar{N}]) [i] + \begin{bmatrix} -K_1 \sin(\delta - \alpha) + [X_{dq}] \\ -V_F \\ 0 \\ K_1 \cos(\delta - \alpha) + [Y_{dq}] \\ 0 \end{bmatrix} \text{ pu}$$

(3.49)

onde as matrizes $[\bar{L}]$ e $[\bar{N}]$ possuem os termos:

$$\bar{L}_q = L_q + A_k \quad (3.50)$$

$$\bar{L}_d = L_d + A_k \quad (3.51)$$

que substituem L_q e L_d nas matrizes $[L]$ e $[N]$.

As equações de tensão para a máquina de indução podem ser escritas na forma:

$$\frac{d[i]}{dt} = -[L_i]^{-1} ([R_i] + W_h [N_i]) [i] - [L_i]^{-1} [V_i] \text{ pu} \quad (3.52)$$

onde $[V_i]$ é a tensão terminal da máquina de indução. Substituindo (3.44) em (3.52), pode-se escrever:

$$-[L_I] \frac{d[i_I]}{dt} = ([R_I] + W_n [N_I]) [i_I] + \begin{bmatrix} v_{\omega d} + [B_{xs}] + [X_{Idq}] \\ v_{\omega q} + [B_{ys}] + [X_{Idq}] \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ pu}$$

(3.53)

onde:

$$[B_{xs}] = B_K \frac{d(i_{1d})}{dt} + W_n B_K i_{1q} \quad (3.54)$$

$$[B_{ys}] = B_K \frac{d(i_{1q})}{dt} - W_n B_K i_{1d} \quad (3.55)$$

$$[X_{Idq}] = L_L \frac{d(i_{s_{di}})}{dt} + W_n L_L i_{s_{qi}} \quad (3.56)$$

$$[Y_{Idq}] = L_L \frac{d(i_{s_{qi}})}{dt} - W_n L_L i_{s_{di}} \quad (3.57)$$

Aplicando a transformação de Park na equação (3.14) e substituindo em (3.53), fica:

$$-[\bar{L}_I] \frac{d[i_I]}{dt} = ([R_I] + W_n [\bar{N}_I]) + \begin{bmatrix} K_1 \text{sen}(\alpha) + [X_{Idq}] \\ K_1 \text{cos}(\alpha) + [Y_{Idq}] \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ pu} \quad (3.58)$$

onde as matrizes $[\bar{L}_I]$ e $[\bar{N}_I]$ possui o termo:

$$\bar{L}_{11} = L_{11} + B_k \quad (3.59)$$

que substitui o termo L_{11} nas matrizes $[L_I]$ e $[N_I]$.

É necessário agora determinar as equações para relacionar as referências das duas máquinas e completar o equacionamento. Através de (3.41) e (3.42) pode-se determinar as correntes que não estão na referência conveniente. Assim:

$$i_{I_{ds}} = i_{1d} \cos(\delta) - i_{1q} \text{sen}(\delta) \quad \text{pu} \quad (3.60)$$

$$i_{I_{qs}} = i_{1q} \cos(\delta) - i_{1d} \text{sen}(\delta) \quad \text{pu} \quad (3.61)$$

$$i_{s_{di}} = i_q \text{sen}(\delta) + i_d \cos(\delta) \quad \text{pu} \quad (3.62)$$

$$i_{s_{qi}} = i_q \cos(\delta) - i_d \text{sen}(\delta) \quad \text{pu} \quad (3.63)$$

Utilizando as equações (3.60)-(3.63) pode-se determinar:

$$\frac{d(i_{ds})}{dt} = \left(\frac{d(i_{1d})}{dt} - i_{1q} (W-1) \right) \cos(\delta) - \left(\frac{d(i_{1q})}{dt} + i_{1d} (W-1) \right) \sin(\delta) \quad (3.64)$$

$$\frac{d(i_{qs})}{dt} = \left(\frac{d(i_{1q})}{dt} + i_{1d} (W-1) \right) \cos(\delta) + \left(\frac{d(i_{1d})}{dt} - i_{1q} (W-1) \right) \sin(\delta) \quad (3.65)$$

$$\frac{d(i_{di})}{dt} = \left(\frac{d(i_q)}{dt} - i_d (W-1) \right) \sin(\delta) + \left(\frac{d(i_d)}{dt} + i_q (W-1) \right) \cos(\delta) \quad (3.66)$$

$$\frac{d(i_{di})}{dt} = \left(\frac{d(i_q)}{dt} - i_d (W-1) \right) \cos(\delta) + \left(\frac{d(i_d)}{dt} + i_q (W-1) \right) \sin(\delta) \quad (3.67)$$

Assim os termos de corrente desconhecidos em (3.49) e (3.58), ficam definidos nas equações (3.60)-(3.67). Desta forma com o modelo matemático completo, que representa o sistema da figura 3.1 e com o problema das referências devidamente contornado, pode-se partir para a parte final que é realizar as simulações com os objetivos já citados.

3.5 - Resultado das simulações

As tabelas 3.4 e 3.5 mostram os dados das máquinas síncrona e de indução utilizados nas simulações, para a frequência de 60 Hz. A potência da máquina síncrona é de 160

MVA e sua tensão de linha é de 15 KV, conexão Y. A potência da máquina de indução é de 4.32 MVA e tensão de linha de 6.6 KV. As indutâncias L_{m1} e L_{r2} utilizadas possuem o valor de 0.001×10^{-3} H e L_{r3} tem o valor de 0.2×10^{-3} H.

$L_d = 6.341 \times 10^{-3}$ H	$K_{M0} = 5.782 \times 10^{-3}$ H
$L_F = 2.184$ H	$r = 1.542 \times 10^{-3}$ Ω
$L_D = 5.989 \times 10^{-3}$ H	$r_D = 18.421 \times 10^{-3}$ Ω
$L_q = 6.118 \times 10^{-3}$ H	$r_F = 0.371$ Ω
$L_0 = 1.423 \times 10^{-3}$ H	$r_0 = 18.969 \times 10^{-3}$ Ω
$K_{MD} = 5.782 \times 10^{-3}$ H	$H = 1.765$ Kw.s/Hp

Tabela 3.4 - Parâmetros da máquina síncrona

$X_1 = 0.1097$ pu
$X_2 = 0.1170$ pu
$X_m = 3.7900$ pu
$r = 0.0052$ pu
$R = 0.0255$ pu
$H = 0.86$ Mj/MVA

Tabela 3.5 - Parâmetros da máquina de indução em pu utilizando os valores base da máquina.

As figuras (3.17)-(3.19) mostram a velocidade angular, ângulo de potência e a tensão v_b do gerador síncrono, sem a atuação da máquina de indução para uma variação de +10% em T_m .

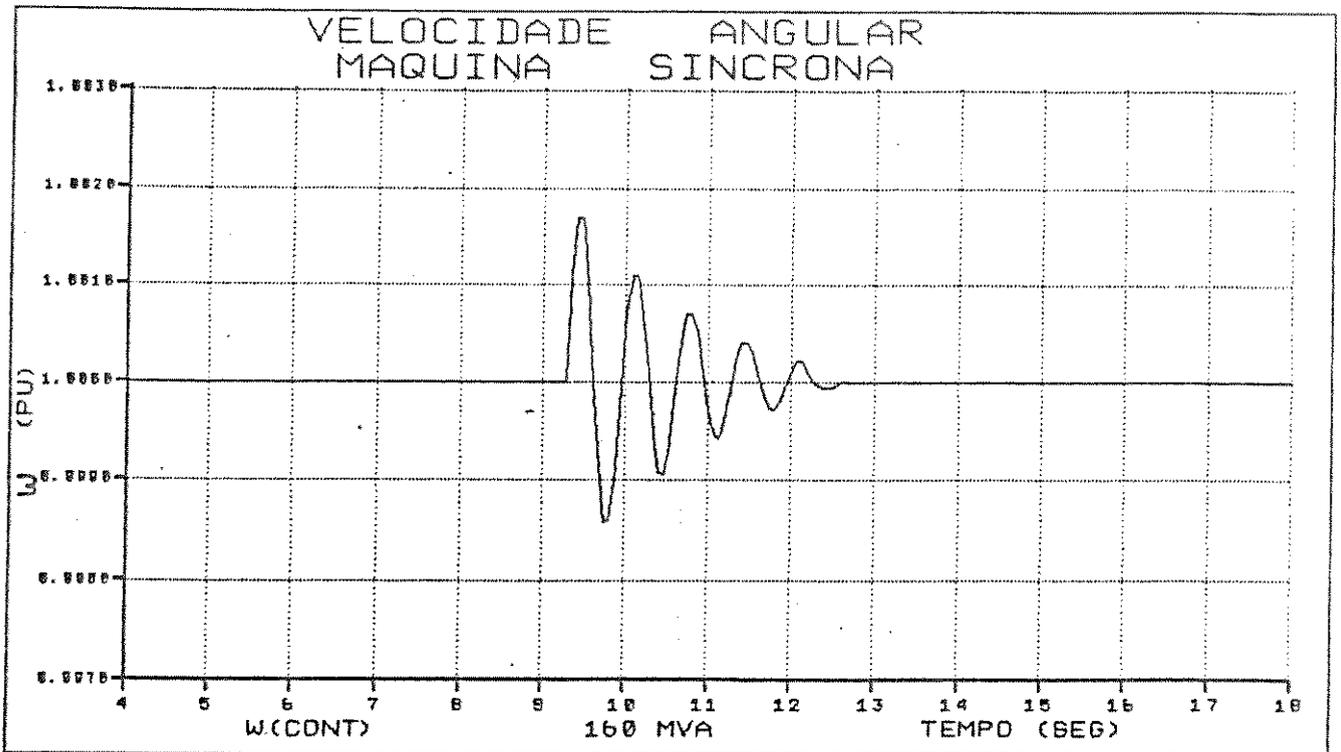


Figura 3.17 - Velocidade angular da máquina síncrona com uma uma variação de +10% em T_m .

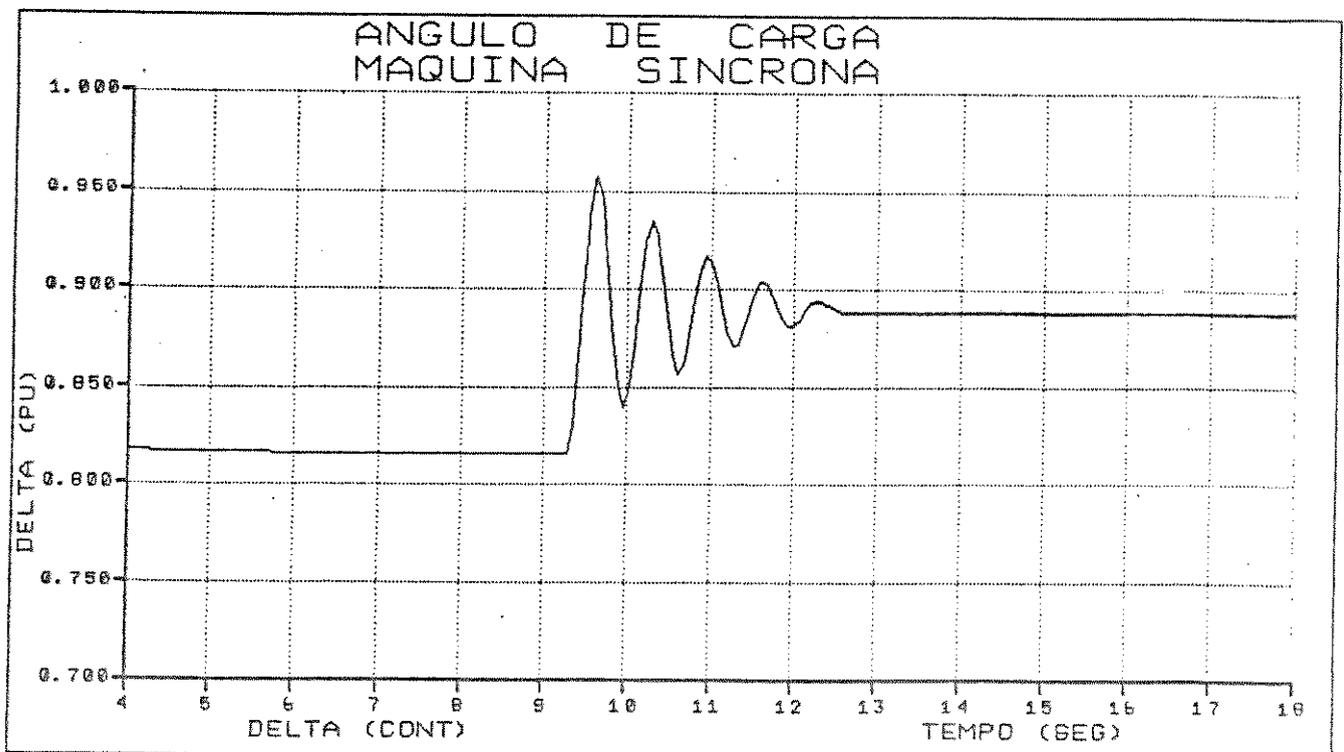


Figura 3.18 - Ângulo de potência da máquina síncrona com variação de +10% em T_m .

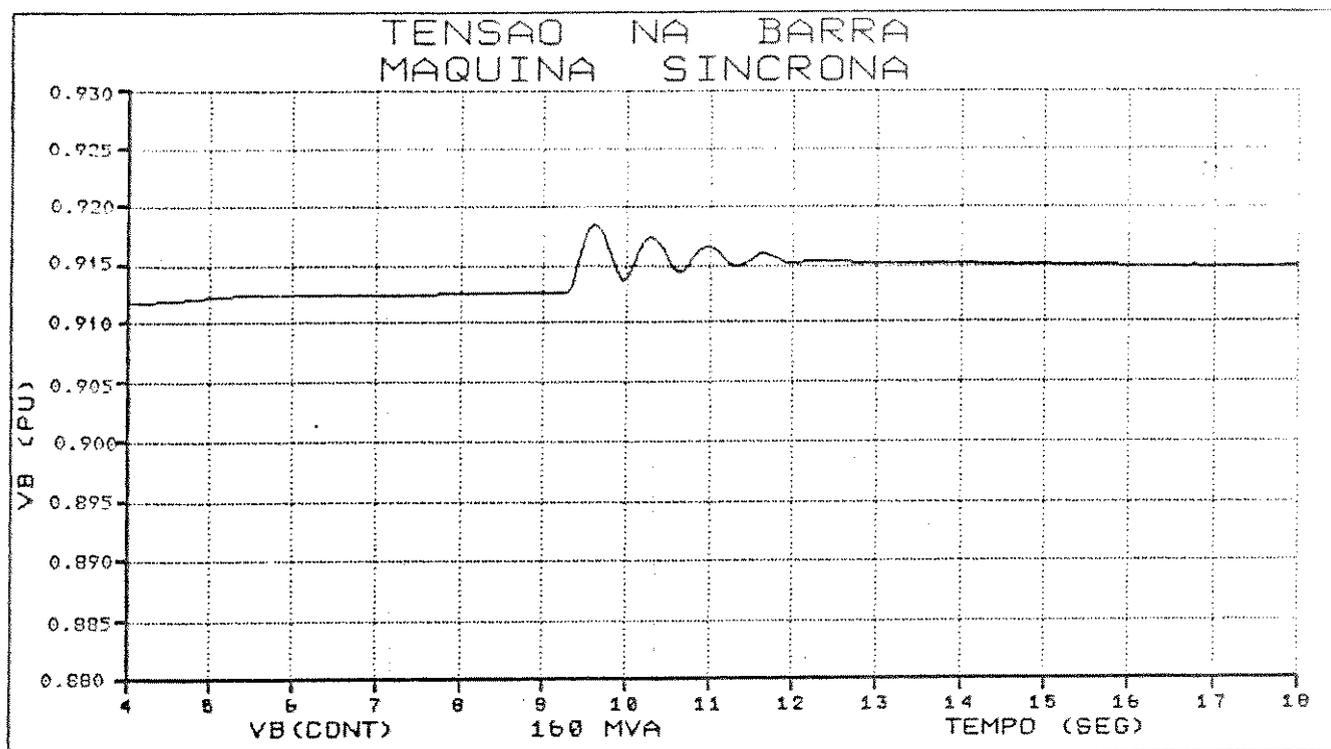


Figura 3.19 - Tensão na barra (v_b) com +10% de variação em T_m .

As figuras a seguir mostram as mesmas variáveis da máquina síncrona, para o mesmo distúrbio, porém com a atuação da máquina de indução. Esta atuação é no seguinte sentido, quando existe a necessidade de uma variação na potência dos geradores para compensar um desbalanceamento de carga; parte desta variação é fornecida pela máquina de indução aliviando a máquina síncrona. Posteriormente esta parte é devolvida para a máquina síncrona em pequenas parcelas no tempo, até que a máquina de indução não mais contribua com nenhuma potência ativa voltando a flutuar na barra. Desta forma as oscilações da máquina síncrona se tornam mais amenas e espaçadas no tempo. As figuras (3.20)-(3.22) mostram o comportamento da máquina síncrona e as figuras (3.23)-(3.25) da máquina de indução.

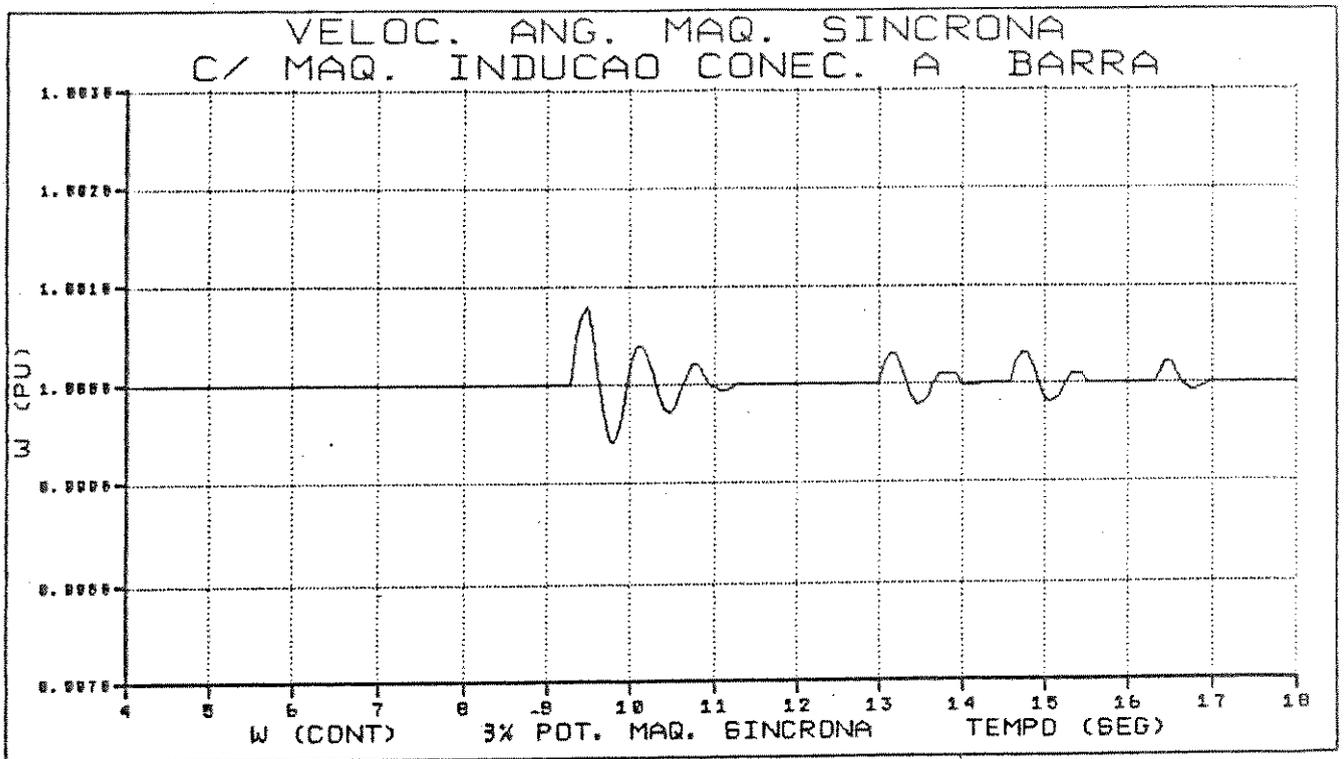


Figura 3.20 - Velocidade angular da máquina síncrona com a atuação da máquina de indução.

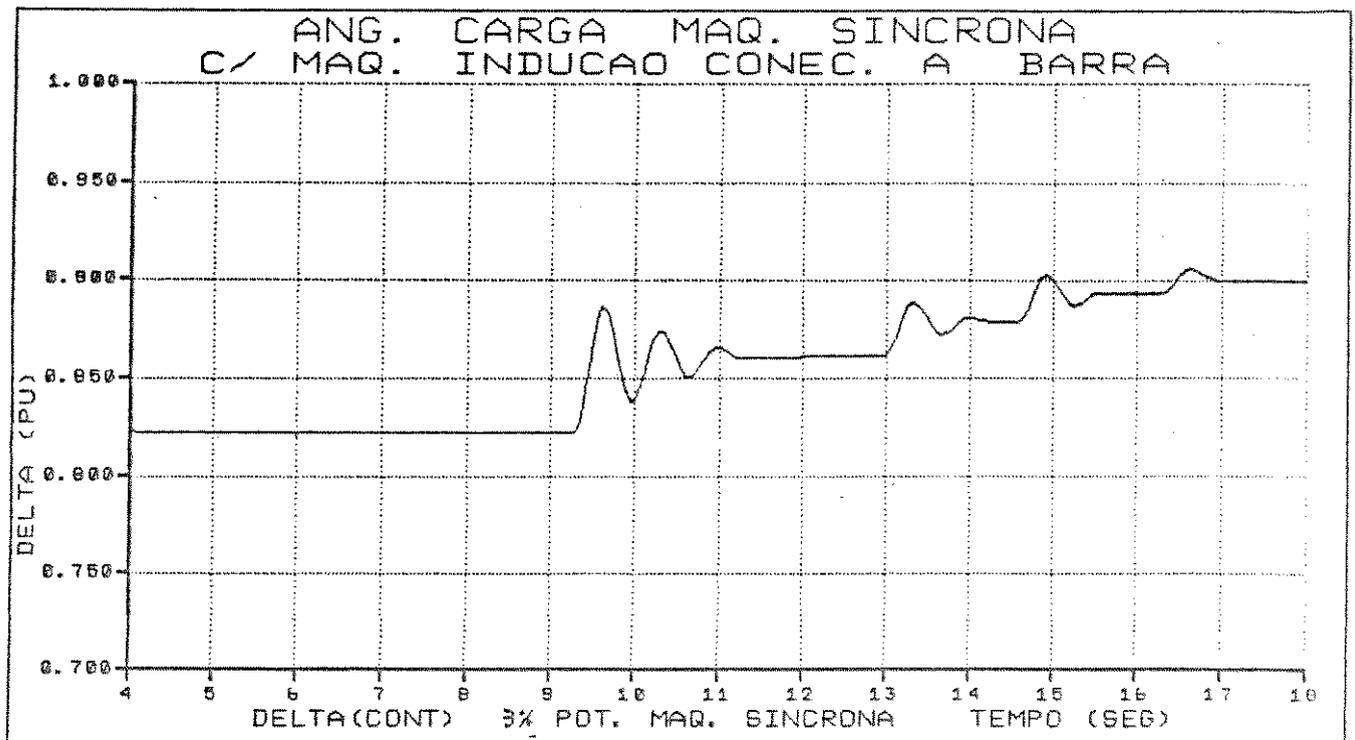


Figura 3.21 - Ângulo de potência da máquina síncrona com a atuação da máquina de indução.

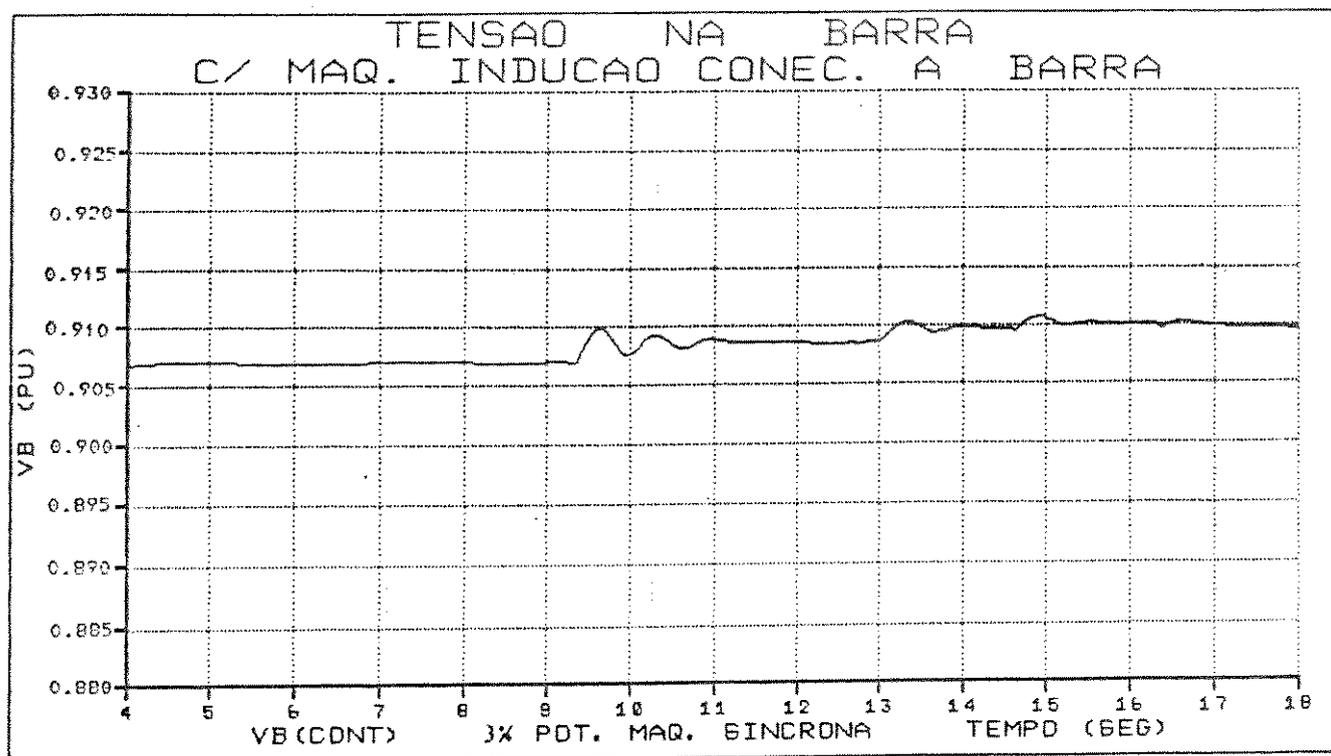


Figura 3.22 - Tensão na barra (vb) com a atuação da máquina de indução.

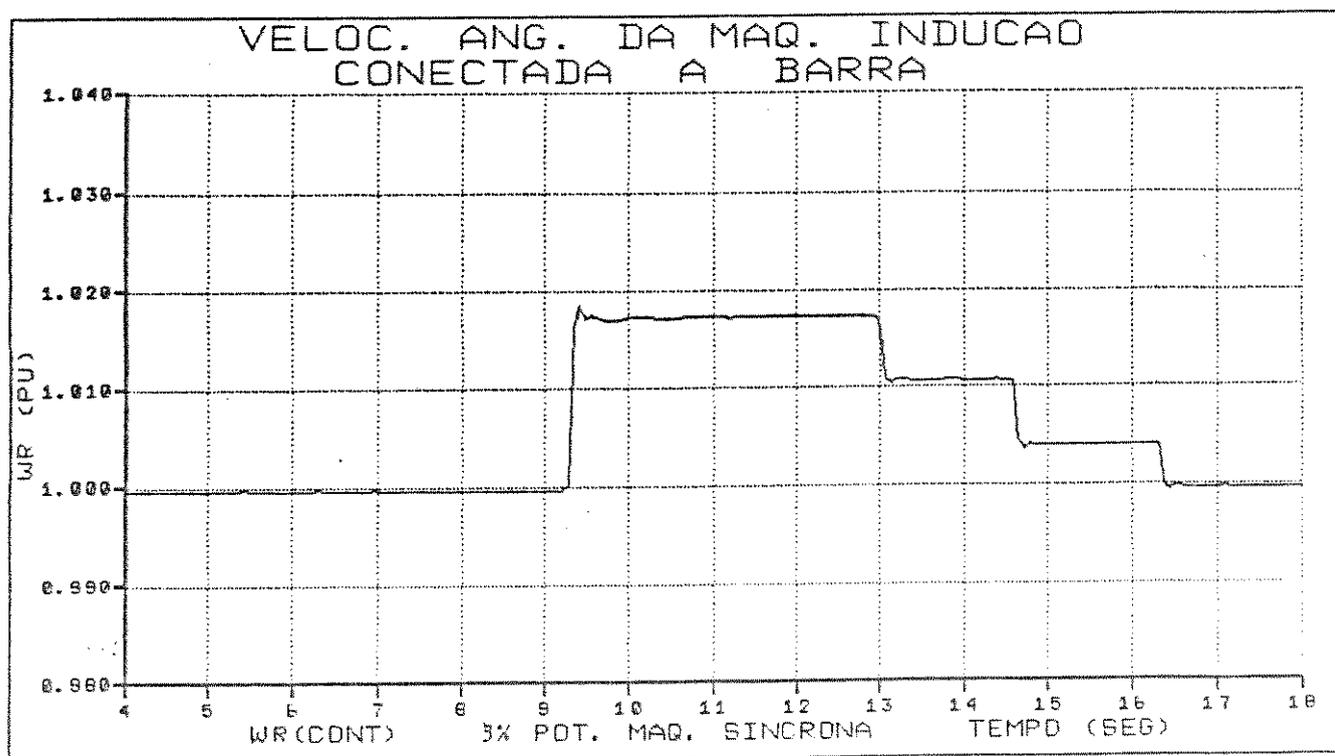


Figura 3.23 - Velocidade angular da máquina de indução no transitório.

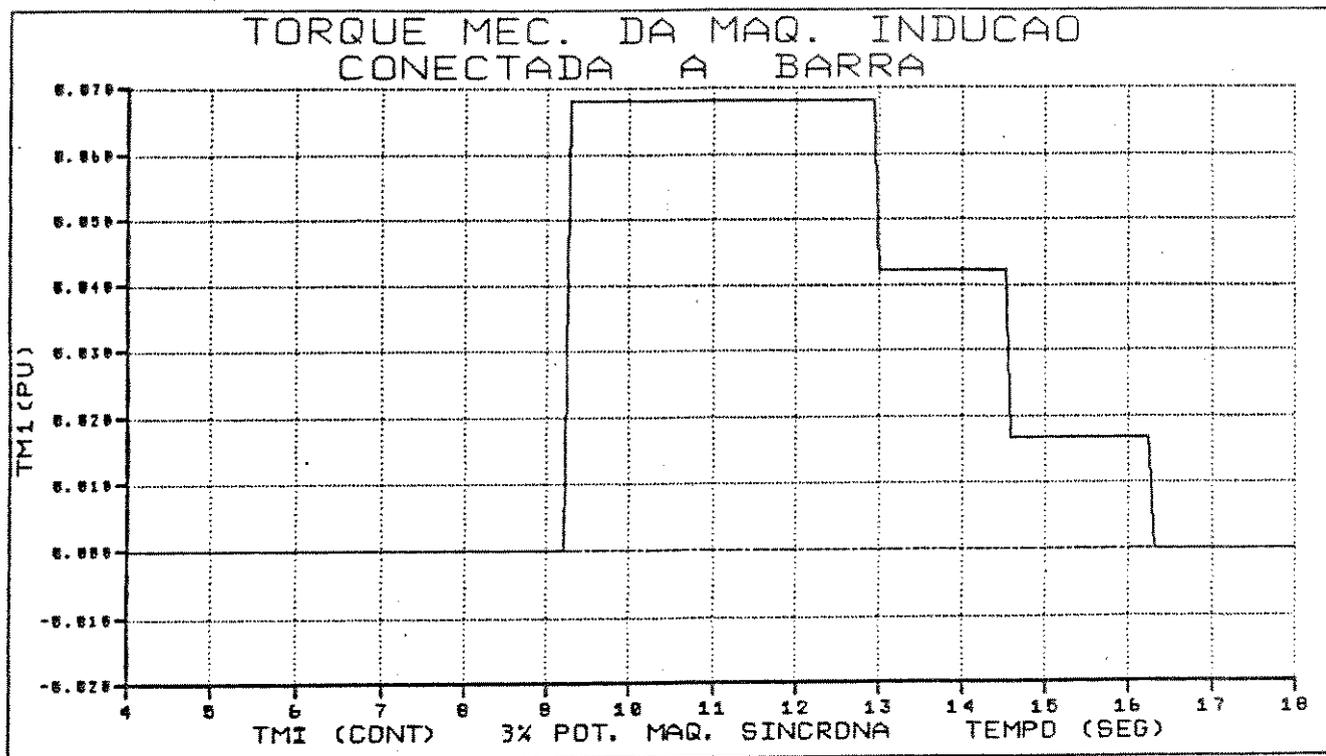


Figura 3.24 - Torque mecânico (T_{m1}) da máquina de indução durante o transitório.

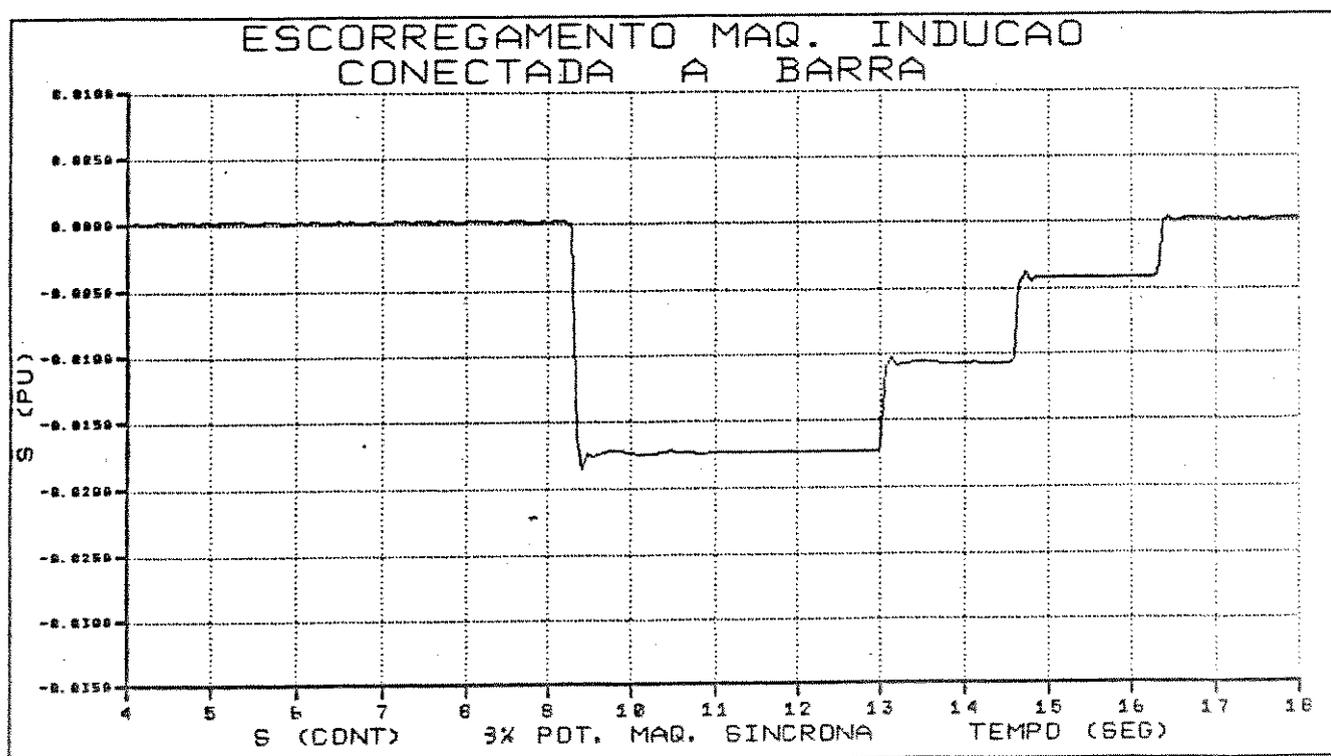


Figura 3.24 - Escorregamento da máquina de indução durante o transitório.

Pode-se observar uma melhora na amplitude da velocidade angular no transitório da máquina síncrona de aproximadamente 58%, assim como uma redução próxima de 35% em seu período. Quanto a tensão na barra (v_b) uma melhora em torno de 30% foi obtida na amplitude e uma diminuição em seu período igual a da velocidade angular. O comportamento da máquina de indução é perfeitamente compatível com o esperado, ou seja com o que foi comentado anteriormente.

3.6 - Comentários

O modelamento matemático desenvolvido até aqui para as máquinas síncrona e de indução, mostrou-se bastante satisfatório, assim como aquele desenvolvido para o sistema isolado aqui analisado com as máquinas operando conjuntamente. Os resultados de todas as simulações mostraram não só o comportamento esperado das máquinas atuando isoladamente como também atendeu aos objetivos deste trabalho que era analisar os efeitos da máquina de indução na máquina síncrona. No entanto, ainda assim o modelo aqui apresentado possui duas limitações quando o estudo é feito em termos práticos, ou seja aplicado a sistemas reais. Primeiro; é uma análise de um sistema isolado, e o que normalmente acontece é que os sistemas são interligados como uma rede composta de inúmeros geradores síncronos, máquinas de indução (na grande maioria motores), assim como cargas de toda a espécie. Segundo; o modelamento foi desenvolvido à potência constante, ou seja não

possui um dispositivo capaz de atuar no eixo da máquina corrigindo a potência fornecida ao sistema sempre que houver a necessidade de se corrigir um desbalanceamento geração-carga. Este dispositivo é chamado regulador de velocidade que não só atua no sentido de fornecer potência para o sistema como também estabelece a parcela de potência que cada máquina deve fornecer quando da ocorrência de distúrbios que envolvam variação de potência ativa. Deve-se entender então que o que foi estudado até aqui é um primeiro passo de um estudo mais completo sobre o trabalho aqui desenvolvido.

Desta forma os próximos capítulos serão dedicados a um estudo de situações reais de operação, com o desenvolvimento de reguladores de velocidade para a máquina de indução, assim como a implementação de ambos em um programa de estabilidade transitória confiável, sempre com os mesmos objetivos; analisar a influência da máquina de indução na estabilidade da máquina síncrona.

CAPITULO 4

PROGRAMA DE ESTABILIDADE TRANSITORIA (PET)

4.1 - Introdução

A análise dinâmica de um sistema de potência submetida a um distúrbio revela problemas não lineares, os quais devem ser resolvidos de forma adequada com a simulação digital. As limitações são tais que não se tem diretamente uma indicação do grau de estabilidade do sistema assim como as causas ou fatores que influenciam na instabilidade, ou seja a estabilidade relativa do sistema.

Utiliza-se o método passo a passo no processo de simulação em que as equações diferenciais do sistema são resolvidas tradicionalmente de uma maneira alternada com a rede elétrica, o que pode levar a um alto custo computacional, que irá impor restrições quanto ao número de simulações normalmente feitas em estudos de engenharia. Assim é de grande interesse trabalhar com um programa digital que possua métodos de resolução de alta eficiência computacional e confiabilidade numérica.

O programa aqui utilizado incorpora modernas técnicas de solução e sofisticado modelamento dos componentes do sistema, sendo utilizado em algumas universidades, órgãos de

pesquisa e concessionárias de energia elétrica no Brasil e exterior, mostrando-se portanto adequado ao estudo de estabilidade dinâmica necessário ao trabalho a ser desenvolvido.

4.2 - Características do programa

O programa de estabilidade transitória (PET) fornece a resposta dinâmica de um sistema elétrico de potência face a distúrbios devidos a:

- Chaveamentos
- Faltas (Curto-circuito, perda de geração, etc.)

As condições iniciais são as de regime permanente fornecidas por um programa de fluxo de carga. O PET é compatível com o programa de fluxo de carga da Philadelphia Electric Company (PECO).

O estudo a ser realizado se preocupa essencialmente com modelo de máquina (síncrona e de indução), e sob este aspecto o programa tem quatro modelos diferentes para a máquina síncrona que será escolhido automaticamente frente aos dados fornecidos. Pode-se ainda usar diferentes representações de reguladores de velocidade e tensão para diferentes máquinas (geradores térmicos e hidráulicos). Os reguladores de velocidade utilizados são tradicionais e podem ser consultados na referência [4]. A representação dos motores de indução (as

máquinas de indução são modeladas apenas como motores) é através de um modelo dinâmico que inclui o efeito transitório do rotor mesmo que seja gaiola dupla. A característica carga-velocidade pode ser especificada de várias formas para um dado motor.

Todas as cargas são representadas por impedância constante, corrente constante ou potência constante, exceto aquelas relativas aos motores de indução.

A frequência média do sistema pode ser determinada a qualquer instante, assim como as frequências das barras com geradores e frequência individual de cada gerador. Um alívio automático de carga pode ser efetuado com base na frequência média ou na frequência de uma barra de geração utilizada como referência. As condições das máquinas são impressas durante a solução em qualquer intervalo de tempo especificado. Pode-se obter também as tensões nas barras e os fluxos de potência em ramos determinados. Pode-se especificar ainda qualquer sequência de falta e chaveamento.

Existe flexibilidade quanto à escolha de modelos. Qualquer grupo gerador pode ser representado por qualquer combinação de modelos de máquinas, sistema de excitação e regulador de velocidade.

Pode-se obter curvas de oscilação dos rotores de geradores especificados, sendo a escala dos gráficos fornecidas

automaticamente ou especificadas.

Os dados de entrada que podem ser especificados ou transferidos de um programa de fluxo de carga, são testados pelo programa e mensagens de erro são emitidas caso existam. A precisão das condições iniciais são também testadas internamente pelo PET.

Para se evitar problemas quanto a integração numérica das equações diferenciais, é utilizado o método trapezoidal implícito para resolução destas equações, pelo fato de ser numericamente estável. O método será explicado ainda neste capítulo.

Os dados relativos à impedância constante da máquina síncrona podem ser fornecidos utilizando-se os valores base da máquina ou do sistema, assim como os do motor de indução, o qual ainda aceita dados de impedância em ohms.

4.3 - Arquivo de dados

4.3.1 - Entrada de dados

A entrada de dados do programa pode ser sub-dividida em oito seções:

- (1) - Dados de entrada da rede
- (2) - Dados de entrada da máquina síncrona
- (3) - Dados de entrada do regulador automático de tensão
- (4) - Dados de entrada do regulador de velocidade
- (5) - Dados de entrada do motor de indução
- (6) - Dados de linha e cargas de impedância constante
(formulação da matriz impedância da rede)
- (7) - Dados com descrição das linhas monitoradas
- (8) - Dados de faltas e chaveamentos

Será executada no próximo capítulo a implementação do gerador de indução com o seu regulador de velocidade no PET, onde então será mostrado com detalhes a entrada dos dados dos geradores síncronos, dos motores de indução, assim como dos reguladores de velocidade. As subrotinas utilizadas ou alteradas como também as modificações na entrada de dados devido à implementação a ser feita também serão mostradas.

4.3.2 - Saída de dados

A saída do PET pode ser arranjada em tabelas ou de outra forma conveniente como gráficos e são determinadas no começo do arquivo de dados.

Pode-se obter relatórios da simulação dinâmica a cada intervalo de impressão após verificação da consistência dos

dados e da precisão das condições iniciais. São relatórios opcionais e fornecem os valores das tensões nos barramentos, fluxos de linhas monitoradas, variáveis dos geradores e controladores, motores de indução, elos de CC, etc.

4.4 - Cálculo das condições iniciais

Após entrar com os dados do gerador, a tensão interna e o ângulo do rotor são calculados com referência a barra em que está conectado. Através destas variáveis a corrente da máquina, potência elétrica e mecânica são calculadas e as condições iniciais estão estabelecidas. Uma verificação no balanço de potência para cada máquina é então executado assegurando a consistência dos dados fornecidos. Uma pequena discrepância entre os valores de potência calculados e fornecidos é tolerada pelo programa, no entanto a execução é interrompida quando a diferença for maior do que a especificada por ele.

As condições iniciais do motor de indução são determinadas pela tensão terminal e pela potência ativa fornecida assim como pelo torque de carga do motor expresso em função da velocidade da máquina conforme será visto no capítulo seguinte. O escorregamento inicial e a potência reativa do motor é calculada durante este estágio sendo então feito uma comparação com as potências especificadas. Da mesma forma como anteriormente citado, pequenas diferenças são aceitas pelo

programa, havendo no entanto uma interrupção quando esta diferença exceder limites especificados.

4.5 - Técnicas de solução das equações

O problema da estabilidade transitória em um sistema de potência elétrica pode ser descrito em qualquer instante "t" por dois grupos diferentes de equações, que são:

- Um sistema de equações algébricas da forma:

$$[g([x],[y])] = 0 \quad (4.1)$$

- Um sistema de equações diferenciais da forma:

$$[py] = [f([x],[y],t)] \quad (4.2)$$

onde:

[x] = Vetor das variáveis não integráveis, tais como tensão do barramento, potência elétrica, torques e fatores de saturação

[y] = Vetor das variáveis integráveis tais como ângulo de carga, velocidade angular e sinais do circuito de controle

p = operador $\frac{d}{dt}$

g e f = funções escalares

Nas equações acima os colchetes são usados para indicar vetor e matriz, e o parentesis indica uma relação funcional com o tempo "t".

As equações (4.1) representam as equações de circuito, modelos de carga estática e equações algébricas das máquinas síncronas e motores de indução.

As equações (4.2) descrevem o comportamento dinâmico das máquinas e seus circuitos de controle.

Qualquer mudança no circuito causada por exemplo por um chaveamento requer uma mudança apropriada na estrutura das equações algébricas (4.1) associada com uma mudança discreta nas variáveis não integráveis.

São três as maneiras de se resolver as equações (4.1) e (4.2) [5,21]:

a) Resolver (4.1) e (4.2) alternadamente - Esta é a técnica utilizada pela maior parte dos métodos de integração explícita tais como Runge-Kutta e Preditor-Corretor;

b) Solução pela eliminação de $[x]$ - Técnica utilizada para estudos de estabilidade de pequenos distúrbios;

c) Solução através da integração implícita; um processo de algebrização aplicada em (4.2) - Esta é a técnica utilizada pelo método trapezoidal implícito que é o processo de solução utilizado pelo programa de estabilidade transitória. O método e suas vantagens são melhores descritos na próxima seção.

4.6 - Método trapezoidal implícito

O método trapezoidal implícito é um método de integração que se baseia na linearização das equações diferenciais dentro de um intervalo especificado. Se as equações são não lineares a solução pelo método trapezoidal é iterativa, de outra forma para equações lineares a solução é obtida diretamente.

Com o auxílio da figura 4.1 onde se verifica a função $f(t)$ representando a derivada e y em função do tempo, pode-se elucidar o método.

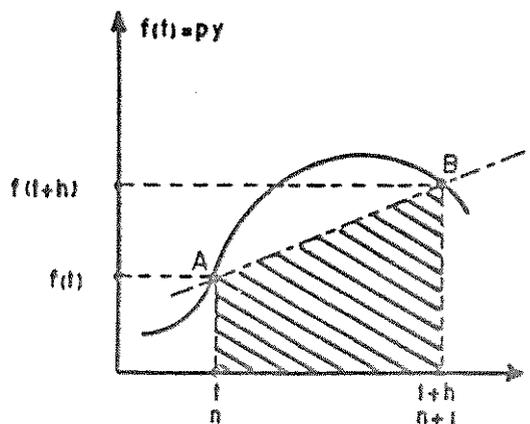


Figura 4.1 - Integração pelo método trapezoidal.

Seja então:

$$p(y) = f(t) \quad (4.3)$$

ou:

$$y(t) = \int f(t) dt \quad (4.4)$$

Considerando o intervalo de tempo h , entre o tempo " t " e " $t+h$ ", a área sob a curva $f(t)$ é dada por:

$$\int_t^{t+h} f(t) dt \quad (4.5)$$

A expressão (4.5) pode ser colocada na forma:

$$\int_t^{t+h} f(t) dt = \int_0^{t+h} f(t) dt - \int_0^t f(t) dt \quad (4.6)$$

As duas integrais do lado direito de (4.6) são as soluções de (4.3) para os limites especificados. Então,

$$y(t+h) = \int_0^{t+h} f(t) dt \quad (4.7)$$

$$y(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (4.8)$$

A área do trapézio na figura 4.1 formada entre a secante AB e o intervalo de tempo " h " do eixo t é dada por:

$$\frac{h}{2} [f(t) + f(t+h)] \quad (4.9)$$

que é uma boa aproximação para a equação (4.5). Assim usando (4.7)-(4.9) em (4.6) a seguinte expressão é obtida:

$$\frac{h}{2} [f(t) + f(t+h)] = y(t+h) - y(t) \quad (4.10)$$

Substituindo (4.3) e a expressão:

$$f(t+h) = py(t+h) \quad (4.11)$$

em (4.10) e rearranjando, resulta:

$$y(t+h) = y(t) + \frac{h}{2} [py(t) + py(t+h)] \quad (4.12)$$

Se "t" e "t+h" correspondem aos passos "n" e "n+1" no processo de integração, então a equação (4.12), omitindo-se o tempo "t", pode ser colocada na forma:

$$Y_{n+1} = Y_n + \frac{h}{2} (pY_n + pY_{n+1}) \quad (4.13)$$

Assim a solução da equação (4.3) no final de n+1 passos é representada pelas equações (4.12)-(4.13), que são duas formas de se escrever o método trapezoidal implícito de integração. O método é dito implícito porque a solução " y_{n+1} " de (4.3) depende da variável " py_{n+1} " para o tempo "t+h", assim como das variáveis " py_n " e " y_n " para o tempo anterior "t".

O método trapezoidal implícito tem sido usado para a resolução de problemas de estabilidade transitória sendo reconhecido como bastante eficaz e tendo grandes vantagens sobre outros métodos tradicionais. As seguintes vantagens podem ser citadas:

- 1) É numericamente estável
- 2) É bastante rápido
- 3) Possui precisão suficiente

Dommel e Sato [21] mostram que o método trapezoidal é numericamente estável mesmo quando a largura de passo de integração é muito maior do que a menor constante de tempo envolvida no estudo. A presença destas pequenas constantes de tempo tem sempre sido causa de preocupação quando se utiliza por exemplo o método Runge-Kutta; método este que assegura a estabilidade limitada ao comprimento do passo de integração de acordo com a menor constante de tempo do estudo efetuado.

Arrilaga [5] faz uma comparação entre o método Runge-Kutta Gill e o trapezoidal para resolver problemas de estabilidade transitória em dois sistemas de potência. Foi mostrado que para uma largura de passo de 0.001 segundos, o método trapezoidal implícito foi duas vezes mais rápido que o Runge-Kutta Gill. Esta diferença se acentua se a largura do passo for diminuída. É mostrado também que para um mesmo passo de integração o erro obtido na aplicação do método trapezoidal é desprezível comparado com o outro método.

Law [22] resolve um problema de estabilidade onde o maior passo que pode ser usado com a utilização do método Runge-Kutta (quarta ordem) sem haver instabilidade numérica foi 0.0001 segundo, enquanto passos da ordem de 0.05 segundos foram possíveis de se utilizar com o método trapezoidal implícito. Mesmo que o método não leve leve a aproximações precisas para grandes larguras de passo, o erro não cresce exponencialmente como acontece no Runge-Kutta [29].

Pode-se mostrar que a estabilidade numérica é uma propriedade que tem importância maior que a precisão [5] e esta é a principal vantagem do método trapezoidal implícito; ou seja o método é numericamente absolutamente estável. Isto o habilita a utilizar largos passos de integração quando necessário, tendo é claro a limitação da precisão desejada.

Desta forma justifica-se plenamente a utilização do método trapezoidal implícito na resolução das equações diferenciais vistas no próximo capítulo.

4.7 - Solução do algoritmo adotado

O procedimento utilizado pelo programa quando da análise da estabilidade transitória é descrito nos seguintes passos:

- (1) Cálculo das condições iniciais (em $t=0$)
- (2) Resolução das equações diferenciais no tempo $(t+h)$ para as variáveis integráveis $[y(t+h)]$ utilizando as variáveis não integráveis $[x(t+h)]$ obtidas por processo de extrapolação linear.
- (3) Resolvem-se as equações algébricas para as variáveis não integráveis $[x(t+h)]$ utilizando as variáveis integráveis calculadas no passo anterior.
- (4) Resolvem-se novamente as equações diferenciais para $[y(t+h)]$ utilizando $[x(t+h)]$
- (5) Se $[y(t+h)]$ e $[x(t+h)]$ convergirem; ir para o passo (6). Se não houver convergência; voltar para o passo (3).
- (6) Avançar um passo no tempo e retornar para (2).

Este procedimento iterativo com testes de convergência tanto de "x" (variável não integrável) e "y" (variável integrável) resulta que as equações algébricas e diferenciais são resolvidas simultaneamente eliminando desta forma os erros de interface.

4.7.1 - Extrapolação

Extrapolação é uma técnica utilizada para prever os valores das variáveis algébricas "x" no passo "n+1" a partir do conhecimento dos valores anteriores melhorando a solução da simulação. O programa utiliza uma forma simples de

extrapolação linear de primeira ordem conjuntamente com o método trapezoidal, dada por:

$$x(t+h) = 2x(t) - x(t-h) \quad (4.14)$$

Apesar de poder-se utilizar um processo de extrapolação de ordem mais alta, como segunda ou terceira ordem, é mostrado por Arnold [4] e Law [22] que isto leva a pouca ou quase nenhuma melhora na solução.

Deve-se observar que o processo de extrapolação não pode ser aplicado imediatamente após uma descontinuidade na solução do sistema. Assim para se manter a precisão desde o início de uma brusca mudança de valor e para continuar fornecendo os valores prévios necessários a esta técnica, a largura de passo "h" é automaticamente dividida pelo programa após a descontinuidade.

4.8 - Aplicações do método trapezoidal implícito

4.8.1 - Solução de sistemas de primeira ordem

O algoritmo de integração trapezoidal implícito pode ser escrito como:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} [py_n + py_{n+1}] \quad (4.15)$$

onde todos os parâmetros já foram definidos.

A figura 4.2 mostra a função de transferência de 1ª ordem para um sistema simples onde "G" é o ganho, "T" é a constante de tempo, "s" é o operador de Laplace e "Z(s)" e "Y(s)" são respectivamente as variáveis de entrada e saída.

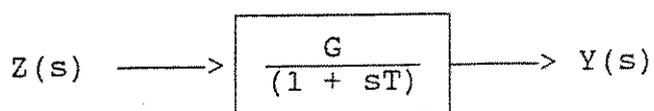


Figura 4.2 - Função de transferência de 1ª ordem para um sistema simples.

No domínio do tempo a equação diferencial associada com o sistema é:

$$pY(t) = \frac{1}{T} [G z(t) - Y(t)] \quad (4.16)$$

Substituindo (4.16) em (4.15) obtém-se o algoritmo de integração:

$$Y_{n+1} = Y_n + \left(\frac{h}{2T}\right) [(Gz_n - Y_n) + (Gz_{n+1} - Y_{n+1})] \quad (4.17)$$

O índice "t" de agora em diante será omitido quando não houver risco de anbigüidade. Desta forma a equação (4.17) pode ser posta na forma:

$$Y_{n+1} = c_{n+1} + m_{n+1} z_{n+1} \quad (4.18)$$

onde:

$$c_{n+1} = (1 - 2b_{n+1})Y_n + b_{n+1}(Gz_n) \quad (4.19)$$

$$m_{n+1} = b_{n+1}(G) \quad (4.20)$$

$$b_{n+1} = \frac{h}{(2T + h)} \quad (4.21)$$

É conveniente a esta altura verificar se uma pequena constante de tempo em (4.16) causa alguma instabilidade na solução pelo método trapezoidal implícito (que pode ocorrer como em alguns métodos tais como o Runge-Kutta). Fazendo $T = 0$ a solução de (4.16) dada pelas equações (4.18)-(4.21) é:

$$Y_{n+1} - G(z_{n+1}) = G(z_n) - Y_n \quad (4.22)$$

a qual concorda com a solução para $T = 0$ em (4.16) que é:

$$Gz(t) - y(t) = 0 \quad \text{para todo } t \quad (4.23)$$

As equações (4.22) e (4.23) são idênticas desde que o processo parta com condições iniciais corretas em regime permanente obtidas de $Gz_0 - y_0 = 0$. Entretanto pequenos erros nas condições iniciais não causam maiores problemas com a utilização do método trapezoidal implícito.

4.8.2 - Generalização da regra trapezoidal

A figura 4.3 mostra uma função de transferência genérica, a qual atribuindo valores convenientes às constantes A, B, C e D pode-se representar qualquer tipo de equação diferencial de 1ª ordem.

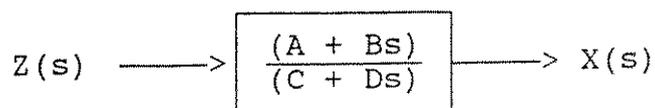


Figura 4.3 - Função de transferência genérica

A função de transferência é:

$$F(s) = \frac{(A + Bs)}{(C + Ds)} = \frac{X(s)}{Z(s)} \quad (4.24)$$

A equação (4.24) pode ser reescrita na forma:

$$F(s) = \frac{B}{D} + \left(\frac{\frac{A}{C} - \frac{B}{D}}{1 + s\frac{D}{C}} \right) \quad (4.25)$$

ou:

$$F(s) = \frac{B}{D} + \left(\frac{G}{(1 + sT)} \right) \quad (4.26)$$

onde:

$$G = \frac{A}{C} - \frac{B}{D} \quad (4.27)$$

$$T = \frac{D}{C} \quad (4.28)$$

A equação (4.26) é representada no diagrama de blocos da figura 4.4.

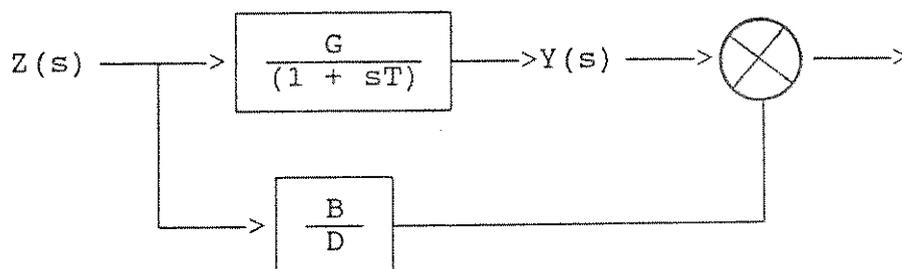


Figura 4.4 - Sistema modificado da figura 4.3

As equações da figura 4.4 podem ser escritas como:

$$Y(s) = \frac{G}{(1 + sT)} \quad (4.29)$$

$$X(s) = \left(\frac{B}{D} \right) Z(s) + Y(s) \quad (4.30)$$

Transformando (4.29) e (4.30) para o domínio do tempo, fica:

$$py(t) = \left(\frac{1}{T} \right) [Gz(t) - y(t)] \quad (4.31)$$

$$x(t) = \left(\frac{B}{D} \right) z(t) + y(t) \quad (4.32)$$

A equação diferencial (4.31) corresponde exatamente à equação (4.16) e conseqüentemente tem a mesma solução usando a regra trapezoidal, ou seja a equação (4.18). As

soluções da equação algébrica (4.32) nos tempos correspondentes aos passos "n" e "n+1" são:

$$x_n = \left(\frac{B}{D} \right) z_n + Y_n \quad (4.33)$$

$$x_{n+1} = \left(\frac{B}{D} \right) z_{n+1} + Y_{n+1} \quad (4.34)$$

A solução simultânea de (4.31) e (4.32) em termo das variáveis de saída e entrada "x" e "z", pode ser obtida com o auxílio das equações (4.16), (4.33) e (4.34) que pode ser reescrita como:

$$x_{n+1} = \text{CONST}_{n+1} + \text{FATOR}_{n+1} z_{n+1} \quad (4.35)$$

onde:

$$\text{CONST}_{n+1} = \left(1 - 2b_{n+1} \right) x_n + \left(-\frac{B}{D} + b_{n+1} G \right) z_n \quad (4.36)$$

$$\text{FATOR}_{n+1} = \frac{B}{D} + b_{n+1} G \quad (4.37)$$

$$b_{n+1} = \frac{h}{(2T + h)} \quad (4.38)$$

A equação (4.35) oferece uma solução genérica para todo tipo de equações diferenciais lineares de 1^a ordem, as quais freqüentemente aparecem no modelamento de sistemas.

9 - Comentários

A estrutura geral do programa de estabilidade transitória e suas principais características foram mostradas de forma resumida de tal forma a se ter idéia de seu potencial, uma vez que será utilizado nas simulações executadas no próximo capítulo. Uma descrição também de forma suscinta foi feita do método trapezoidal implícito, concluindo que ele sobrepuja os métodos convencionais em aspectos tais como; rapidez e estabilidade, além de manter uma boa precisão. Desta forma o material necessário para as implementações e simulações a serem feitas no capítulo subsequente fica definido de forma completa e confiável.

CAPITULO 5

MODELAMENTO DO GERADOR DE INDUÇÃO COM REGULADOR DE VELOCIDADE E SUA IMPLEMENTAÇÃO NO PET.

5.1 - Introdução

A implementação do modelo matemático do gerador de indução e de seu regulador de velocidade visa os mesmos objetivos já citados anteriormente e leva em conta os mesmos aspectos de operação também já descritos; ou seja a análise dos efeitos da máquina de indução na estabilidade do sistema. No capítulo 3 todo um modelamento matemático foi desenvolvido com este intuito, porém como já foi citado uma limitação era inerente a este modelo; não havia como controlar o torque mecânico da máquina. No entanto, como uma análise inicial do comportamento da máquina de indução, os resultados obtidos foram satisfatórios.

Um gerador conectado a um sistema elétrico deve ter um controle automático de velocidade realizado por reguladores que detectam desvios de frequência, corrigindo a potência fornecida por ele ao sistema. Daí a necessidade então de se implementar um regulador de velocidade no gerador de indução de tal forma que sistemas reais possam ser simulados. Reguladores poderiam ser implementados no sistema elementar estudado no capítulo 3; no entanto existem atualmente

programas de estabilidade altamente funcionais como o descrito no capítulo 4, onde toda a análise de estabilidade poderá ser feita com a implementação das equações dinâmicas do gerador de indução e de seu regulador de velocidade tornando confiáveis as simulações a serem realizadas. Torna-se desnecessário aqui, comentar mais sobre o programa de estabilidade transitória, uma vez que suas características principais foram vistas no capítulo anterior.

No desenvolvimento das equações o termo "máquina de indução" será quase sempre utilizado, uma vez que o modelamento serve tanto para gerador como para motor, devendo este aspecto ser determinado na entrada de dados. Será visto também que quando se optar no programa pela máquina de indução auxiliando o gerador síncrono (isto é uma terceira opção, além da máquina funcionando como motor ou gerador), esta poderá atuar tanto como gerador assim como motor, e este controle deverá ser feito pelo regulador de velocidade da máquina de indução; o que mostra desde já que nestas condições ele terá características um pouco diferentes dos reguladores convencionais.

5.2 - Modelamento da máquina de indução

Serão mostrados os modelos mais utilizados para a máquina de indução levando-se em conta certas suposições que simplificam o equacionamento. A representação da máquina de gaiola simples será a única utilizada aqui; isto porque partida

de motores é um estudo que não será abordado neste trabalho. No entanto pode-se utilizar a máquina de gaiola dupla com o equacionamento desenvolvido para a de gaiola simples, através de um circuito equivalente que será mostrado adiante.

De uma forma geral supõe-se que:

- Os enrolamentos do rotor e estator são balanceados

- As indutâncias mútuas entre quaisquer enrolamentos do rotor e estator são consideradas como funções senoidais do ângulo elétrico entre os eixos dos dois enrolamentos.

- Assume-se que o entreferro é uniforme e que a auto-indutância de qualquer enrolamento é independente da posição do rotor.

- Os efeitos de saturação, histerese e correntes de Foucault são ignoradas.

- As impedâncias da máquina são tidas como independentes da velocidade do rotor.

Os três modelos que representam a máquina de indução mais utilizados são [ver referências 9,10,12,15,16]:

5.2.1 - Modelo utilizando o circuito equivalente de regime permanente.

Máquinas de indução de gaiola simples podem ser modeladas por um circuito equivalente mostrado na figura 5.1;

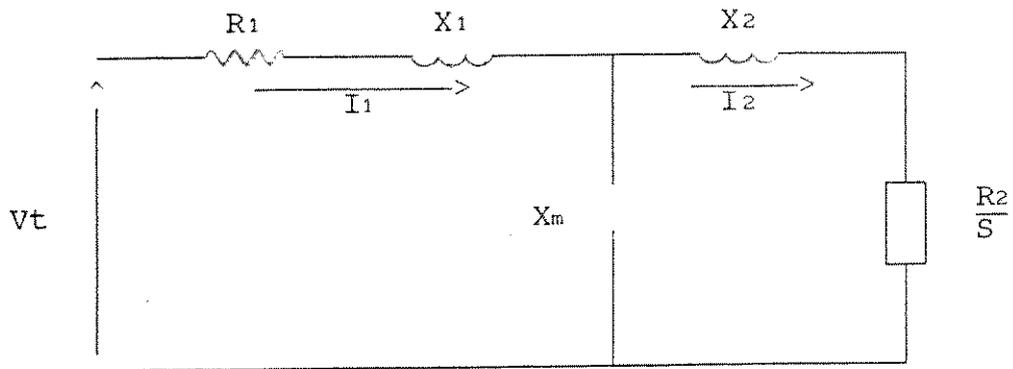


Figura 5.1 - Circuito equivalente para máquina de indução de gaiola simples em regime permanente.

onde:

R_1 é a resistência do estator	(Ω)
X_1 é a reatância do estator	(Ω)
R_2 é a resistência do rotor	(Ω)
X_2 é a reatância do rotor	(Ω)
X_m é a reatância magnetizante	(Ω)
V_t é a tensão terminal	(V)
I_1 é a corrente do estator	(A)
I_2 é a corrente do rotor	(A)
S é o escorregamento do rotor	

Este modelo que considera apenas os transitórios mecânicos da máquina de indução é utilizável quando a constante de tempo elétrica do rotor for pequena e puder ser desprezada,

não se considerando assim os transitórios elétricos do rotor, além é claro de se desprezar os transitórios elétricos do estator, que é o usual. Assim o comportamento da máquina pode ser representado utilizando o circuito equivalente da figura 5.1 e a equação mecânica dada por [3,4].

$$pS = \frac{1}{2H} \left(T_e - T_m \right) \quad (5.1)$$

onde:

H → Constante de inércia da máquina (seg)

T_e → Torque elétrico (pu)

T_m → Torque mecânico (pu)

5.2.2. - Modelo incluindo os transitórios mecânicos e elétricos do rotor.

Nos casos em que a constante de tempo elétrica do rotor for considerável, o estudo do comportamento transitório utilizando o modelo em regime permanente não mais poderá ser feito, pois os transitórios elétricos agora devem ser levados em conta. Assim utiliza-se agora um modelo transitório que pode ser representado por uma tensão transitória E' atrás de uma reatância transitória X' , e resistência do estator R_1 [10,11,14,17]. O circuito equivalente do modelo transitório é mostrado na figura 5.2.

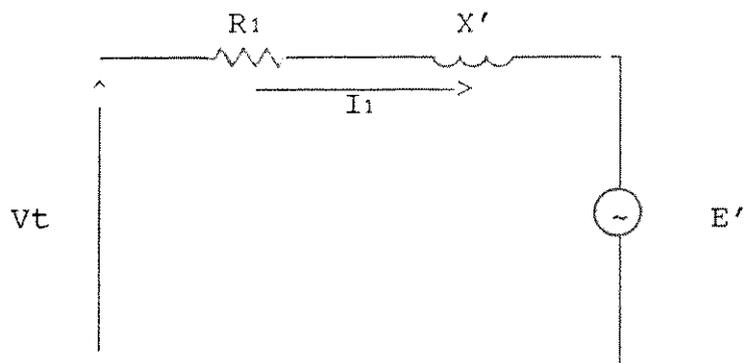


Figura 5.2 - Circuito equivalente de estado transitório para máquina de indução de gaiola simples.

Através das equações de fluxo e tensão vistas no capítulo 3 e desprezando os transitórios do estator, pode-se chegar às seguintes equações elétricas (ver apêndice [A]):

$$V_t - E' = (R_1 + jX')I_1 \quad (5.2)$$

$$pE' = -j2\pi f_s SE' - [E' - j(X_0 - X')I_1]/T_0 \quad (5.3)$$

onde:

$$X' = X_1 + \frac{X_2 X_m}{X_2 + X_m} \quad (5.4)$$

f_s é a frequência nominal. A constante de tempo transitória a circuito aberto T_0' é dada por:

$$T_0' = \frac{X_2 + X_m}{2\pi f_s R_2} \quad (5.5)$$

e a reatância de circuito aberto é dada por:

$$X_0 = X_1 + X_m \quad (5.6)$$

As equações (5-1)-(5.3) são utilizadas para descrever o comportamento dinâmico da máquina, podendo-se acrescentar a equação de torque elétrico dada por:

$$T_e = \text{Re}[E' I_1^*] \quad (5.7)$$

que completa o grupo de equações necessárias para a simulação de uma máquina de indução na qual se desprezam os transitórios do estator.

O método passo a passo utilizado na simulação é mostrado [10]:

- 1) Após o distúrbio ter se iniciado, T_e é computado para um tempo " t_n " (T_m é suposto ou não como constante);
- 2) A diferença entre T_e e T_m é calculada e um novo valor de escorregamento no tempo " $(t_n + \Delta t)$ " é calculada através da equação mecânica da máquina;
- 3) A mudança no valor de E' durante o intervalo " Δt " é calculada a partir das condições terminais da máquina, escorregamento e o valor de E' no tempo " t_n ";
- 4) Um novo valor de T_e é calculado a partir de E' em " $(t_n + \Delta t)$ ";
- 5) O procedimento é repetido a cada intervalo de tempo.

5.2.3 - Modelo incluindo todos os transitórios da máquina.

Este modelo foi desenvolvido no Capítulo 3 onde todos os transitórios da máquina foram levados em consideração. Como foi uma análise de um sistema simples, procurou-se um refinamento maior no modelo matemático desenvolvido, de tal forma a se obter resultados mais exatos; além do que uma avaliação de parâmetros foi feita o que justifica mais uma vez a necessidade de uma maior exatidão obtida com o modelo completo. No entanto na prática sabe-se que a influência dos transitórios do estator no comportamento geral das máquinas do sistema, assim como da própria máquina considerada [11,13,14], tem muito pouco efeito. Desta forma em estudos de estabilidade transitória é costume desprezar os transitórios associados com os circuitos do estator de todas as máquinas presentes do sistema.

5.3 - Representação do modelo de gaiola dupla.

Quando houver em um sistema a disponibilidade de uma máquina de indução de gaiola dupla; a mesma pode ser representada pelo modelo desenvolvido para gaiola simples através de uma equivalência dos parâmetros. A figura 5.3 mostra o circuito equivalente para a máquina de gaiola dupla; que pode ser representada pelo circuito equivalente da figura 5.4, mostradas a seguir;

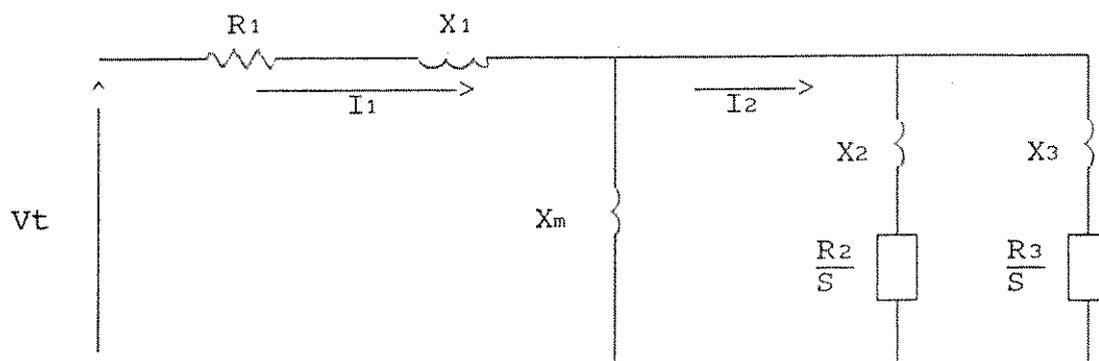


Figura 5.3 - Circuito equivalente para a máquina de gaiola dupla.

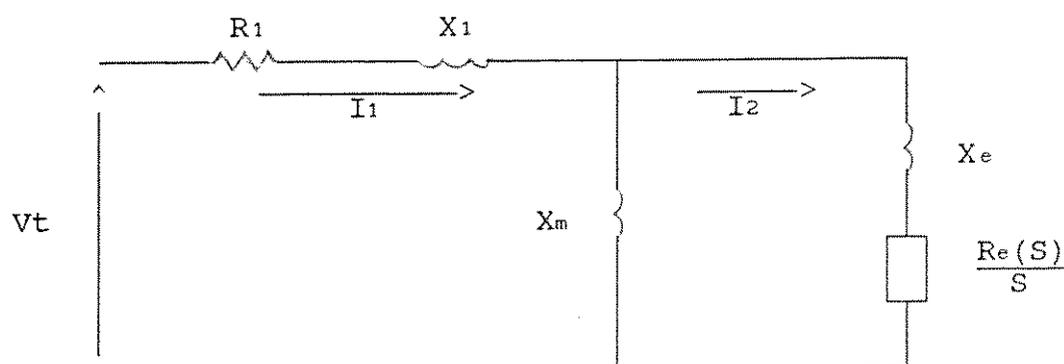


Figura 5.4 - Circuito equivalente de gaiola simples representando o de gaiola dupla da fig. 5.3.

As equações equivalentes do rotor para o modelo de gaiola simples podem ser deduzidas através da figura 5.3;

$$\begin{aligned}
 R_e(S) &= \frac{R_2 R_3 (R_2 + R_3) + S^2 (R_2 X_3^2 + R_3 X_2^2)}{(R_2 + R_3)^2 + (X_2 + X_3)^2} \\
 X_e(S) &= \frac{R_2^2 X_3 + R_3^2 X_2 + S (X_2 + X_3) X_2 X_3}{(R_2 + R_3)^2 + S^2 (X_2 + X_3)^2}
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

Deve-se observar que o modelo de gaiola simples visto no circuito equivalente é o modelo em regime permanente já estudado, que leva em conta apenas os transitórios mecânicos do rotor. Também deve-se comentar aqui que o circuito equivalente da figura 5.4 somente é possível de ser determinado caso se conheçam os parâmetros das gaiolas internas e externas da máquina. Não se conhecendo no entanto, existe uma metodologia de obtenção de parâmetros em que se conhecendo a potência em condições normais de operação $P_0 + jQ_0$ (potência aparente) da máquina conectada à barra, e se desconheça seus parâmetros, os mesmos podem ser obtidos [26], sendo possível utilizá-los nos estudos de estabilidade transitória. Este processo possui a vantagem de se levar em conta os transitórios elétricos e mecânicos do rotor e pode ser visto no apêndice [B].

5.3.1 - Fator de gaiola

Com o intuito de se obter uma representação compatível com a característica de torque de uma máquina de indução de gaiola dupla que utiliza o modelo descrito para gaiola simples, um fator de gaiola (k_r) pode ser utilizado. Objetiva-se com isto mudar a resistência do rotor com o escorregamento. A expressão da resistência em função de "S" e de "K_r" é dada por [3]:

$$R_2 = R_2(0) (1 + SK_r) \quad (5.9)$$

onde $R(0)$ é a resistência do rotor para $S = 0$. Teoricamente o valor do fator de gaiola pode ser dado por uma expressão a qual descreve a mudança na resistência do rotor de $S = 1$ até $S = 0$, o que resulta em:

$$K_f = \frac{R_2(1) - R(0)}{R_2(0)} \quad (5.10)$$

Salienta-se aqui que a reatância transitória também varia com o escorregamento, no entanto seu efeito é pequeno e pode ser desconsiderado ou incluído em " K_f ", fazendo-o maior que o obtido na expressão (5.10).

O efeito do fator de gaiola na característica de torque de uma máquina de indução de gaiola simples pode ser visto na figura 5.5.

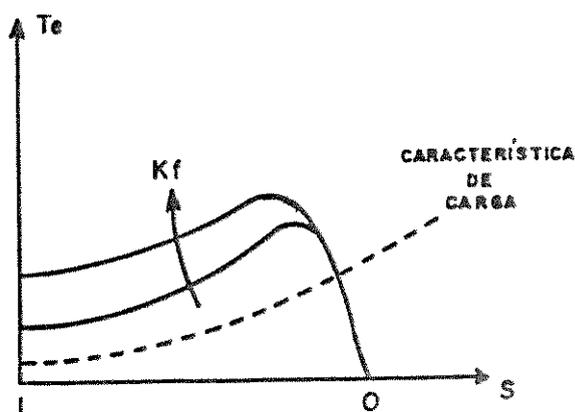


Figura 5.5 - Característica de torque em função do escorregamento influenciado por " K_f ".

Pode-se observar que o efeito se acentua nas regiões de maior escorregamento como por exemplo na partida do

motor. Neste trabalho especificamente pode ocorrer que em alguns casos o módulo do escorregamento chegue a atingir valores mais altos, no entanto de uma maneira geral o escorregamento fica dentro da faixa normal de operação.

5.4 - Características do torque de carga

O torque de carga utilizado no programa de estabilidade transitória pode ser independente da velocidade do rotor (W_R), proporcional à velocidade, proporcional ao quadrado da velocidade ou uma combinação dos três casos [3]. Assim:

$$T_L = a_{w0} + a_{w1}W_R + a_{w2}W_R^2 \quad (5.11)$$

ou

$$T_L = a_{s0} - a_{s1} + a_{s2}S^2 \quad (5.12)$$

onde;

T_L é o torque de carga

a_{w0} é o coeficiente de torque de carga constante

a_{w1} é o coeficiente de torque de carga proporcional a velocidade.

a_{w2} é o coeficiente de torque de carga proporcional ao quadrado da velocidade.

$$a_{s0} = a_{w0} + a_{w1} + a_{w2}$$

$$a_{s1} = a_{w1} + a_{w2} \quad (5.13)$$

$$a_{s2} = a_{w2}$$

a_{w0} , a_{w1} e a_{w2} são definidos na entrada de dados do programa e a_{s0} , a_{s1} e a_{s2} são determinados pela equação (5.13) e pelas condições iniciais.

5.5 - Condições iniciais

Do circuito equivalente da máquina de indução da figura 5.1, a corrente I_1 do estator pode ser calculada da seguinte forma:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_t}{(R_1 + jX_1) + \left[\frac{jX_m (R_2/s)}{jX_m + R_2/s} \right]} \quad (5.14)$$

onde:

$$R_2/s = \left[\frac{R_2}{s} + jX_2 \right]$$

Dividindo todos os membros acima por $(X_m + X_2)$ e com alguma manipulação algébrica, fica:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_t \left[\frac{R_2}{(X_m + X_2)s} + j \right]}{\left[\frac{R_1 R_2}{(X_m + X_2)s} - X_1 - \frac{X_m X_2}{X_m + X_2} \right] + j \left[\frac{X_1 R_2}{(X_m + X_2)} + R_1 + \frac{X_m R_2}{(X_m + X_2)s} \right]} \quad (5.15)$$

Substituindo (5.4) e (5.5) em (5.15), pode-se escrever:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_t \left[\frac{1}{(2\pi f T_0' S)} + j \right]}{\left[\frac{R_1}{(2\pi f T_0' S)} - X' \right] + j \left[\frac{X_1}{(2\pi f T_0' S)} + R_1 + \frac{X_m}{(2\pi f T_0' S)} \right]} \quad (5.16)$$

Substituindo (5.6) em (5.16) e definindo:

$$Y_e = 2\pi f T_0' S$$

(5.16) se torna:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_t \left[\frac{1}{Y_e} + j \right]}{\left[\frac{R_1}{Y_e} - X' \right] + j \left[R_1 + \frac{X_0}{Y_e} \right]} \quad (5.17)$$

que após alguma manipulação algébrica:

$$I_1 = \frac{V_t(1 + jY_e)}{(R_1 - Y_e X') + j(X_0 + R_1 Y_e)} \quad (5.18)$$

Dividindo e multiplicando (5.18) pelo conjugado do denominador, pode-se escrever:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_t [1 + jY_e][(R_1 - Y_e) - j(X_0 + R_1 Y_e)]}{[R_1 - 2Y_e X']^2 + [X_0 + R_1 Y_e]^2} \quad (5.19)$$

ou

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_t [(R_1 - Y_e X') + (Y_e X_0 + R_1 Y_e^2)]}{[R_1 - 2Y_e X']^2 + [X_0 + R_1 Y_e]^2} + j \frac{\dot{V}_t [(R_1 Y_e - Y_e^2 X') - (X_0 + R_1 Y_e)]}{[R_1 - Y_e X']^2 + [X_0 + R_1 Y_e]^2} \quad (5.20)$$

Podendo então a equação (5.20) ser escrita na forma:

$$\dot{I}_1 = I_{1r} + jI_{1m} \quad (5.21)$$

onde:

\dot{I}_1 é a corrente terminal da máquina

I_{1r} é a parte real da corrente terminal da máquina

I_{1m} é a parte imaginária da corrente terminal da máquina.

Sabe-se que a potência aparente pode ser escrita na forma:

$$S = P + jQ = V_t I_1^* \quad (5.22)$$

onde:

- P —> Potência Ativa
 Q —> Potência Reativa
 * —> Denota conjugado

Assim através da equação (5.20) pode-se escrever as equações de potência a seguir:

$$P = \frac{Vt^2 [(R_1 - Y_e X') + (X_0 Y_e + R_1 Y_e^2)]}{[R_1 - Y_e X']^2 + [X_0 + R_1 Y_e]^2} \quad (5.23)$$

$$Q = - \frac{Vt^2 [(R_1 Y_e - Y_e^2 X') - (X_0 + R_1 Y_e)]}{[R_1 - Y_e X']^2 + [X_0 + R_1 Y_e]^2} \quad (5.24)$$

Através das equações (5.2) e (5.3) pode-se chegar a expressão do escorregamento, dada por:

$$\left[\left(R_1^2 + X_0^2 \right) \frac{P}{Vt^2} - R_1 \right] + \left[\left(2R_1(X_0 - X') \right) \frac{P}{Vt^2} - (X_0 - X') \right] Y_e + \left[\left(R_1^2 + X'^2 \right) \frac{P}{Vt^2} - R_1 \right] = Y_e^2 \quad (5.25)$$

Desta forma o escorregamento inicial pode ser calculado, assim como a potência reativa da máquina. O valor da potência ativa é um dado de entrada da máquina, no entanto sua expressão foi determinada pois será útil posteriormente.

As condições iniciais para a corrente da máquina, a tensão interna e o torque elétrico desenvolvido, são calculados na subrotina MOTINC. As equações são:

$$I_{1r} = - \frac{P V_{tr} + Q V_{tm}}{V_t^2} \quad (5.26)$$

$$I_{1m} = - \frac{P V_{tm} - Q V_{tr}}{V_t^2} \quad (5.27)$$

$$E_r' = V_{tr} + (R_1 I_{1r} - X' I_{1m}) \quad (5.28)$$

$$E_m' = V_{tm} + (R_1 I_{1m} + X' I_{1r}) \quad (5.29)$$

$$T_e = P - R_1 I_1^2 \quad \text{pu} \quad (5.30)$$

sendo:

$$V_t^2 = V_{tr}^2 + V_{tm}^2 \quad (5.31)$$

$$I_1^2 = I_{1r}^2 + I_{1m}^2 \quad (5.32)$$

Após o cálculo das condições iniciais, o balanço da potência é verificado pela subrotina MOTOP. A execução do programa terá continuidade se a diferença entre a potência da saída das máquinas verificadas pela subrotina e a potência especificada na entrada de dados estiver dentro de uma tolerância estabelecida.

5.6 - Descrição do programa e solução das equações diferenciais

As subrotinas especificadas para a máquina de indução contém seis partes principais:

- Dados de entrada
- Condições iniciais
- Processo de solução
- Operações de chaveamento
- Saída
- Construção de gráficos

A entrada de dados e construção de gráficos podem ser requeridas apenas uma vez. As condições iniciais são calculadas uma vez para cada estudo. O processo de solução e as operações de chaveamento podem ser verificadas a cada intervalo de tempo, enquanto a saída pode ser feita em intervalos de tempo especificados. As principais subrotinas serão vistas mais a frente.

5.6.1 - Entrada de dados

Todos os dados de entrada são lidos pela subrotina MOTIP. A entrada de dados da máquina de indução é mostrada a seguir de forma resumida:

- (1) Nome do barramento
- (2) Número da máquina
- (3) MVA base
- (4) KV base
- (5) Constante de inércia em KWs/KVA
- (6) Potência terminal da máquina
- (7) Característica de torque (IC)
- (8) Resistência do estator
- (9) Tipo de parâmetros (LZ)
- (10) Parâmetro com o modelo da máquina (IDC), sendo zero para gaiola simples e diferente de zero para gaiola dupla.

 Sendo gaiola simples os seguintes dados são necessários:

- (11) Resistência do rotor, reatância a circuito aberto, reatância transitória e constante de tempo transitória a circuito aberto.
- (12) Resistência do rotor, reatância do estator, reatância do rotor e reatância de magnetização.

 A escolha do conjunto de dados é determinada pelo tipo de parâmetro LZ, sendo 0 (zero) ou 1 (um) respectivamente.

 A característica de torque descreve a variação do torque de carga durante a execução do programa. IC deve ser

0,1,2 ou 3, significando que o torque de carga varia com a velocidade de acordo com a expressão (5.11) ou (5.12), que é da forma:

$$\text{Torque de carga} = (\text{Velocidade})^k$$

onde:

$$k = 0,1 \text{ ou } 2$$

Quando $k = 3$, o torque de carga será função de todo o polinômio.

5.6.2 - Solução das equações diferenciais

O processo de solução utilizado no programa de estabilidade transitória já foi devidamente elucidado no capítulo anterior, e é realizado após o cálculo das condições iniciais e da verificação do balanço de potência.

Conforme foi visto no capítulo 4, o programa utiliza o método trapezoidal implícito para a resolução das equações diferenciais, podendo ser escrito na forma:

$$y(t+h) = y(t) + \frac{h}{2} \left[p y(t) + p y(t+h) \right] \quad (5.33)$$

Todas as equações diferenciais utilizadas na implementação podem ser expressas genericamente na forma linear:

$$y(t) = \frac{1}{T} \left[C x(t) - A y(t) \right] \quad (5.34)$$

onde:

$y(t)$ é a variável integrável

$x(t)$ é a variável não integrável

A, C são constantes

T é a constante de tempo

A equação (5.34) combinada com a equação (5.33), fornecem uma equação genérica do tipo:

$$y(t+h) = y_c + y_x x(t+h) \quad (5.35)$$

onde:

y_c é a constante obtida a partir de $x(t)$ e $y(t)$

y_x é a constante dependente do passo de integração

Agora as equações diferenciais vistas nos passos (1) e (3) do item (4.5.1.1.) tornam-se um conjunto de equações algébricas, sendo assim de simples resolução. As seções seguintes mostram estas transformações para as equações da máquina de indução.

5.6.2.1 - Equações mecânicas

Conforme já foi visto, a expressão de torque com relação ao escorregamento é:

$$pS = \frac{T_a}{T} \quad (5.36)$$

onde Ta é o torque acelerante da máquina e $T = 2H$, sendo H a constante de inércia das massas solidárias ao eixo da máquina.

A expressão (5.36) associada com (5.12), fica:

$$pS = (as_0 - as_1 + as_2 S^2 - T_e) \frac{1}{T} \quad (5.37)$$

a qual representa uma equação diferencial não linear.

Aplicando a regra trapezoidal em (5.37), fica:

$$S(t+h) = SMC + SMX [as_2 S^2(t+h) - T_e(t+h)] \quad (5.38)$$

onde:

$$SMC = (1 - 2B as_1)S(t) + B [2as_0 + as_2 S^2(t) - T_e(t)] \quad (5.39)$$

$$SMX = B$$

$$B = \frac{h}{2T + has_1} \quad (5.40)$$

Devido à não linearidade em S , o escorregamento $S(t+h)$ não pode ser obtido diretamente; requerendo desta forma um processo iterativo para a solução da equação (5.38). Utilizando o método de Newton, $S(t+h)$ pode ser escrito como:

$$S^{(k+1)} = S^{(k)} + \Delta S^{(k)} \quad (5.41)$$

sendo "k" o número da iteração. Aqui omite-se o subscrito "(t+h)", uma vez que o passo de integração se mantém constante em "(t+h)" até que haja convergência.

A expressão para $\Delta S^{(k)}$ pode ser deduzida com o auxílio do gráfico da figura 5.6.

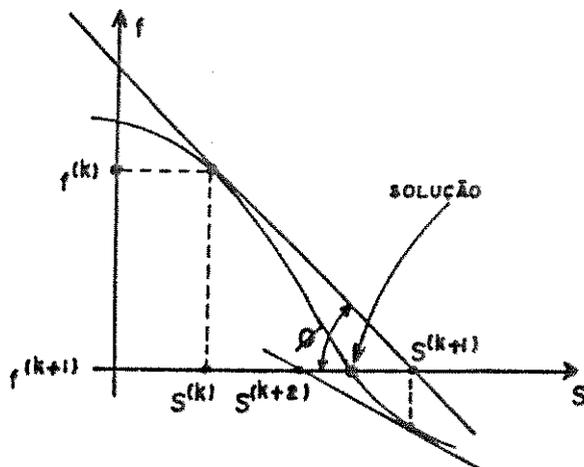


Figura 5.6 - Gráfico com o método de Newton para determinação do escorregamento.

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{f^{(k+1)} - f^{(k)}}{S^{(k+1)} - S^{(k)}} \quad (5.42)$$

ou

$$\operatorname{tg} \phi = \left. \frac{\delta f}{\delta S} \right|_{S = S^{(k)}} \quad (5.43)$$

assim $\Delta S^{(k)}$ pode ser dado por:

$$\Delta S^{(k)} = \frac{f^{(k+1)} - f^{(k)}}{\operatorname{tg} \phi} \quad (5.44)$$

Para se atingir a solução tem-se que $f^{(k+1)} = 0$,

então:

$$\Delta S^{(k)} = \frac{-f^{(k)}}{\operatorname{tg}\phi} = \frac{-f^{(k)}}{\delta f / \delta S} \quad (5.45)$$

Sendo

$$f^{(k)} = S - [SMC + SMX \operatorname{as}_2 S^2 - SMX T_e] \quad (5.46)$$

então:

$$\frac{\delta f^{(k)}}{\delta S} = 1 - 2SMX \operatorname{as}_2 \quad (5.47)$$

Desta forma (5.45) fica:

$$\Delta S^{(k)} = \frac{[SMC + SMX \operatorname{as}_2 S^2 - SMX T_e] - S}{1 - 2SMX \operatorname{as}_2 S} \quad (5.48)$$

Quando $|S^{(k+1)} - S^{(k)}|$ for menor que um erro pré estabelecido, então:

$$S(t+h) = S \quad (5.49)$$

5.6.2.2. - Equações de tensão

A equação diferencial de tensão vista em (5.3) pode ser escrita separando-se as partes real e imaginária:

$$pE_r' = \frac{1}{T_0'} \left[W_n S T_0' E_m' - E_r' + (X_0 - X') I_{1m} \right] \quad (5.50)$$

$$pE_m' = \frac{1}{T_0'} \left[-W_n S T_0' E_r' - E_m' - (X_0 - X') I_{1r} \right] \quad (5.51)$$

onde W_n é a velocidade angular nominal. Usando as relações de correntes,

$$I_{1r} = (E_r' - V_{tr}) Y_r + (E_m' - V_{tm}) Y_m \quad (5.52)$$

$$I_{1m} = (E_m' - V_{tm}) Y_r + (V_{tr} - E_r') Y_m \quad (5.53)$$

onde:

$$Y_r = \frac{R_1}{(R_1^2 + X'^2)} \quad (5.54)$$

$$Y_m = \frac{X'}{(R_1^2 + X'^2)} \quad (5.55)$$

e aplicando a regra trapezoidal, as equações (5.50) e (5.51) ficam:

$$E_r'(t+h) = ECR + BA [S(t+h)] E_m'(t+h) + BR [E_m'(t+h) - V_{tm}(t+h)] + BX V_{tr}(t+h) \quad (5.54)$$

$$E_m'(t+h) = ECM - BA [S(t+h)] E_r'(t+h) + BR [V_{tr}(t+h) - E_r'(t+h)] + BX V_{tm}(t+h) \quad (5.55)$$

onde:

$$ECR = B_1 E_r'(t) + B [W_n T_0' S(t) + X_3 Y_r] E_m'(t) - BX_3 [Y_r V_{tm}(t) + Y_m V_{tr}(t)] \quad (5.56)$$

$$ECM = B_1 E_m'(t) - B [-W_n T_o' S(t) + X_3 Y_r] E_r'(t) + B X_3 [Y_r V_{tr}(t) - Y_m V_{tm}(t)] \quad (5.57)$$

sendo:

$$B = \frac{h}{2T_o' + (1 - X_3 Y_m)h} \quad (5.58)$$

$$B A = B W_n T_o' \quad (5.59)$$

$$B_1 = 1 - 2(1 - X_3 Y_m)B \quad (5.60)$$

$$X_3 = X_0 - X' \quad (5.61)$$

$$B X = - B X_3 Y_m \quad (5.62)$$

$$B R = B X_3 Y_m \quad (5.63)$$

As equações (5.54) e (5.55) devem ser resolvidas simultaneamente uma vez que as variáveis integráveis são dependentes uma da outra. Assim:

$$E_r' = \frac{ECR + HA JA - BR V_{tm}(t+h) + BX V_{tr}(t+h)}{(1 + HA^2)} \quad (5.66)$$

$$E_m' = \frac{ECM - HA JA_1 + BR V_{tr}(t+h) + BX V_{tm}(t+h)}{(1 + HA^2)} \quad (5.67)$$

onde:

$$HA = BX + BA S(t+h) \quad (5.68)$$

$$JA = ECM + BR V_{tr}(t+h) + BX V_{tm}(t+h) \quad (5.69)$$

$$JA_1 = ECR + BR V_{tm}(t+h) + BX V_{tr}(t+h) \quad (5.70)$$

5.7 - Subrotinas para resolução das equações

As principais rotinas utilizadas pelo PET no processo de resolução das equações das máquinas de indução são:

●MOTCON - Responsável pelo cálculo de todas as constantes utilizadas na resolução das equações diferenciais.

●MOTEXT - Verifica o processo de extrapolação da variável não integrável " T_e ", ou seja estima seu valor a ser usado no próximo passo.

●MOTRAP - Desenvolve o processo de integração pelo método trapezoidal implícito usando as equações (5.41)-(5.70). Utiliza as constantes calculadas na rotina MOTCON e os valores de " T_e " estimados na MOTEXT e os valores atuais da resolução das equações algébricas feitas na rotina MOTSOL.

●MOTSOL - Calcula simultaneamente os valores das variáveis não-integráveis e integráveis do conjunto de equações.

As principais alterações feitas no programa de estabilidade transitória estão nas rotinas citadas acima. Estas modificações, que são na verdade a implementação das equações da máquina de indução, são o primeiro passo para se atingir os objetivos nas simulações. O segundo seria o controle da máquina, feito por reguladores de velocidade; assunto da próxima seção.

5.8 - Reguladores de velocidade

5.8.1 - Introdução

Os reguladores de velocidade são normalmente usados com os geradores síncronos com o intuito de reestabelecer a frequência do sistema após um desequilíbrio carga/geração [18,20]. Isto porque apesar do sistema mostrar uma tendência de se auto-regular e atingir um novo estado de equilíbrio, este novo estado não é satisfatório para a operação do sistema que normalmente possui uma série de cargas que trabalham dentro de uma estreita faixa de variação de frequência [27]. Assim o reestabelecimento citado é necessário para manter a frequência o mais próximo do valor nominal, por exigência do próprio consumidor.

Os vários tipos de reguladores de velocidade em composição com as turbinas serão mostrados nesta seção, com a finalidade de se ter uma idéia geral dos reguladores utilizados na prática. Desta forma o regulador de velocidade a ser utilizado pela máquina de indução poderá se basear em uma série de critérios importantes no controle de potência da máquina.

5.8.2 - Aspectos gerais

A figura 5.7 mostra o esquema simplificado de um regulador de velocidade atuando sobre uma turbina.

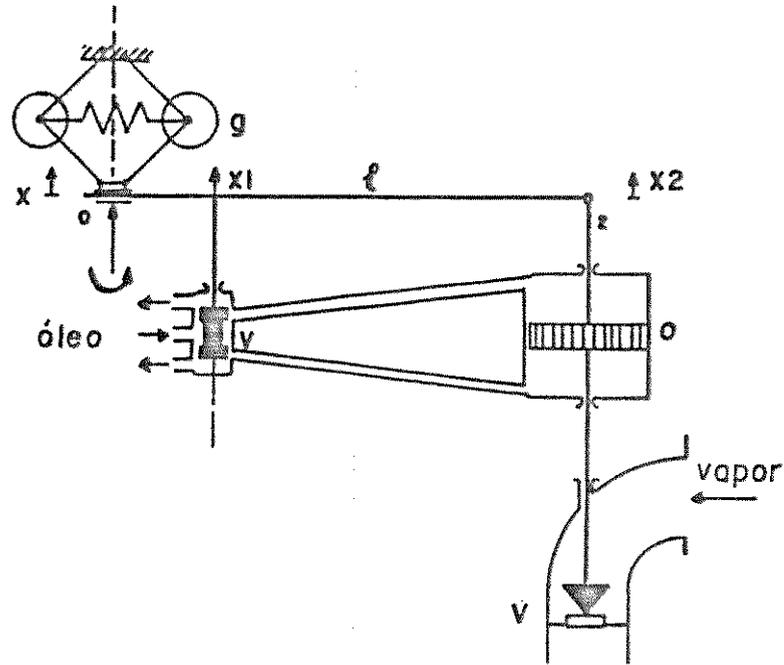


Figura 5.7 - Esquema de um regulador de velocidade

O regulador é constituído de uma válvula piloto "v", um servomotor a óleo "O", e uma barra "l", participando dos deslocamentos "x1" e "x2".

A barra "l" representa uma retroação negativa que torna este esquema um regulador com queda de velocidade. A retirada da barra com a anulação da realimentação, torna este dispositivo um regulador isócrono, o qual tem apenas uma utilização específica em sistemas de potência ou atua em sistemas isolados onde trabalha apenas um gerador; isto porque o regulador isócrono não define a parcela de potência de cada gerador em um sistema, onde normalmente existem vários operando em paralelo.

Desta forma os reguladores com queda de velocidade são utilizados em sistemas de potência com a finalidade de definir o estatismo (porcentagem de carga que o

gerador deve suprir) de cada gerador, seja em regime permanente, seja em condições transitórias. Uma outra etapa de regulação é necessária para reestabelecer a frequência, uma vez que com o regulador mencionado, a mesma não retorna à condição nominal de operação. Esta regulação é chamada secundária e a mencionada acima, chamada de primária. A regulação secundária consiste de um motor que muda a referência estipulada pelo "flyball", fazendo assim com que a frequência permaneça no seu valor nominal mesmo com outra condição de carga [25,27].

5.8.3 - Regulador de velocidade utilizado no PET

A figura 5.8 mostra o esquema do regulador de velocidade utilizado no programa de estabilidade, que é geral e serve tanto para hidroturbinas como para turbinas a vapor [4,19,23,24].

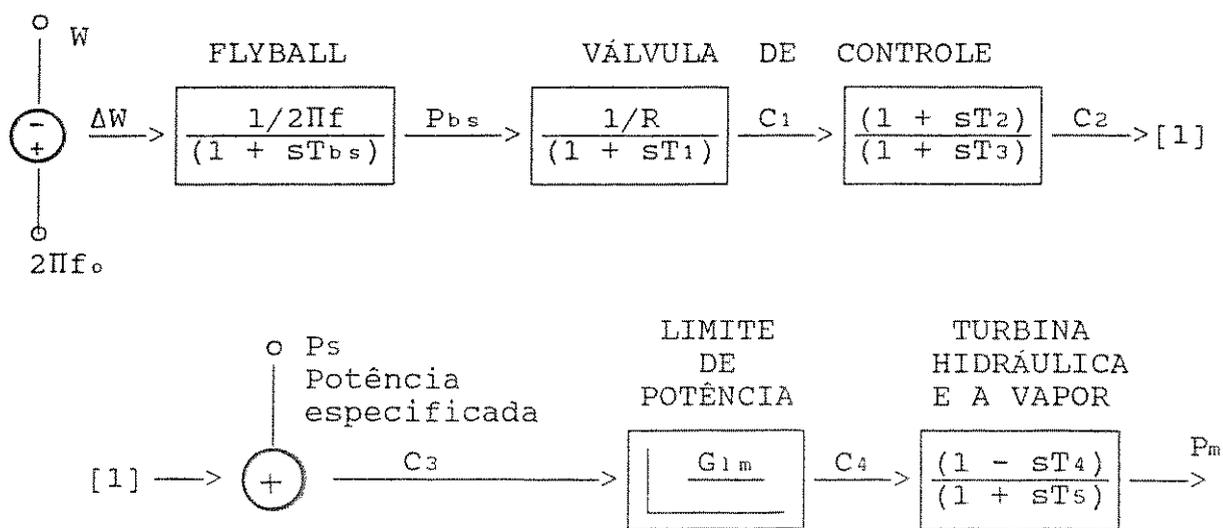


Figura 5.8 - Diagrama de blocos representando o regulador de velocidade e a turbina.

O diagrama de blocos mostrado na figura 5.8 mostra funções de transferência, sendo "s" o operador de Laplace. A diferença entre a velocidade da máquina e a nominal, (ΔW) pode ser vista após o bloco que representa a função de transferência do "flyball". Esta diferença é proporcional ao distúrbio ocorrido no sistema em que se encontra o gerador síncrono. " T_{bs} " representa a constante de tempo do "flyball", "R" representa o fator de regulação e " T_1 ", " T_2 " e " T_3 " representam as constantes de tempo da válvula de controle. O sinal " C_2 " somado a potência especificada " P_s " resulta em um valor que é testado pelo limite de potência " G_{lm} " resultando em " C_4 " que desta forma ficará limitado entre "0" e " G_{lm} ". Este valor passa pela função de transferência da turbina resultando na potência mecânica do gerador síncrono (P_m). As variáveis " T_4 " e " T_5 " são as constantes de tempo da turbina. Quando a turbina for térmica " T_4 " será feito igual a zero e a turbina será um simples circuito de atraso com constante de tempo " T_5 ". Para hidroturbinas " T_4 " é mantido e " T_5 " é normalmente feito igual a " $T_4/2$ ".

Pode-se escrever as seguintes equações baseadas no diagrama da figura 5.8.

$$pP_{bs} = \frac{\left(\frac{(2\pi f_0 - W)}{(2\pi f_0 - P_{bs})} \right)}{T_{bs}} \quad (5.71)$$

$$pC_1 = \frac{\left(\frac{P_{bs}}{R} - C_1\right)}{T_1} \quad (5.72)$$

$$pC_2 = \frac{((1 + sT_2)C_1 - C_2)}{T_2} \quad (5.73)$$

$$pP_m = \frac{((1 + sT_4)C_4 - P_m)}{T_5} \quad (5.74)$$

$$C_4 = C_2 + P_s \quad (5.75)$$

As equações (5.71)-(5.75) descrevem o comportamento da composição regulador de velocidade e turbina; composição esta que fornece potência mecânica correta à máquina síncrona no intuito de manter constante a frequência nominal do sistema.

As subrotinas envolvidas nos cálculos referentes aos reguladores de velocidade são:

- GOVIP - Faz a leitura dos dados dos reguladores de velocidade.
- GOVINC - Estipula valores iniciais para o regulador em casos específicos.
- GOVCON - Executa cálculos de constantes utilizadas na GOVTRA.
- GOVTRA - Executa o cálculo da potência mecânica que será utilizada nas subrotinas referentes ao gerador síncrono.

5.8.4 - Regulação de velocidade para a máquina de indução

A figura 5.9 mostra o diagrama de controle para o gerador síncrono e para a máquina de indução trabalhando conjuntamente. O regulador de velocidade da máquina de indução é implementado utilizando o mesmo sinal de realimentação do gerador síncrono (ΔW). O propósito deste controle não é o convencional, e sim uma maneira de se controlar a potência ativa da máquina de indução de forma que ela possa funcionar tanto como gerador como motor. Deve-se entender neste ponto do

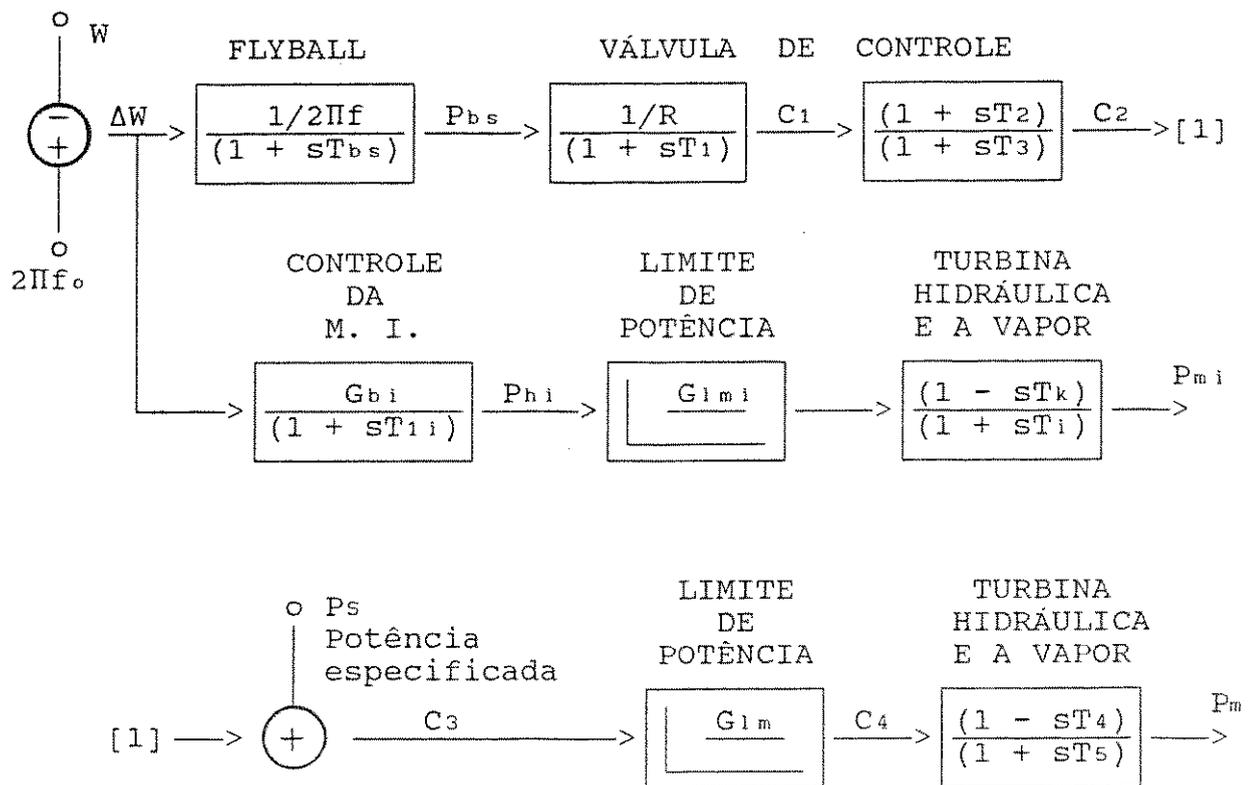


Figura 5.9 - Composição dos reguladores de velocidade de gerador síncrono e da máquina de indução.

trabalho que para se atingir os objetivos propostos que são os de analisar os efeitos da máquina de indução na estabilidade do gerador síncrono a composição de controladores mostrada na figura 5.9 é bastante eficaz conforme será mostrado mais a frente na análise dos resultados. No entanto o regulador de velocidade da máquina de indução pode atuar isoladamente sem o sinal do controlador que atua no gerador síncrono quando se desejar que a máquina de indução atue simplesmente como gerador de potência para o sistema.

Na função de transferência do controle da máquina de indução a constante " G_{bi} " representa todos os ganhos do sistema de controle e " T_{1i} " é a constante de tempo do controle. A variação " ΔW " passa pela função de transferência do controle fornecendo o sinal " Φ_i " que é testado pelo limite de potência da máquina primária " G_{limi} ". O sinal testado pelo limite, após passar pela função de transferência que representa a turbina fornece " P_{mi} " que é a potência mecânica da máquina de indução. As variáveis " T_k " e " T_i " representam as constantes de tempo da máquina primária. Como não existe potência especificada no regulador de velocidade da máquina de indução, o valor de " P_{mi} " pode ser positivo ou negativo fazendo com que a máquina de indução realmente funcione tanto como gerador como motor, respectivamente, atuando sempre no sentido de auxiliar o gerador síncrono.

Considerando que a máquina de indução é muito

mais rápida do que o gerador síncrono, em um transitório a variação de potência do sistema é suprida em grande parte pela máquina de indução antes que o gerador síncrono inicie sua atuação. Desta forma o gerador síncrono irá atender apenas a uma pequena parcela da variação de potência devido ao distúrbio no sistema; conseqüentemente tendo uma atenuação em seu transitório. O controle é automático pois com o reestabelecimento da frequência, a variação " ΔW " vai a zero, fazendo com que a máquina de indução volte a sua condição inicial, ou seja sem fornecer nem absorver potência ativa do sistema.

As seguintes equações devem ser acrescentadas para completar o conjunto já mostrado em (5.71)-(5.75).

$$pP_{mi} = \frac{((1 - sT_k) P_{hi}) - P_{mi}}{T_i} \quad (5.76)$$

$$pP_{hi} = \frac{((2\Pi f - W) G_{bi}) - P_{hi}}{T_{1i}} \quad (5.77)$$

Utilizando a forma geral do método trapezoidal implícito mostrada na equação (4.35) do capítulo 4, pode-se escrever:

$$P_{mi} = \text{CONST} + \text{FATOR } P_{hk} \quad (5.78)$$

onde:

$$\text{CONST} = (1 - 2B)P_{mi}(t) + (TZ + B(1 - TZ))P_{hk} \quad (5.79)$$

$$\text{FATOR} = B(1 + TZ) - TZ \quad (5.80)$$

$$TZ = \frac{T_k}{T_i} \quad (5.81)$$

$$B = \frac{h}{(2T_i + h)} \quad (5.82)$$

Substituindo (5.79)-(5.80) em (5.78) e com alguma manipulação algébrica, fica:

$$P_{mi}(t+h) = (1 - 2B)P_{mi}(t) + TX P_{hi}(t) + TY P_{hi}(t+h) \quad (5.83)$$

onde:

$$TX = (B(1 - TZ) + TZ) \quad (5.84)$$

$$TY = (B(1 + TZ) - TZ) \quad (5.85)$$

A equação de velocidade do gerador síncrono pode ser escrita na forma [4]:

$$pW = \frac{(P_m - P_e - D p\delta)}{T} \quad (5.86)$$

sendo:

$$p\delta = (W - 2\pi f_0) \quad (5.87)$$

$$T = \frac{H}{\Pi f_0} \quad (5.88)$$

onde todas as variáveis já foram definidas no capítulo 3.

Aplicando o método trapezoidal implícito nas equações (5.86)-(5.87), fica:

$$W = WC + WX(P_m - P_e) \quad (5.89)$$

$$\delta = AC + AX W \quad (5.90)$$

onde:

$$WC = (1 - 2BaD)W(t) + Ba(P_m - P_e - 4\Pi fD) \quad (5.91)$$

$$WX = Ba = \frac{h}{(2T + hD)} \quad (5.92)$$

$$AC = \delta(t) + \frac{h}{2} (W(t) - 4\Pi f) \quad (5.93)$$

$$AX = \frac{h}{2} \quad (5.94)$$

Assim:

$$\begin{aligned} \Phi(t+h) = & (1 - 2Ba)\Phi(t) + Ba(2\Pi f_0 - W(t))G_{bi} + \\ & Ba(2\Pi f_0 - W(t+h))G_{bi} \end{aligned} \quad (5.95)$$

sendo W definido em (5.89).

O relacionamento da equação mecânica (5.36) com a potência de acionamento da " P_{mi} " constitui o modelo matemático completo da máquina de indução com o seu controle de velocidade.

5.9 - Modificação na entrada de dados

Com a implementação das equações da máquina de indução assim como de seu regulador de velocidade; algumas alterações foram feitas na entrada de dados. Desta forma é mostrado a seguir como ficou a entrada de dados da máquina de indução, do gerador síncrono e dos reguladores de velocidade.

5.9.1 - Dados da máquina de indução

As colunas mostradas abaixo referem-se aos cartões de dados das máquinas de indução.

col 1-8 / Nome da barra em que se encontra a máquina de indução

col 9-10 / Número da máquina

col 11-20/ Potência ativa da máquina (MW), sendo positiva quando a máquina for um motor, significando portanto potência mecânica. Terá valor negativo quando a máquina for gerador; significando

potência elétrica, e será zero quando atuar como dispositivo de auxílio do gerador síncrono.

col 19-23/ Indicador se a máquina está desconectada do sistema.

col 24-44/ Constantes de carga da máquina

col 45-47/ Indicador se a máquina funciona como gerador

col 48-50/ Indicador se a máquina funciona como controlador de potência ativa.

5.9.2 - Dados da máquina síncrona e do regulador de velocidade

col 1-8 / Nome da barra em que se encontra a máquina síncrona

col 9-10 / Número da máquina

col 11-20/ Potência ativa de saída (MW)

col 21-30/ Potência reativa de saída (MVAR)

col 31-40/ Fator de amortecimento (pu)

col 41-43/ Indicador da existência da máquina de indução na barra, com finalidades de auxílio. Os próximos cartões somente serão preenchidos se houver a máquina citada

col 44-49/ Constantes de tempo da turbina que aciona a máquina de indução (T_k e T_i)

col 50-56/ Ganho total do regulador (G_{bi})

col 57-63/ Constante de tempo do regulador da máquina de indução (T_{ii})

5.10 - Parâmetros das máquinas de indução e dos reguladores de velocidade.

A tabela 5.1 mostra parâmetros da máquina de indução para potências de 5 a 220 Hp [3]. A tensão nominal é 220 volts/fase com conexão Δ .

P_m (HP)	p	FP	X_1 (Ω)	R_1 (Ω)	X_2 (Ω)	R_2 (Ω)	X_m (Ω)
5	2	0.83	2.49659	0.61960	2.49865	1.11289	59.01489
5	4	0.85	2.18004	0.77860	2.18136	1.06547	62.91074
10	2	0.89	1.22349	0.29110	1.22514	0.50822	43.96418
10	4	0.86	1.09103	0.38951	1.09308	0.50731	33.96418
20	2	0.90	0.59730	0.11760	0.59833	0.24084	24.09068
20	4	0.87	0.48832	0.15395	0.48932	0.17611	17.00738
30	4	0.88	0.33316	0.08714	0.33391	0.12027	13.13901
30	6	0.88	0.37686	0.10293	0.37825	0.13303	13.52249
50	4	0.89	0.18589	0.05943	0.18649	0.06478	8.35247
50	6	0.88	0.20378	0.07066	0.20428	0.06766	7.86717
60	4	0.89	0.14060	0.03518	0.14105	0.04603	6.79256
60	6	0.88	0.17289	0.04172	0.17325	0.05684	6.69658
100	4	0.89	0.09579	0.02401	0.09629	0.02766	4.22828
100	6	0.86	0.09416	0.03157	0.09431	0.02743	3.46007
150	4	0.90	0.07049	0.01002	0.07074	0.01855	3.17636
150	6	0.88	0.05469	0.01181	0.06463	0.01857	2.67633
200	4	0.90	0.05644	0.00743	0.05646	0.01400	2.45457
200	6	0.88	0.04848	0.00843	0.04849	0.01393	2.01020

Tabela 5.1 - Parâmetros da máquina de indução.

onde "p" é o número de polos e "FP" significa fator de potência. A tabela 5.2 mostra parâmetros dos reguladores de velocidade, mais utilizados nas simulações.

Dados do Regulador de Velocidade		Valor Típico
Ganho (Flyball)	0.01 - 1.00	0.02
T _b (seg)	0.10 - 0.40	0.10
R (pu)	0.05 - 0.07	0.05
T ₁ (seg)	0.00 - 0.35	0.20
T ₂ (seg)	0.00 - 1.00	1.00
T ₃ (seg)	0.50 - 1.00	0.50
T ₄ (seg)	0.00 - 0.15	0.09
T ₅ (seg)	0.10 - 0.20	0.10
T _{1i} (seg)	0.02 - 0.30	0.02
T _k (seg)	0.00 - 0.15	0.10
T _i (seg)	0.02 - 0.10	0.04
G _{bi}	0.02 - 0.50	0.40

ela 6.2 - Parâmetros do regulador de velocidade

5.11 - Resultado das simulações

Nas simulações realizadas são utilizados dados de um sistema industrial real, fornecidos pela indústria. Este sistema está conectado ao barramento infinito e possui um gerador auxiliar de 20 MVA, funcionando em regime nominal. Na barra onde se encontra o gerador, é colocada a máquina de indução que irá funcionar como o dispositivo auxiliar mencionado durante todo o trabalho. Todos os dados referentes às linhas de transmissão, motores e do gerador são mostrados nas tabelas abaixo.

A tabela 5.3 mostra os parâmetros das linhas de transmissão.

Barras Terminais	Resistência da linha (pu)	Susceptância da linha (pu)
810-801	0.00109	0.00514
811-810	0.00000	0.00010
801-700	0.00278	0.11801
801-700	0.00156	0.00166
701-600	0.00747	0.11681
700-601	0.02292	0.32162
700-602	0.00296	0.00176
700-702	0.00296	0.00176
702-500	0.33153	2.81550
700-703	0.00253	0.00352
700-704	0.00377	0.00384

700-704	0.00971	0.02081
704.603	0.01102	0.17882
700-604	0.01464	0.28230
810-802	0.00153	0.00853
802-705	0.00262	0.12239
802-705	0.00277	0.12402
705-706	0.00183	0.00180
706-605	0.00578	0.14071
705-606	0.02799	0.42889
705-607	0.01897	0.31109
705-707	0.00115	0.00154
707-610	0.02034	0.20437
705-608	0.01773	0.28960
705-609	0.01324	0.28279
705-611	0.02405	0.36099
611-501	0.01500	0.01743
611-502	0.09158	0.10641
611-503	0.10405	0.80682
611-504	0.19038	0.89794
612-611	0.00679	0.00789
612-505	0.22659	0.26328
612-506	0.05850	0.51400

Tabela 5.3 - Parâmetros das linhas de transmissão
com $S_{base} = 100$ MVA

A tabela 5.4 mostra os parâmetros do gerador síncrono, utilizando os valores nominais do gerador como valores base.

N ^o da Barra	612
MVA Base	25.0
H (Mj/MVA)	4.318
X' _d (pu)	0.166
X' _q (pu)	0.166
X _d (pu)	1.770
X _q (pu)	1.600
R _a (pu)	0.005
T _o ' (seg)	5.30
X'' _d (pu)	0.110
X'' _q (pu)	0.110
T _o '' (seg)	0.019

Tabela 5.4 - Parâmetros do gerador síncrono

A tabela 5.5 mostra os parâmetros dos motores de indução. Os valores nominais das máquinas são utilizados como valores base no processo de normalização.

N ^o da Barra	MVA Base	Pot. MW	r (pu)	R (pu)	X ₁ (pu)	X ₂ (pu)	X _m (pu)
600	8.20	6.83	0.006	0.012	0.140	0.140	6.000
601	4.72	4.25	0.006	0.012	0.130	0.130	6.100
602	11.51	10.32	0.007	0.014	0.140	0.140	6.200
603	19.06	17.08	0.006	0.012	0.130	0.130	6.000
604	9.71	8.7	0.006	0.012	0.130	0.130	6.000
605	7.97	7.14	0.006	0.013	0.140	0.140	6.300
607	7.08	6.345	0.006	0.012	0.130	0.130	6.000
608	4.35	3.9	0.006	0.012	0.130	0.130	6.000
609	13.13	11.84	0.007	0.013	0.140	0.140	6.200
610	7.28	6.53	0.006	0.012	0.130	0.130	6.000
612	0.40	4.45	0.006	0.012	0.130	0.130	6.000
702	0.24	0.217	0.007	0.013	0.140	0.140	6.400
703	2.402	2.156	0.008	0.014	0.150	0.150	6.500

Tabela 5.5 - Parâmetros dos motores de indução

A potência mostrada nas barras da tabela 5.5, corresponde a um motor equivalente. Assim os parâmetros são determinados em função das potências ativa e reativa de cada barra [Ver apêndice B], não sendo disponível portanto os parâmetros de cada motor, nem a sua quantidade. Outros 43 motores de menor porte (abaixo de 50 Hp), não são modelados dinamicamente, sendo representados por impedâncias constantes. Os parâmetros utilizados para os reguladores de velocidade são típicos e podem ser vistos na tabela 5.2.

As figuras (5.10)-(5.15) mostram através da frequência, tensão, ângulo de carga, potência ativa, potência reativa e corrente terminal, respectivamente, o comportamento do gerador síncrono quando da ocorrência de uma variação de carga no instante 2 segundos (distúrbio #1), sem o auxílio da máquina de indução. A variação de carga é provocada pela retirada da barra 601. As figuras (5.16)-(5.21) mostram as mesmas grandezas para o mesmo distúrbio, porém agora com a presença da máquina de indução. As figuras (5.22)-(5.26) mostram respectivamente, escorregamento, tensão, potência ativa, potência reativa e corrente terminal da máquina de indução auxiliar.

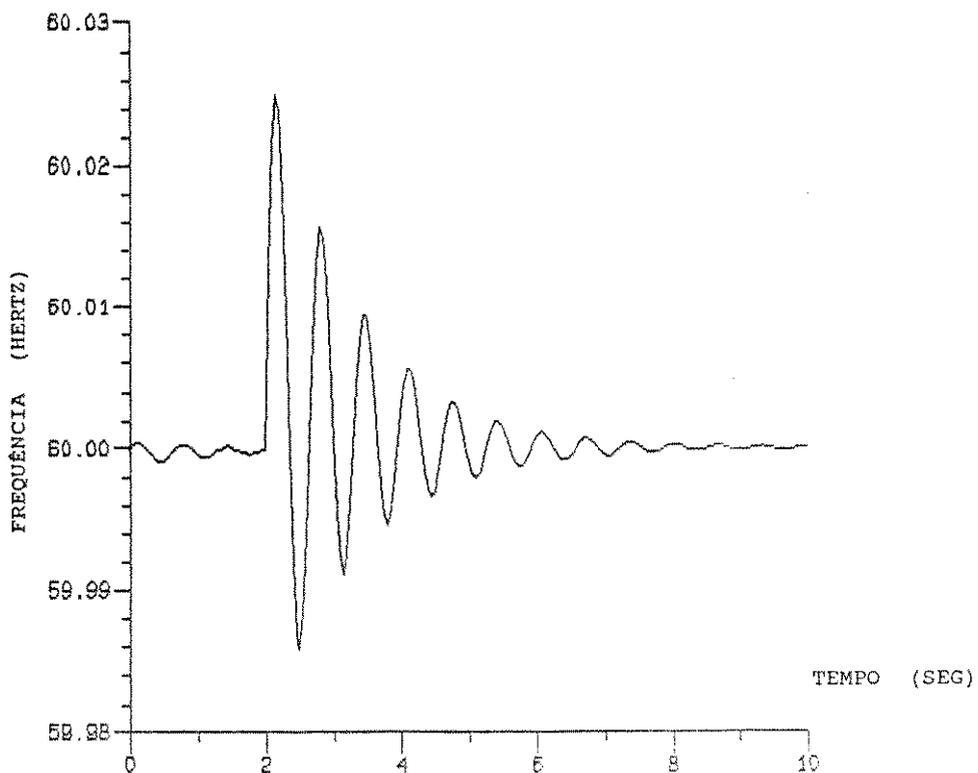


Figura 5.10 - Frequência da máquina síncrona para o distúrbio #1 sem a presença da máquina de indução.

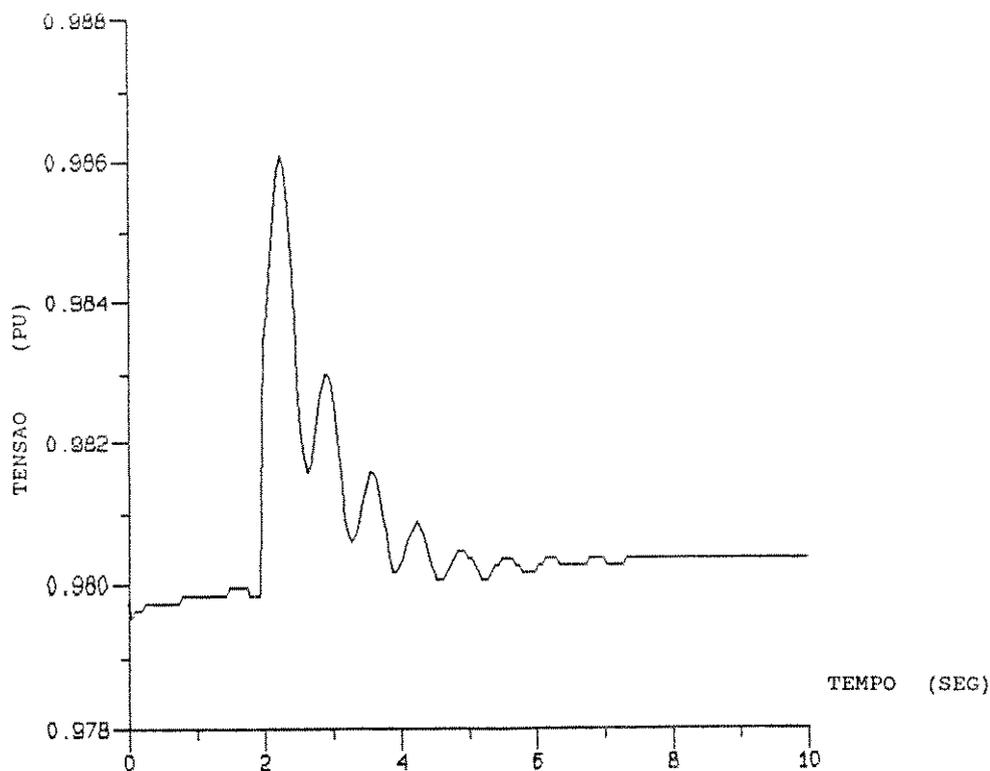


Figura 5.11 - Tensão terminal do gerador síncrona para o distúrbio #1 sem a presença da máquina de indução.

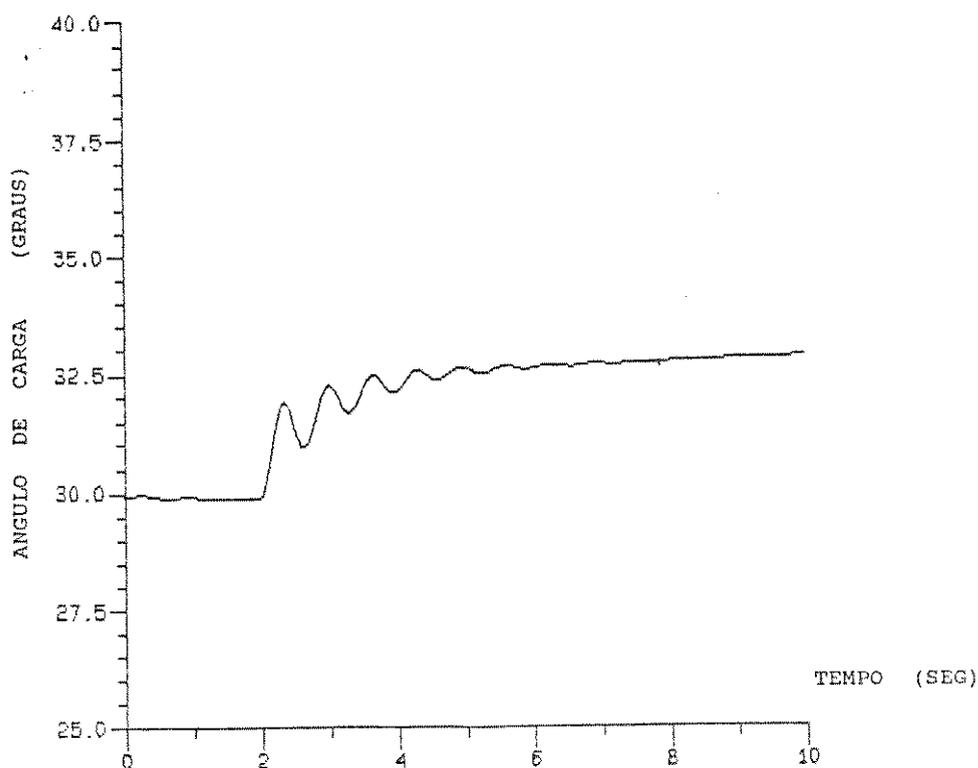


Figura 5.12 - Ângulo de carga da máquina síncrona para o distúrbio #1 sem a presença da máquina de indução.

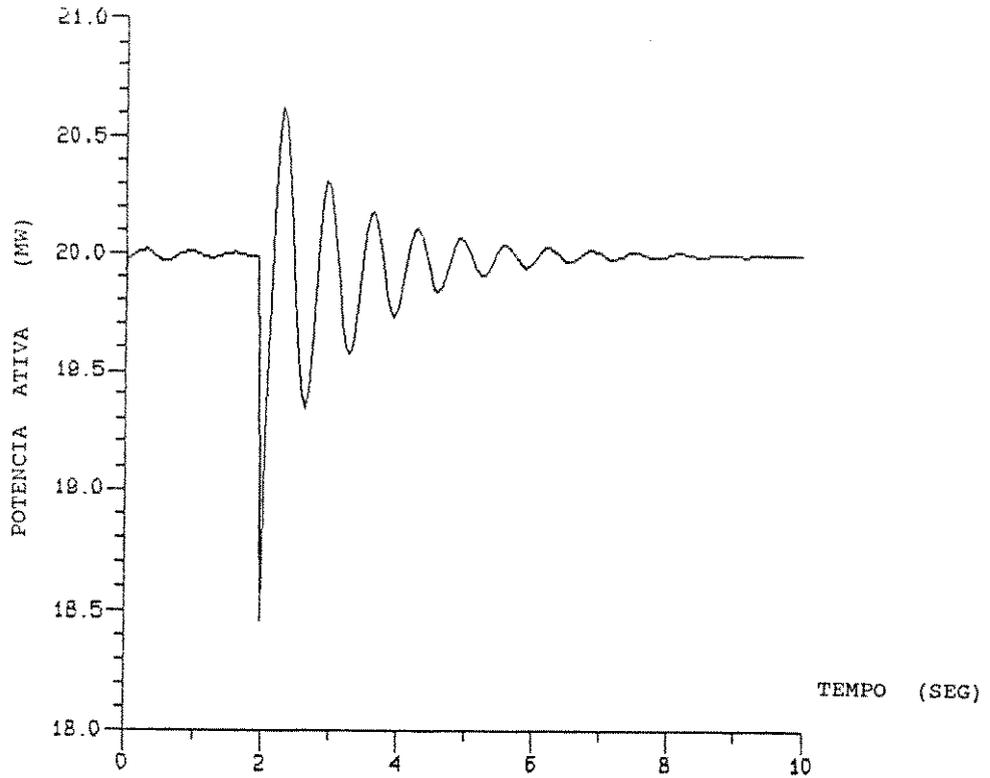


Figura 5.13 - Potência ativa da máquina síncrona para o distúrbio #1 sem a presença da máquina de indução.

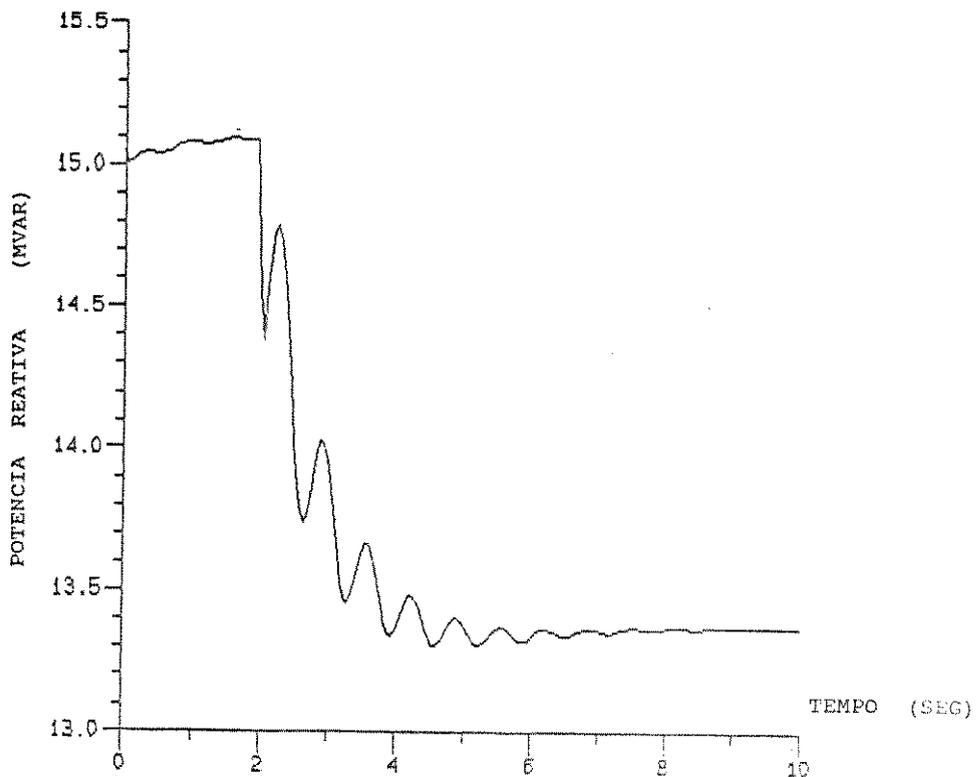


Figura 5.14 - Potência reativa da máquina síncrona para o distúrbio #1 sem a presença da máquina de indução.

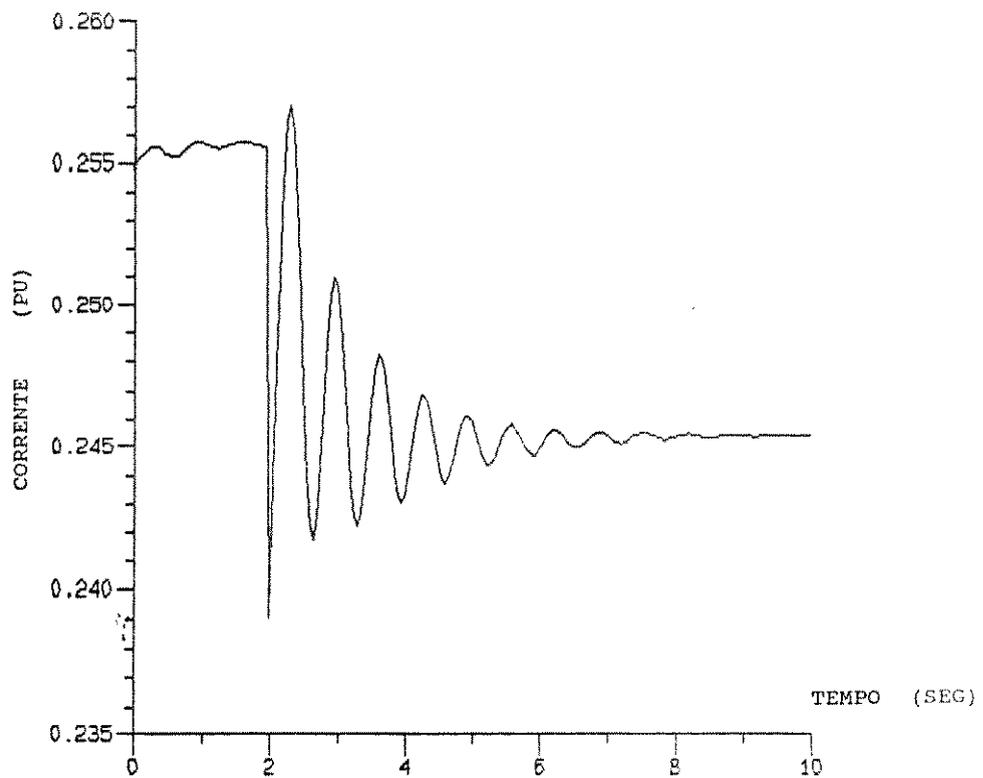


Figura 5.15 - Corrente terminal da máquina síncrona para o distúrbio #1 sem a presença da máquina de indução.

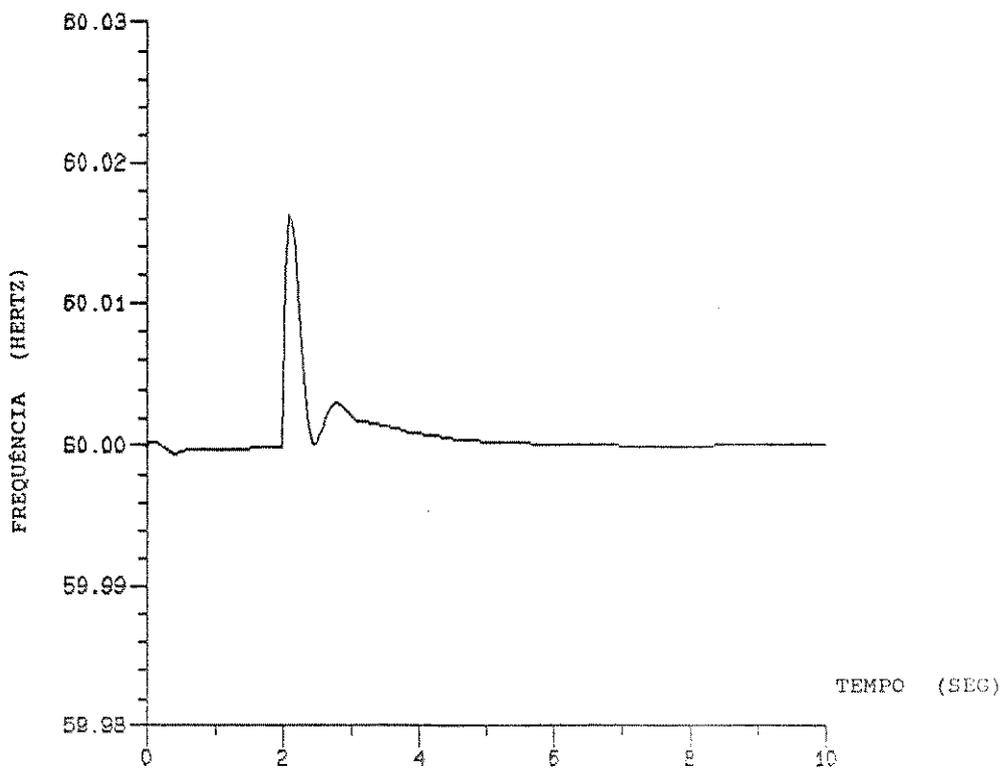


Figura 5.16 - Frequência da máquina síncrona para o distúrbio #1 com a presença da máquina de indução.

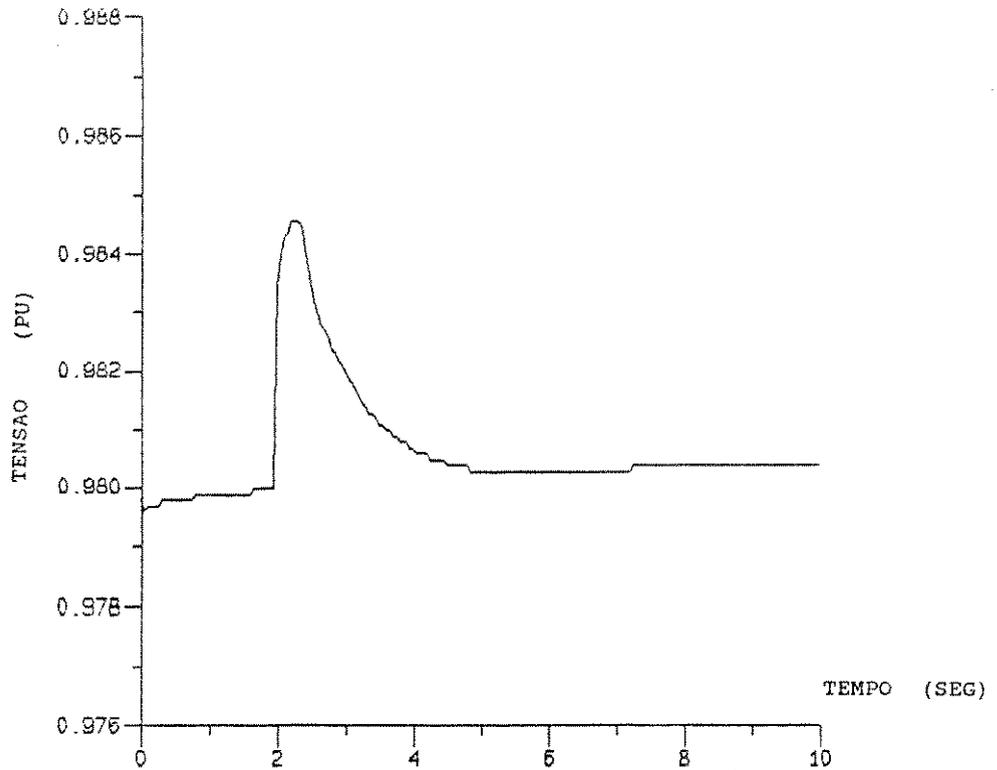


Figura 5.17 - Tensão da máquina síncrona para o distúrbio #1 com a presença da máquina de indução.

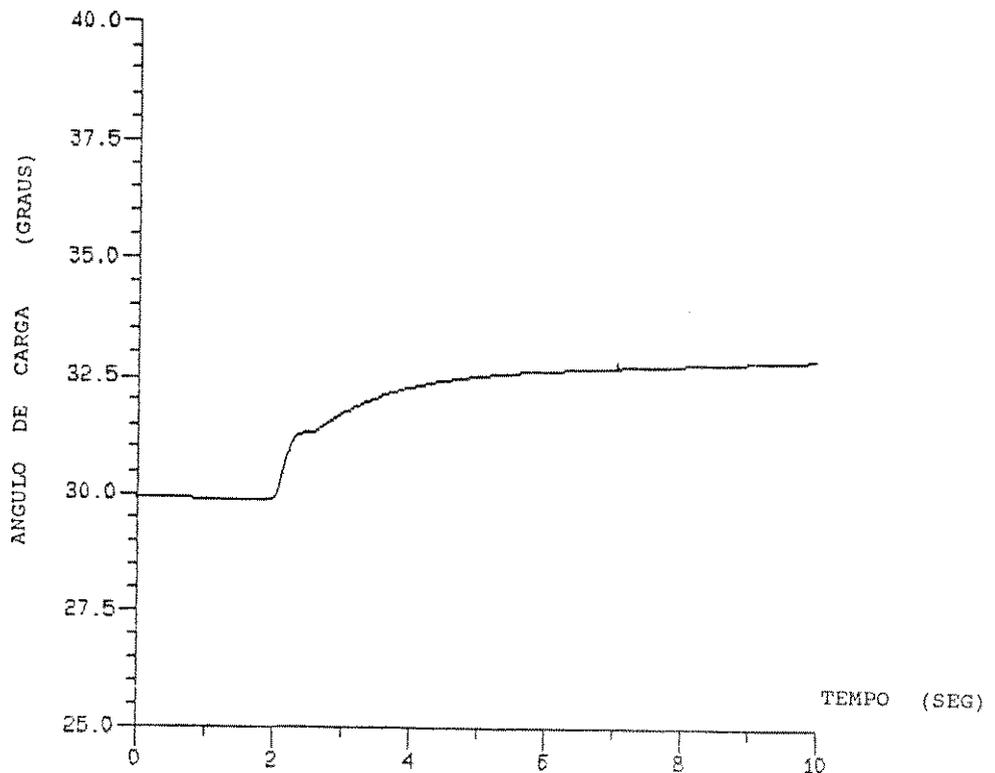


Figura 5.18 - Ângulo de carga da máquina de indução para o distúrbio #1 com a presença da máquina de indução.

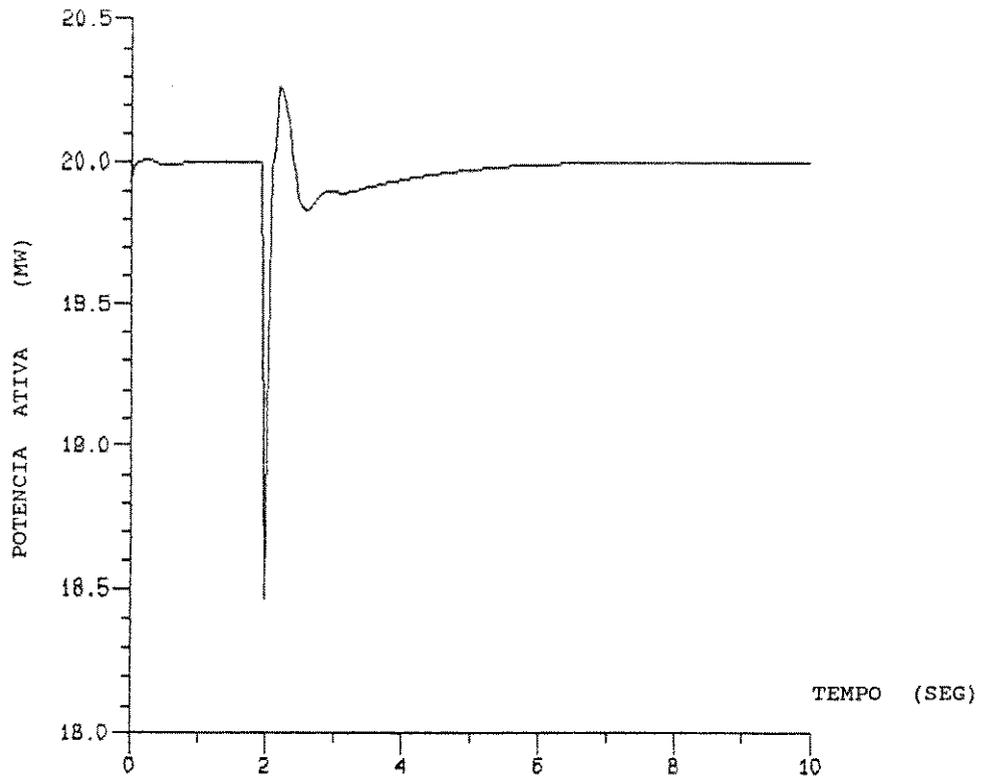


Figura 5.19 - Potência ativa da máquina síncrona para o distúrbio #1 com a presença da máquina de indução.

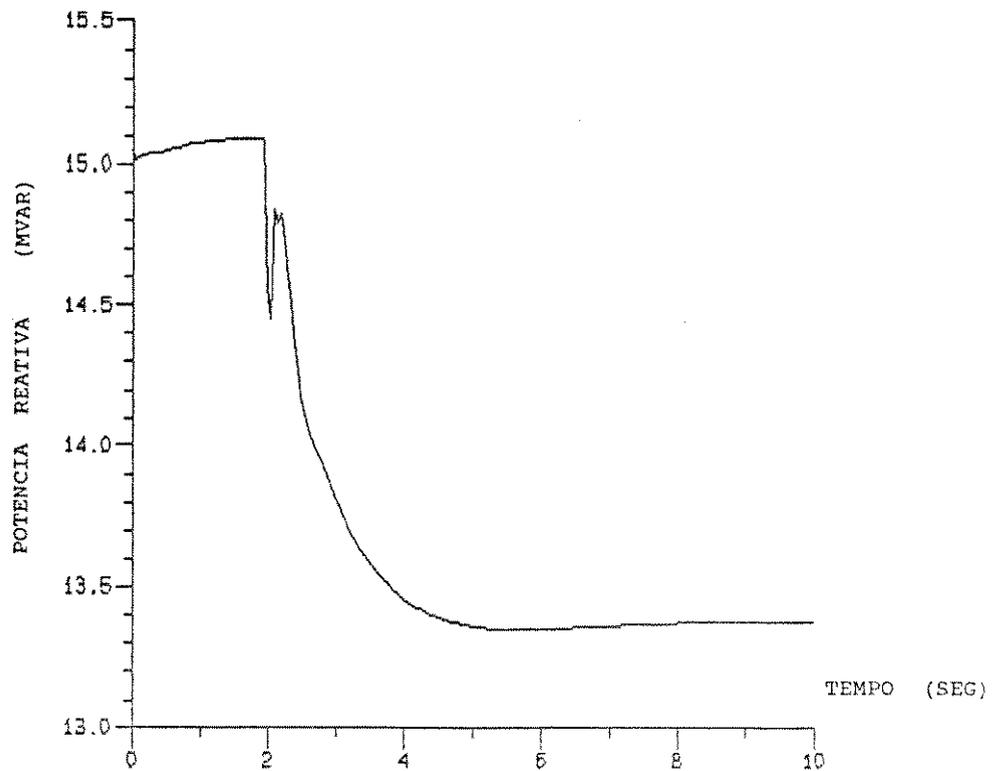


Figura 5.20 - Potência reativa da máquina síncrona para o distúrbio #1 com a presença da máquina de indução.

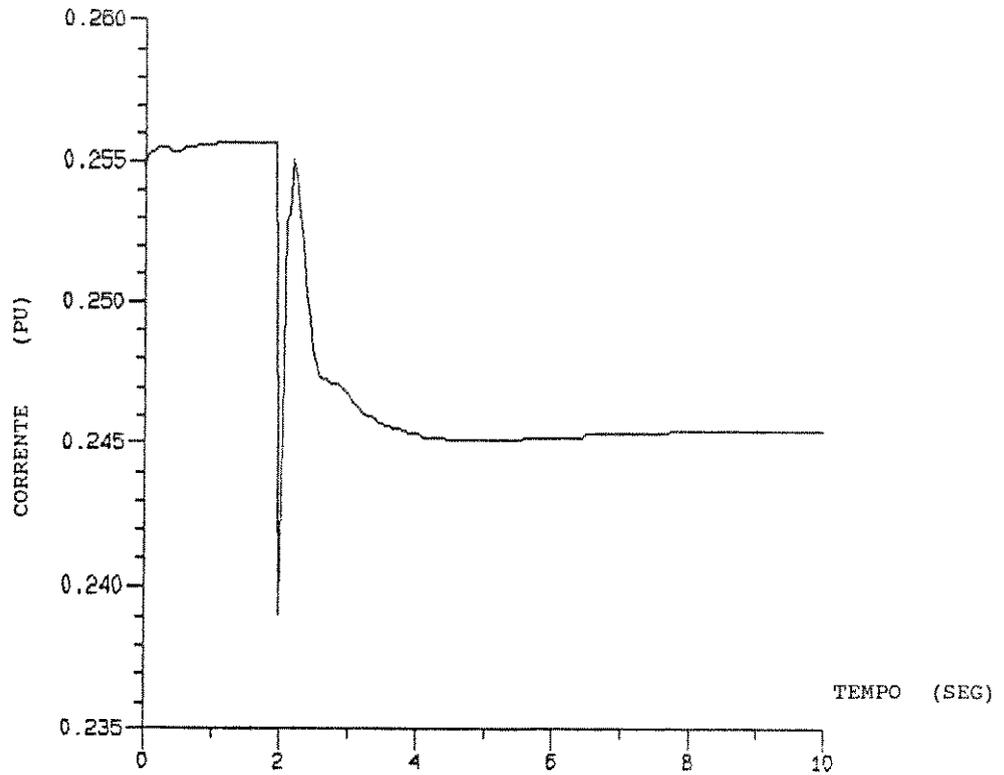


Figura 5.21 - Corrente terminal da máquina síncrona para o distúrbio #1 com a presença da máquina de indução.

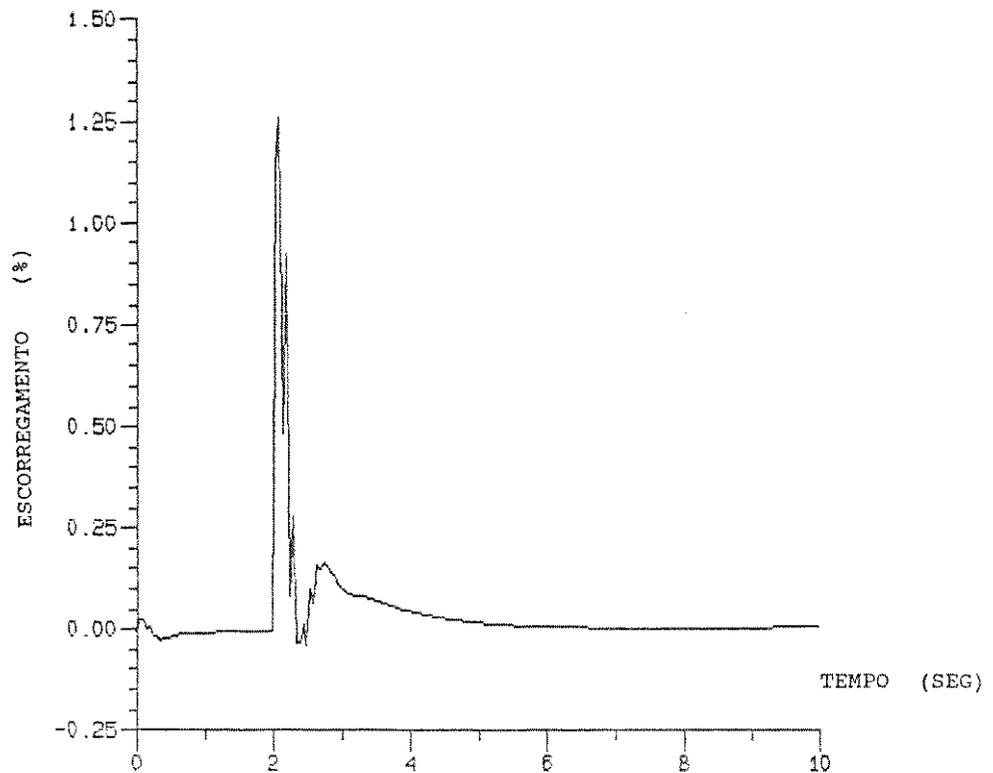


Figura 5.22 - Escorregamento da máquina de indução para o distúrbio #1.

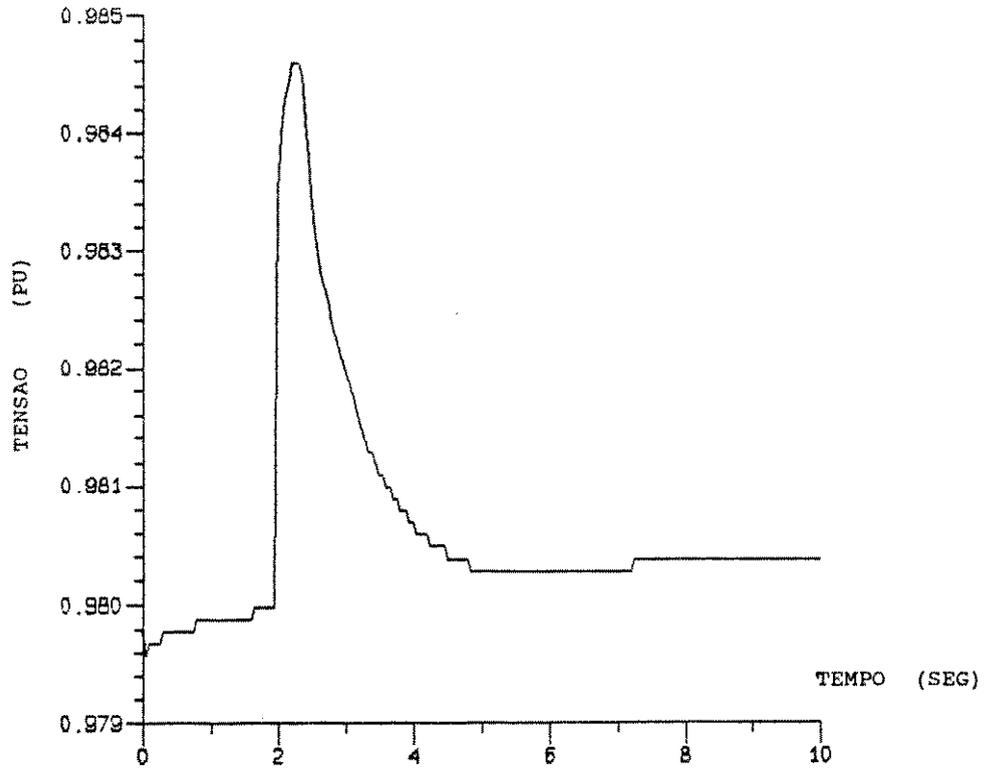


Figura 5.23 - Tensão da máquina de indução para o distúrbio #1.

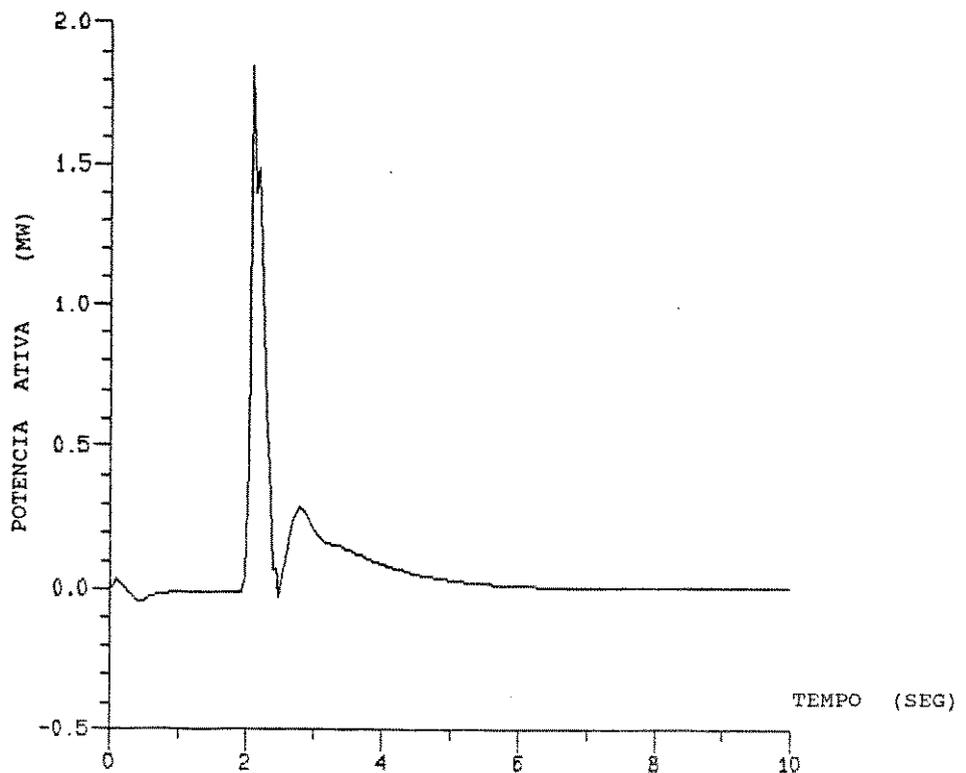


Figura 5.24 - Potência ativa da máquina de indução para o distúrbio #1.

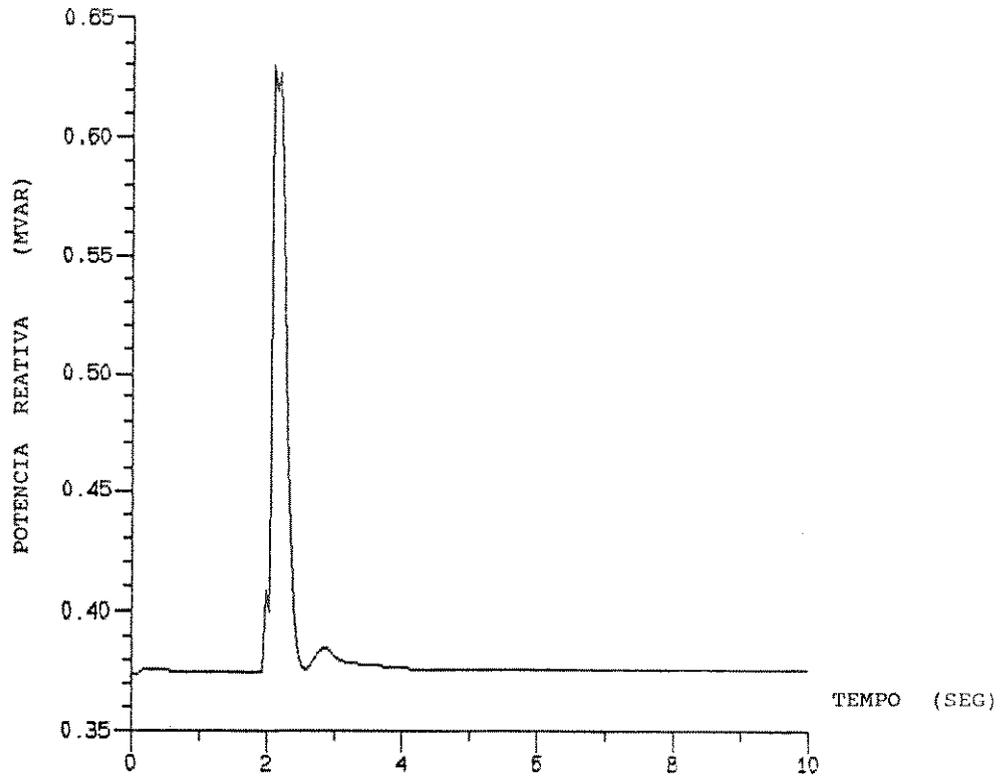


Figura 5.25 - Potência reativa da máquina de indução para o distúrbio #1.

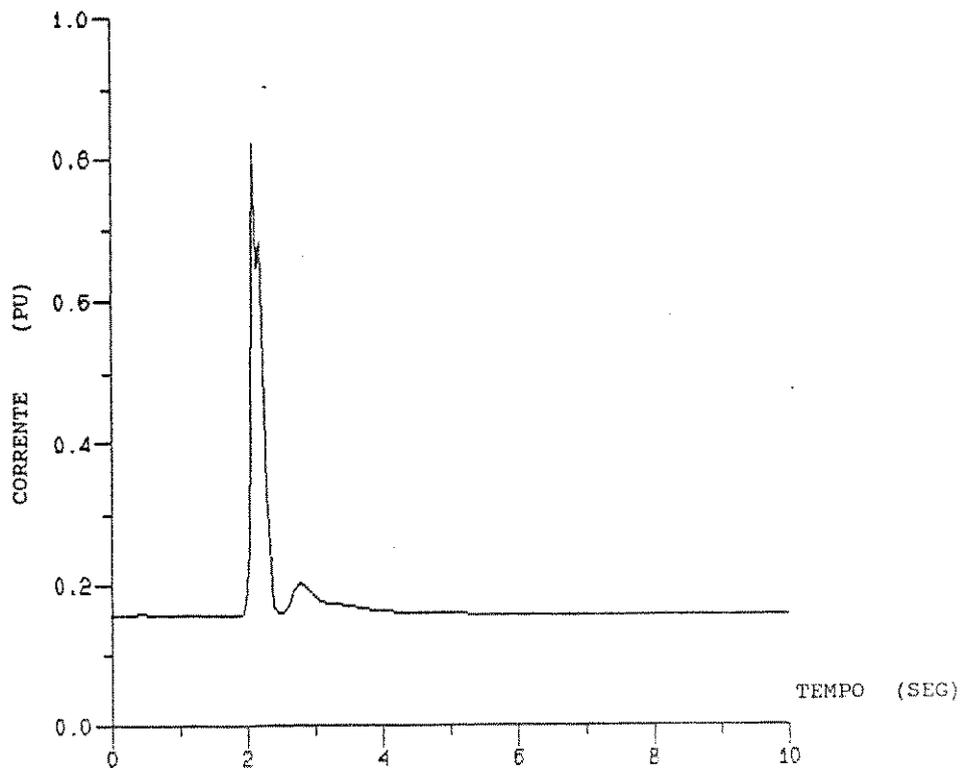


Figura 5.26 - Corrente terminal da máquina de indução para o distúrbio #1.

As figuras (5.27)-(5.32) mostram através da frequência, tensão, ângulo de carga, potência ativa, potência reativa e corrente terminal, respectivamente, o comportamento do gerador síncrono quando da ocorrência de uma variação de carga caracterizada pela retirada da barra 600 no instante 0.0 segundos e pela entrada da mesma barra no instante 8 segundos (distúrbio #2), sem o auxílio da máquina de indução. As figuras (5.33)-(5.38) mostram as mesmas grandezas para o mesmo distúrbio, porém agora com a presença da máquina de indução. As figuras (5.39)-(5.43) mostram respectivamente, escorregamento, tensão, potência ativa, potência reativa e corrente terminal da máquina de indução auxiliar.

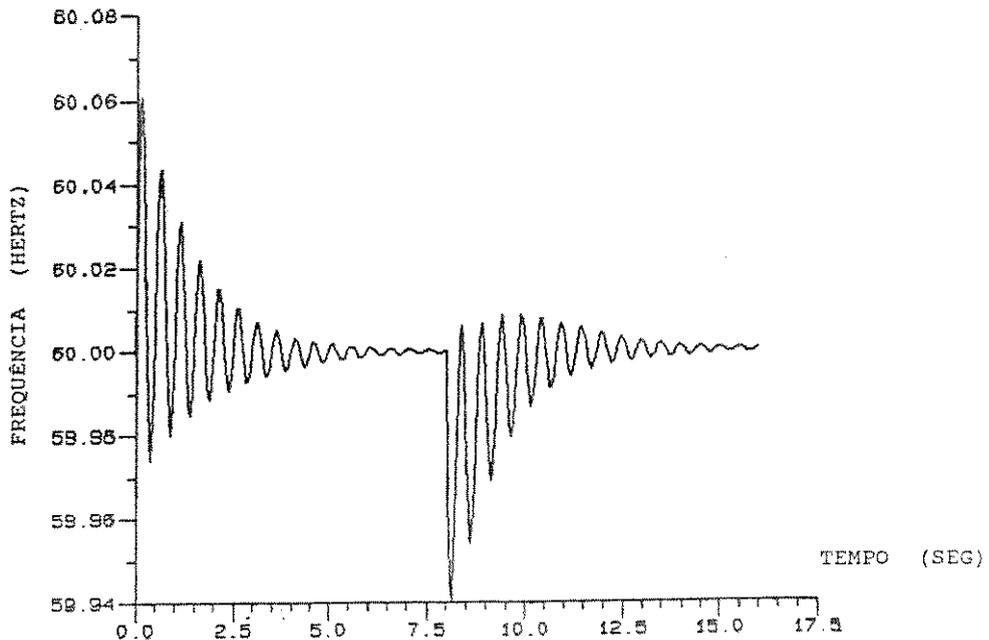


Figura 5.27 - Frequência da máquina síncrona para o distúrbio #2 sem a presença da máquina de indução.

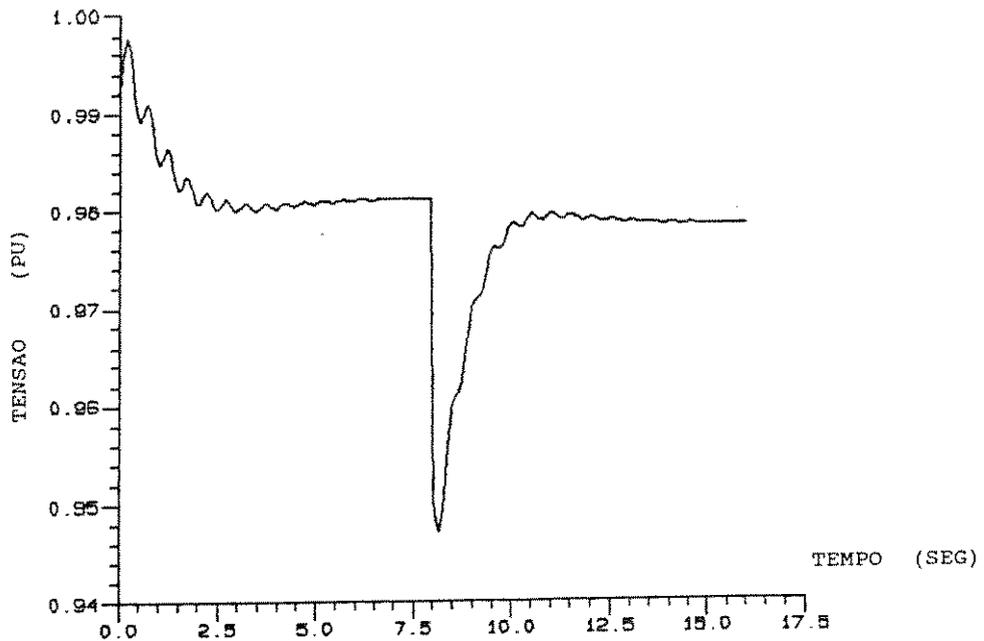


Figura 5.28 - Tensão da máquina síncrona para o distúrbio #2 sem a presença da máquina de indução.

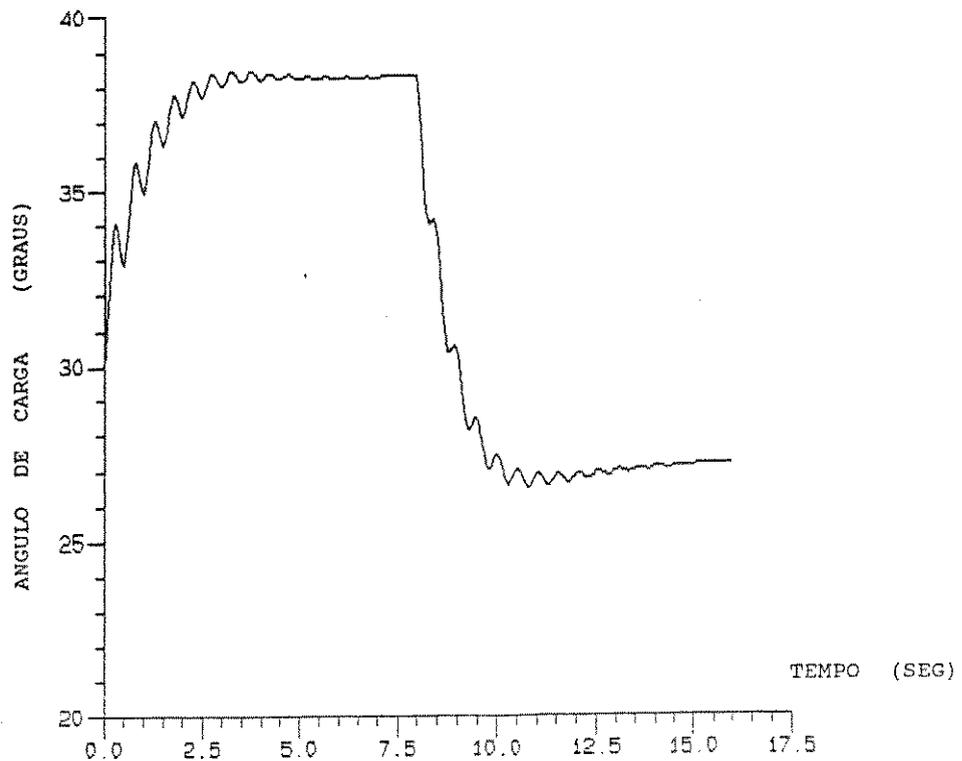


Figura 5.29 - Ângulo de carga da máquina síncrona para o distúrbio #2 sem a presença da máquina de indução.

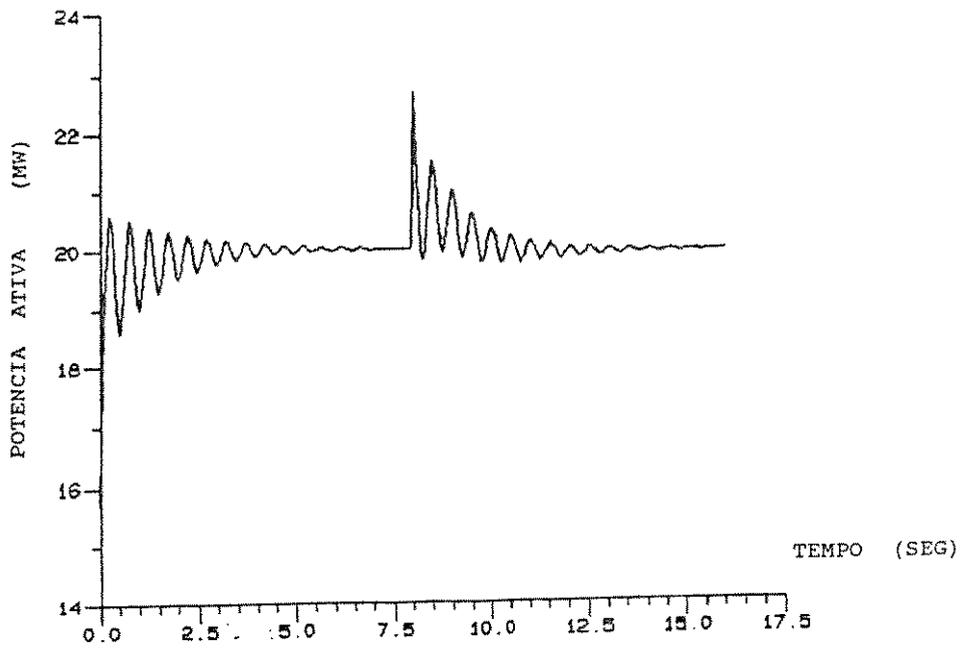


Figura 5.30 - Potência ativa da máquina síncrona para o distúrbio #2 sem a presença da máquina de indução.

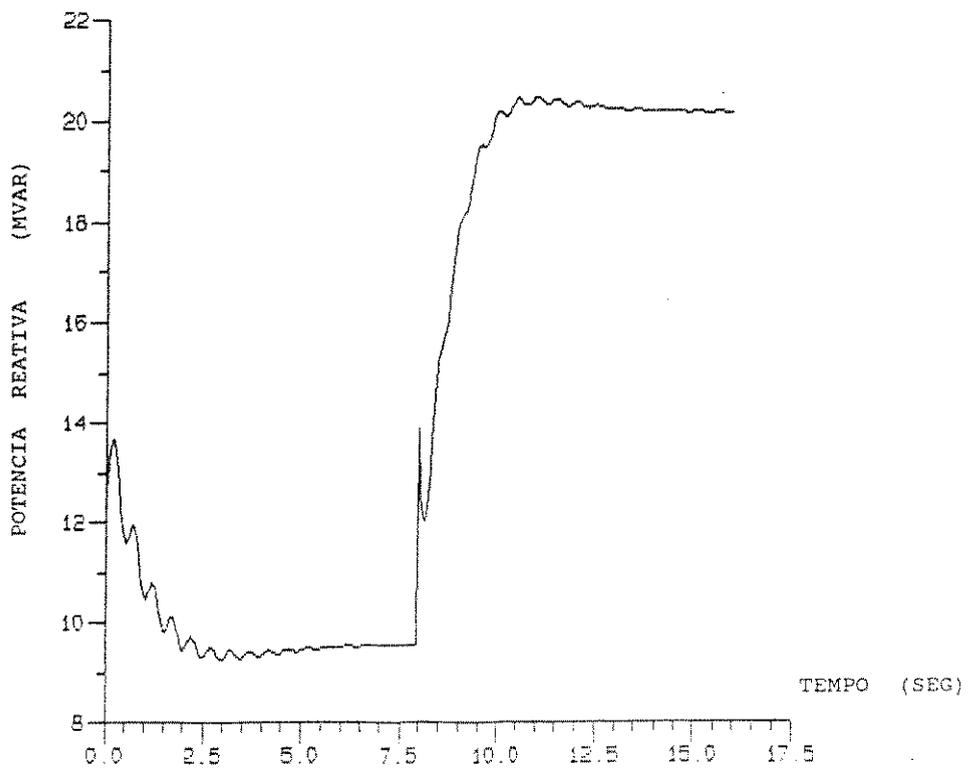


Figura 5.31 - Potência reativa da máquina síncrona para o distúrbio #2 sem a presença da máquina de indução.

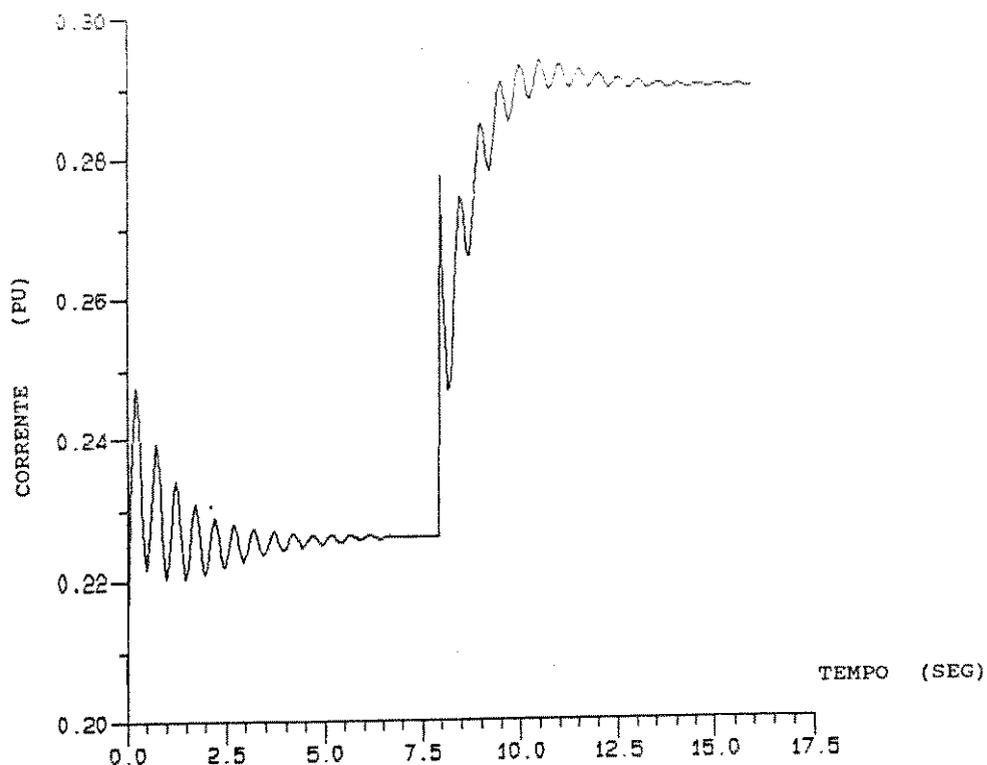


Figura 5.32 - Corrente terminal da máquina síncrona para o distúrbio #2 sem a presença da máquina de indução.

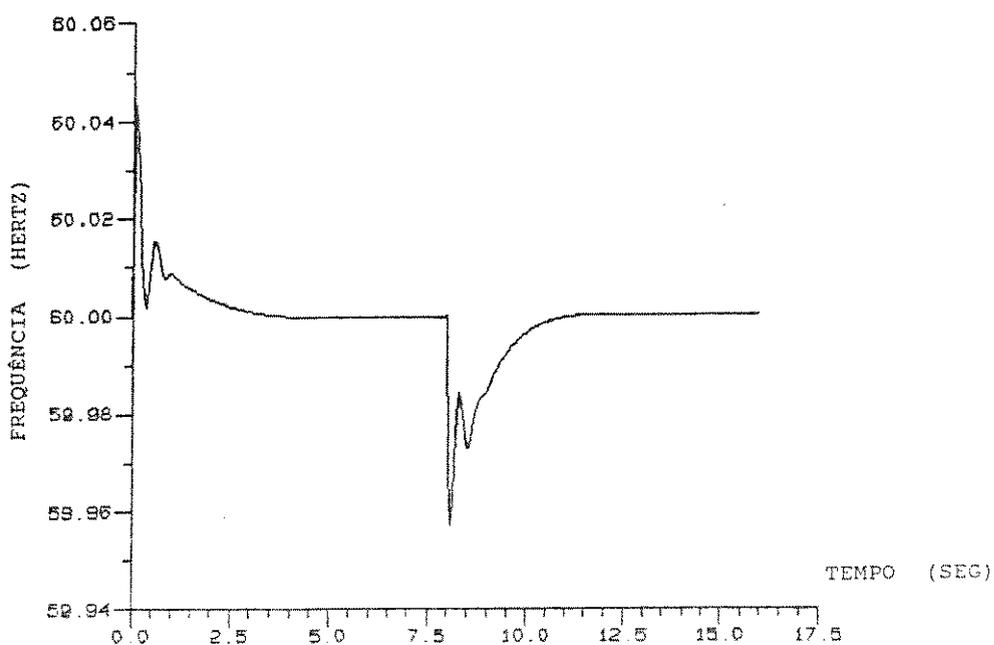


Figura 5.33 - Frequência da máquina síncrona para o distúrbio #2 com a presença da máquina de indução.

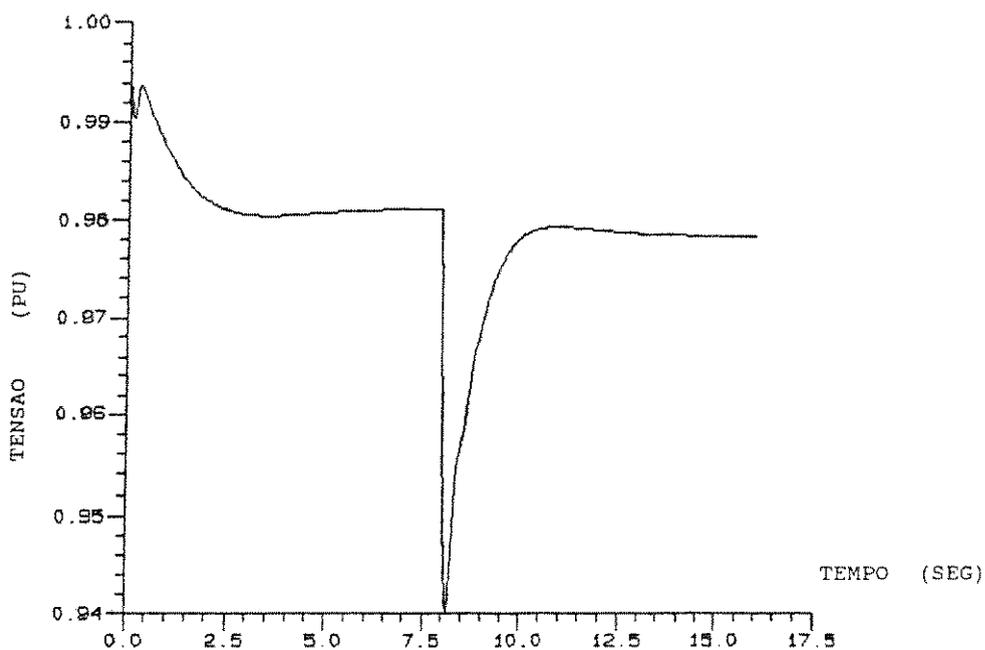


Figura 5.34 - Tensão da máquina síncrona para o distúrbio #2 com a presença da máquina de indução.

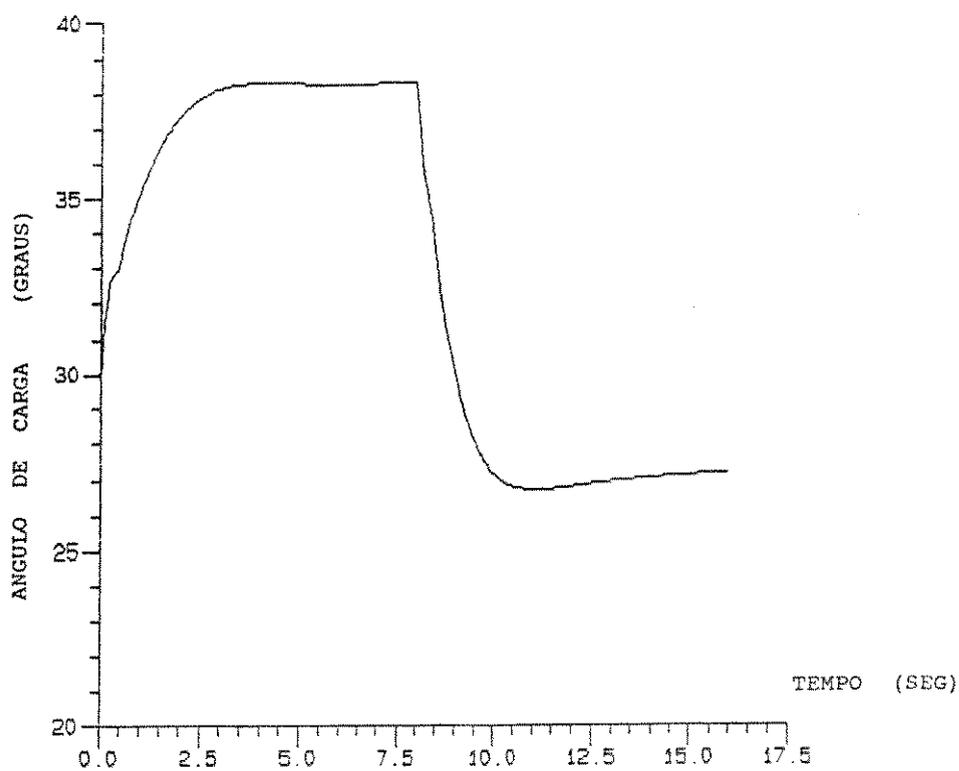


Figura 5.35 - Ângulo de carga da máquina de indução para o distúrbio #2 com a presença da máquina de indução.

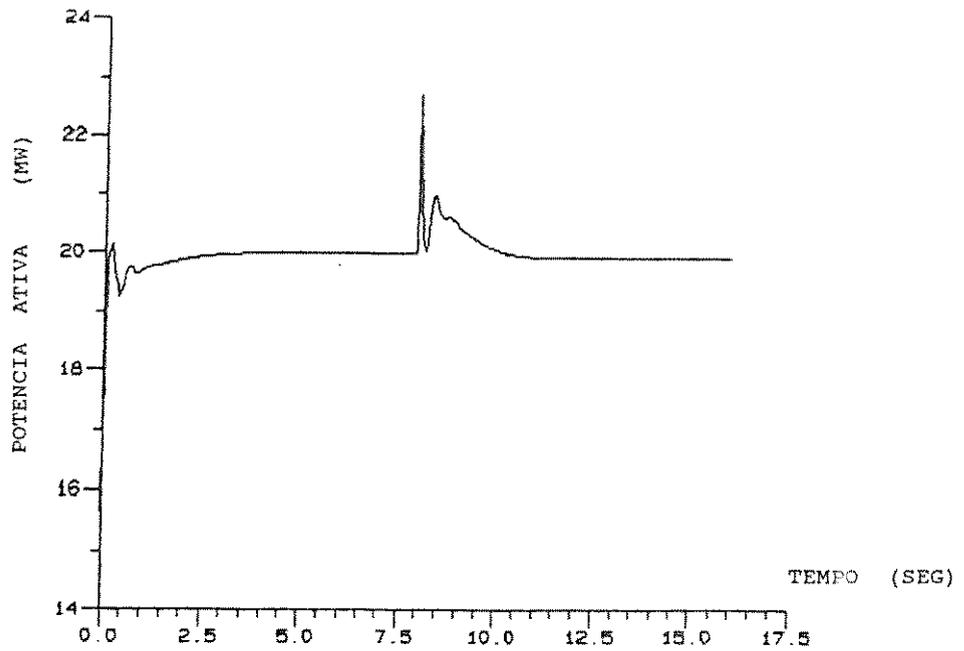


Figura 5.36 - Potência ativa da máquina síncrona para o distúrbio #2 com a presença da máquina de indução.

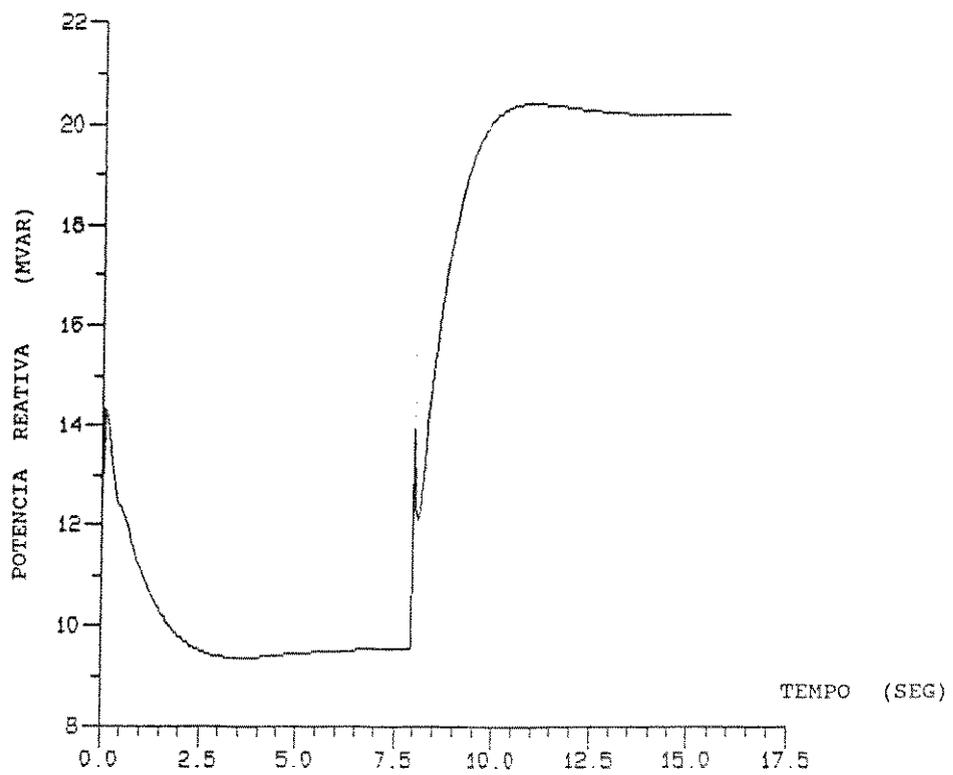


Figura 5.37 - Potência reativa da máquina síncrona para o distúrbio #2 com a presença da máquina de indução.

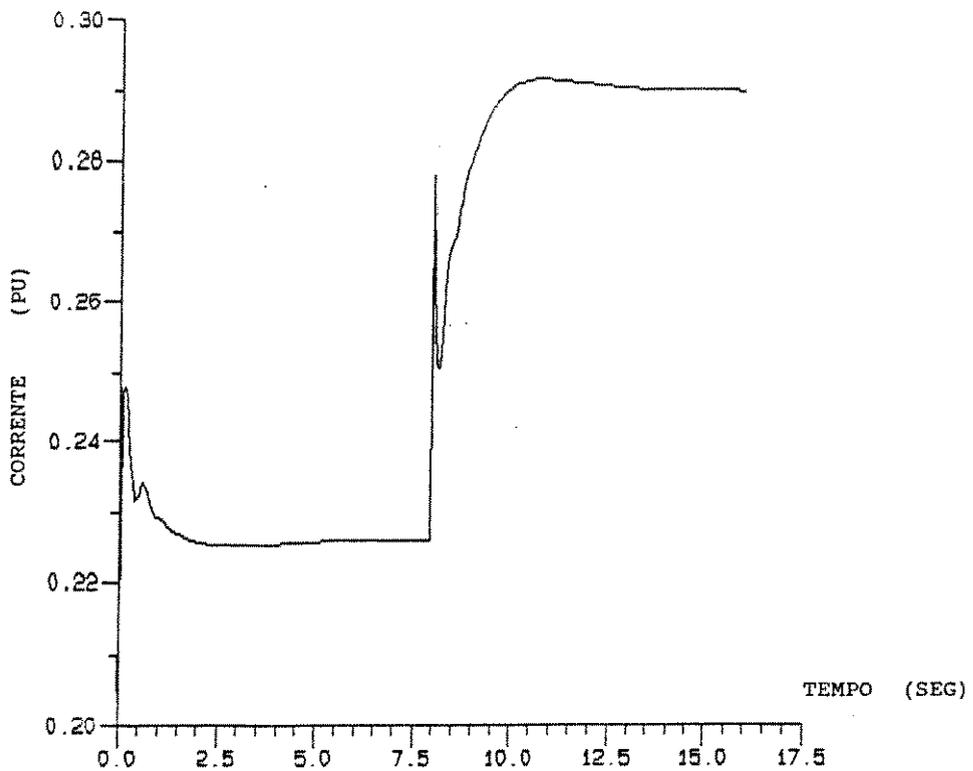


Figura 5.38 - Corrente terminal da máquina síncrona para o distúrbio #2 com a presença da máquina de indução.

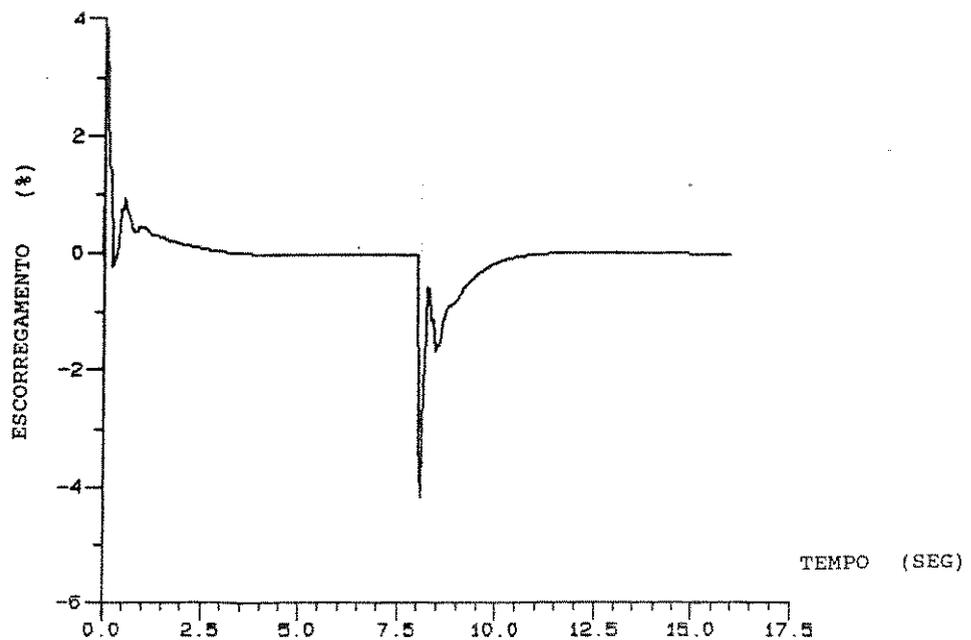


Figura 5.39 - Escorregamento da máquina de indução para o distúrbio #2.

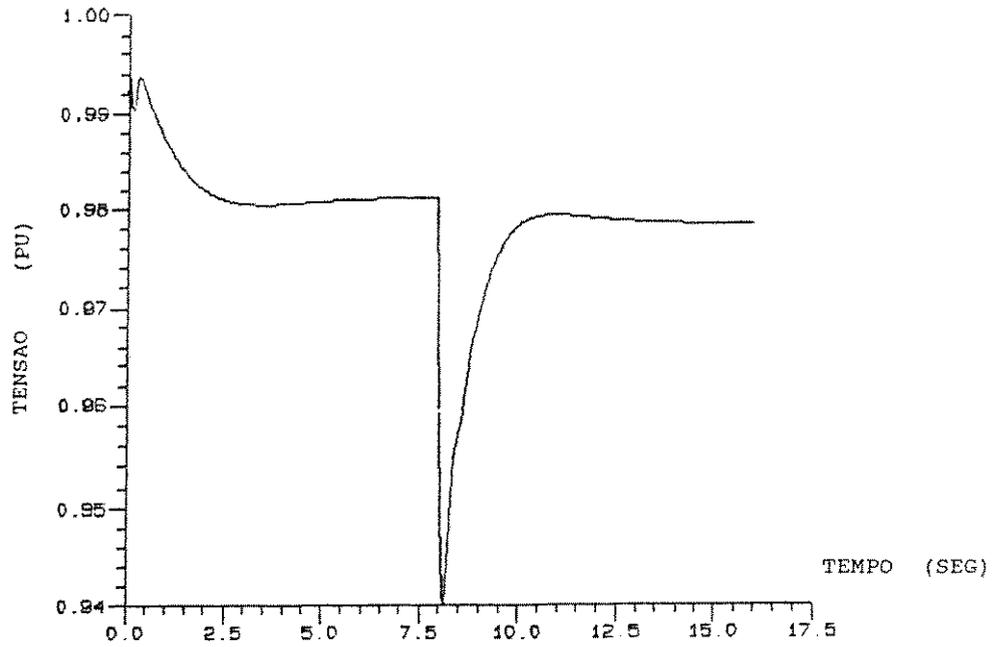


Figura 5.40 - Tensão da máquina de indução para o distúrbio #2.

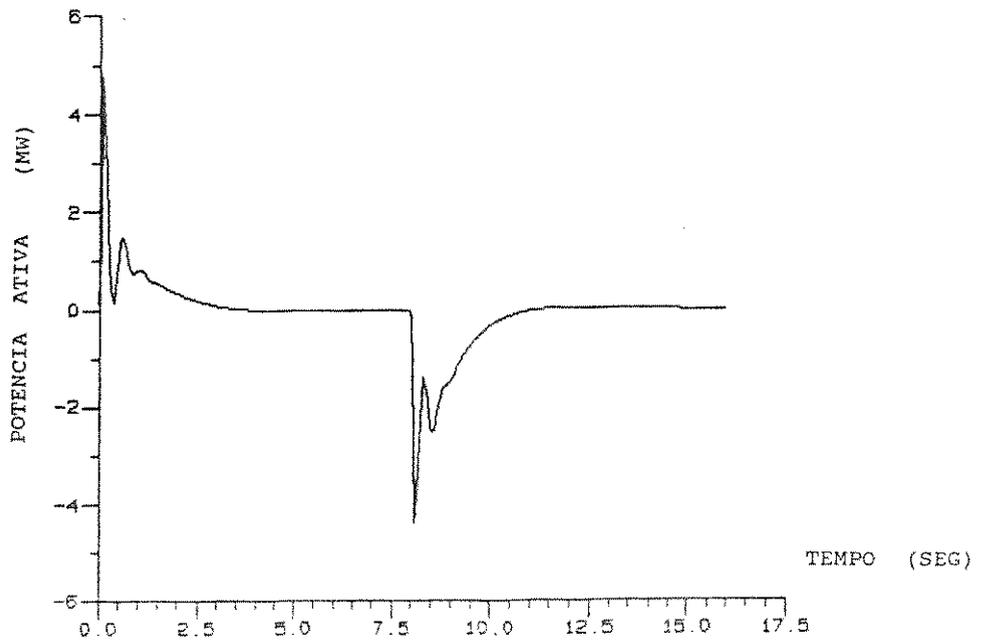


Figura 5.41 - Potência ativa da máquina de indução para o distúrbio #2.

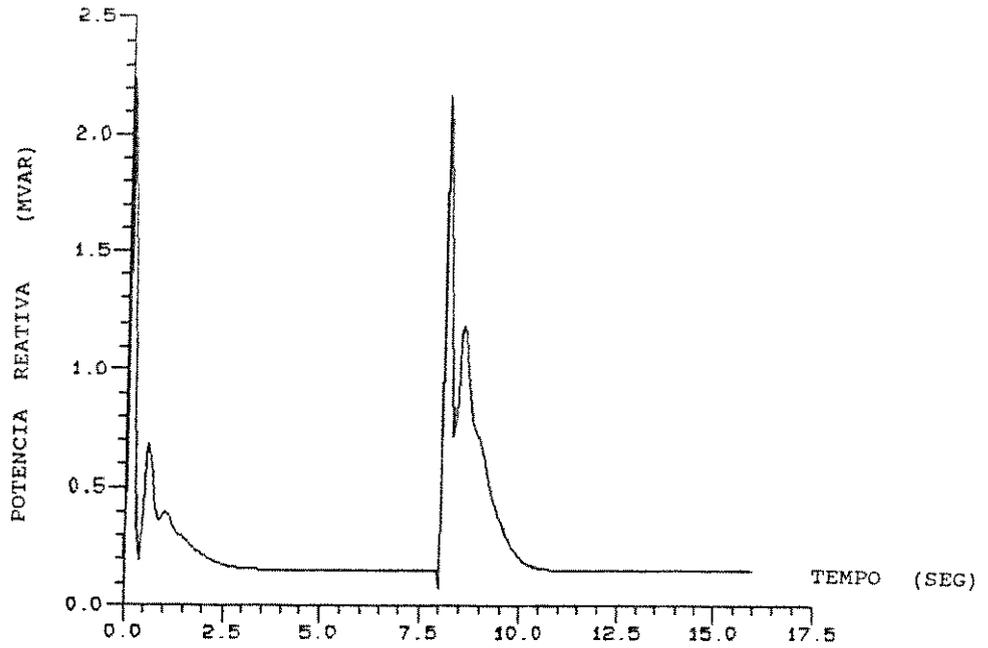


Figura 5.42 - Potência reativa da máquina de indução para o distúrbio #2.

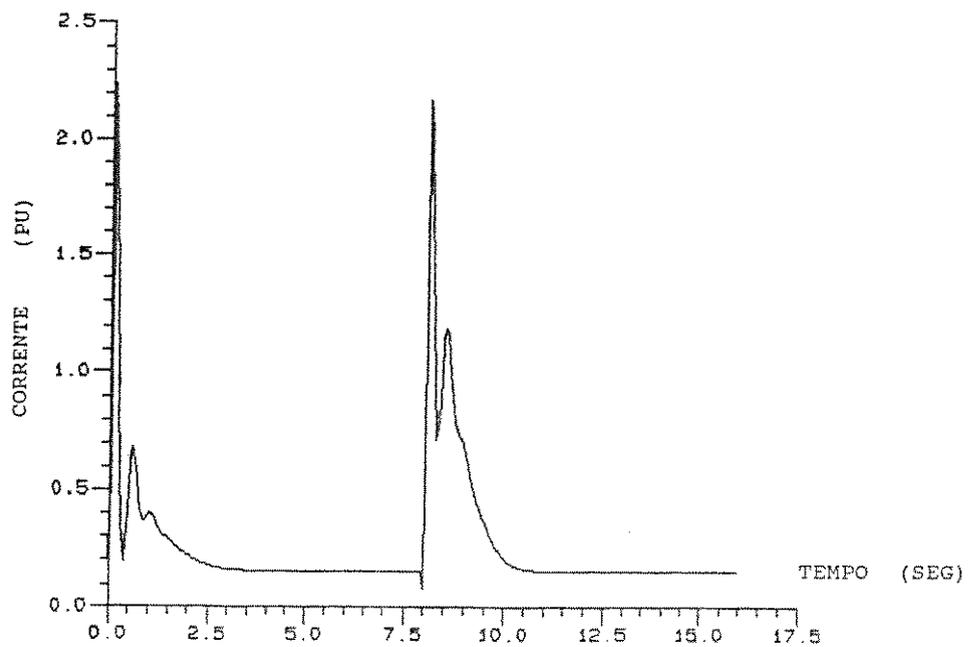


Figura 5.43 - Corrente terminal da máquina de indução para o distúrbio #2.

As figuras (5.44)-(5.49) mostram através da frequência, tensão, ângulo de carga, potência ativa, potência reativa e corrente terminal, respectivamente, o comportamento do gerador síncrono quando da ocorrência de uma variação de carga caracterizada pela retirada das barras 600,604 e 609 no instante 2.0 segundos (distúrbio #3), sem o auxílio da máquina de indução. As figuras (5.50)-(5.55) mostram as mesmas grandezas para o mesmo distúrbio, porém agora com a presença da máquina de indução. As figuras (5.56)-(5.60) mostram respectivamente, escorregamento, tensão, potência ativa, potência reativa e corrente terminal da máquina de indução auxiliar.

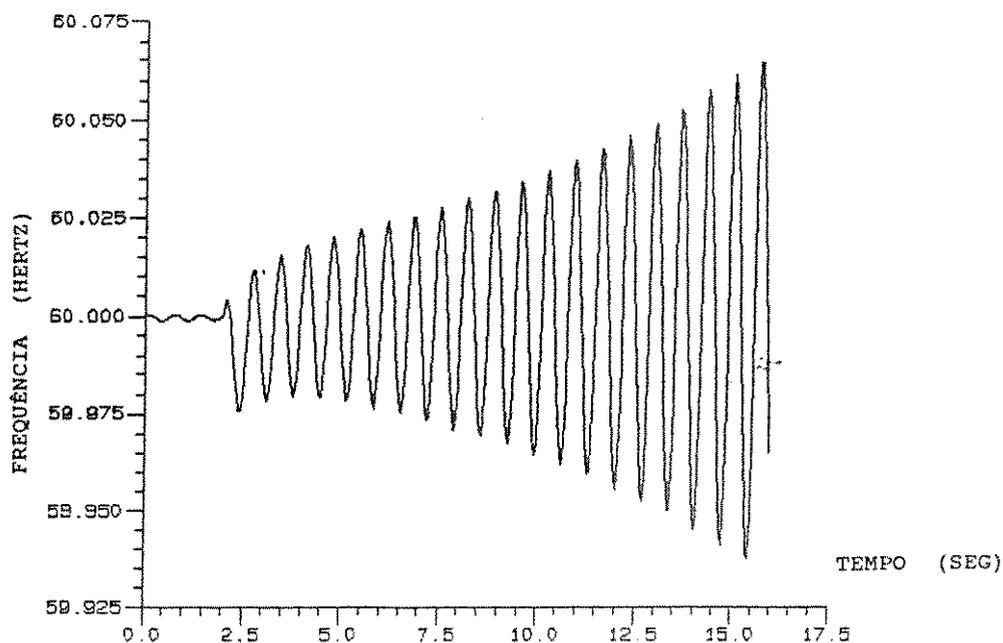


Figura 5.44 - Frequência da máquina síncrona para o distúrbio #3 sem a presença da máquina de indução.

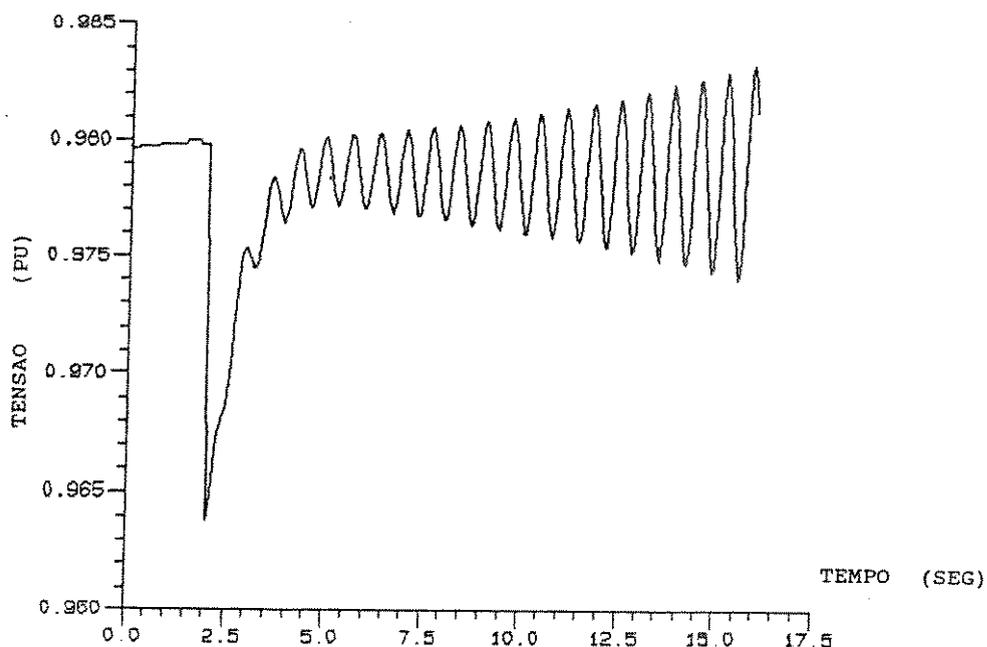


Figura 5.45 - Tensão terminal da máquina síncrona para o distúrbio #3 sem a presença da máquina de indução.

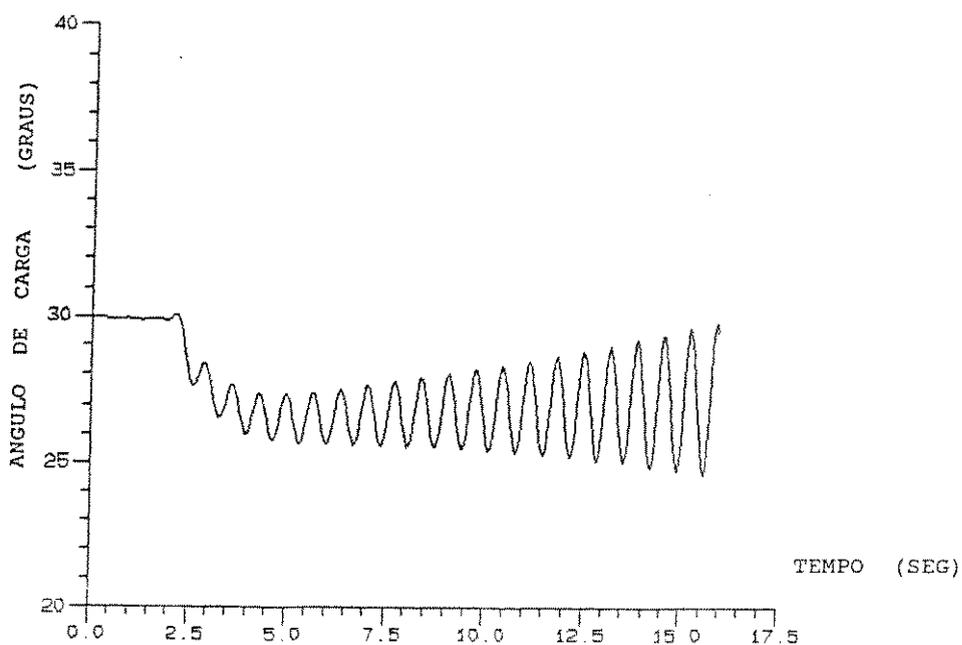


Figura 5.46 - Ângulo de carga da máquina síncrona para o distúrbio #3 sem a presença da máquina de indução.

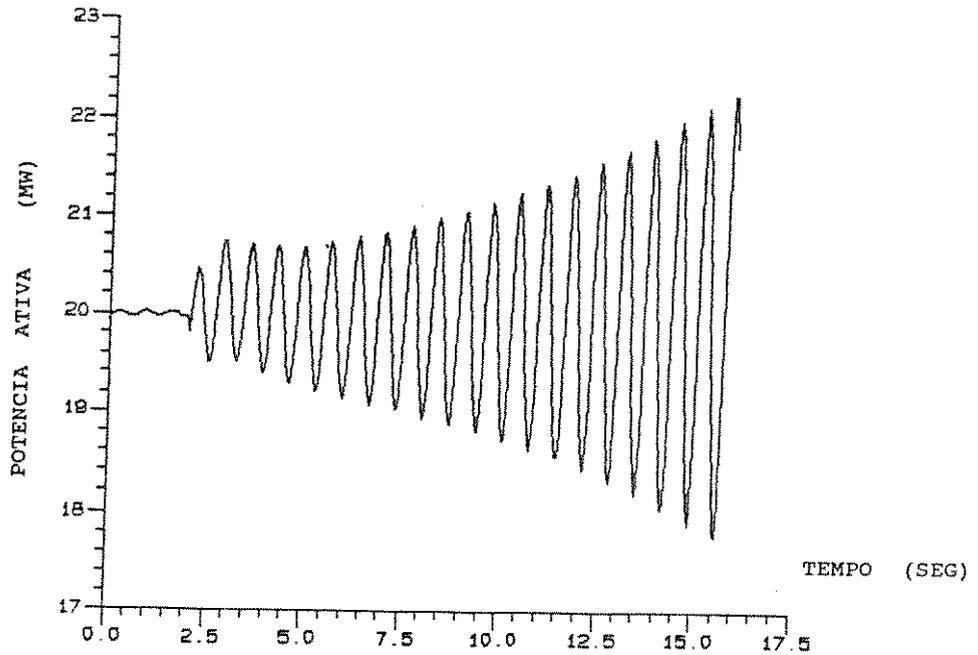


Figura 5.47 - Potência ativa da máquina síncrona para o distúrbio #3 sem a presença da máquina de indução.

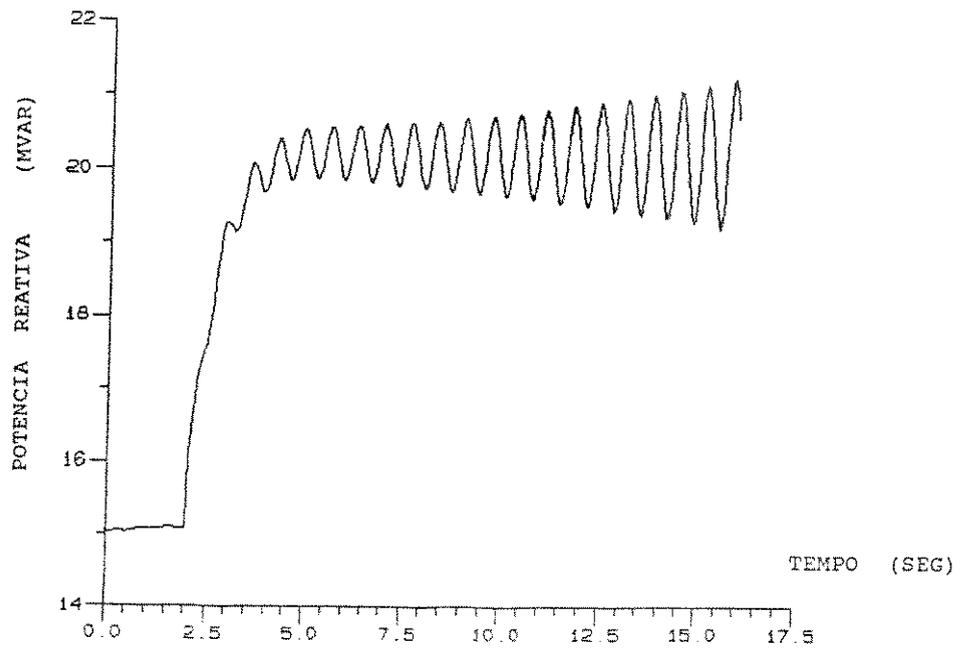


Figura 5.48 - Potência reativa da máquina síncrona para o distúrbio #3 sem a presença da máquina de indução.

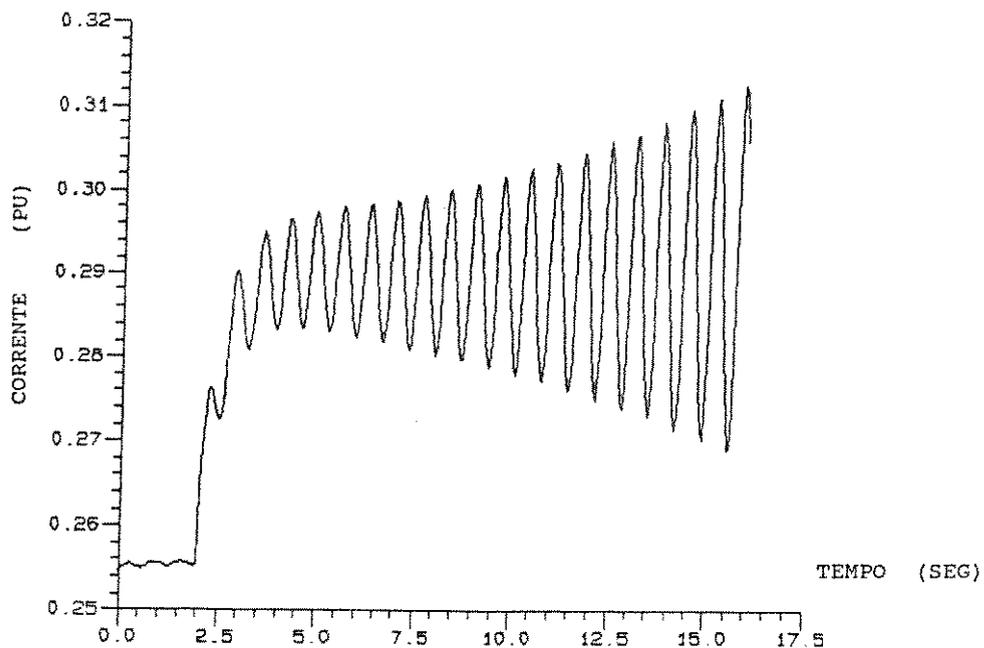


Figura 5.49 - Corrente terminal da máquina síncrona para o distúrbio #3 sem a presença da máquina de indução.

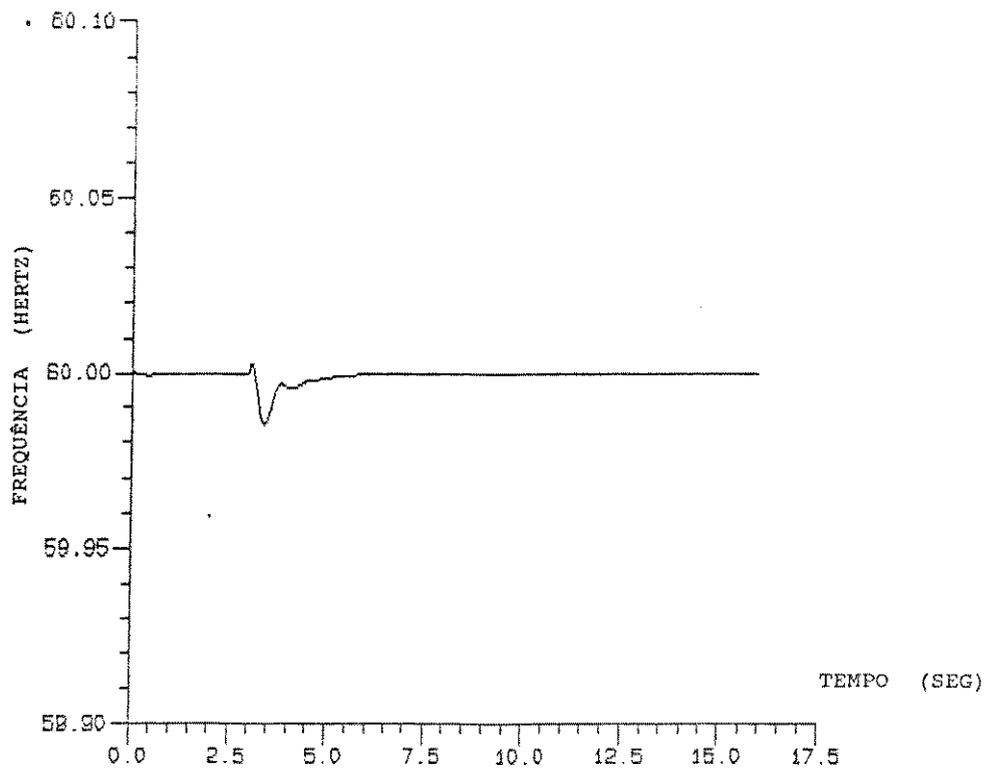


Figura 5.50 - Frequência da máquina síncrona para o distúrbio #3 com a presença da máquina de indução.

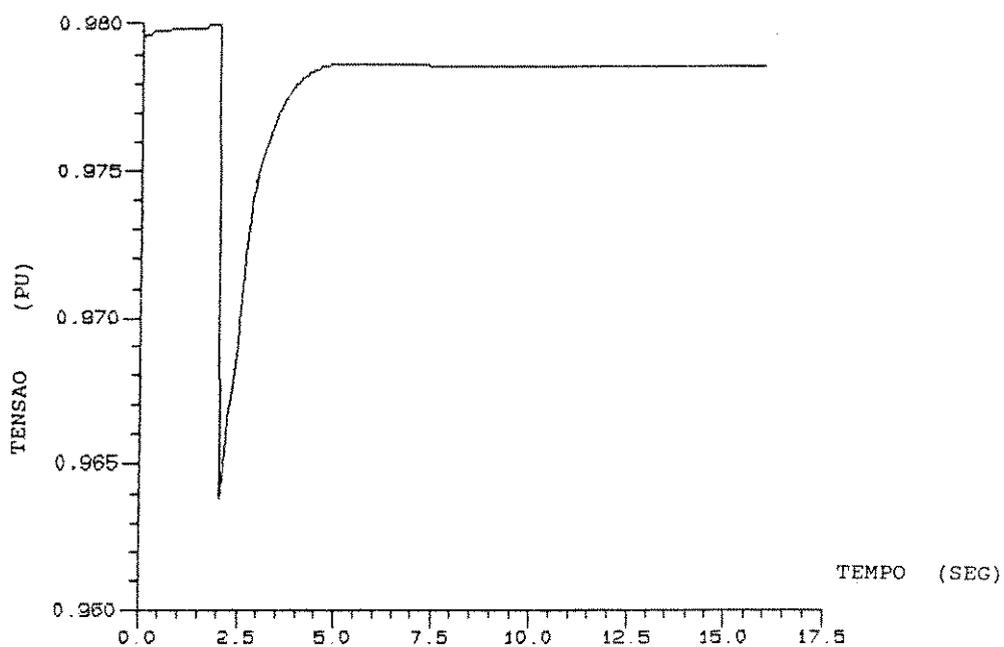


Figura 5.51 - Tensão terminal da máquina síncrona para o distúrbio #3 com a presença da máquina de indução.

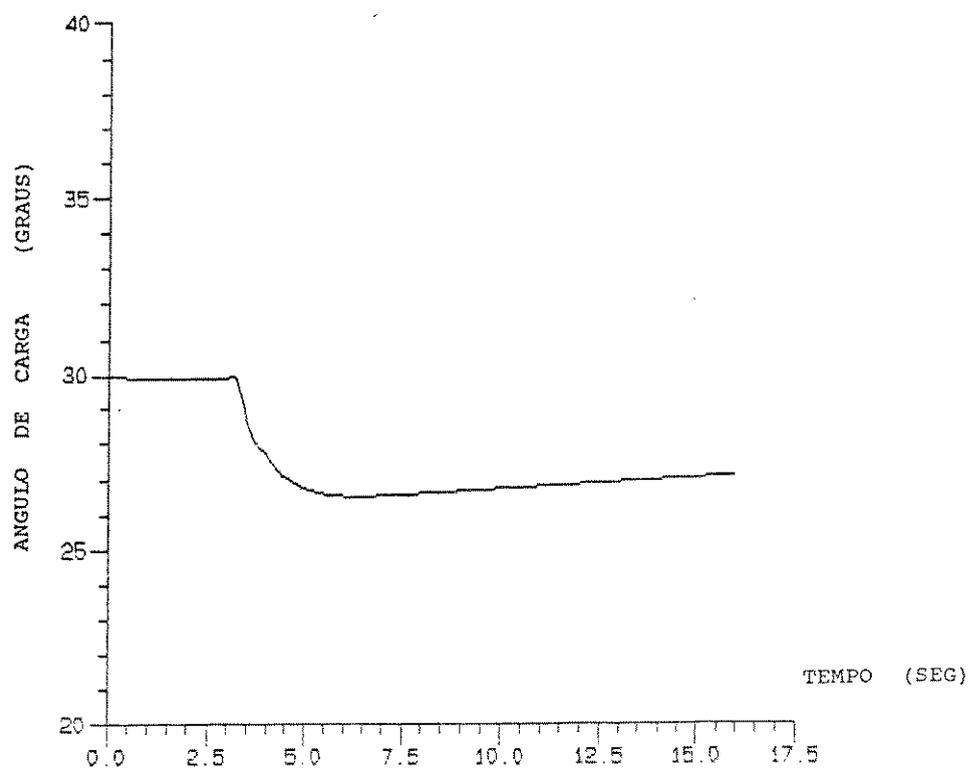


Figura 5.52 - Ângulo de carga da máquina de indução para o distúrbio #3 com a presença da máquina de indução.

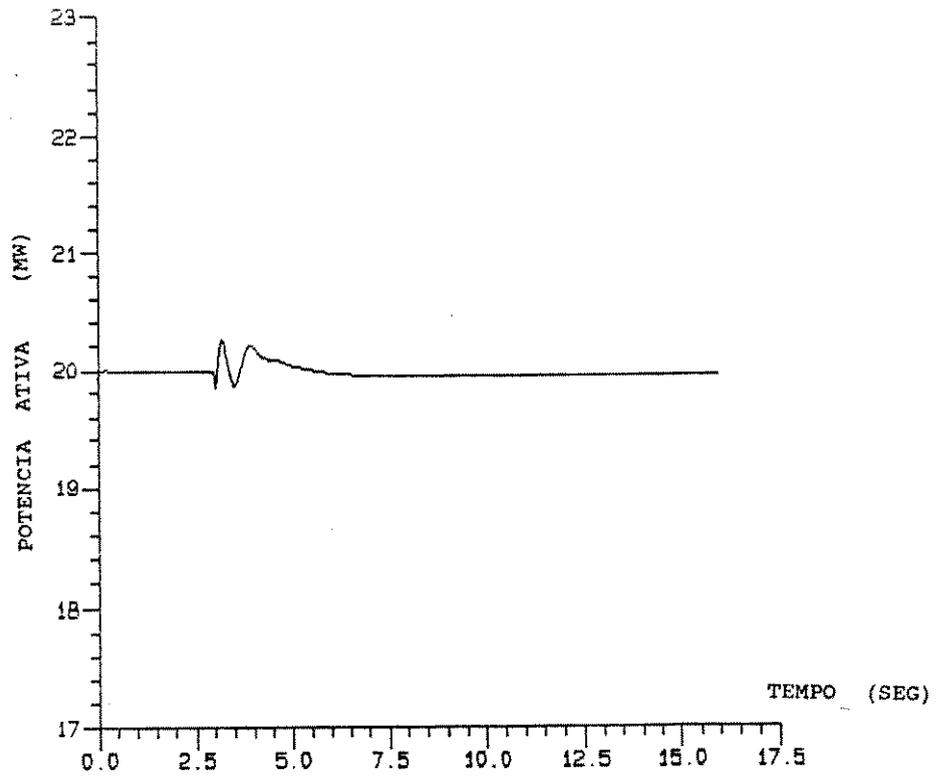


Figura 5.53 - Potência ativa da máquina síncrona para o distúrbio #3 com a presença da máquina de indução.

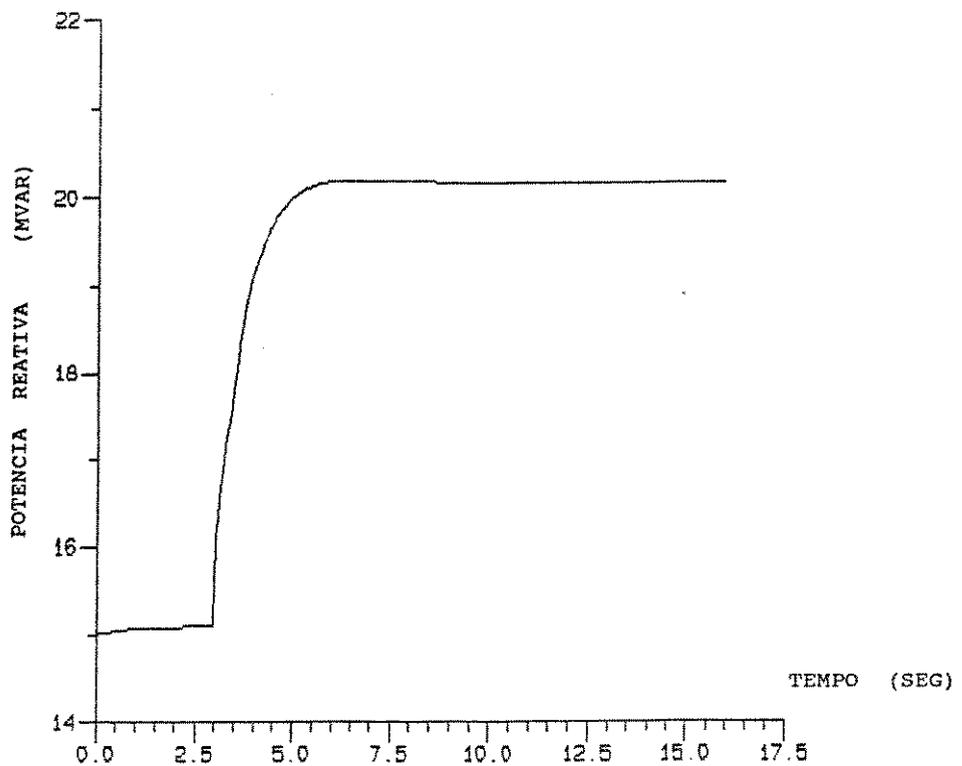


Figura 5.54 - Potência reativa da máquina síncrona para o distúrbio #3 com a presença da máquina de indução.

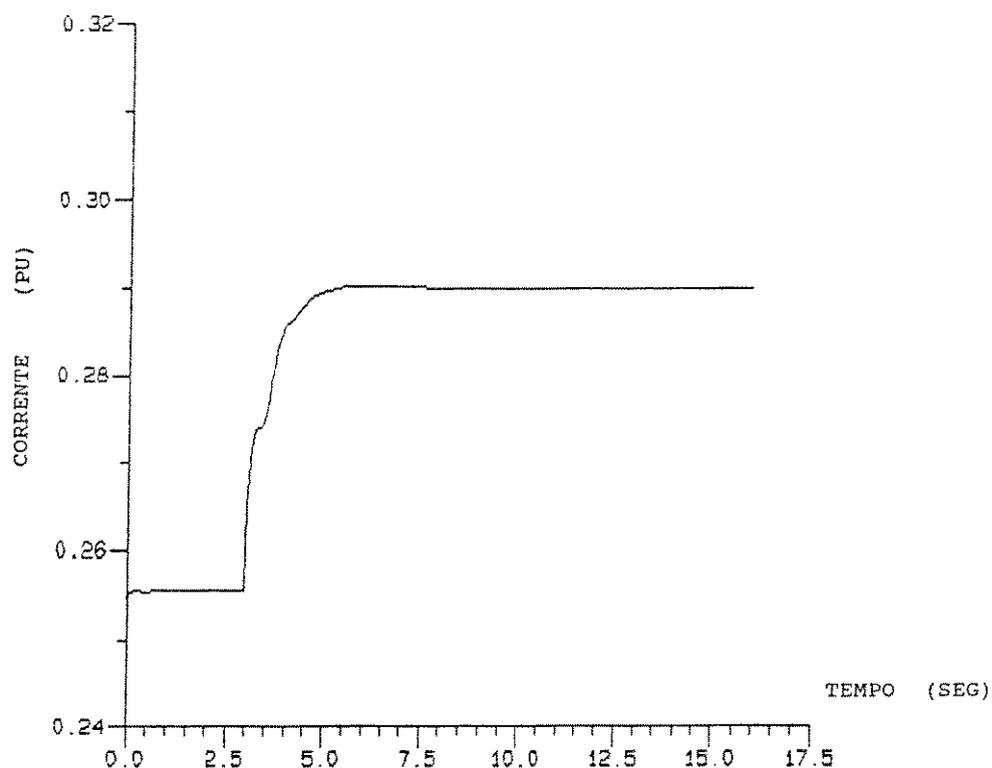


Figura 5.55 - Corrente terminal da máquina síncrona para o distúrbio #3 com a presença da máquina de indução.

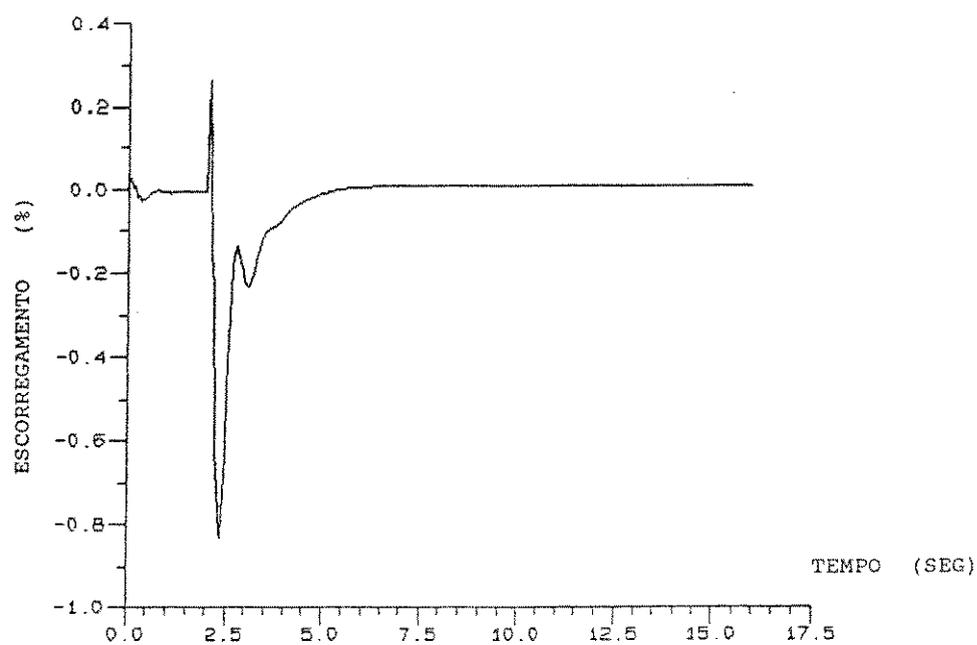


Figura 5.56 - Escorregamento da máquina de indução para o distúrbio #3.

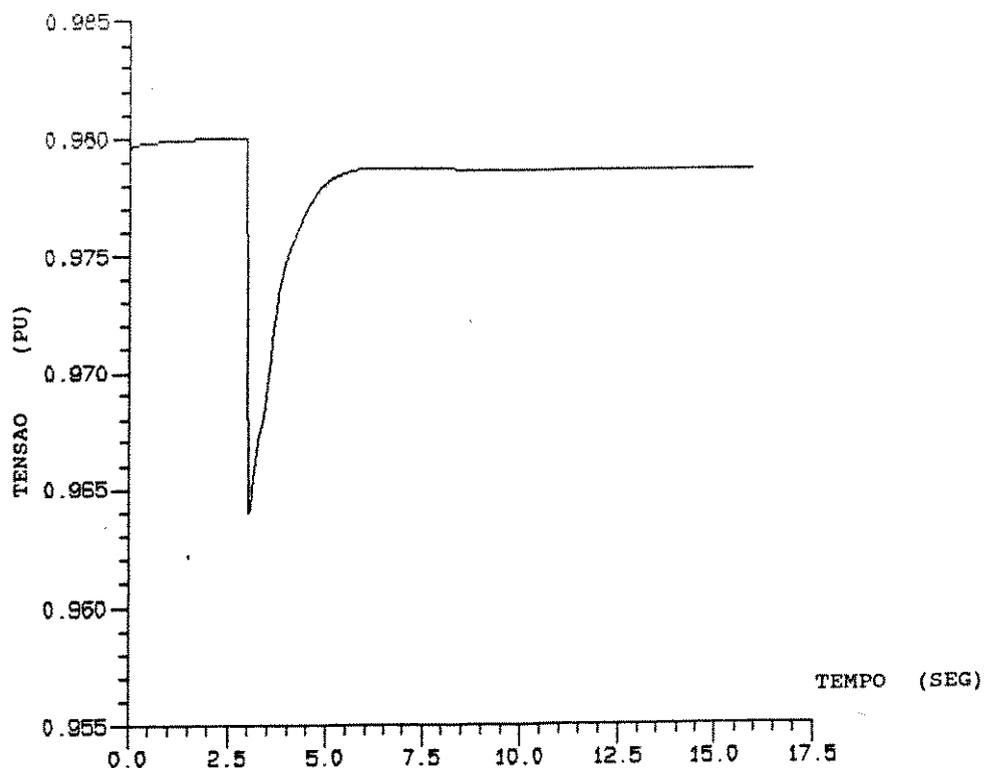
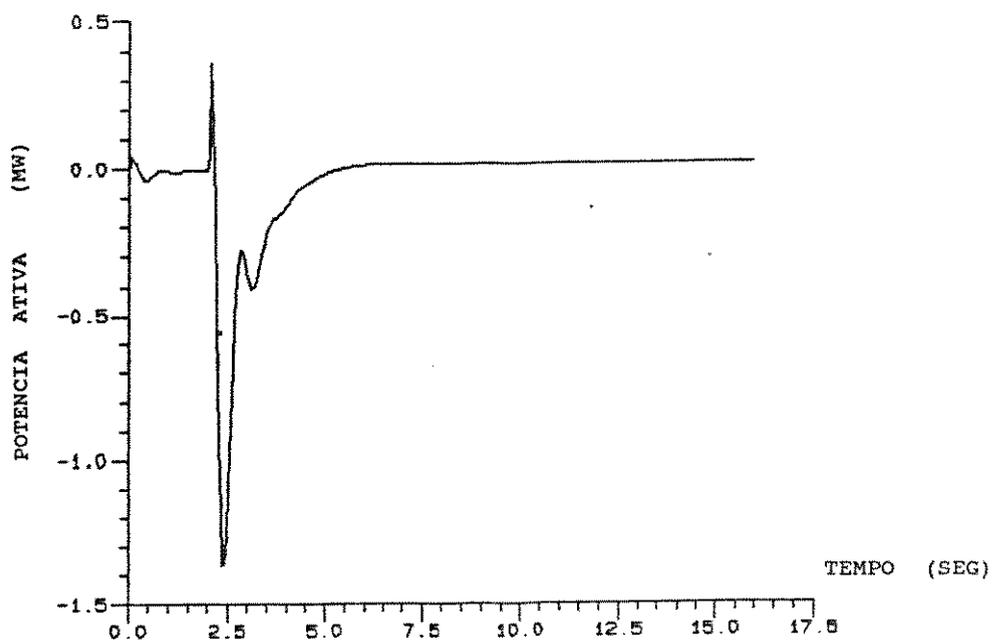


Figura 5.57 - Tensão da máquina de indução para o distúrbio #3.



MQ1 - BARRA: BARRA612 - MAQUINA: 1 - POTENCIA ATIVA x TEMPO

Figura 5.58 - Potência ativa da máquina de indução para o distúrbio #3.

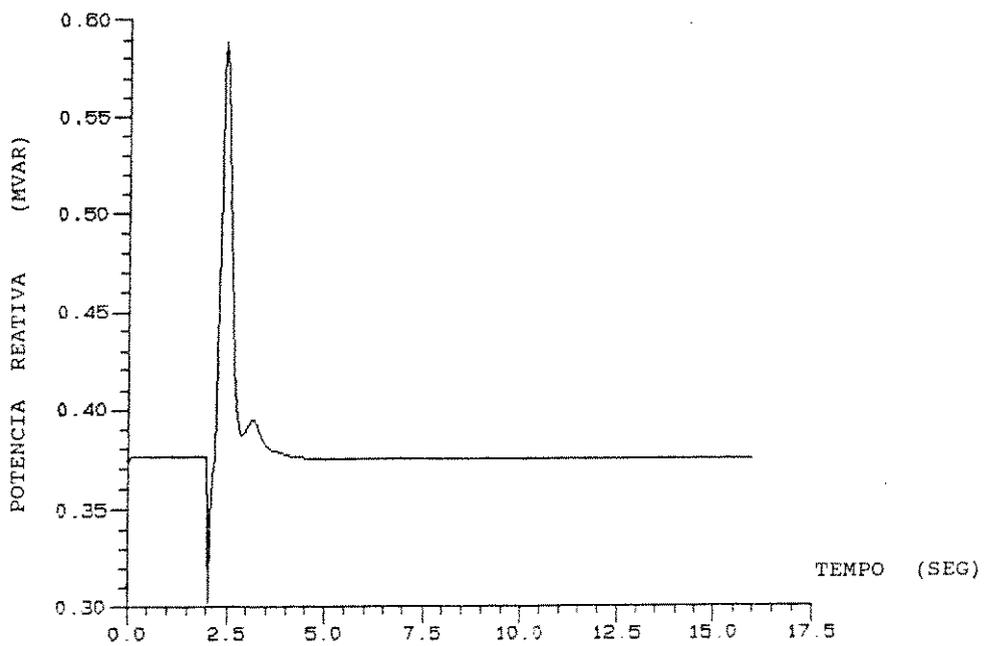


Figura 5.59 - Potência reativa da máquina de indução para o distúrbio #3.

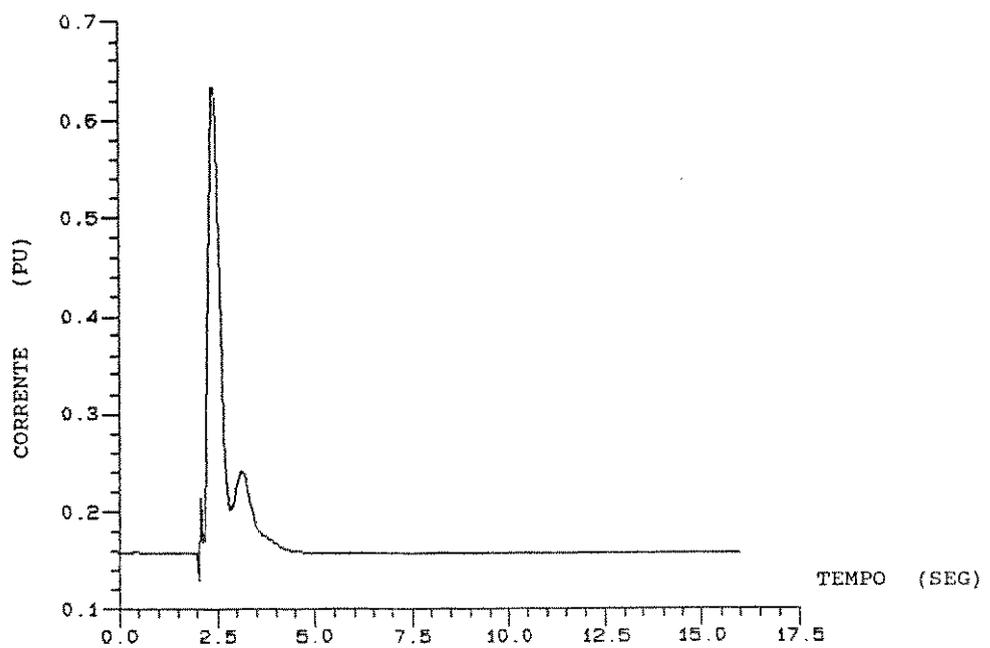


Figura 5.60 - Corrente terminal da máquina de indução para o distúrbio #3.

5.12 - Comentários e conclusões

Antes de comentar os resultados das simulações que de antemão podem ser julgados satisfatórios, deve-se observar alguns aspectos no que se refere aos parâmetros dos reguladores de velocidade, tanto do gerador síncrono, como da máquina de indução. Os melhores parâmetros foram determinados após uma série de simulações, uma vez que se não escolhidos convenientemente, pode-se chegar a resultados totalmente fora das condições aceitáveis de operação. A tabela 5.2 mostra os parâmetros dos reguladores utilizados nas simulações.

Através dos resultados obtidos nas simulações pode-se concluir que a idéia é pertinente e que os objetivos propostos foram alcançados, ou seja pode-se observar que não houve oscilações no gerador síncrono com a ajuda da máquina de indução. Deve-se observar também que ela atua somente nos períodos transitórios, estando no regime permanente flutuando na barra.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DO DESEMPENHO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO EM FUNÇÃO DE SEUS
PARÂMETROS E DE SUA POTÊNCIA COM RELAÇÃO A POTÊNCIA
DA MÁQUINA SÍNCRONA

6.1 - Introdução

O desempenho de uma máquina de indução em operação normal no sistema sofre grande influência de seus parâmetros nos regimes transitórios: principalmente da reatância transitória X' e da constante de tempo a circuito aberto To' . Em termos de estudo dinâmico sabe-se que a estabilidade da máquina de indução aumenta com a diminuição de X' ou com o aumento de To' [24]. A constante de inércia H também tem influência na estabilidade da máquina, que se torna maior para maiores valores de H . A resistência de estator R_1 pode ser desprezada em estudos de estabilidade sem nenhuma alteração sensível nas simulações, podendo-se concluir então que R_1 com pequenos valores tem pouca influência no comportamento dinâmico da máquina de indução. Desta forma neste trabalho; apesar da máquina de indução não se caracterizar por uma operação normal (como motor ou gerador em regime permanente), no entanto atuando normalmente nos períodos transitórios; é de interesse analisar seu desempenho para uma certa variação em seus parâmetros, observando sua influência nos efeitos causados na estabilidade do gerador síncrono. Salienta-se ainda que todos os dados aqui utilizados são reais,

ou seja são dados fornecidos pelo fabricante. Para o propósito deste trabalho pode ser que se conclua que o melhor desempenho da máquina de indução seja para parâmetros com valores fora daqueles fornecidos pelo fabricante; no entanto a idéia é mostrar que as máquinas convencionais que obviamente estão dentro de especificações que levam às suas melhores características de trabalho, também terão um bom desempenho para a finalidade desejada.

A máquina de indução a ser utilizada e já discutido seus objetivos, pode ser pequena comparada com o gerador síncrono. Isto porque não atuando em regime permanente, ou tendo apenas atuação nos transitórios, sua potencia deve ser suficiente apenas para suprir variações de carga (que normalmente são uma pequena porcentagem do gerador síncrono), além do que, o tempo de duração de um transitório é pequeno comparativamente com a operação em regime permanente, não tendo então problemas a máquina trabalhar com grandes sobrecargas, havendo é claro uma limitação para este processo. Por outro lado pode ser que uma máquina maior mostre melhor desempenho nos transitórios estudados; sendo então analisado também a influência da relação de potência da máquina de indução comparativamente com a potência do gerador síncrono, na estabilidade da barra em que se encontram as duas máquinas.

6.2 - Equações que relacionam os parâmetros e os valores utilizados na simulação

Foi visto no capítulo anterior as equações que relacionam os parâmetros de regime permanente com os parâmetros de regime transitório da máquina de indução:

$$X' = X_1 + \frac{X_2 X_m}{X_2 + X_m} \quad (6.1)$$

$$X_0 = X_m + X_1 \quad (6.2)$$

$$T_0' = \frac{X_2 + X_m}{2\pi f R_2} \quad (6.3)$$

$$pS = \frac{1}{2H} (T_e - T_m) \quad (6.4)$$

onde:

X_1 é a reatância do estator	(Ω)
X_2 é a reatância do rotor	(Ω)
X_m é a reatância magnetizante	(Ω)
S é o escorregamento do rotor	(Ω)
T_e é o torque elétrico	(Ω)
T_m é o torque mecânico	(Ω)
p é o operador d/dt	

Foi mostrado também no capítulo anterior uma tabela com valores de parâmetros em regime permanente da máquina de indução para vários valores de potência. Nas simulações realizadas neste capítulo os valores dos parâmetros que estão em "pu" utilizam os valores base da máquina. São os mesmos utilizados nas simulações anteriores, sendo tirados portanto de

um sistema real e mostrados na tabela 6.1.

X_0 (pu)	X' (pu)	T_0' (seg)	R_1 (pu)	H (Mj/MVA)
6.13	0.2572	1.355	0.006	0.002

Tabela 6.1 - Valores de parâmetros da máquina de indução

6.3 - Resultados das simulações mostrando a influência dos parâmetros da máquina de indução

Os resultados que se seguem mostram a influência dos parâmetros da máquina de indução na estabilidade do gerador síncrono. Serão vistos inicialmente resultados de simulações onde uma máquina de indução com valores de parâmetros reais (fornecidos pelo fabricante) atua melhorando a estabilidade do gerador síncrono; como já foi observado no capítulo anterior. Posteriormente serão variados os valores dos parâmetros observando-se o comportamento de ambas as máquinas para o mesmo transitório aplicado ao sistema. Os valores da tabela 6.1 serão referidos no restante do capítulo como originais.

Os gráficos mostrados nas figuras (6.1)-(6.2) mostram frequência e tensão do gerador síncrono, quando ocorre o distúrbio #3, descrito no capítulo anterior, com a ausência da máquina de indução. Os gráficos das figuras (6.3)-(6.4) mostram frequência e tensão do gerador síncrono, para o mesmo distúrbio, porém agora com a presença da máquina de indução na barra. Os

gráficos das figuras (6.5)-(6.6) mostram o escorregamento e a potência ativa da máquina de indução que auxilia o gerador. Os parâmetros da máquina de indução são neste caso:

$T_0'(\text{orig}) \leq T_0' \leq 1.5 T_0'(\text{orig})$; com os outros parâmetros ctes.
ou

$0.5 X'(\text{orig}) \leq X' \leq X'(\text{orig})$; com os outros parâmetros ctes.
ou

$0.0 \leq R_1 \leq R_1(\text{orig})$; com os outros parâmetros constantes.
ou

$0.0 \leq H \leq H(\text{orig})$; com os outros parâmetros constantes.

ou seja; o resultado da simulação mostrado a seguir é praticamente o mesmo para valores de parâmetros dentro da faixa de variação mostrada acima.

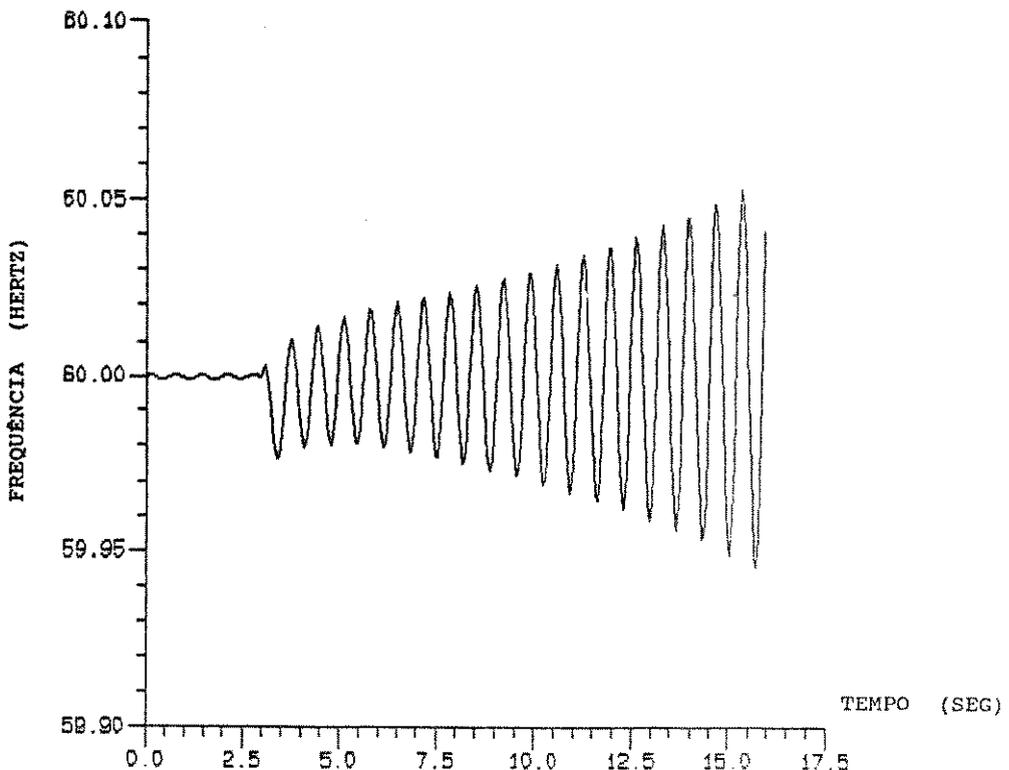


Figura 6.1 - Frequência do gerador síncrono para um dado distúrbio com a máquina de indução ausente.

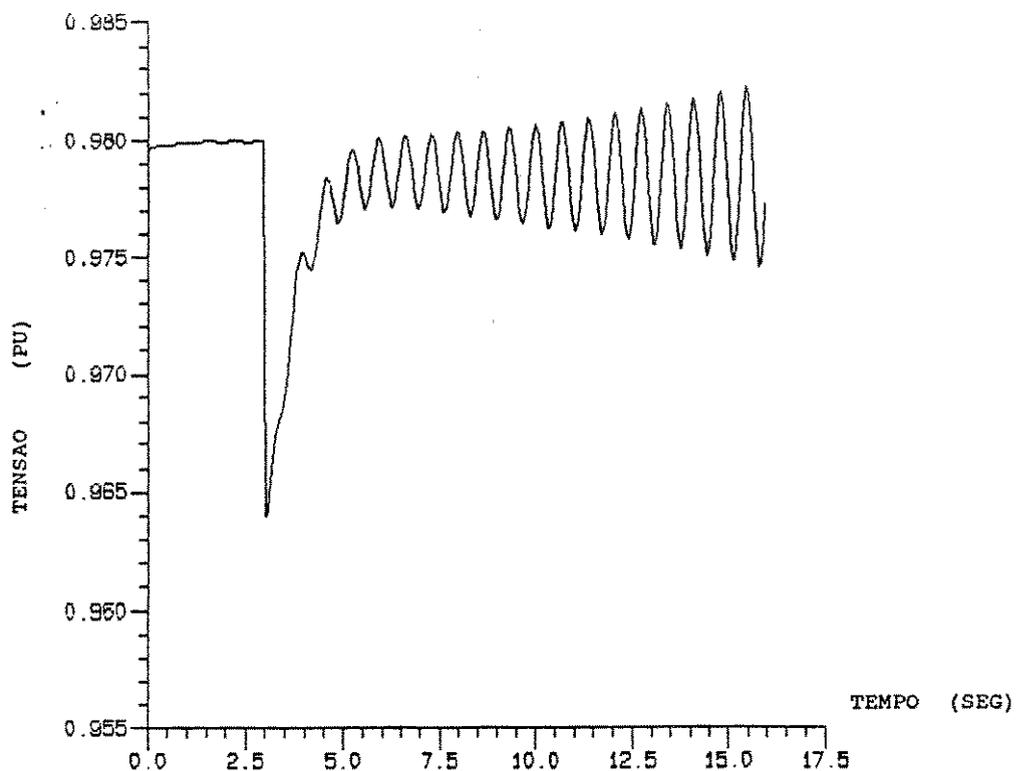


Figura 6.2 - Tensão do gerador síncrono para um dado distúrbio com a máquina de indução ausente

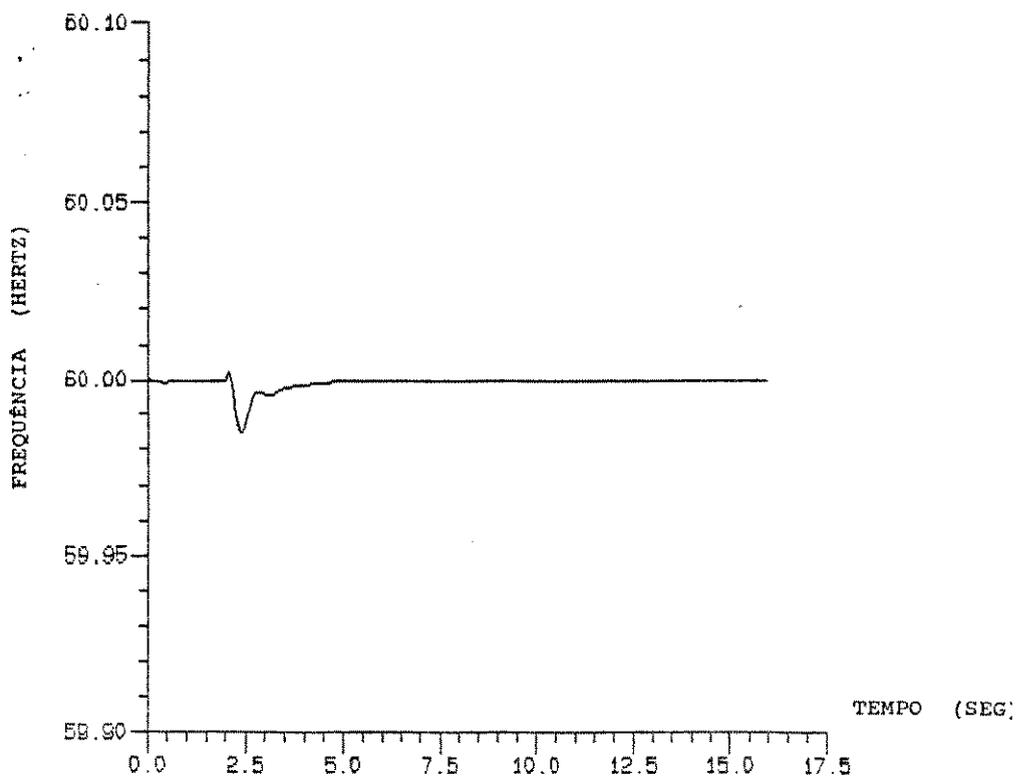


Figura 6.3 - Frequência do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução.

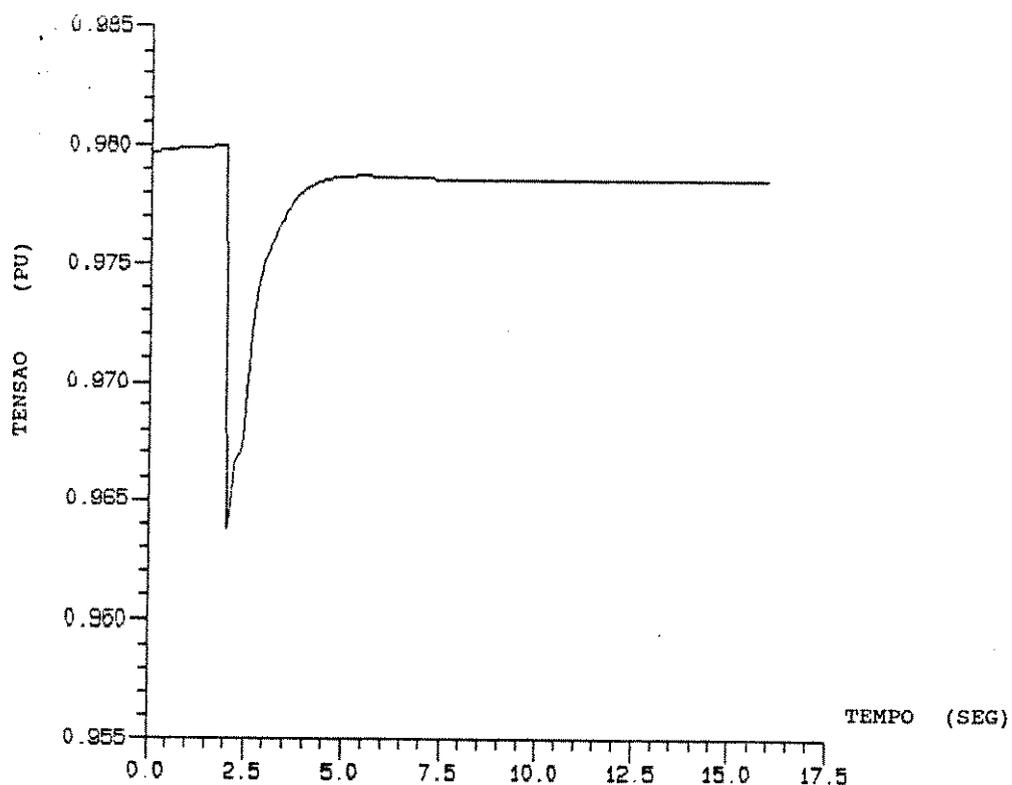


Figura 6.4 - Tensão do gerador síncrono para um dado distúrbio com a máquina de indução presente

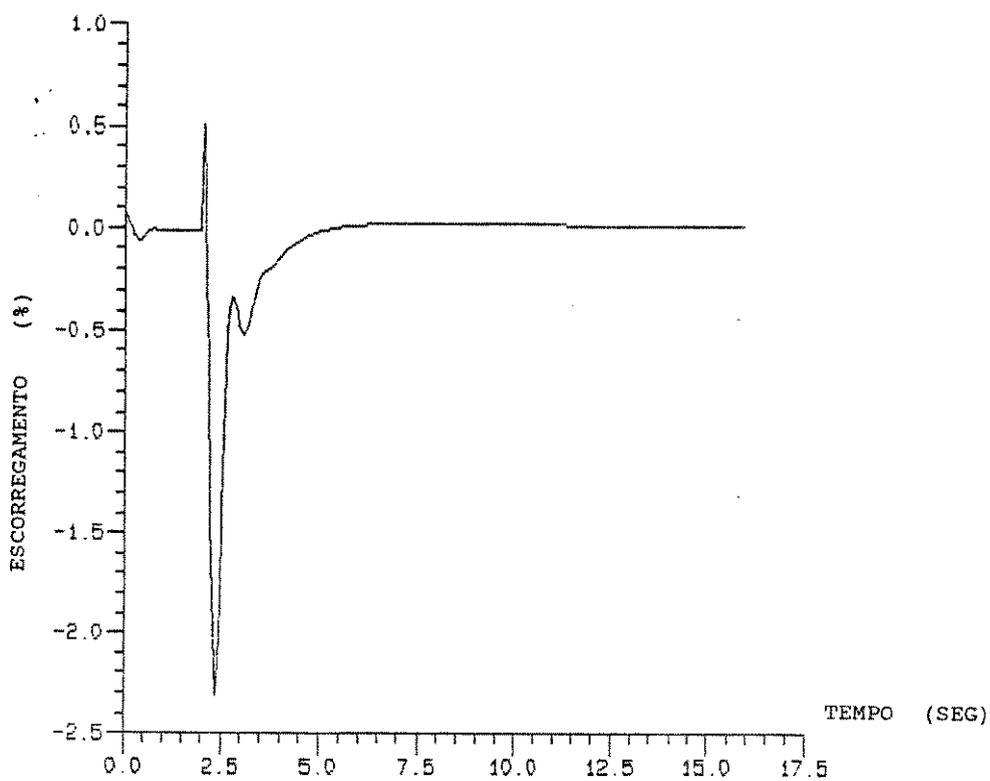


Figura 6.5 - Escorregamento da máquina de indução que auxilia o gerador síncrono.

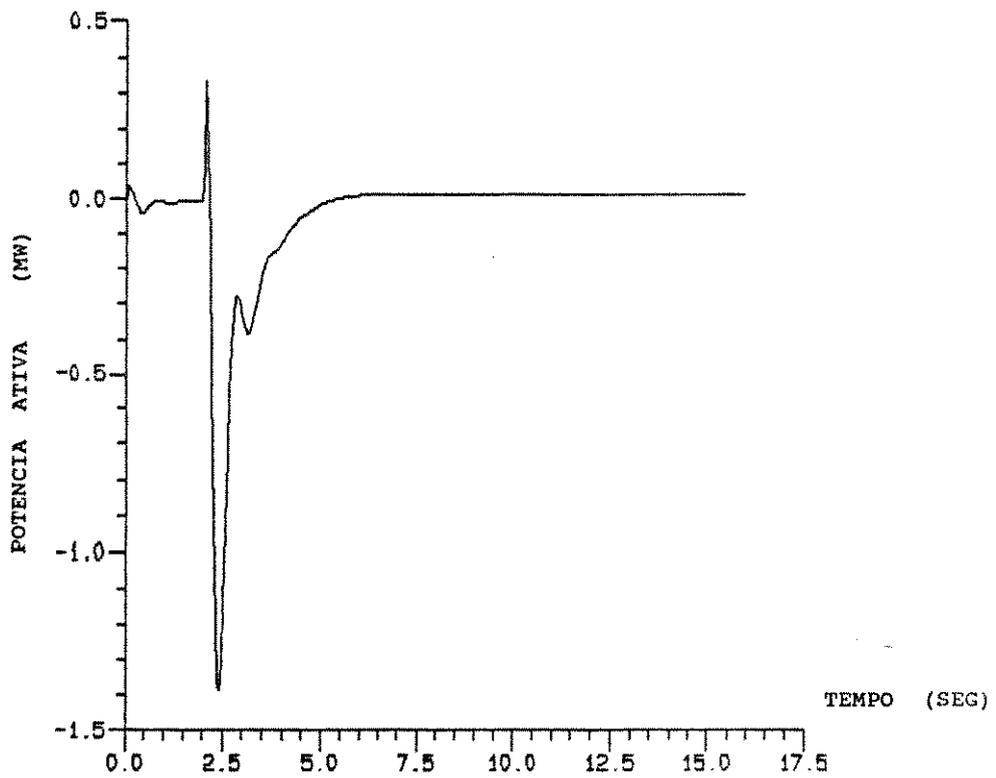


Figura 6.6 - Potência ativa da máquina de indução que auxilia o gerador síncrono.

As figuras (6.7)-(6.10) mostram respectivamente frequência e tensão do gerador síncrono, e escorregamento e potência ativa da máquina de indução para a condição:

$$0.4 T_o'(\text{orig}) \leq T_o' \leq 0.8 T_o'(\text{orig})$$

e o restante dos parâmetros com seus valores originais.

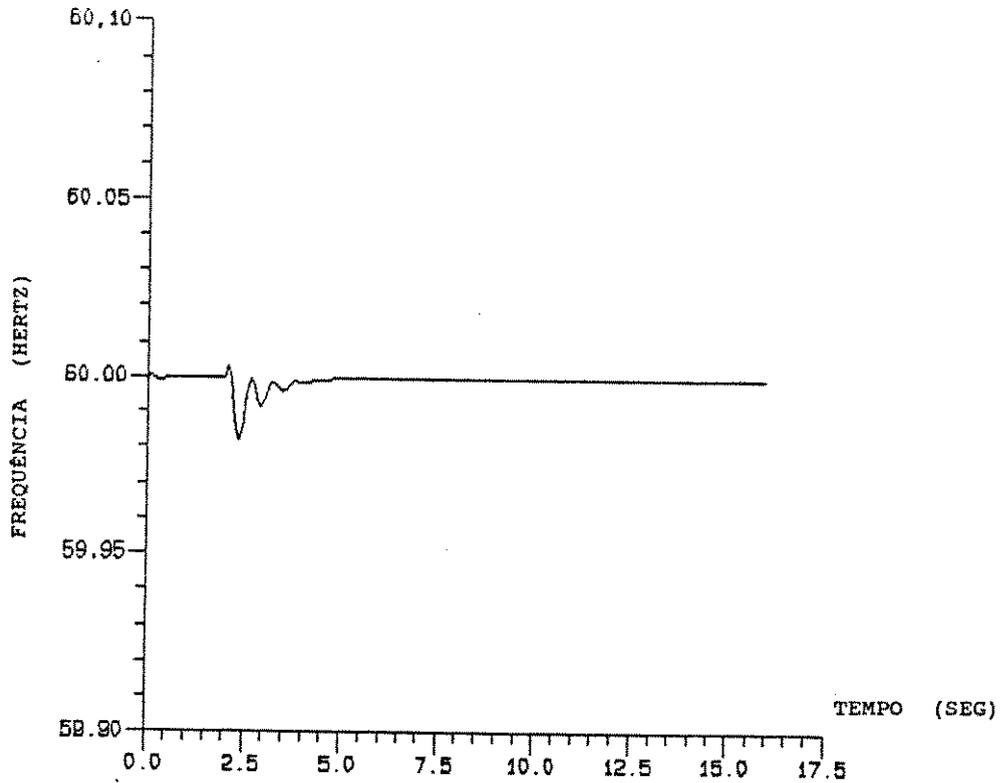


Figura 6.7 - Frequência do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $0.4 T_o'(\text{orig}) \leq T_o' \leq 0.8 T_o'(\text{orig})$

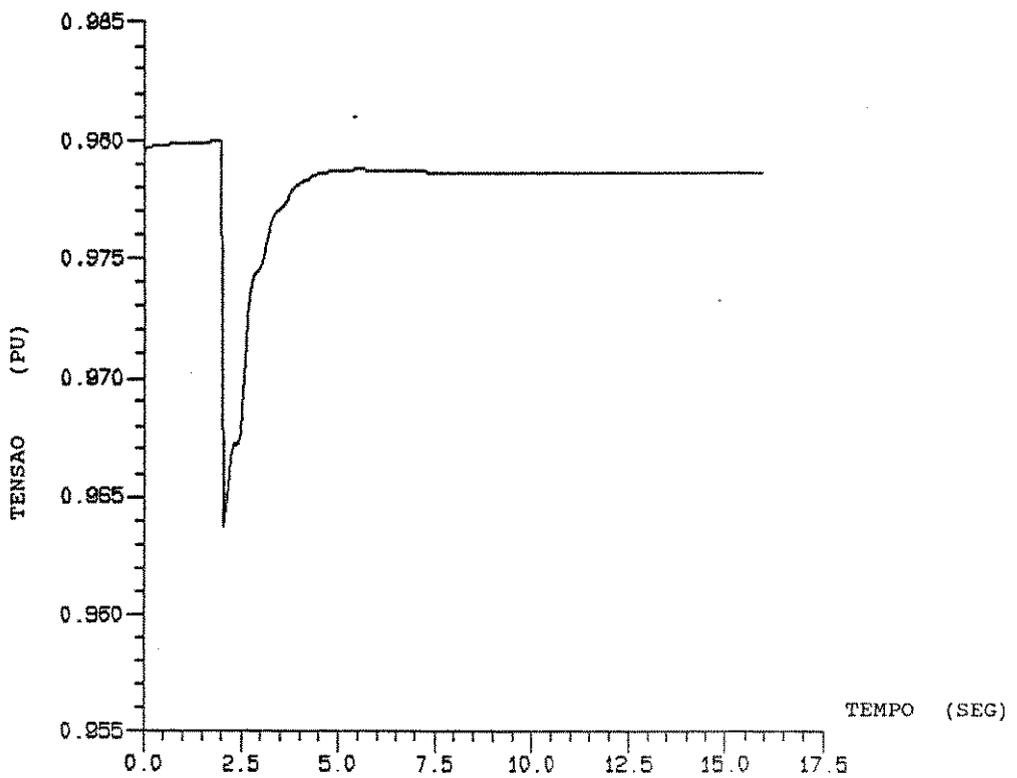


Figura 6.8 - Tensão do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $0.4 T_o'(\text{orig}) \leq T_o' \leq 0.8 T_o'(\text{orig})$

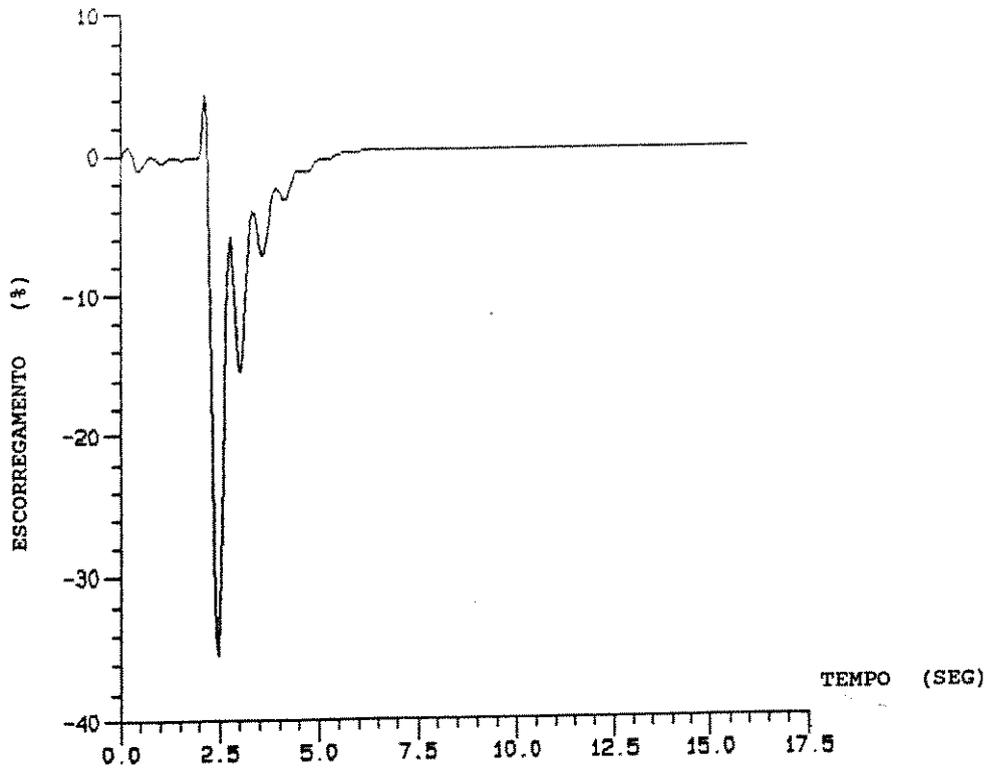


Figura 6.9 - Escorregamento da máquina de indução com $0.4 T_o' \leq T_o' \leq 0.8 T_o'$

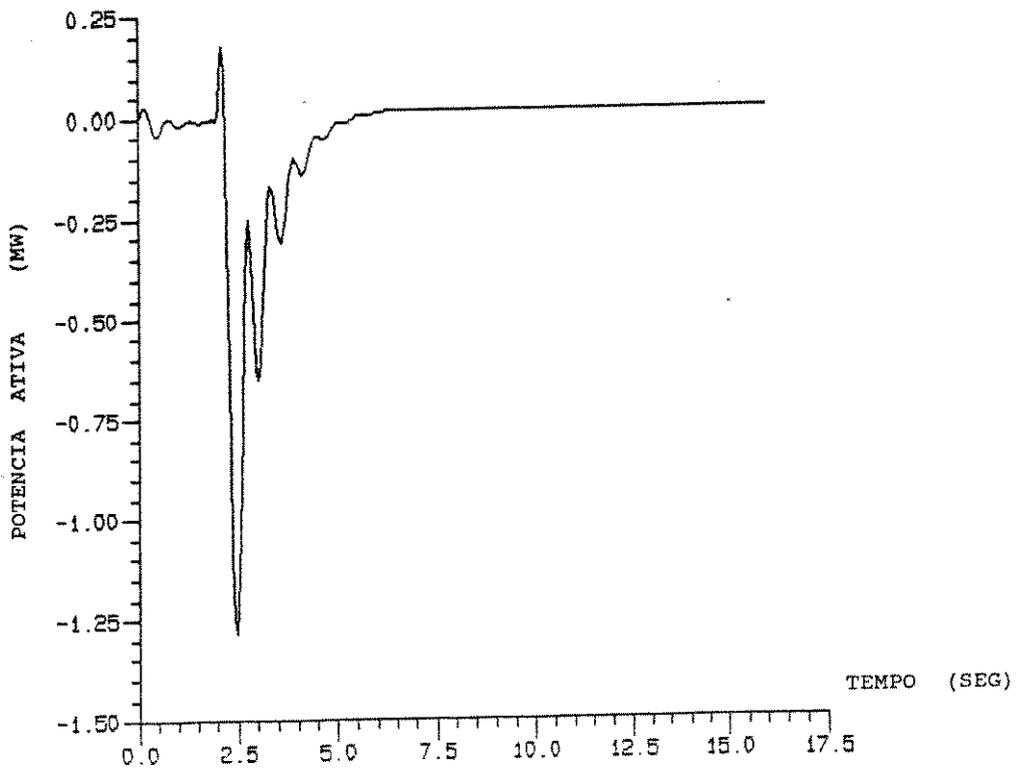


Figura 6.10 - Potência ativa da máquina de indução com $0.4 T_o' \leq T_o' \leq 0.8 T_o'$

As figuras (6.11)-(6.14) mostram respectivamente a frequência e tensão do gerador síncrono, e escorregamento e potência ativa da máquina de indução para a condição:

$$T_o' \leq 0.1 T_o'(\text{orig})$$

e o restante dos parâmetros com seus valores originais.

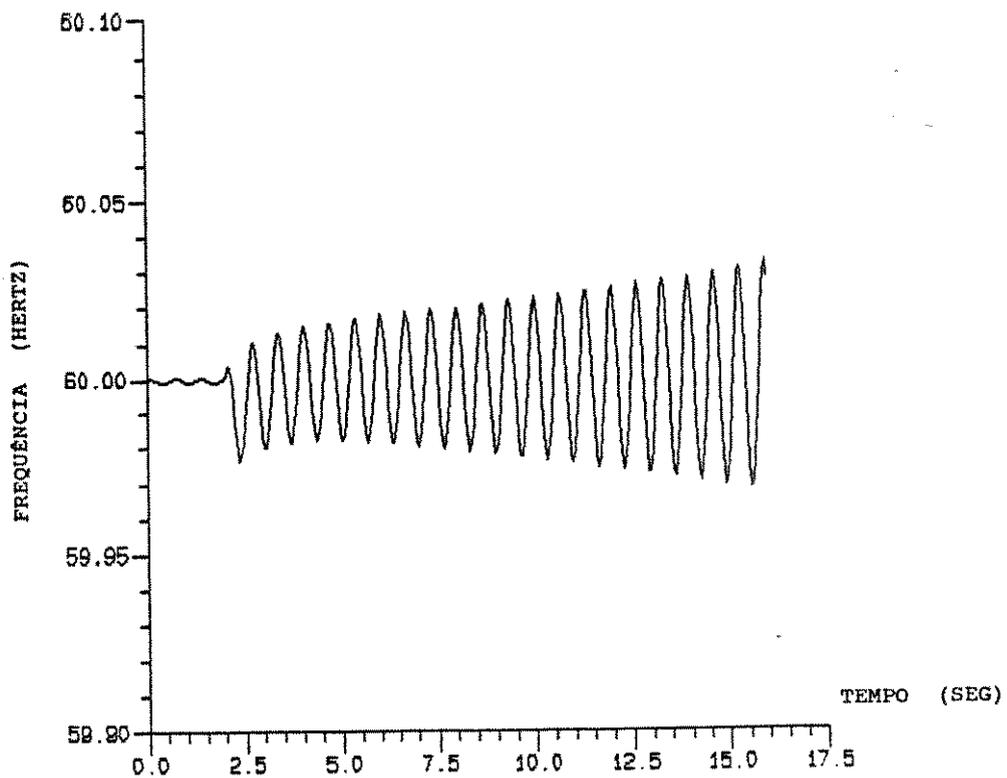


Figura 6.11 - Frequência do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $T_o' \leq 0.1 T_o'(\text{orig})$

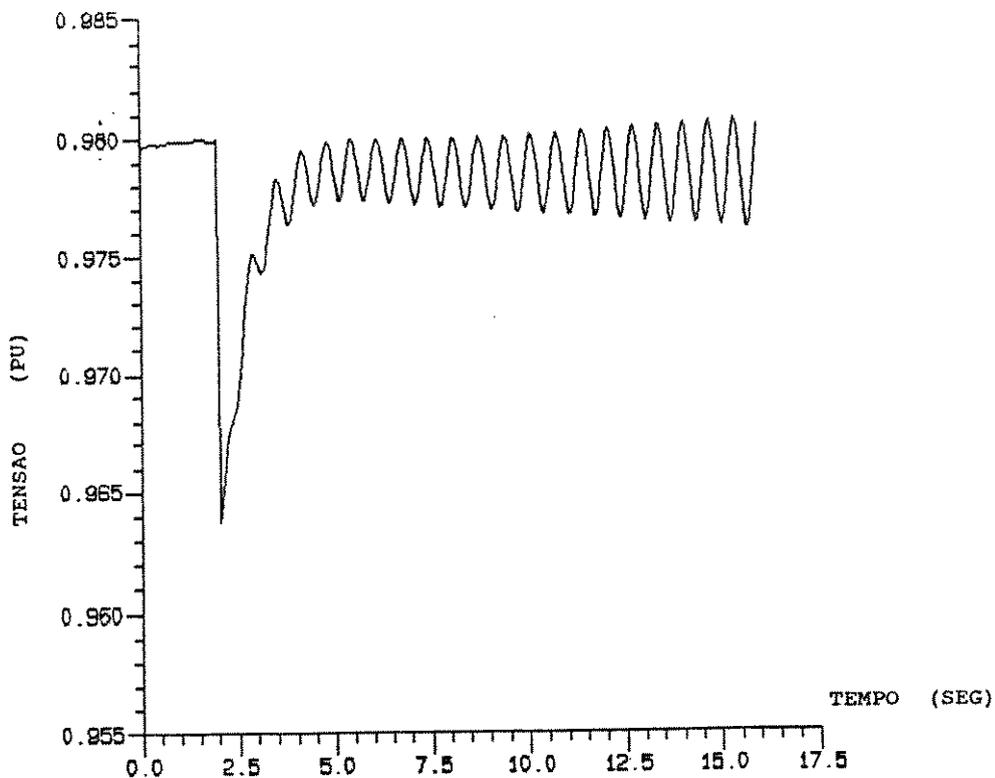


Figura 6.12 - Tensão do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $T_{o'} \leq 0.1 T_{o'}(\text{orig})$

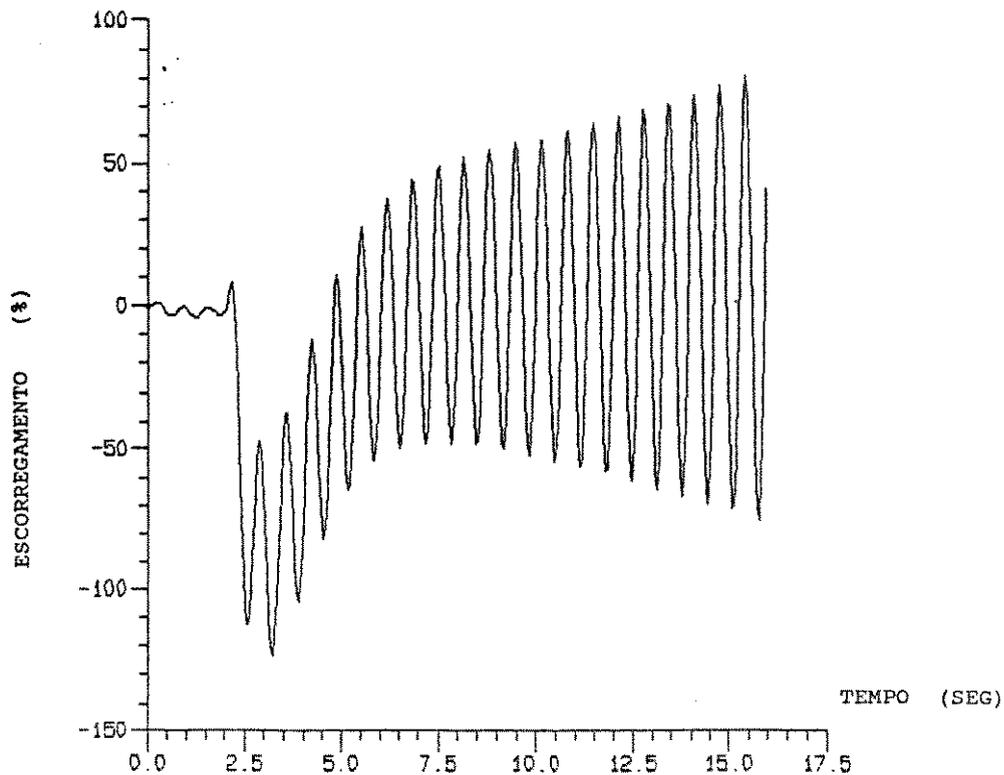


Figura 6.13 - Escorregamento da máquina de indução com $T_{o'} \leq 0.1 T_{o'}(\text{orig})$

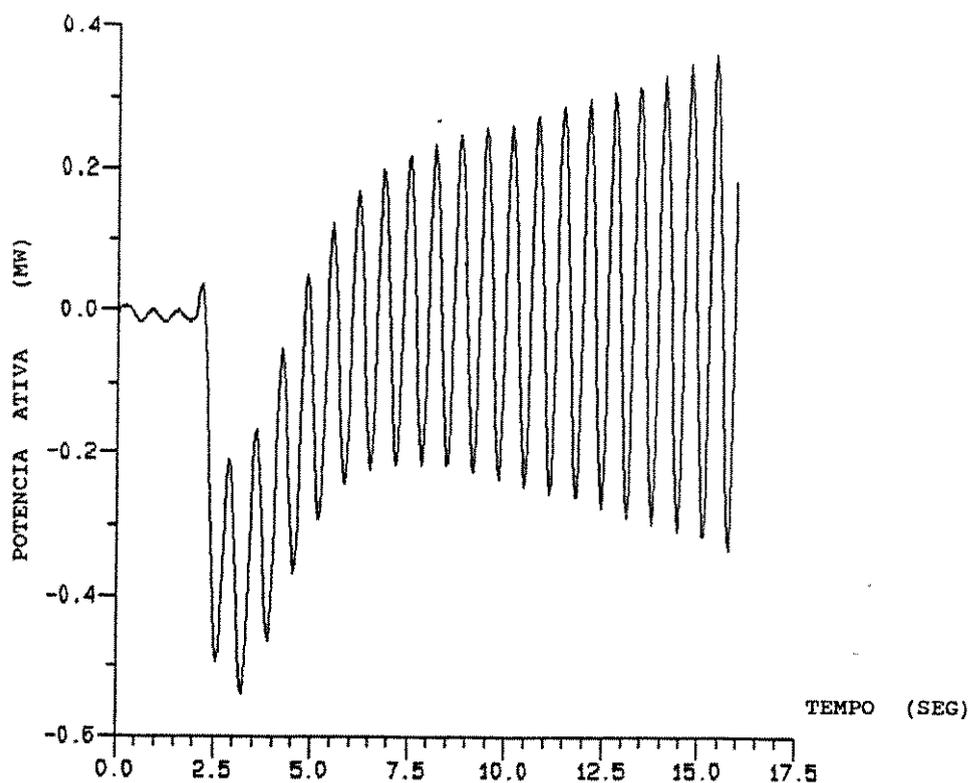


Figura 6.14 - Potência ativa da máquina de indução com $T_0' \leq 0.1 T_0'(\text{orig})$

As figuras (6.15)-(6.18) mostram respectivamente a frequência e tensão do gerador síncrono, e escorregamento e potência ativa da máquina de indução para a condição:

$$T_0' \geq 5.0 T_0'(\text{orig})$$

e os outros parâmetros com seus valores originais.

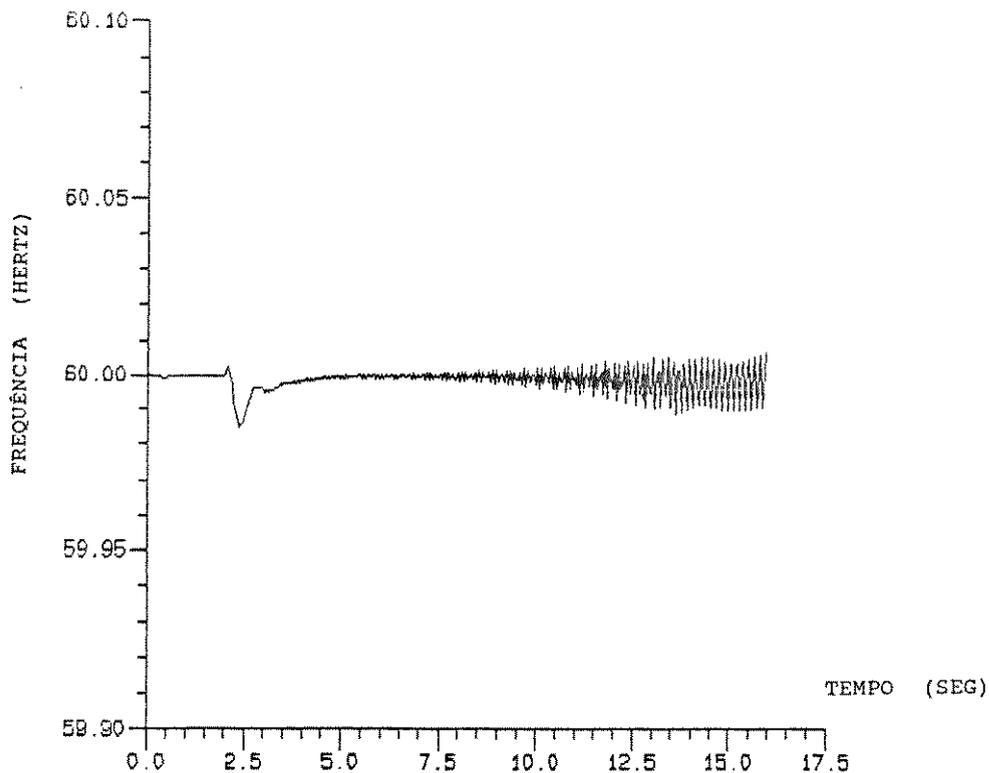


Figura 6.15 - Frequência do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $T_{o'} \geq 5.0 T_{o'}(\text{orig})$

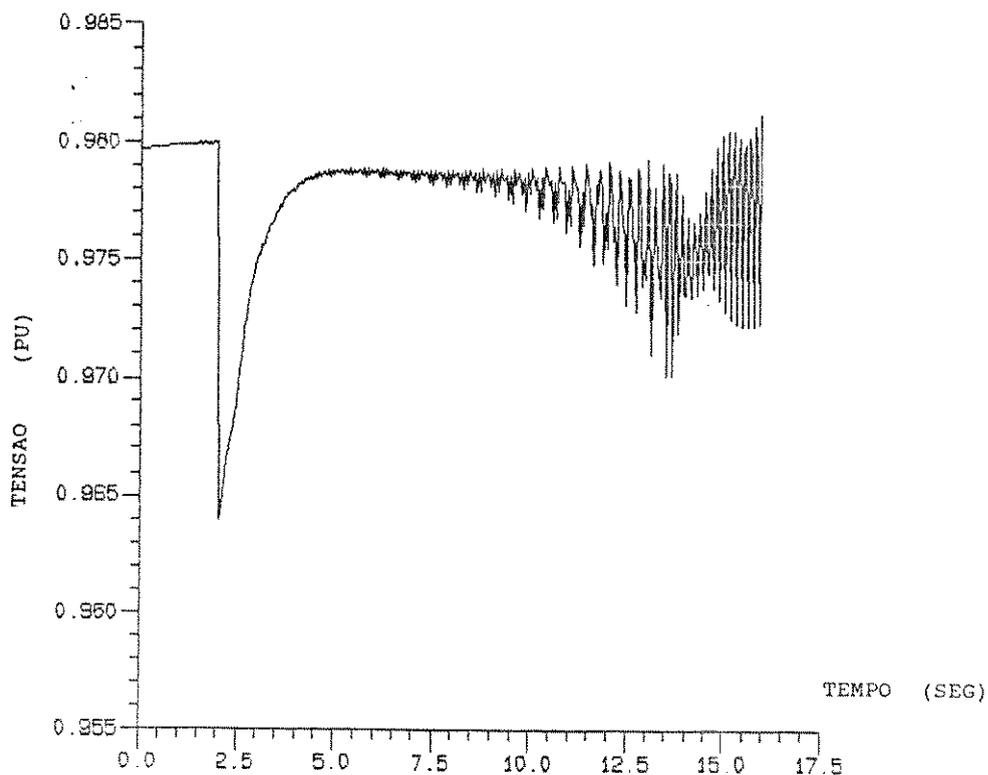


Figura 6.16 - Tensão do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $T_{o'} \geq 5.0 T_{o'}$

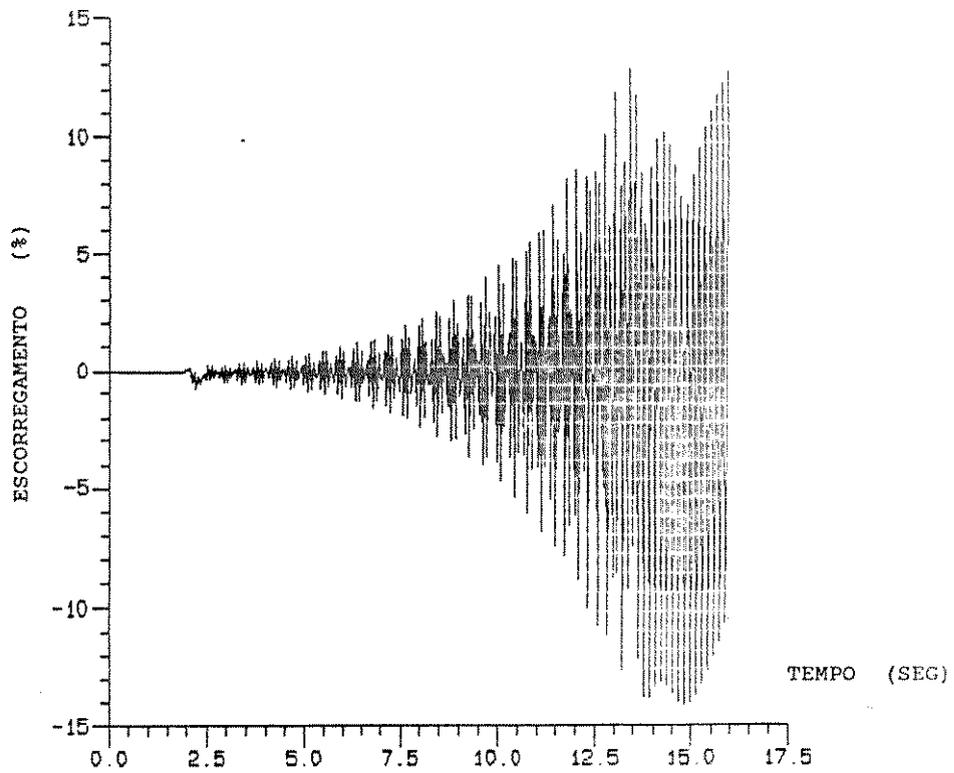


Figura 6.17 - Escorregamento da máquina de indução com $T_{o'} \geq 5.0 T_{o'}(\text{orig})$

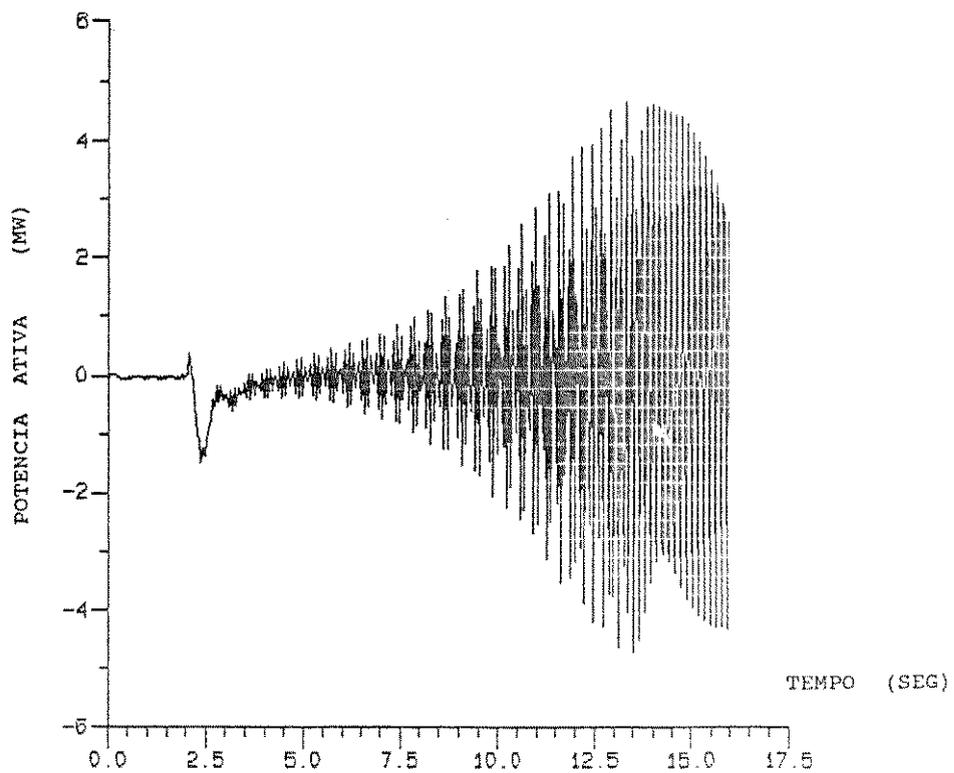


Figura 6.18 - Potência ativa da máquina de indução com $T_{o'} \geq 5.0 T_{o'}(\text{orig})$

As figuras (6.19)-(6.22) mostram respectivamente a frequência e tensão do gerador síncrono, e escorregamento e potência ativa da máquina de indução para a condição:

$$1.2 X'(\text{orig}) \leq X' \leq 1.5 X'(\text{orig})$$

e todos os outros parâmetros com seus valores originais.

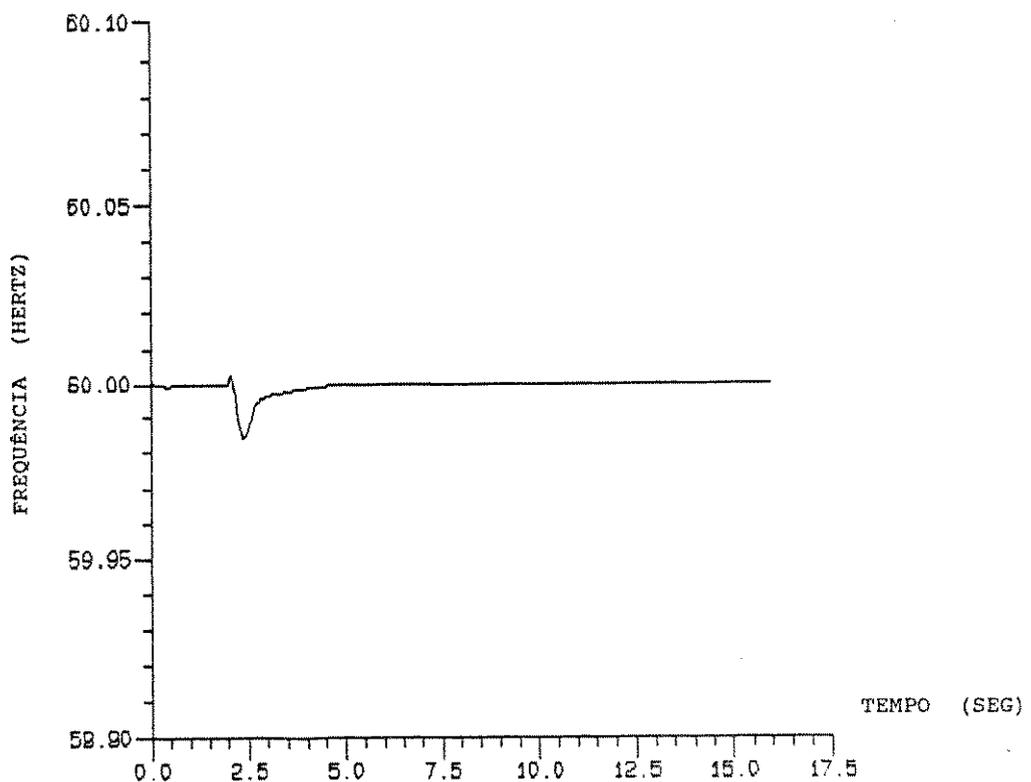


Figura 6.19 - Frequência do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $1.2 X'(\text{orig}) \leq X' \leq 1.5 X'(\text{orig})$

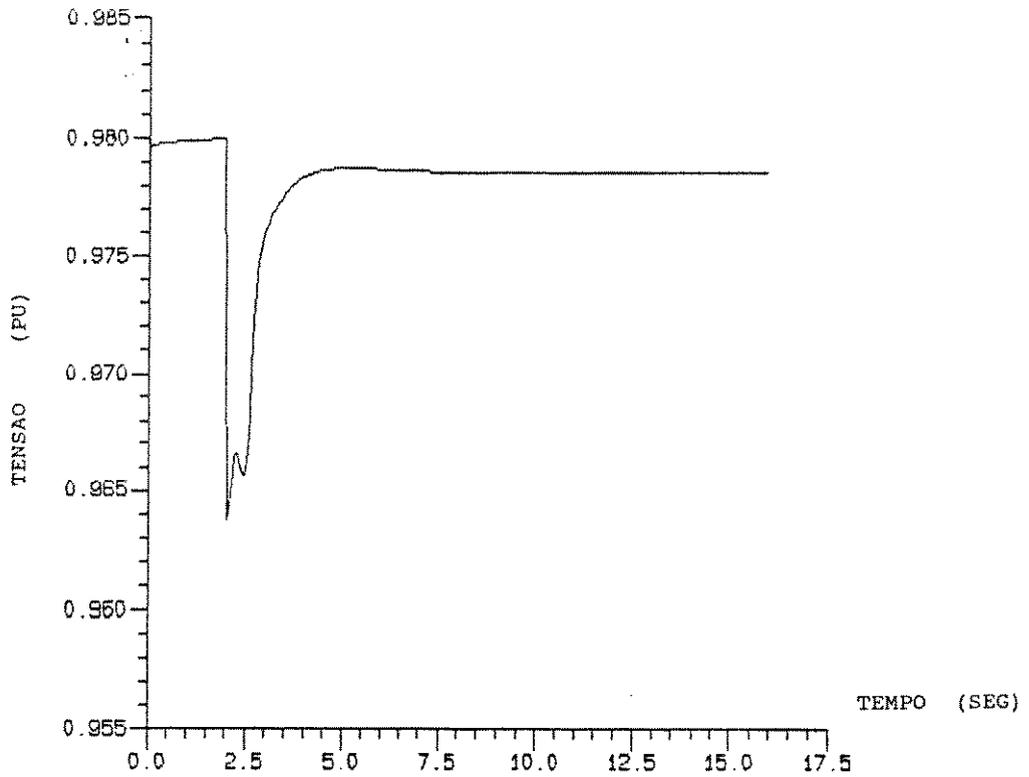


Figura 6.20 - Tensão do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $1.2 X'(\text{orig}) \leq X' \leq 1.5 X'(\text{orig})$

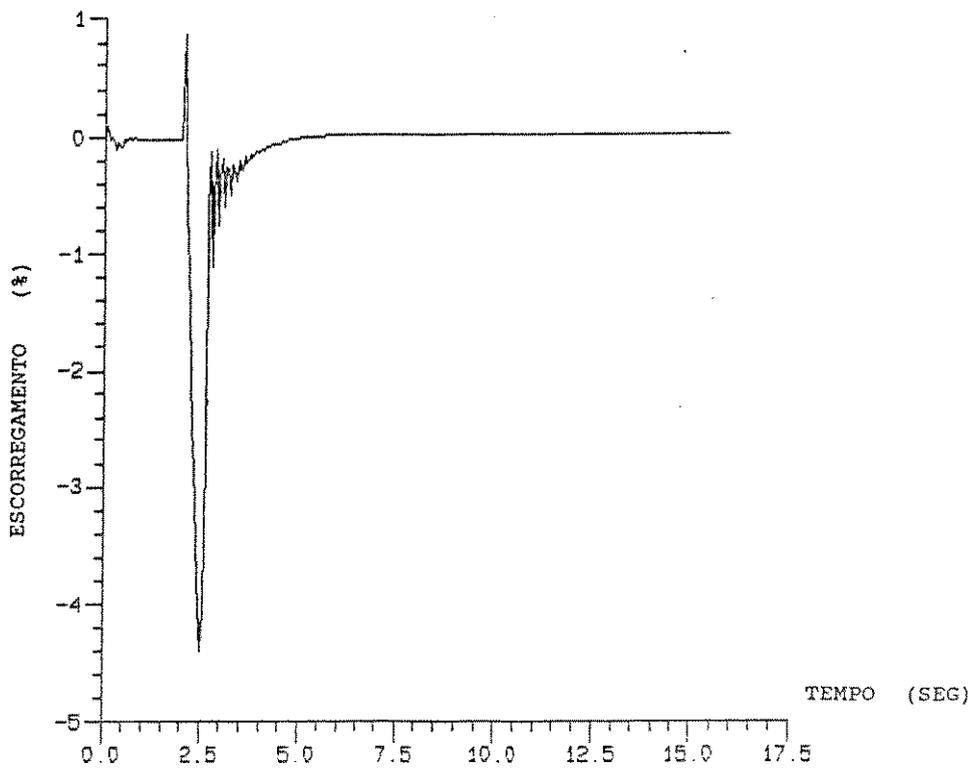


Figura 6.21 - Escorregamento da máquina de indução com $1.2 X'(\text{orig}) \leq X' \leq 1.5 X'(\text{orig})$

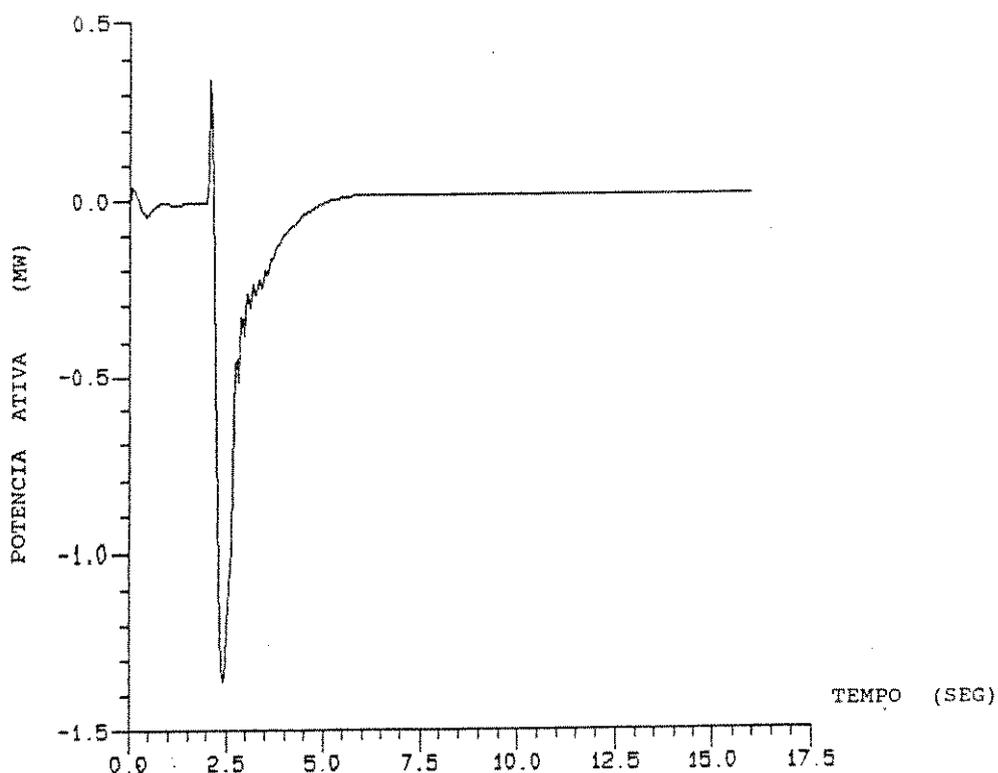


Figura 6.22 - Potência ativa da máquina de indução com $1.2 X'(\text{orig}) \leq X' \leq 1.5 X'(\text{orig})$

As figuras (6.23)-(6.26) mostram respectivamente a frequência e tensão do gerador síncrono, e escorregamento e potência ativa da máquina de indução para a condição:

$$X' \geq 2.0 X'(\text{orig})$$

e com os outros parâmetros com seus valores originais.

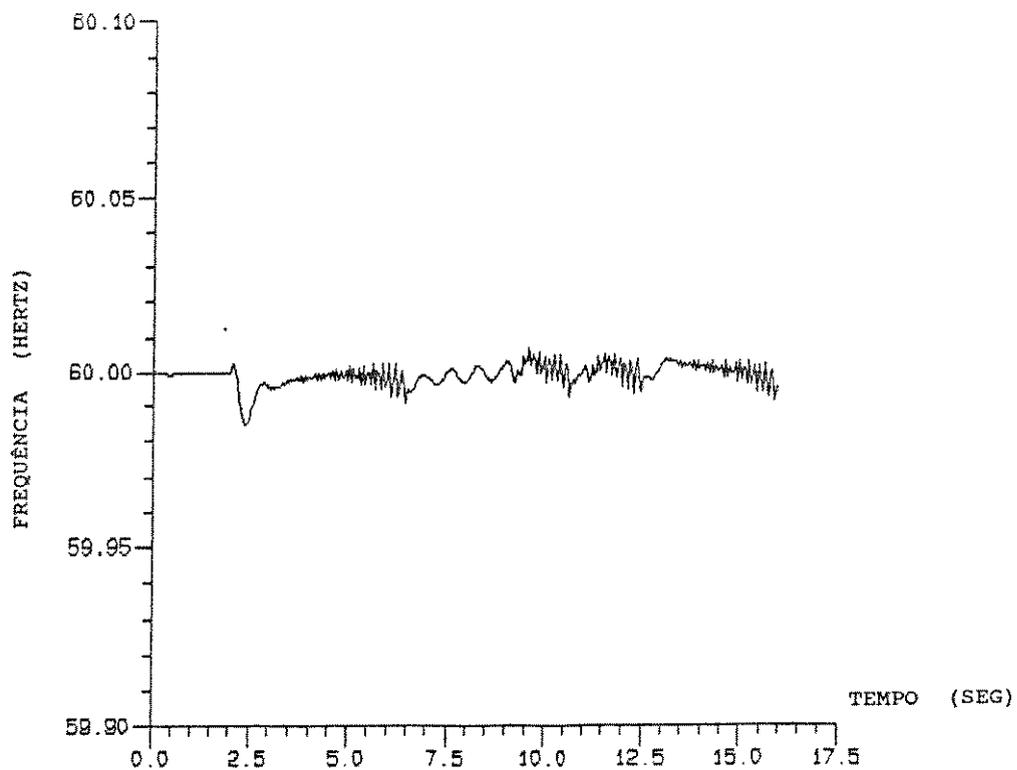


Figura 6.23 - Frequência do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $X' \geq 2.0 X'(\text{orig})$

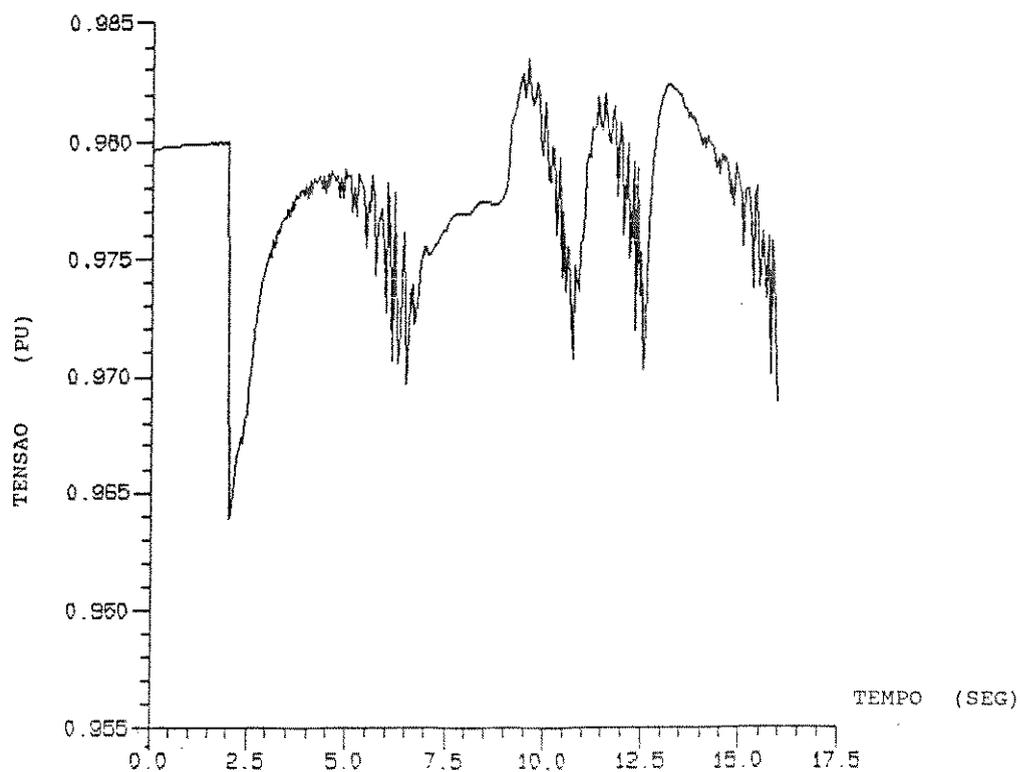


Figura 6.24 - Tensão do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $X' \geq 2.0 X'(\text{orig})$

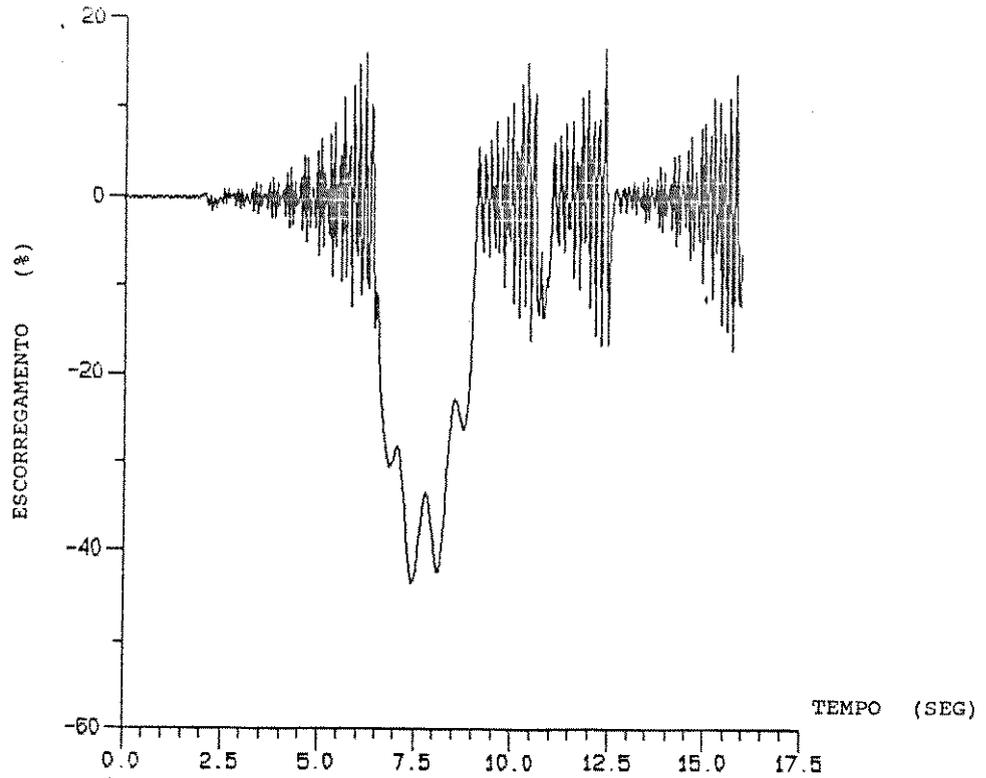


Figura 6.25 - Escorregamento da máquina de indução com $X' \approx 2.0 X'(\text{orig})$

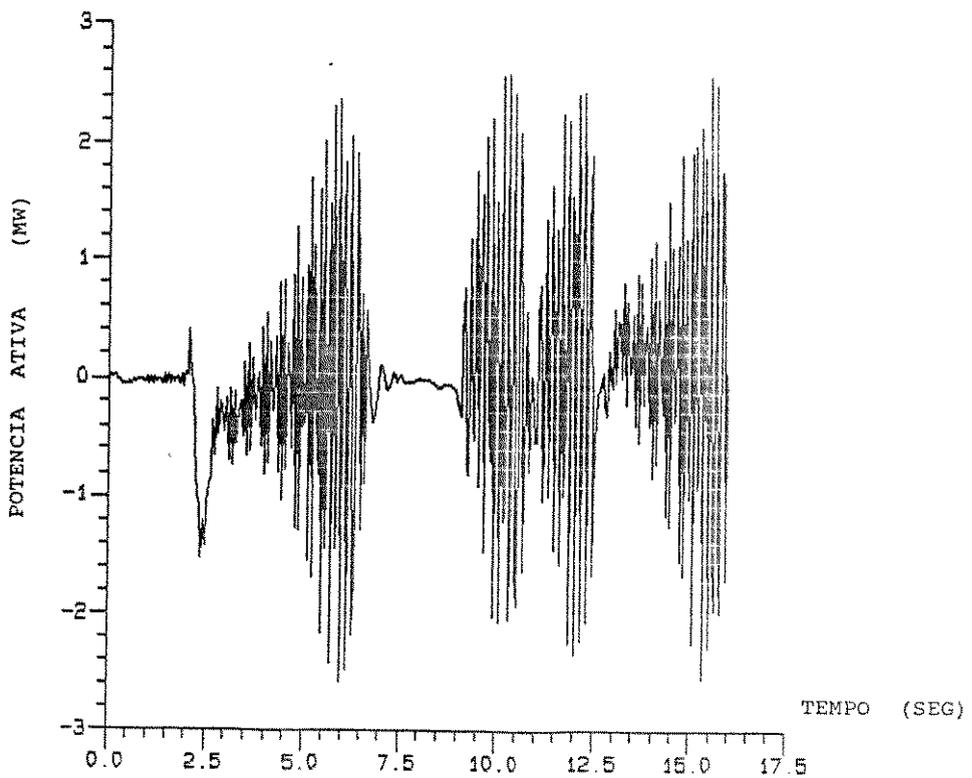


Figura 6.26 - Potência ativa da máquina de indução com $X' \approx 2.0 X'(\text{orig})$

As figuras (6.27)-(6.30) mostram respectivamente a frequência e tensão do gerador síncrono, e escorregamento e potência ativa da máquina de indução para a condição:

$$H = 10 \text{ H(orig)}$$

e com os outros parâmetros com seus valores originais.

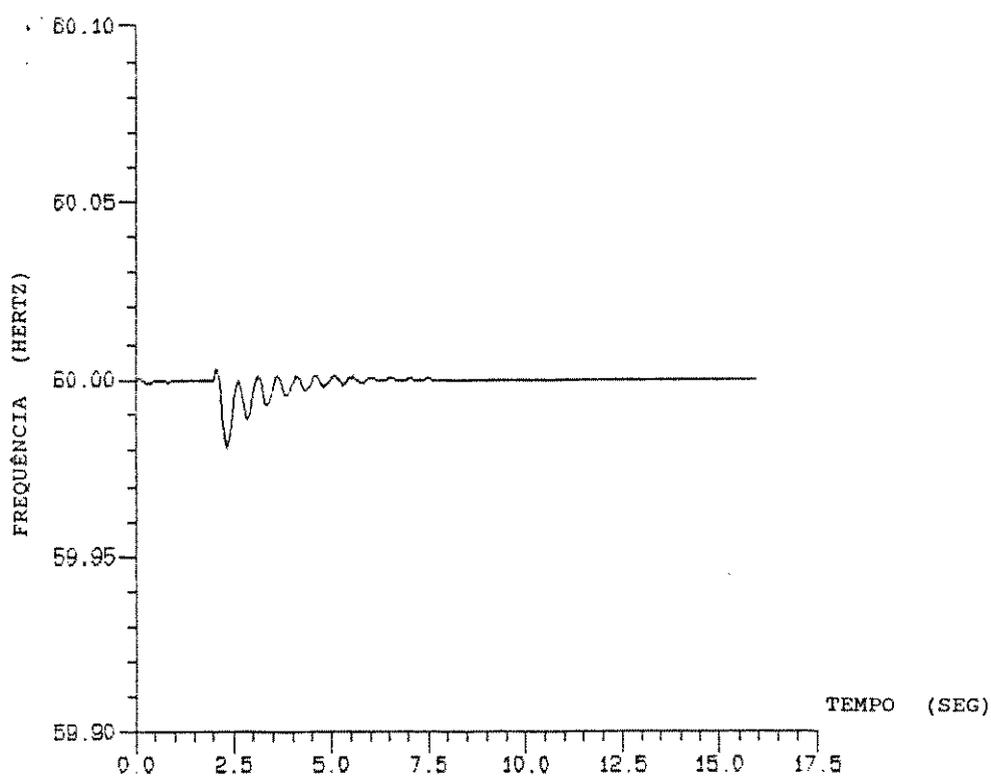


Figura 6.27 - Frequência do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $H = 10 \text{ H(orig)}$

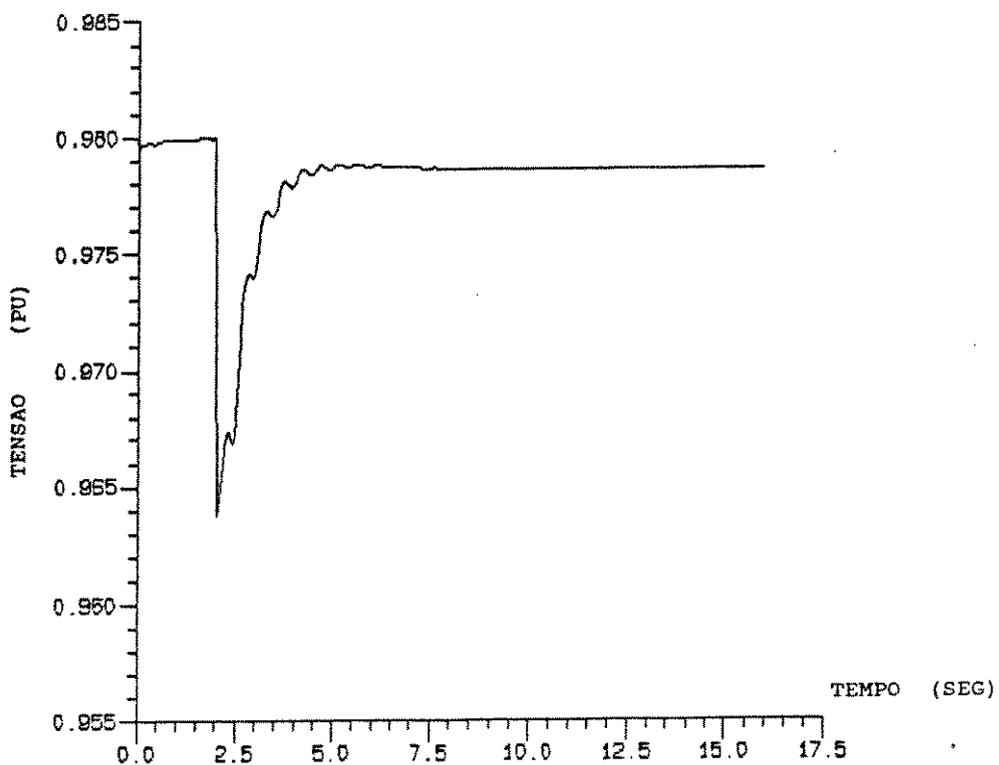


Figura 6.28 - Tensão do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $H = 10$ H(orig)

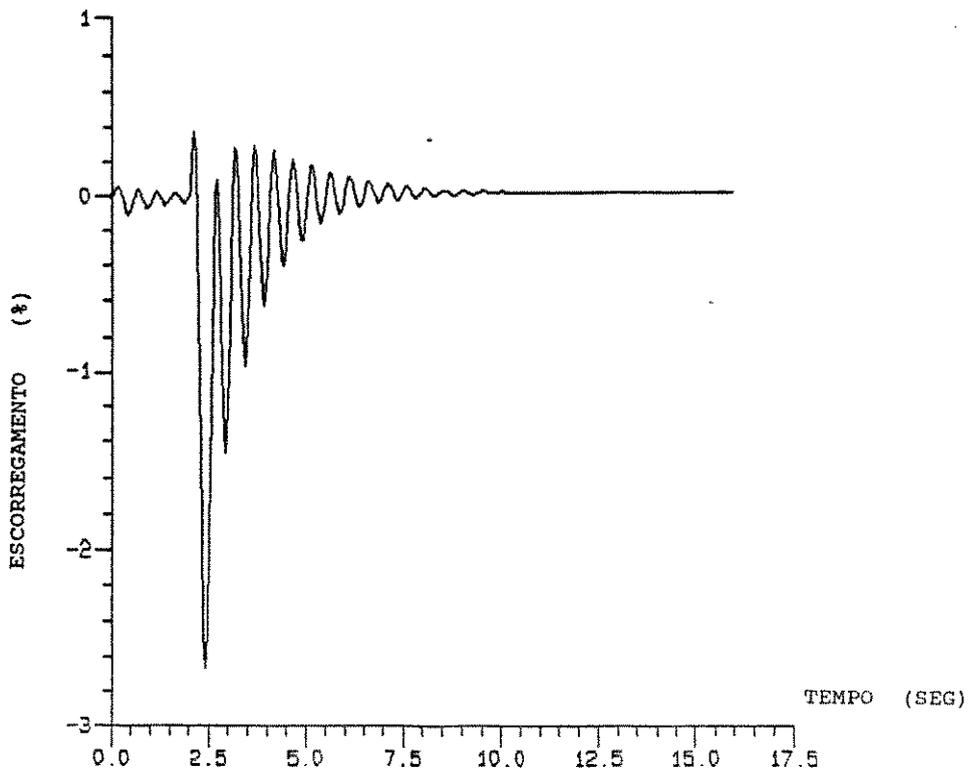


Figura 6.29 - Escorregamento da máquina de indução com $H = 10$ H(orig)

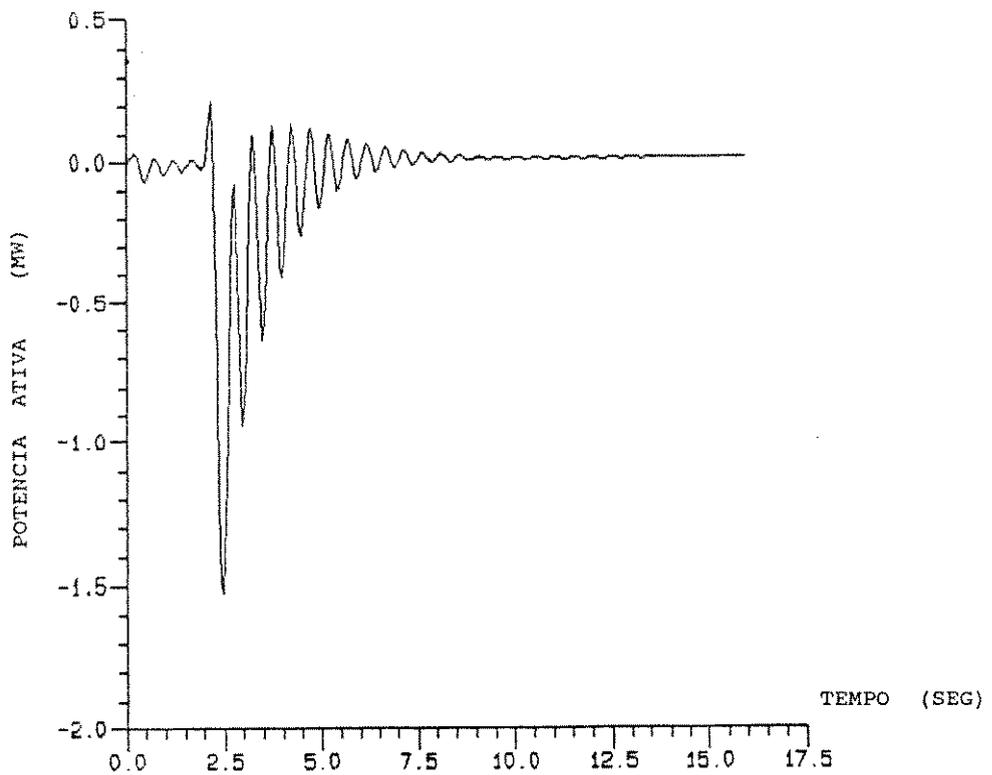


Figura 6.30 - Potência ativa da máquina de indução com $H = 10 H(\text{orig})$

As figuras (6.31)-(6.34) mostram respectivamente a frequência e tensão do gerador síncrono, e escorregamento e potência ativa da máquina de indução para a condição:

$$H \geq 15 H(\text{orig})$$

e com os outros parâmetros com seus valores originais.

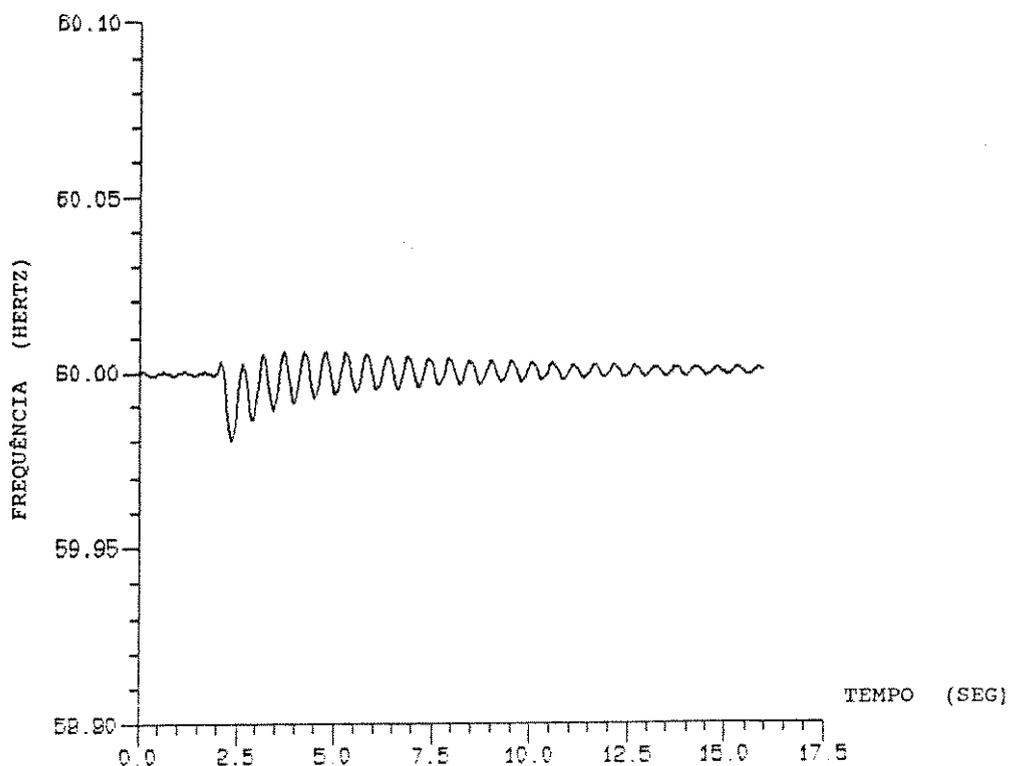


Figura 6.31 - Frequência do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $H \geq 15 H(\text{orig})$

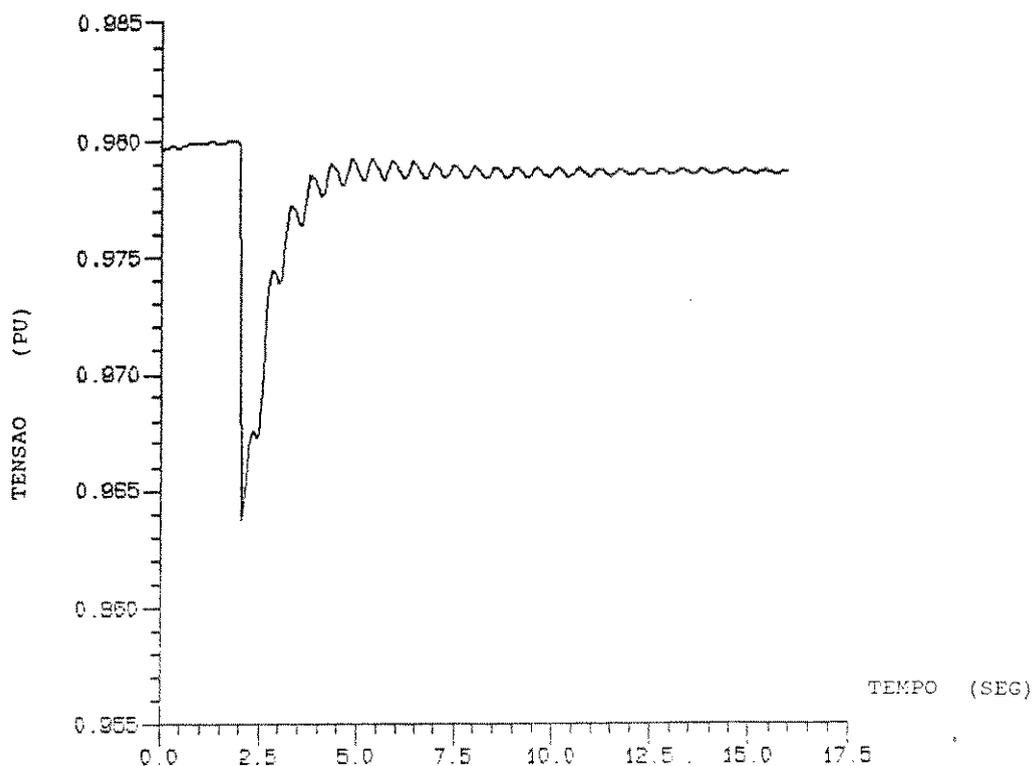


Figura 6.32 - Tensão do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $H \geq 15 H(\text{orig})$

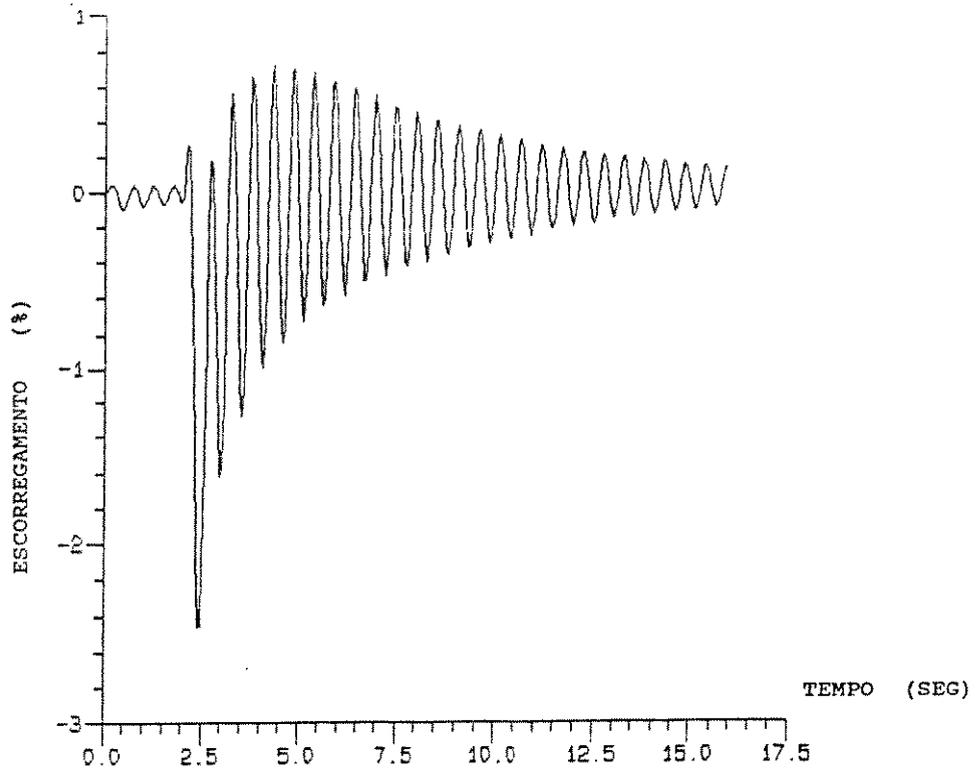


Figura 6.33 - Escorregamento da máquina de indução com $H \geq 15$ H(orig)

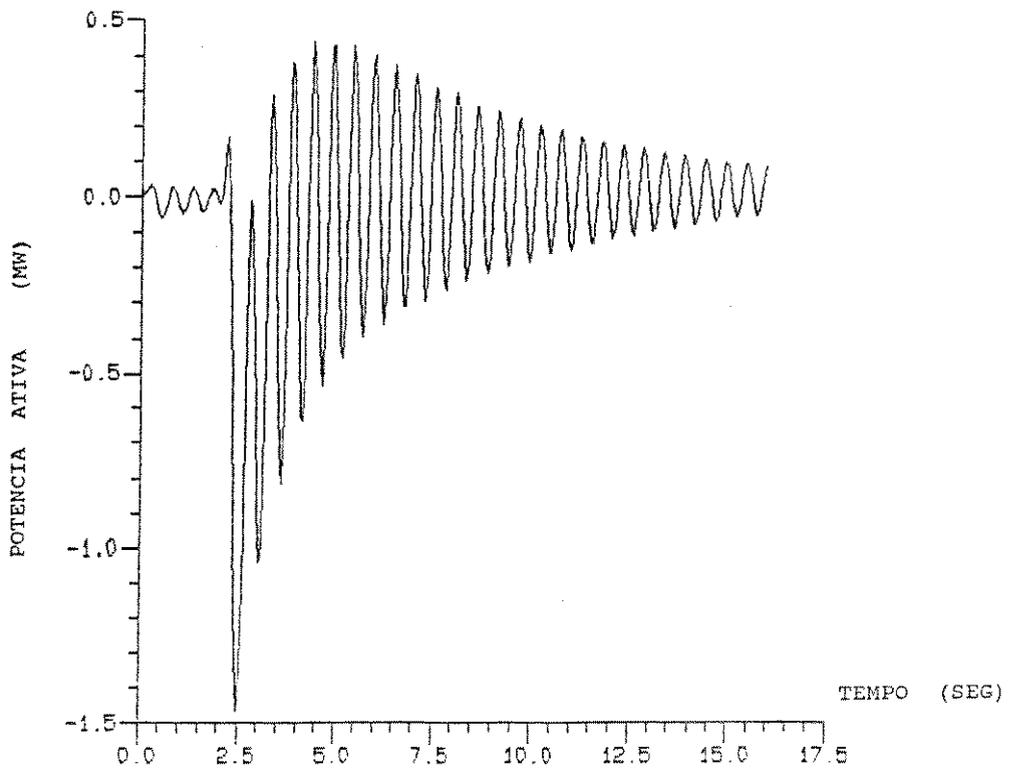


Figura 6.34 - Potência ativa da máquina de indução com $H \geq 15$ H(orig)

As figuras (6.35)-(6.38) mostram respectivamente a frequência e tensão do gerador síncrono, e escorregamento e potência ativa da máquina de indução para a condição:

$$R_1 \geq 10 R_1(\text{orig})$$

e com os outros parâmetros com seus valores originais.

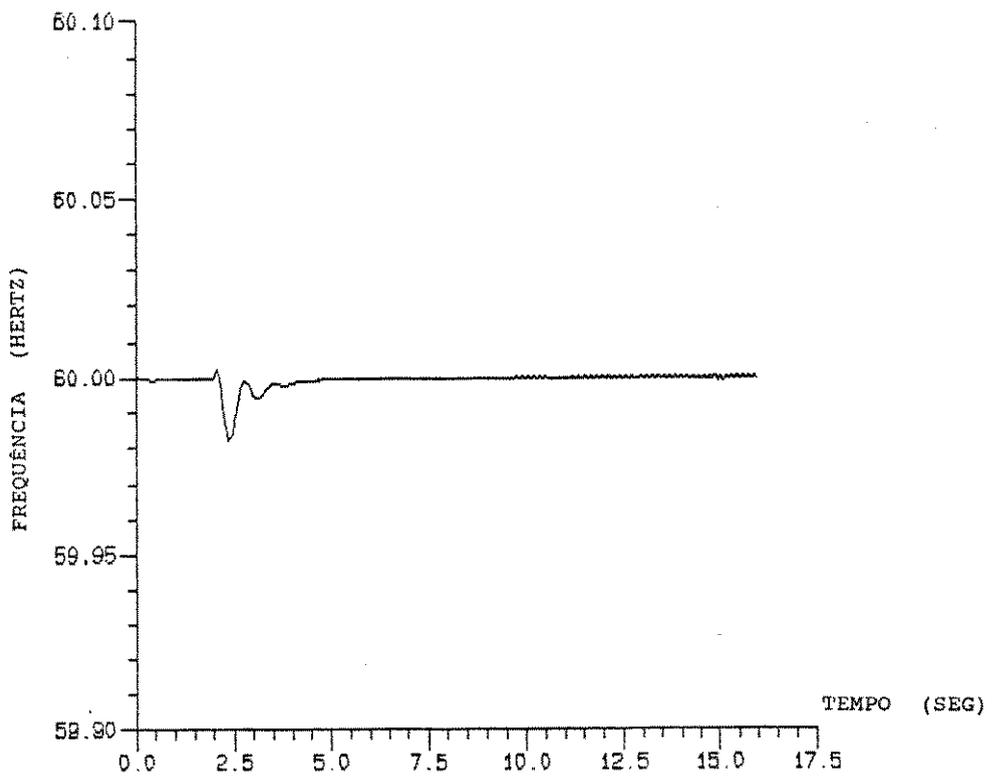


Figura 6.35 - Frequência do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $R_1 \geq 10 R_1(\text{orig})$

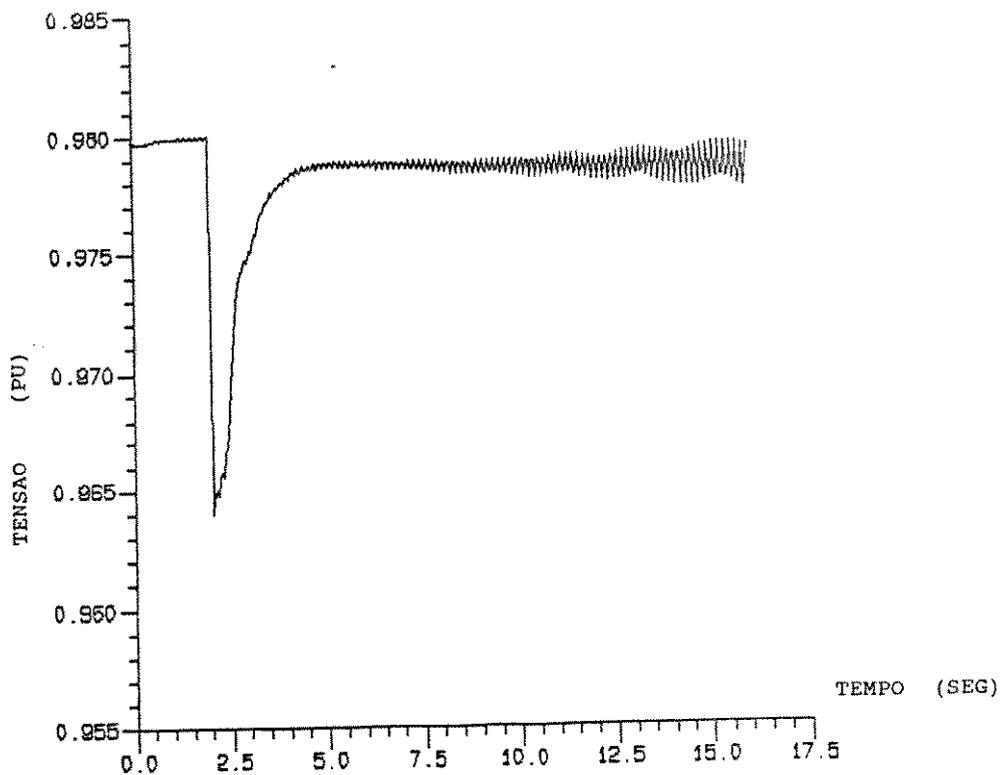


Figura 6.36 - Tensão do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $R_1 \geq 10 R_1(\text{orig})$

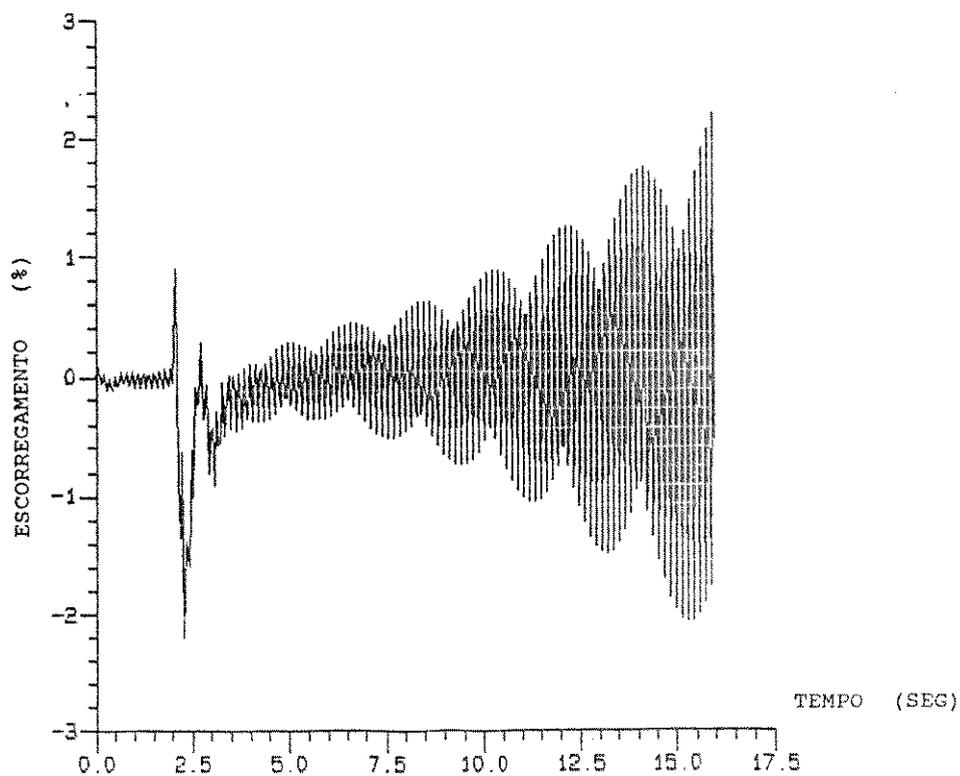


Figura 6.37 - Escorregamento da máquina de indução com $R_1 \geq 10 R_1(\text{orig})$

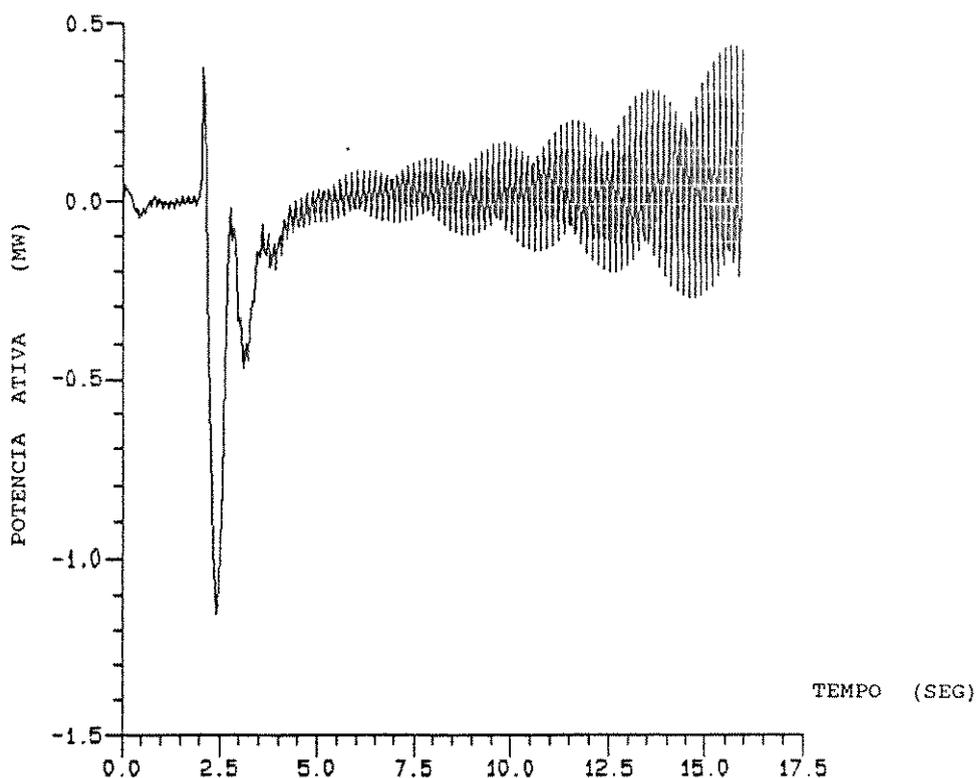


Figura 6.38 - Potência ativa da máquina de indução com $R_1 \geq 10 R_1(\text{orig})$

6.4 - Resultados das simulações mostrando a influência da potência da máquina de indução

As figuras (6.39)-(6.42) mostram respectivamente a frequência e tensão do gerador síncrono, e escorregamento e potência ativa da máquina de indução para a condição:

$$P_{mI} = 0.15 P_{gS}$$

onde:

P_{mI} é a potência nominal da máquina de indução

P_{gS} é a potência nominal do gerador síncrono

e com a máquina de indução com seus parâmetros originais.

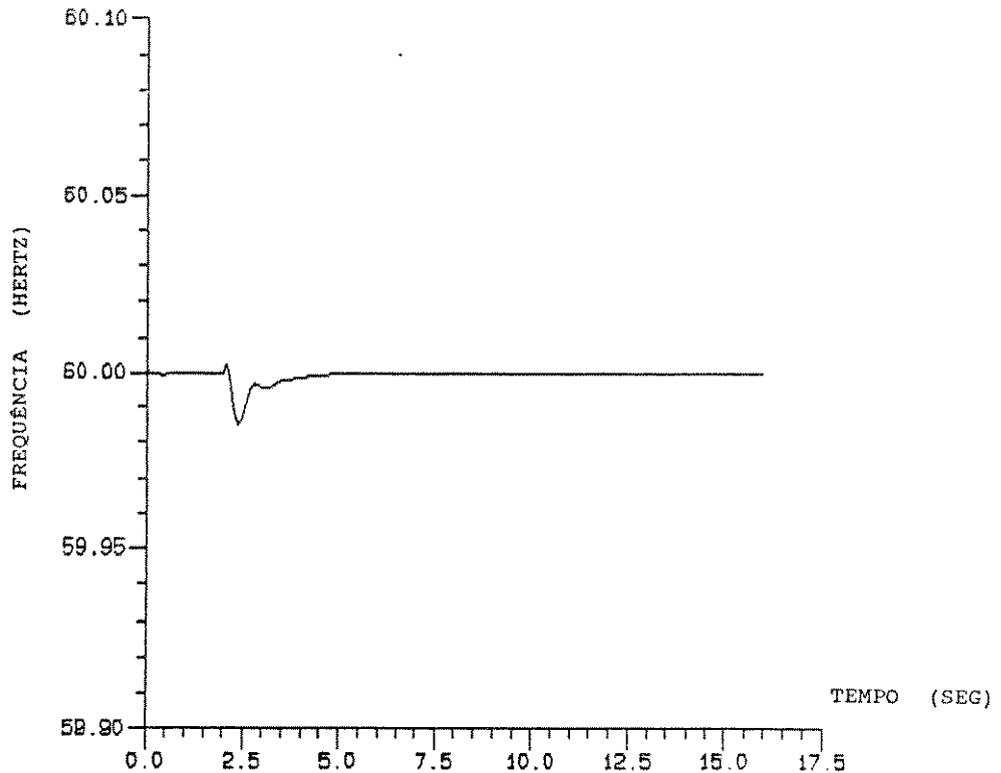


Figura 6.39 - Frequência do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $P_{mI} = 0.15 P_{gs}$

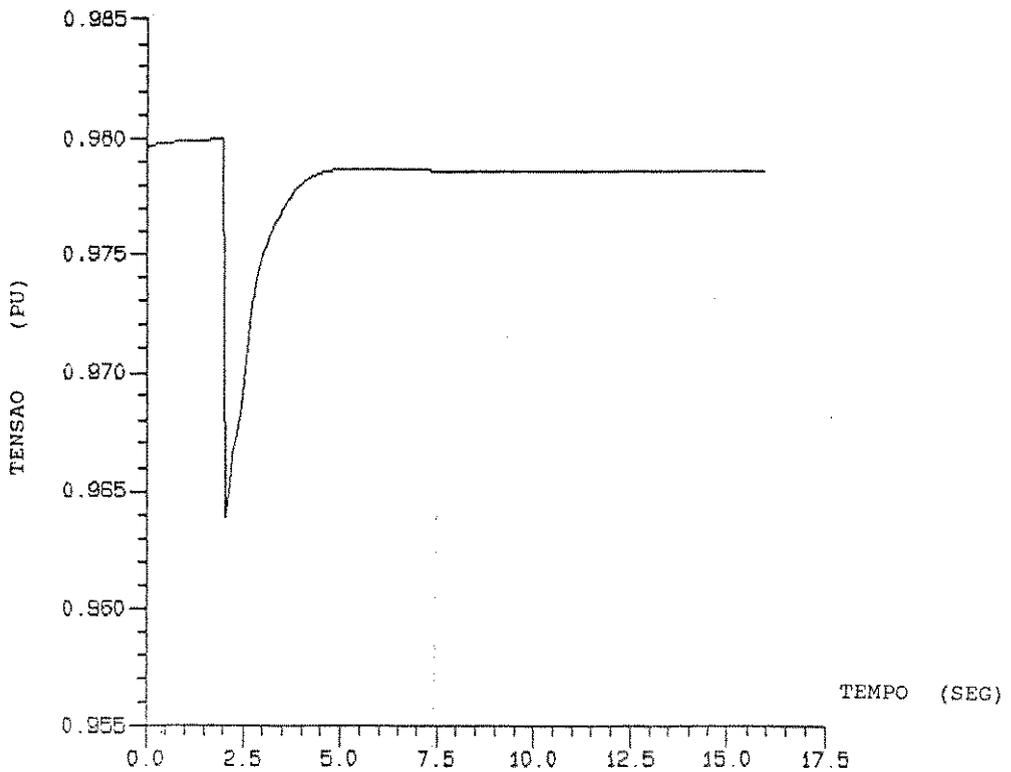


Figura 6.40 - Tensão do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $P_{mI} = 0.15 P_{gs}$

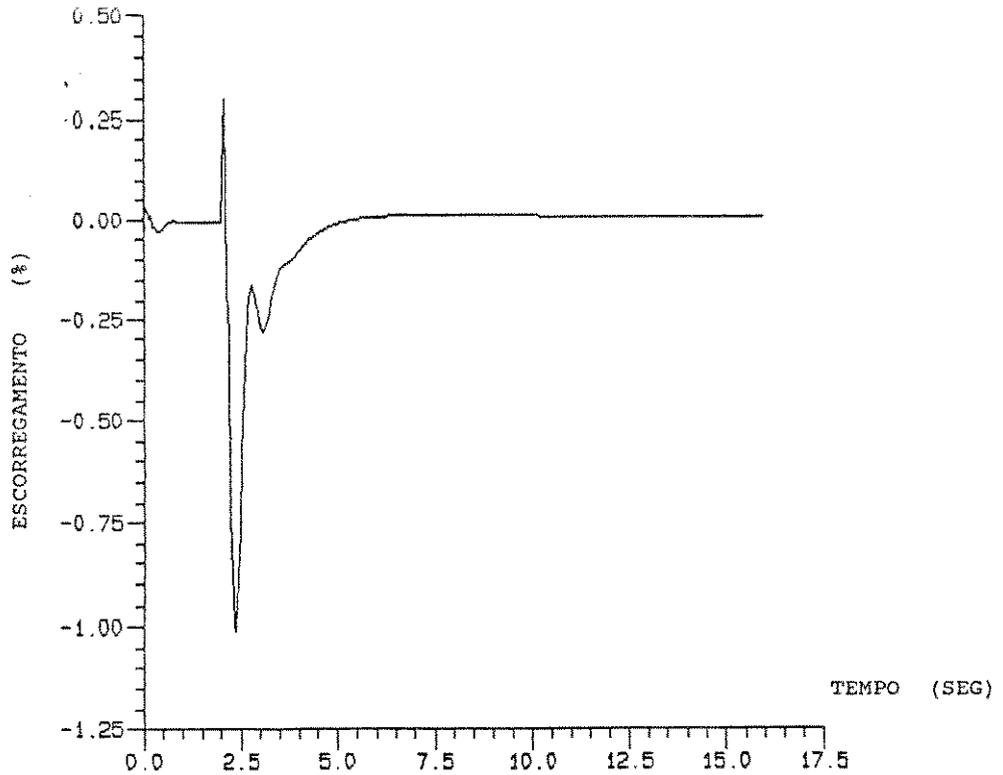


Figura 6.41 - Escorregamento da máquina de indução com $P_{m1} = 0.15 P_{gs}$

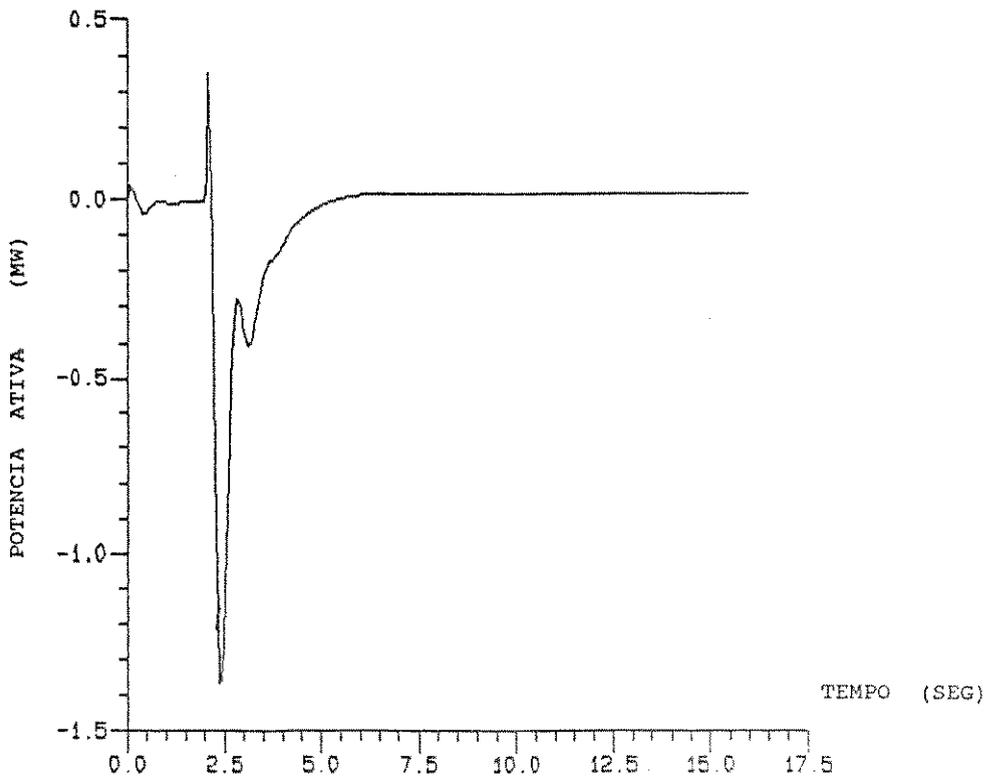


Figura 6.42 - Potência ativa da máquina de indução com $P_{m1} = 0.15 P_{gs}$

As figuras (6.43)-(6.46) mostram respectivamente a frequência e tensão do gerador síncrono, e escorregamento e potência ativa da máquina de indução para a condição:

$$P_{mI} = 0.04 P_{gS}$$

e com a máquina de indução com seus parâmetros originais.

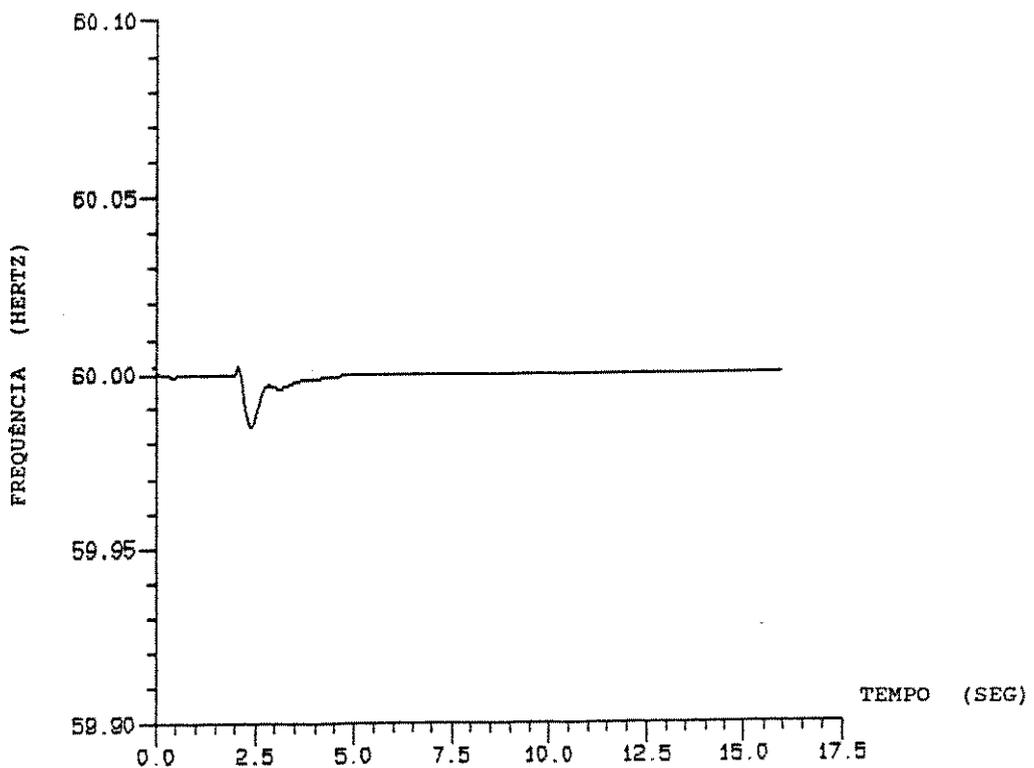


Figura 6.43 - Frequência do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $P_{mI} = 0.04 P_{gS}$

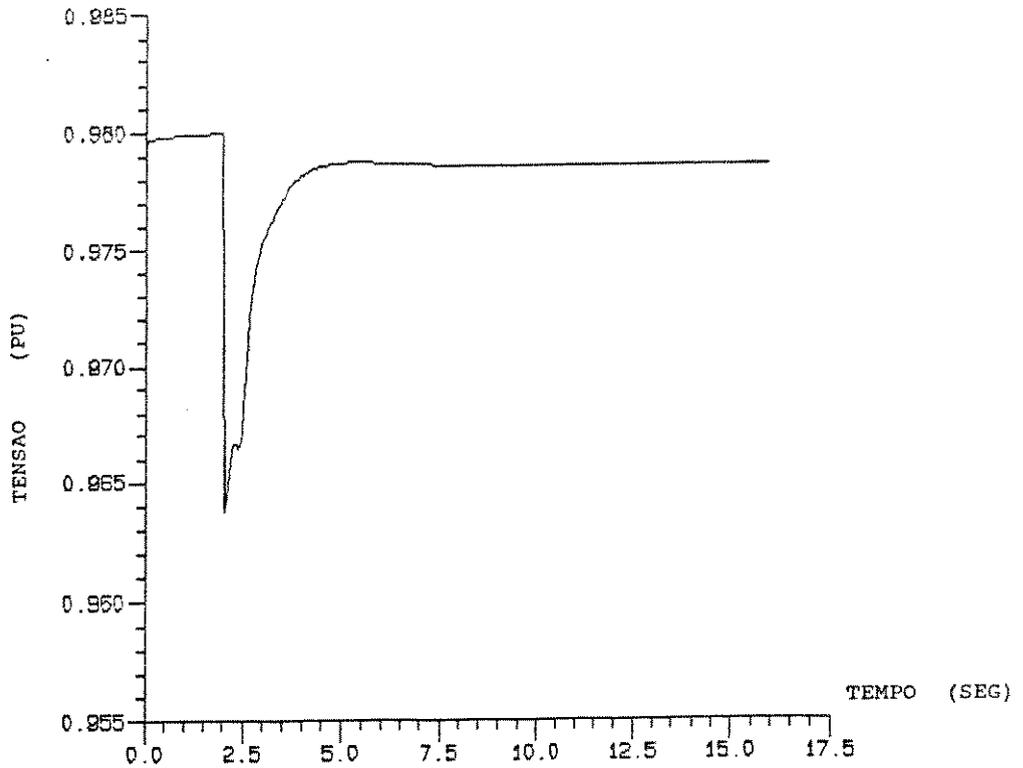


Figura 6.44 - Tensão do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $P_{m1} = 0.04 P_{gs}$

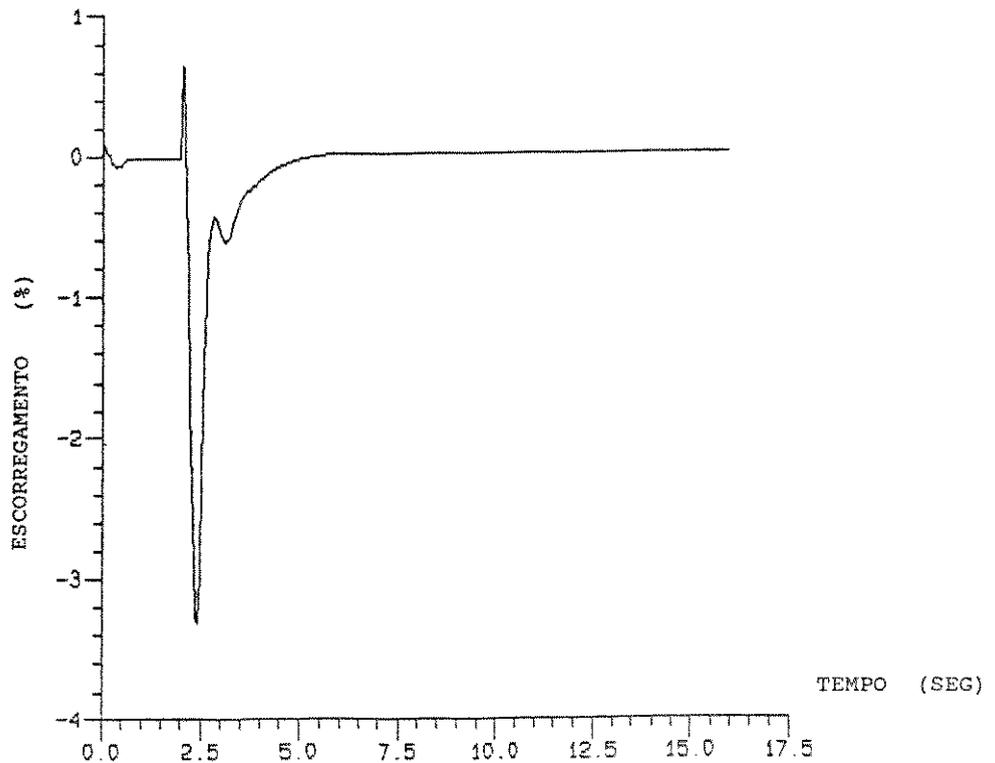


Figura 6.45 - Escorregamento da máquina de indução com $P_{m1} = 0.04 P_{gs}$

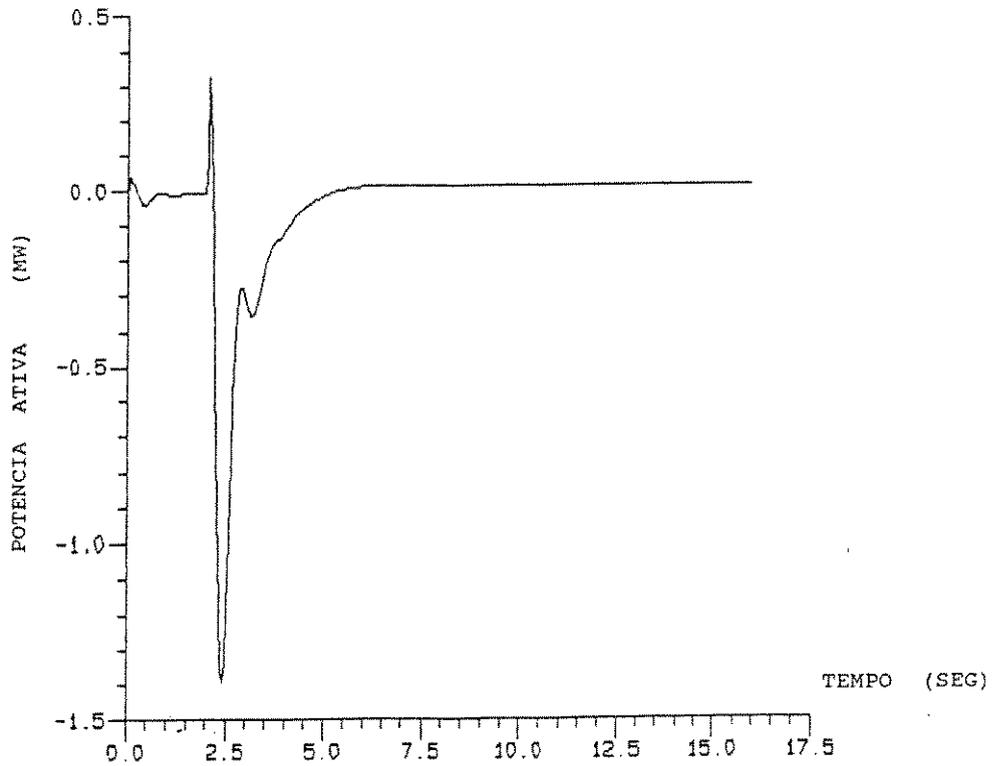


Figura 6.46 - Potência ativa da máquina de indução com $P_{mI} = 0.04 P_{gs}$

As figuras (6.47)-(6.50) mostram respectivamente a frequência e tensão do gerador síncrono, e escorregamento e potência ativa da máquina de indução para a condição:

$$P_{mI} = 0.02 P_{gs}$$

e com a máquina de indução com seus parâmetros originais.

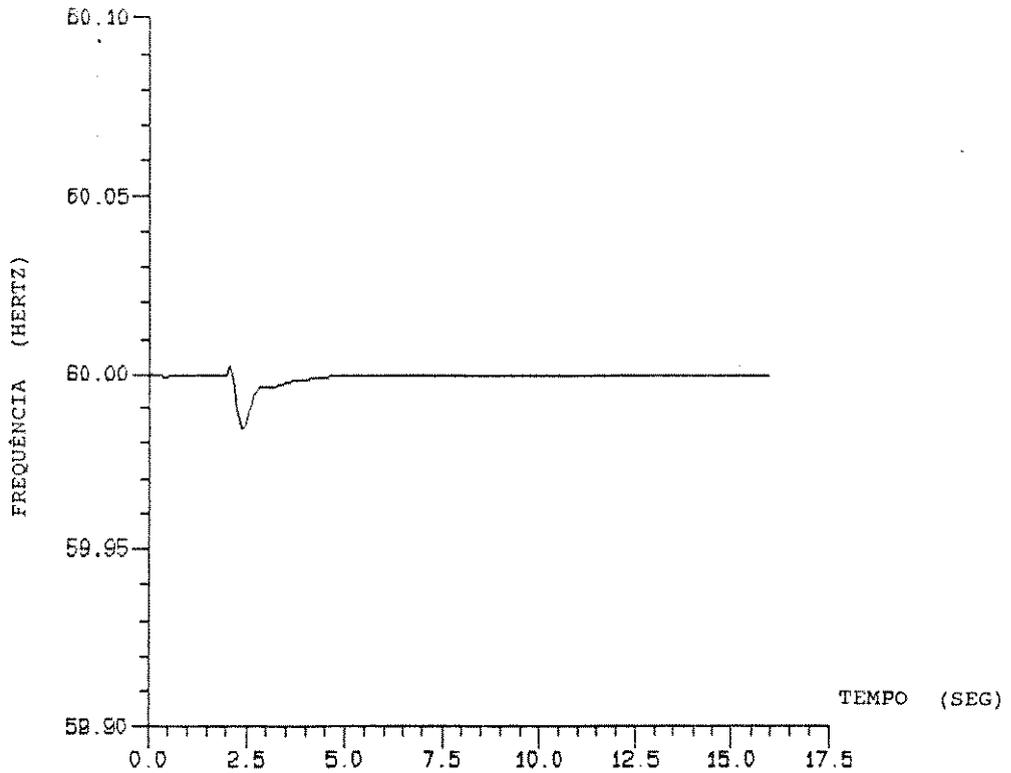


Figura 6.47 - Frequência do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $P_{mI} = 0.02 P_{gs}$

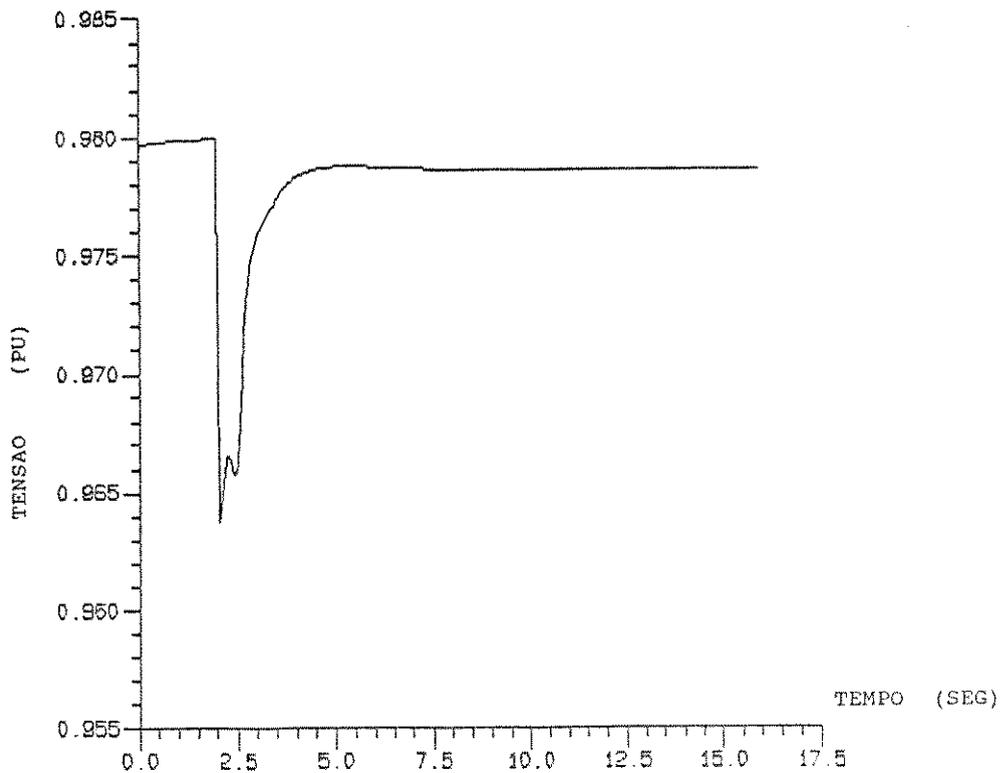


Figura 6.48 - Tensão do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $P_{mI} = 0.02 P_{gs}$

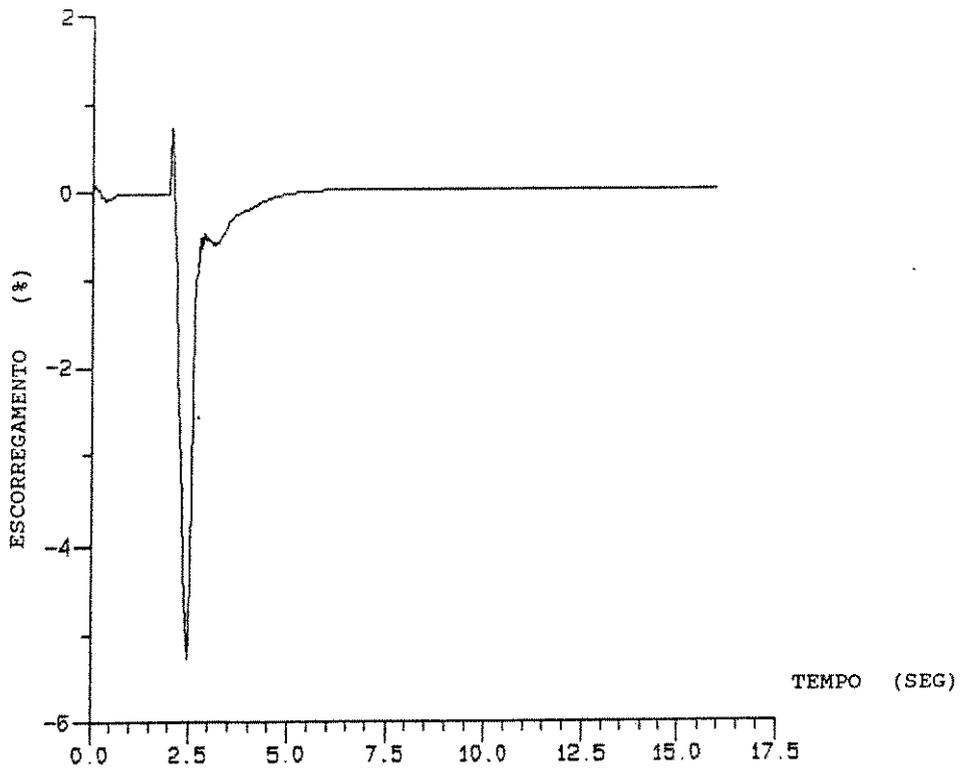


Figura 6.49 - Escorregamento da máquina de indução com $P_{mI} = 0.02 P_{gs}$

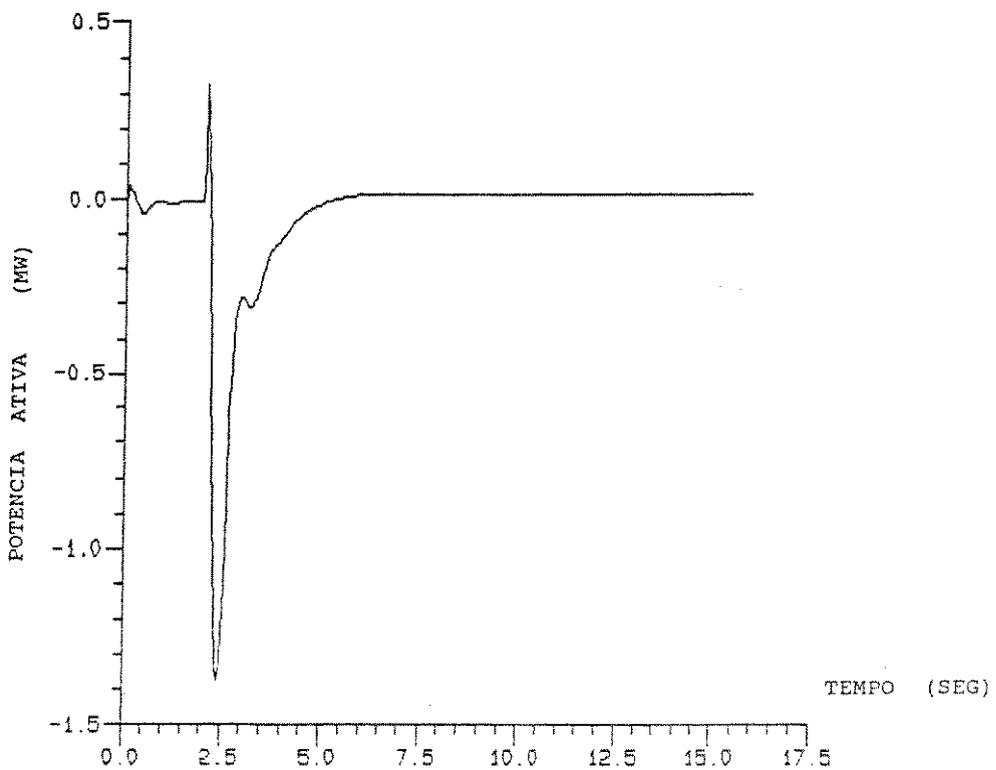


Figura 6.50 - Potência ativa da máquina de indução com $P_{mI} = 0.02 P_{gs}$

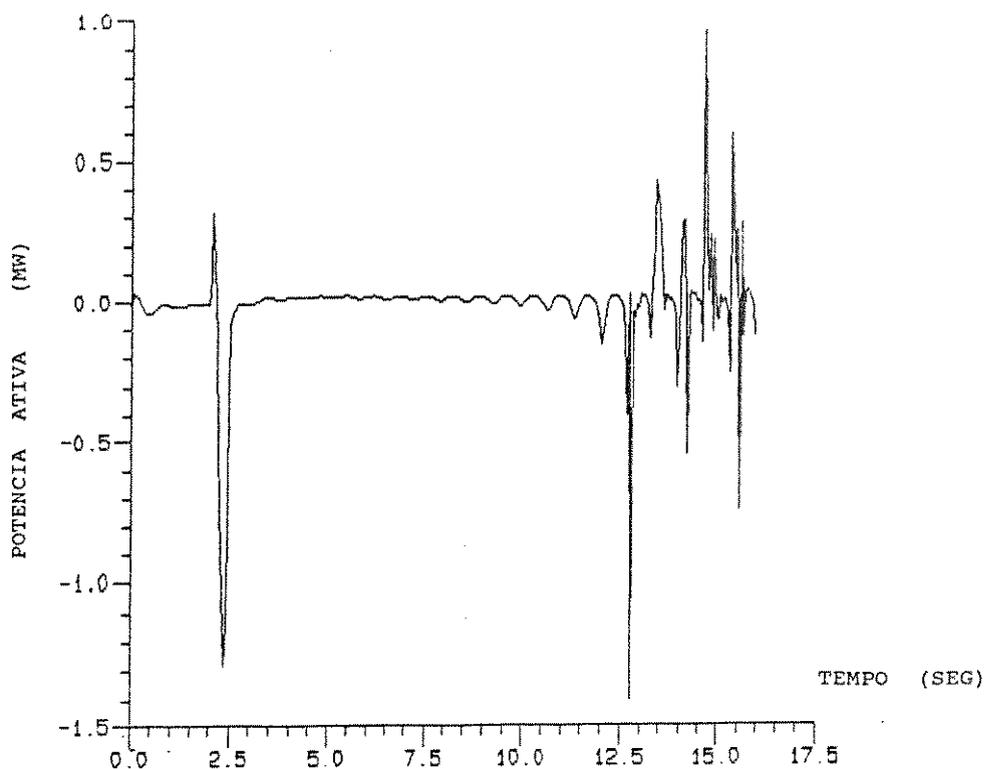


Figura 6.54 - Potência ativa da máquina de indução com $P_{mI} \leq 0.01 P_{gs}$

6.5 - Comentários e conclusões

Como era de se esperar o resultado das simulações mostraram um comportamento natural da máquina de indução frente à variação de seus parâmetros e de sua potência. Pode-se observar que tanto a diminuição de T_o' como o aumento de X' levam a um comprometimento da estabilidade da máquina, prejudicando assim a estabilidade de todo o sistema. Por outro lado um aumento considerável em T_o' mostrou instabilidade para a máquina, e isto é justificável uma vez que o sistema permanece estável na simulação feita devido a rapidez de atuação da máquina de indução. Se a constante de tempo é aumentada esta

As figuras (6.51)-(6.54) mostram respectivamente a frequência e tensão do gerador síncrono, e escorregamento e potência ativa da máquina de indução para a condição:

$$P_{mI} \leq 0.01 P_{gs}$$

e com a máquina de indução com seus parâmetros originais.

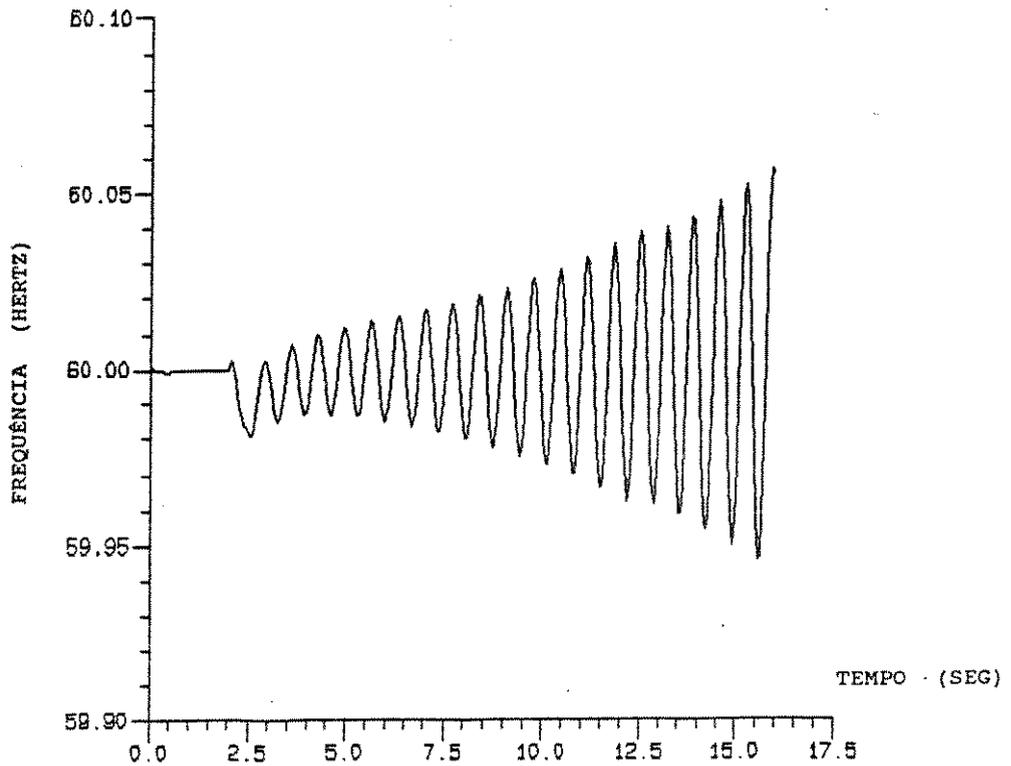


Figura 6.51 - Frequência do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $P_{mI} \leq 0.01 P_{gs}$

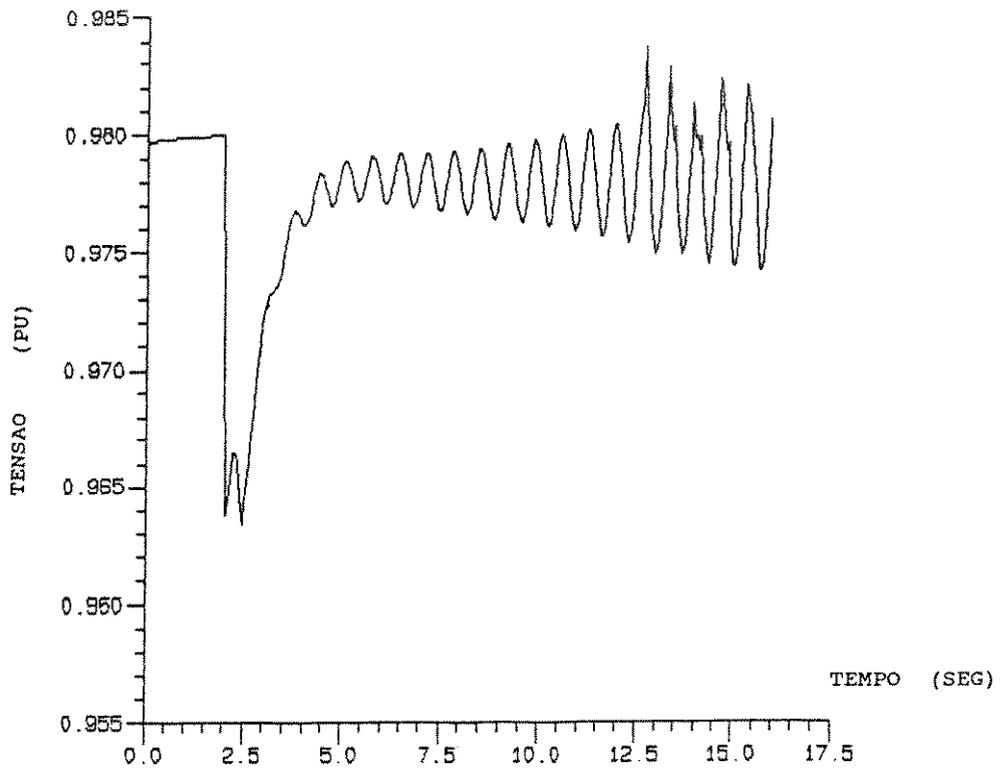


Figura 6.52 - Tensão do gerador síncrono para um dado distúrbio com a presença da máquina de indução com $P_{m1} \leq 0.01 P_{gs}$

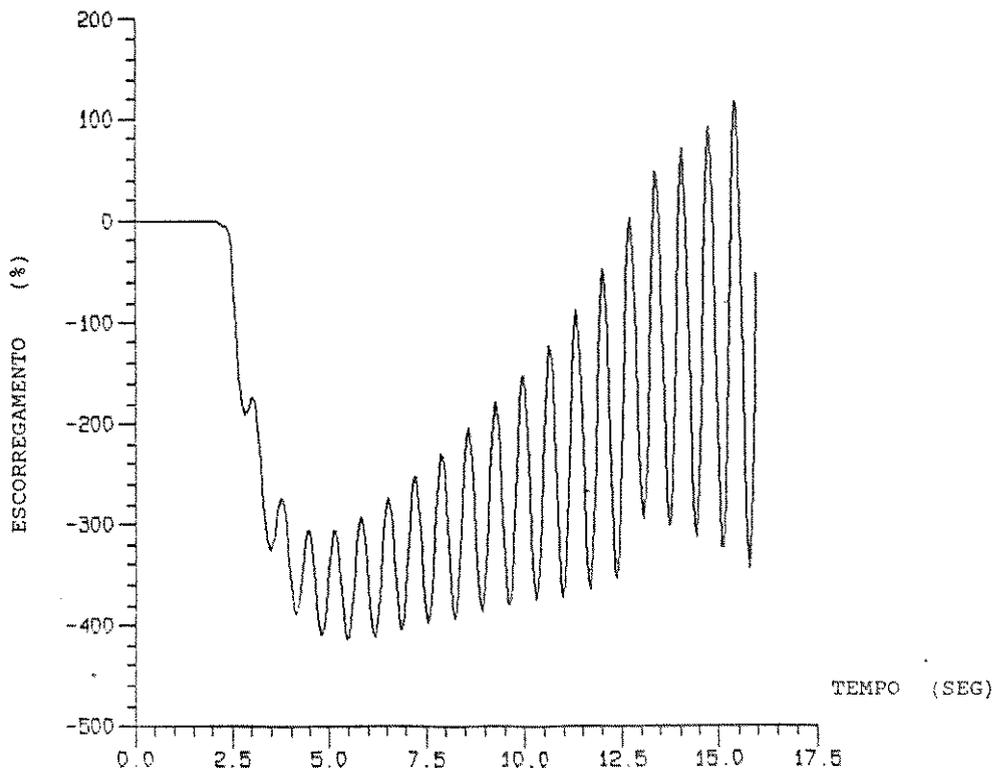


Figura 6.53 - Escorregamento da máquina de indução com $P_{m1} \leq 0.01 P_{gs}$

característica é prejudicada e o sistema não mais tem a compensação oferecida pela máquina. O comportamento frente a variações de H e R_1 também foram os esperados, ou seja o aumento de H provocou um aumento no tempo de resposta e a situação é a mesma que ocorre quando T_o' é aumentado. A resistência R_1 possui valores normalmente baixos, podendo em alguns casos ser desprezada. Por outro lado observou-se que valores muito altos inviabilizam a utilização da máquina.

Com relação à variação de potência da máquina de indução pode-se observar que para potências menores até um determinado limite o módulo do escorregamento aumenta. Isto é justificável já que uma máquina de indução trabalha com escorregamentos maiores em processos de sobrecarga. Com relação ao gerador síncrono pode-se observar que ele tem um comportamento menos estável a medida que a potência da máquina de indução diminui. De outra maneira para máquina de indução com potência maior, pouca alteração foi observada a não ser uma pequena diminuição no módulo do escorregamento.

CAPITULO 7

ENSAIOS EM LABORATÓRIO

7.1 - Introdução

Até aqui foram mostrados modelos matemáticos das máquinas, tanto de indução como síncrona, e através destes modelos várias simulações para uma série de situações foram executadas. As simulações foram realizadas em computador digital utilizando programas de estabilidade de porte como o utilizado no capítulo 5, ou desenvolvidos para sistemas simples como no capítulo 3. Os resultados foram sempre coincidentes, ou seja, levaram às mesmas conclusões no que se refere aos objetivos deste trabalho. No entanto um ensaio feito em laboratório onde se pudesse obter resultados coerentes com os já obtidos nas simulações seria bastante conveniente complementando o trabalho realizado até aqui. Assim este é o objetivo deste capítulo; mostrar na prática, através de testes de laboratório, que a idéia é funcional.

7.2 - Montagem do Protótipo

A figura 7.1 mostra o esquema da montagem utilizado nos testes de laboratório.

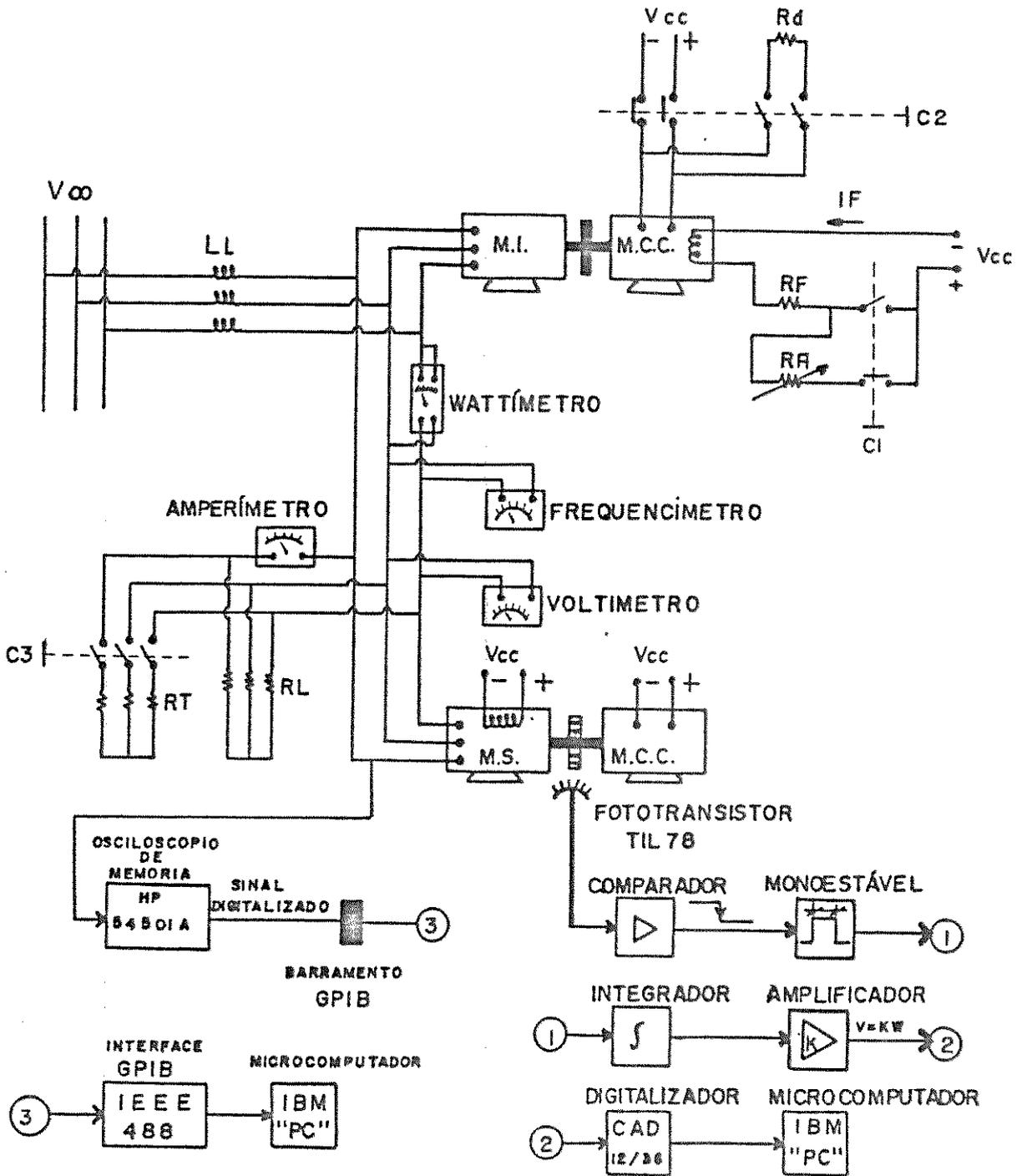


Figura 7.1 - Esquema da montagem para realização dos testes em laboratório.

O gerador síncrono utilizado é de 12 KVA, sendo acionado por uma máquina de corrente contínua de 12 KW. Pode-se observar as marcas feitas na polia do eixo do gerador, necessárias à monitoração de velocidade da máquina, feita por um tacômetro óptico descrito posteriormente. A tabela 7.1 mostra os parâmetros do gerador síncrono. Os valores estão normalizados utilizando os valores base da máquina. A tensão fornecida pelo gerador é de 220 volts.

X_d (pu)	X_q (pu)	X_d' (pu)	X_q' (pu)	X_d'' (pu)	X_q'' (pu)	R_a (pu)
1.51	0.96	0.35	0.42	0.13	0.82	0.02

Tabela 7.1 - Parâmetros do gerador síncrono.

A máquina de indução tem a potência de 3 CV e a máquina primária utilizada no acionamento é de corrente contínua com 3 KW de potência. A tabela 7.2 mostra os parâmetros da máquina de indução em pu. A normalização utiliza os valores base da máquina.

X_1	X_2	r	R	X_m
0.2389	0.2391	0.0515	0.0859	4.842

Tabela 7.2 - Parâmetros da máquina de indução

O controle da máquina primária é feito através do controle de excitação de campo , ajustada por resistores em série com o enrolamento de campo. São dois os resistores; um com valor fixo " R_F " e outro variável " R_A ", e através de seu ajuste a máquina de corrente contínua irá funcionar tanto como máquina primária de acionamento como carga, dando características de gerador e motor respectivamente à máquina de indução. O contator " C_1 " faz o chaveamento das resistências " R_F " e " R_A ".

Como o interesse dos testes é no fluxo de potência ativa, a carga trifásica utilizada é puramente resistiva composta de duas partes chaveadas pelo contator " C_3 ". Seu consumo em KW será ajustado nos experimentos realizados. O contator " C_2 " faz a transferência da linha que recebe a alimentação da máquina de corrente contínua que aciona a máquina de indução para uma resistência " R_d ". Isto é necessário quando a máquina de indução em um transitório atua como motor e conseqüentemente a máquina de corrente contínua opera como gerador.

Uma linha de transmissão é simulada através de três bobinas com indutância " L " de 80 mH podendo ter seu valor alterado na realização dos testes. Através desta linha o barramento em que se encontra o gerador síncrono, máquina de indução e carga, ficará conectado ao barramento infinito.

Aparelhos elétricos de medição tais como: amperímetros, voltímetros, frequencímetros e wattímetros são colocados em locais estratégicos para o ajuste em regime permanente do sistema que deverá ser colocado em paralelo com o barramento infinito.

7.2.1 - Monitoração das grandezas elétricas e mecânicas

Através do esquema da figura 7.1 pode-se observar a monitoração de tensão e corrente efetuadas na saída do gerador e a monitoração da velocidade angular e do ângulo de carga realizada através de um tacômetro óptico colocado próximo a polia solidária ao eixo do gerador síncrono. Os dois processos de monitoração foram feitos de formas diferentes e são descritos a seguir.

7.2.1.1 - Monitoração das grandezas elétricas

A figura 7.2 mostra o esquema de monitoração das grandezas elétricas utilizado nos testes.

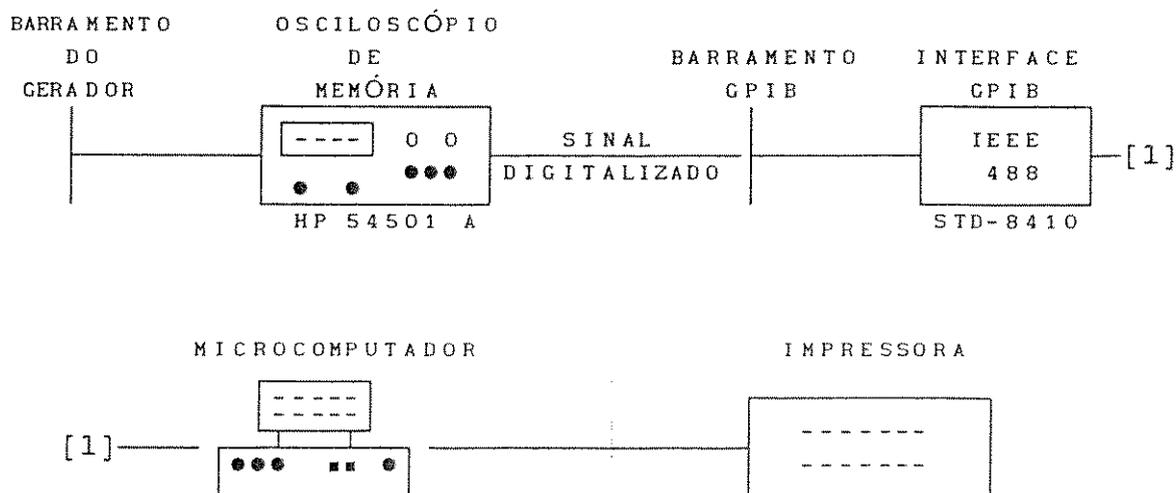


Figura 7.2 - Montagem para a monitoração das grandezas elétricas.

O osciloscópio utilizado na montagem é um HP 54501a-100 MHz, digitalizador com quatro canais de memória. Ele é bastante preciso com avançada lógica de triggering e medições automáticas.

O cartão STD-8410 é uma interface GPIB (General Purpose Interface Bus) definida pela norma IEEE 488, para microcomputadores compatíveis com o "IBM-PC", que utilizam o sistema operacional "MS-DOS (PC-DOS)". De forma simplificada o cartão STD-8410 pode ser visto como um conversor de barramentos, que converte mensagens e sinais entre os barramentos do computador e do GPIB. Desta forma o sinal de tensão e corrente é obtido no barramento do gerador, armazenado e digitalizado pelo osciloscópio. Este sinal digitalizado é transferido para o

microcomputador através de uma interface, onde então pode-se obter os gráficos necessários através de um software específico.

7.2.1.2 - Monitoração das grandezas mecânicas

O esquema de monitoração das grandezas mecânicas utilizado nos ensaios de laboratório é mostrado na figura 7.3 em dois estágios; devendo-se destacar o primeiro que evidencia o tacômetro óptico montado no laboratório.

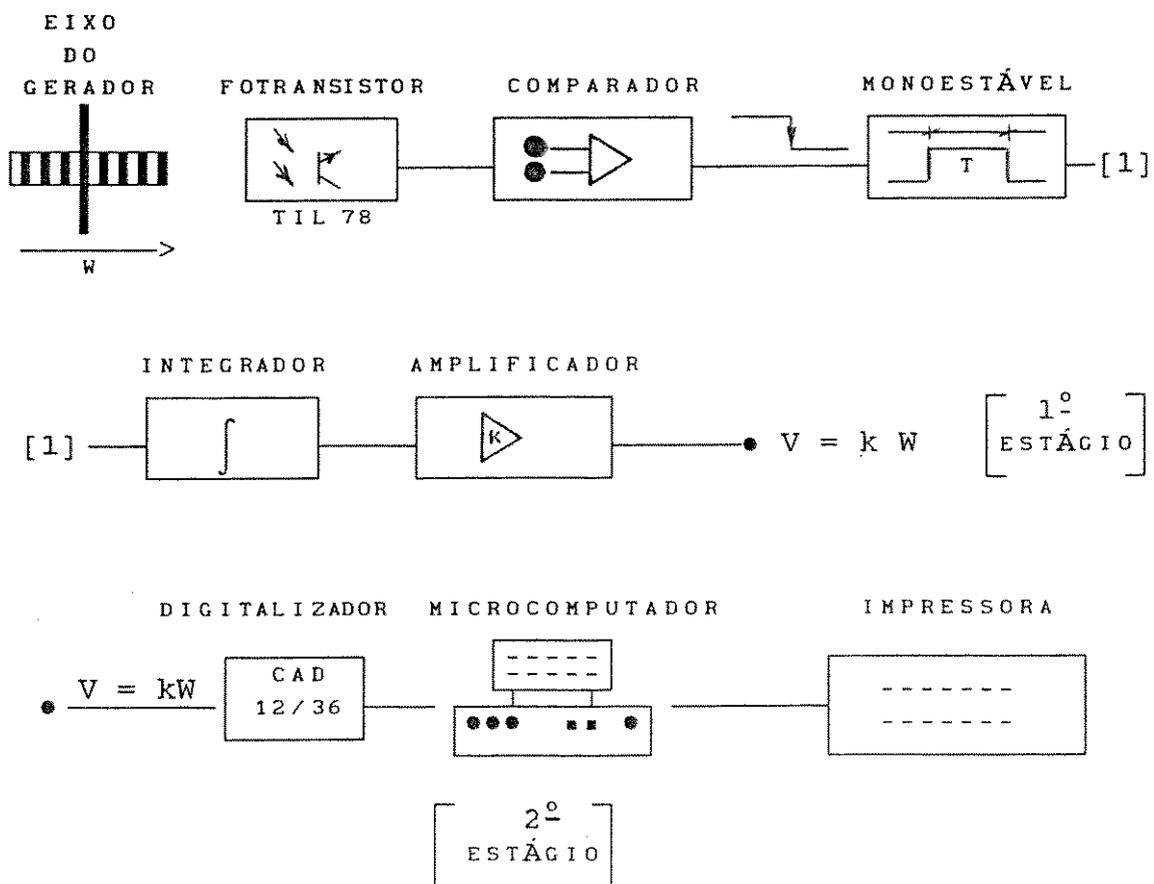


Figura 7.3 - Esquema de monitoração das grandezas mecânicas do gerador síncrono.

A polia solidária ao eixo do gerador foi marcada com faixas escuras e claras igualmente espaçadas de tal forma a se obter melhor contraste. Para captar estas variações de luminosidade foi utilizado o fototransistor TIL-78 (Texas) bastante sensível e preciso. O sinal devido a variação de luminosidade passa por um comparador que verifica a passagem da faixa escura para a faixa clara. Um sistema monoestável garante a largura constante do sinal. Deve-se entender que a velocidade é função do espaçamento entre os pulsos e não da largura dos pulsos. Assim o integrador fornece o valor médio dos pulsos que depende do espaçamento entre eles; sinal este que sofre uma amplificação fornecendo um sinal de tensão " $V = kW$ ", proporcional a velocidade do eixo do gerador.

No 2º estágio o sinal analógico "V" passa pela placa de expansão digitalizadora "CAD 12/36" que permite aos computadores compatíveis com o "IBM PC/XT/AT" executar a leitura de sinais analógicos e digitais. A placa possui "DMA" (Memória de Acesso Direto) que possibilita a conversão e transferência automática de dados para a memória do micro-computador, eliminando os atrasos causados pela transferência via "UCP", permitindo assim o completo aproveitamento da alta velocidade do conversor "A/D - D/A". Após o sinal estar digitalizado ele é introduzido no micro-computador ficando os dados disponíveis a qualquer operação.

7.3 - Procedimento e resultado dos ensaios

Os ensaios foram realizados conforme o procedimento explicado no decorrer de todo o trabalho, ou seja a máquina de indução deverá atuar sempre no sentido de auxiliar o gerador síncrono com o objetivo de melhorar sua estabilidade.

O ensaio é separado em duas partes:

- Monitoração das grandezas elétricas
- Monitoração das grandezas mecânicas

que são ensaios realizados separadamente haja visto a impossibilidade de se monitorar ambas as grandezas conjuntamente, devido a grande diferença entre a ordem de grandeza dos tempos envolvidos nos transitórios elétricos e mecânicos. Cada situação acima se divide em duas outras:

- Transitório devido a acréscimo de carga
- Transitório devido a decréscimo de carga

Antes que qualquer transitório seja provocado, o sistema é colocado em regime permanente ficando o gerador síncrono operando em regime nominal alimentando uma carga fixa trifásica com $R_L \Omega/\text{fase}$, e a máquina de indução flutuando no barramento (sem fornecer nem absorver potência ativa) através do ajuste da corrente de campo I_F de sua máquina primária. Quando o transitório é causado por um acréscimo de carga através do fechamento do contator "C₃" que acrescenta uma carga trifásica com $R_T \Omega/\text{fase}$, o contator "C₁" coloca ($R_F + R_A$) no circuito de campo da máquina de corrente contínua fazendo com que ela acione

a máquina de indução que atua como gerador. Logo após a resistência variável R_A é levada até zero fazendo com que a máquina de indução volte a flutuar na barra. Em uma outra situação o gerador síncrono está operando em regime permanente e nominal, porém alimentando a carga formada pelas resistências ($R_L + R_T$). A máquina de indução novamente está flutuando no barramento, no entanto com a máquina de corrente contínua ajustada com as resistências ($R_F + R_A$) em série com o enrolamento de campo. Quando agora o transitório é provocado por um decréscimo de carga através da abertura do contator " C_3 " que retira a carga trifásica composta pelas resistências $R_T \Omega$ /fase, o contator " C_1 " deixa apenas $R_F \Omega$ no circuito de campo da máquina de corrente contínua que passa a atuar como gerador. Desta forma a máquina de indução opera como motor acionando o gerador; daí a necessidade do contator " C_2 " inserir a resistência " R_d " no circuito de armadura da máquina de corrente contínua retirando a alimentação. A resistência " R_A " é então levada até zero, inserida novamente no circuito de campo e ajustada novamente para que a máquina de indução volte a flutuar no barramento.

As figuras (7.4)-(7.5) mostram respectivamente corrente e tensão para um distúrbio provocado por um acréscimo de 35% de carga no sistema (em relação a potência do gerador) sem a presença da máquina de indução. As figuras (7.6)-(7.7) mostram as mesmas grandezas para a mesma situação, porém agora com o auxílio da máquina de indução.

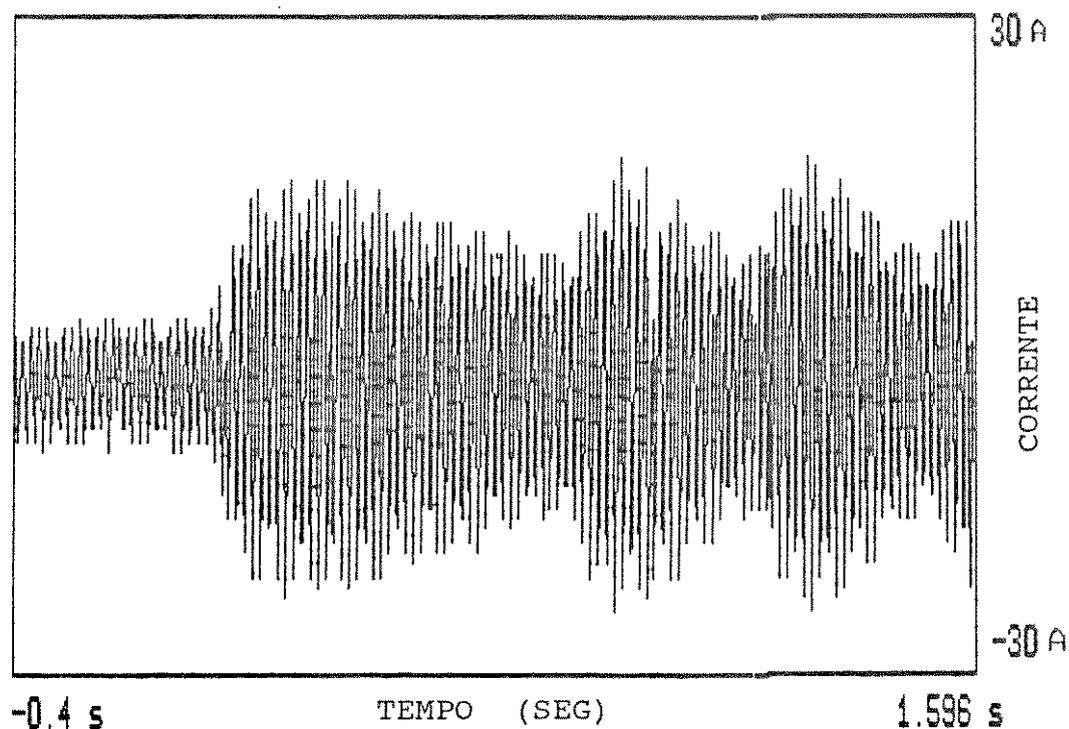


Figura 7.4 - Corrente da máquina síncrona para um aumento de carga sem a presença da máquina de indução.

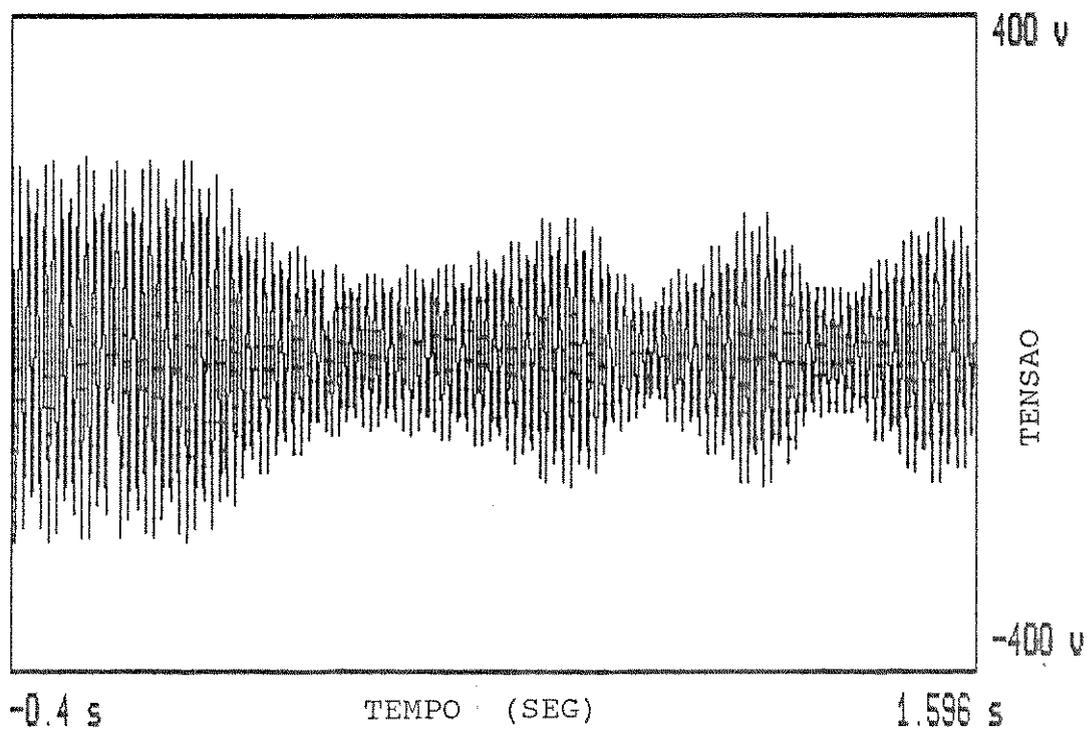


Figura 7.5 - Tensão da máquina síncrona para um aumento de carga sem a presença da máquina de indução.

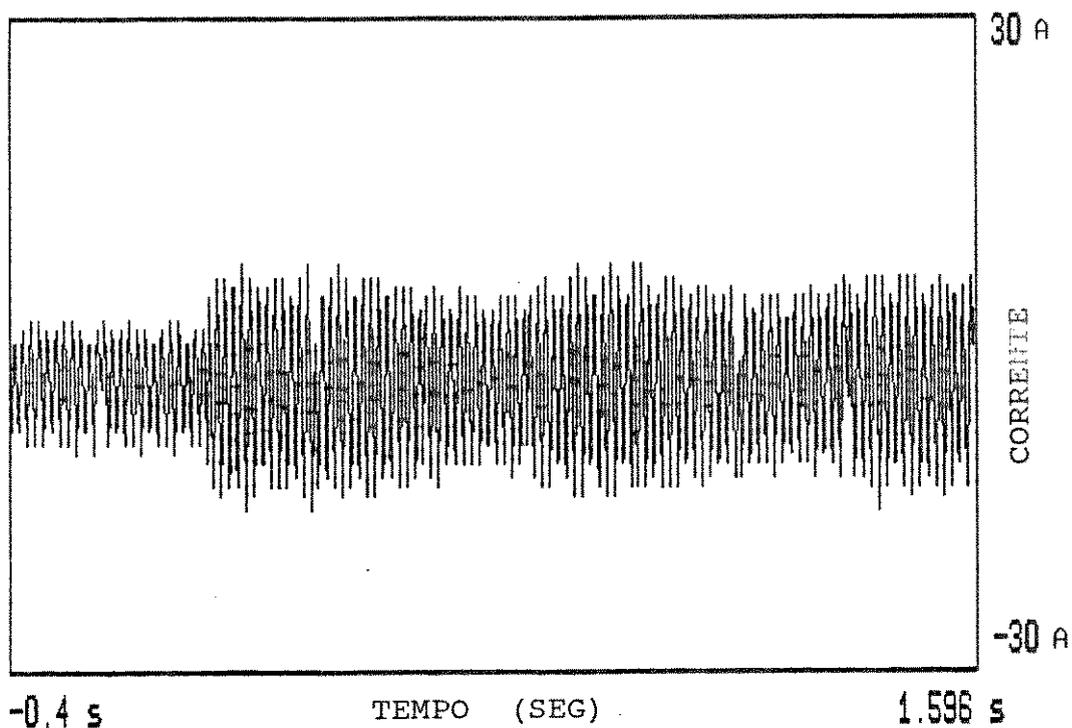


Figura 7.6 - Corrente da máquina síncrona para um aumento de carga com o auxílio da máquina de indução.

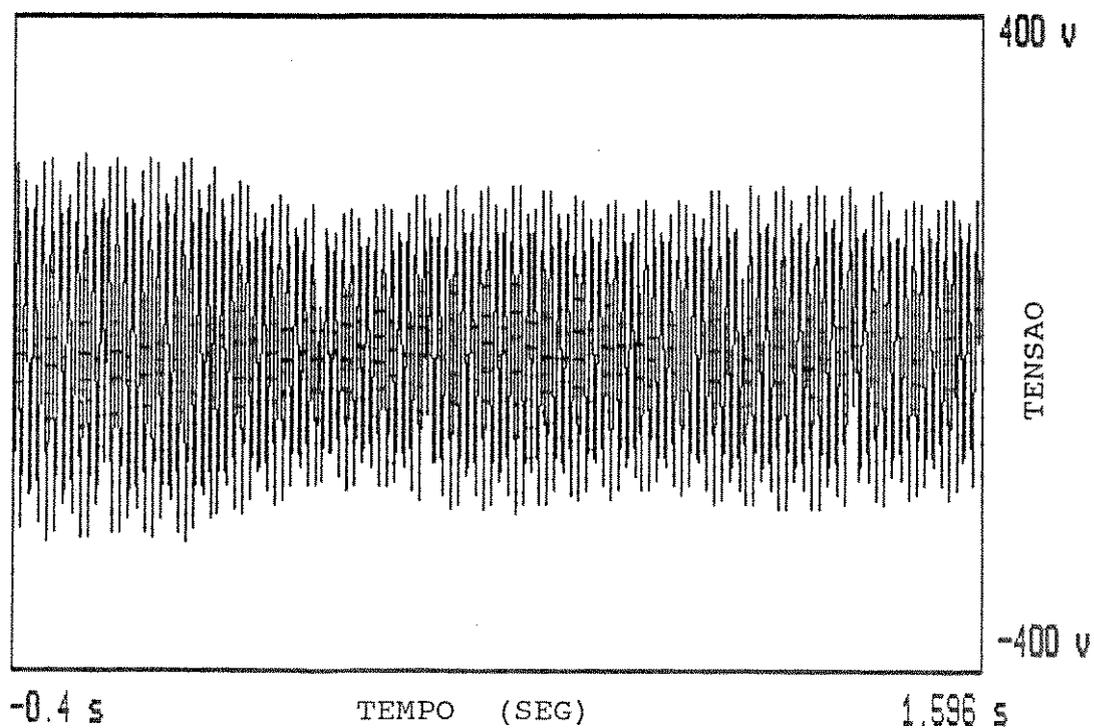


Figura 7.7 - Tensão da máquina síncrona para um aumento de carga com o auxílio da máquina de indução.

As figuras (7.8)-(7.9) mostram respectivamente corrente e tensão para um distúrbio provocado por um decréscimo de carga no sistema sem a presença da máquina de indução. As figuras (7.10)-(7.11) mostram as mesmas grandezas para a mesma situação, porém agora com o auxílio da máquina de indução.

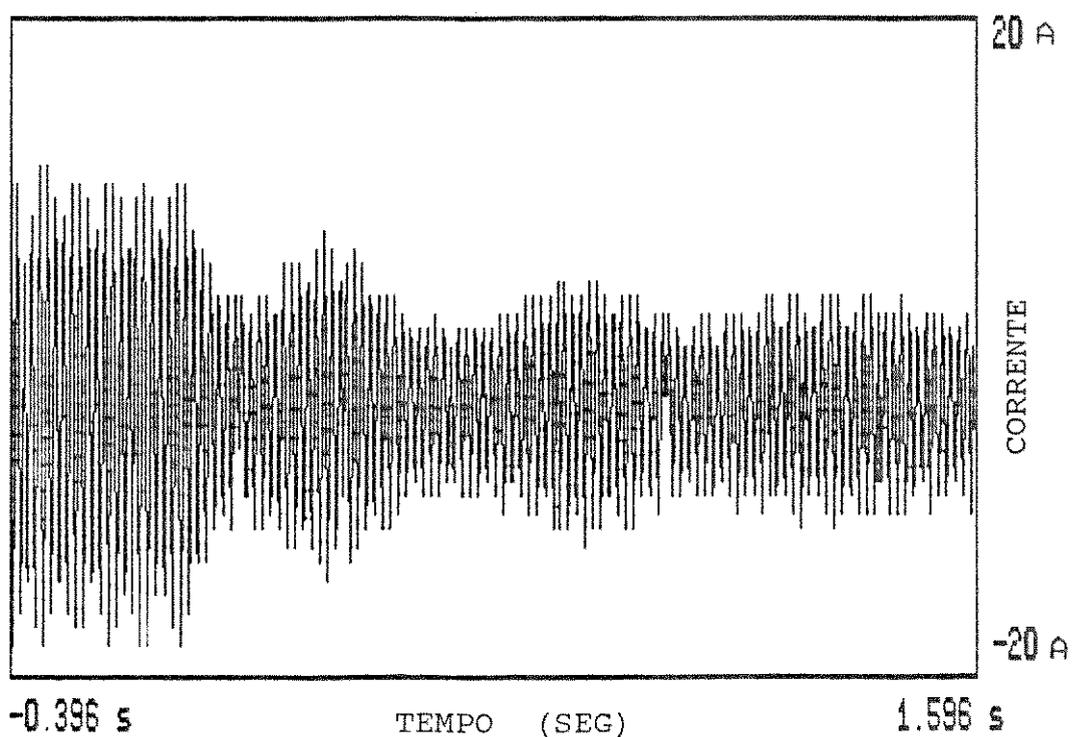


Figura 7.8 - Corrente da máquina síncrona para um decréscimo de carga sem a presença da máquina de indução.

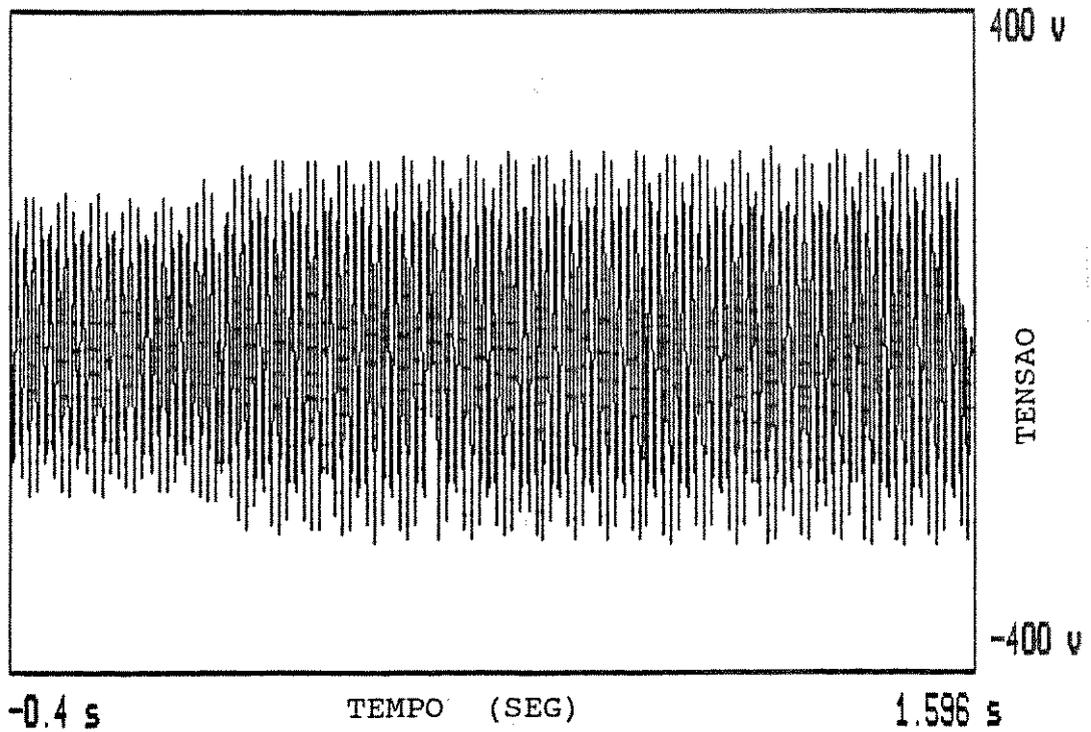


Figura 7.9 - Tensão da máquina síncrona para um decréscimo de carga sem a presença da máquina de indução.

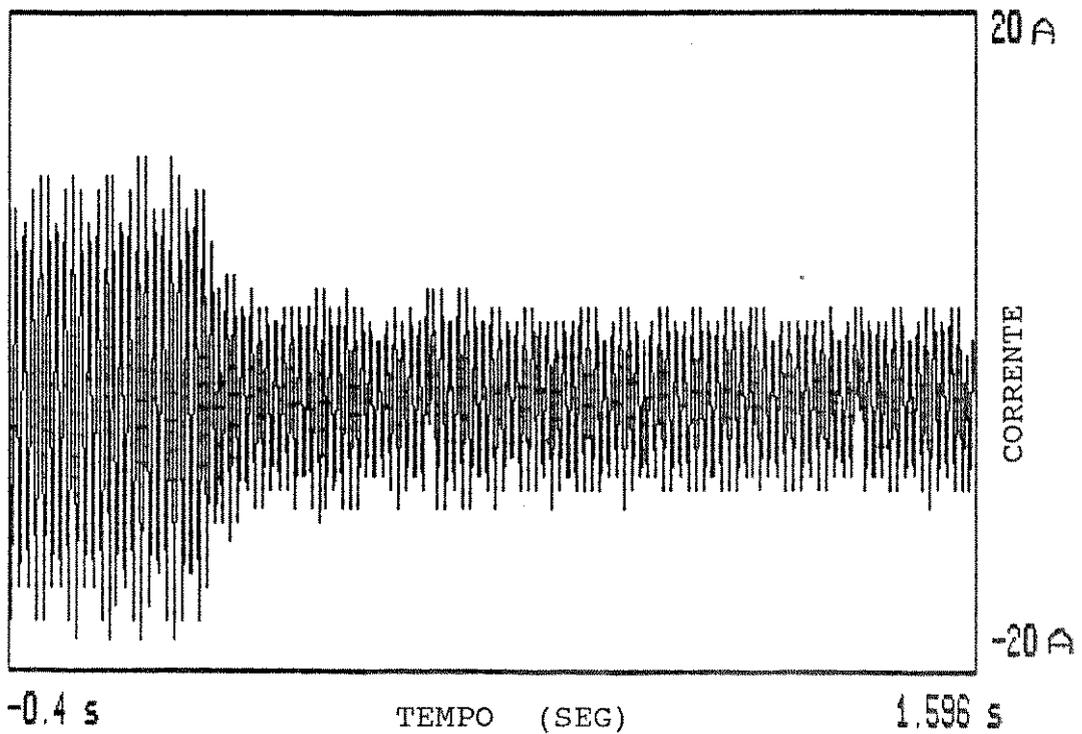


Figura 7.10- Corrente da máquina síncrona para um decréscimo de carga com o auxílio da máquina de indução.

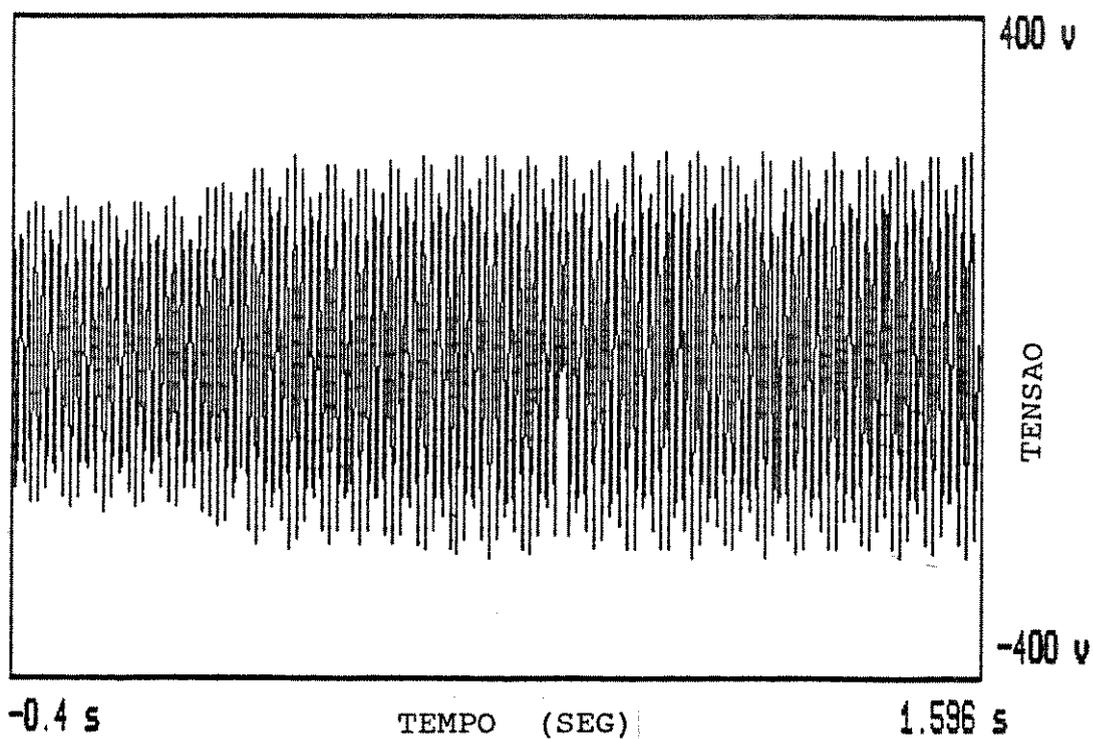


Figura 7.11- Tensão da máquina síncrona para um decréscimo de carga com o auxílio da máquina de indução.

As figuras (7.12)-(7.13) mostram respectivamente corrente e tensão para um distúrbio provocado por um acréscimo de carga no sistema sem a presença da máquina de indução. As figuras (7.14)-(7.15) mostram as mesmas grandezas para a mesma situação, porém agora como auxílio da máquina de indução.

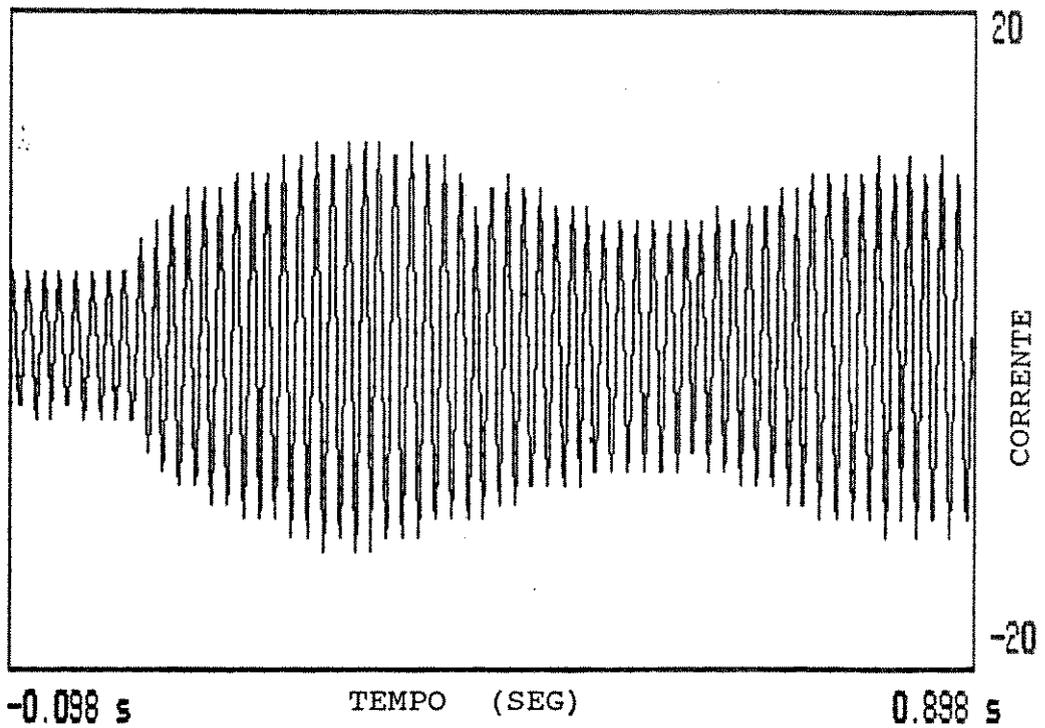


Figura 7.12- Corrente da máquina síncrona para um aumento de carga sem a presença da máquina de indução.

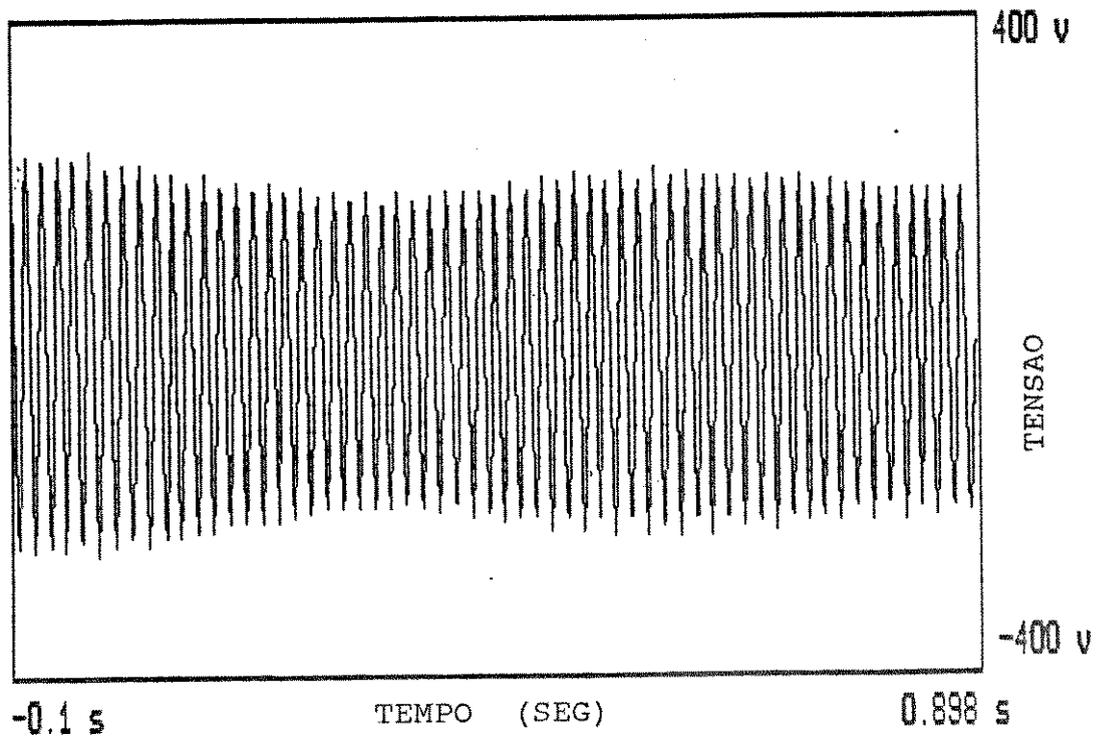


Figura 7.13 -Tensão da máquina síncrona para um aumento de carga sem a presença da máquina de indução.

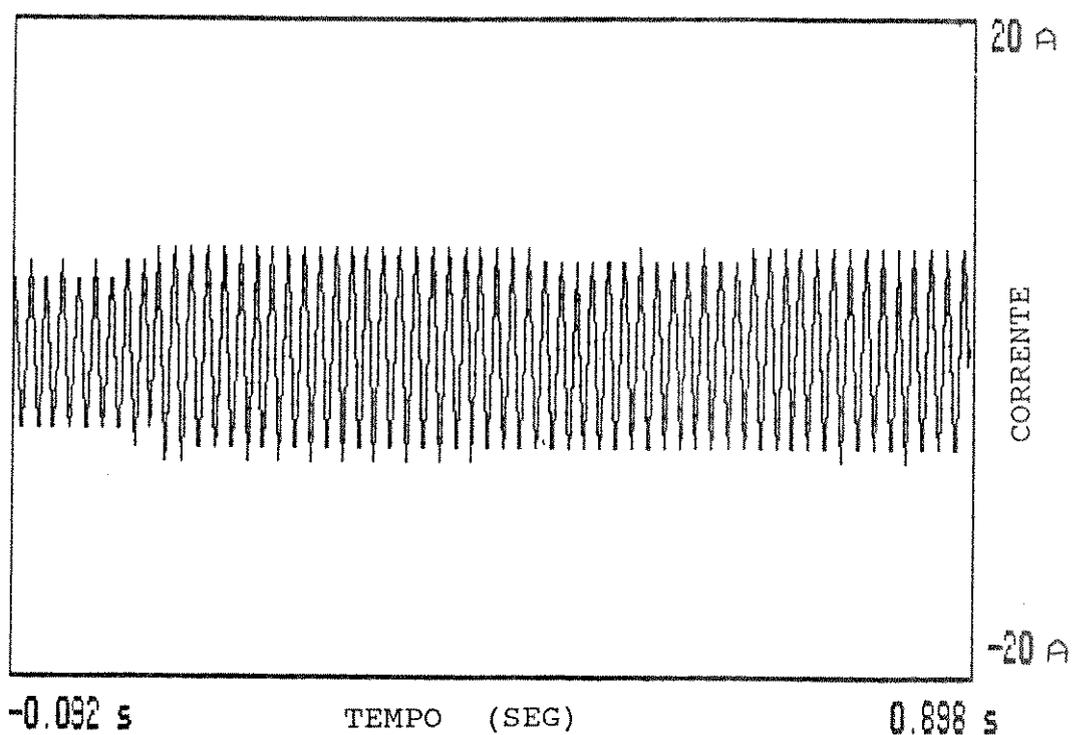


Figura 7.14 -Corrente da máquina síncrona para um aumento de carga com o auxílio da máquina de indução.

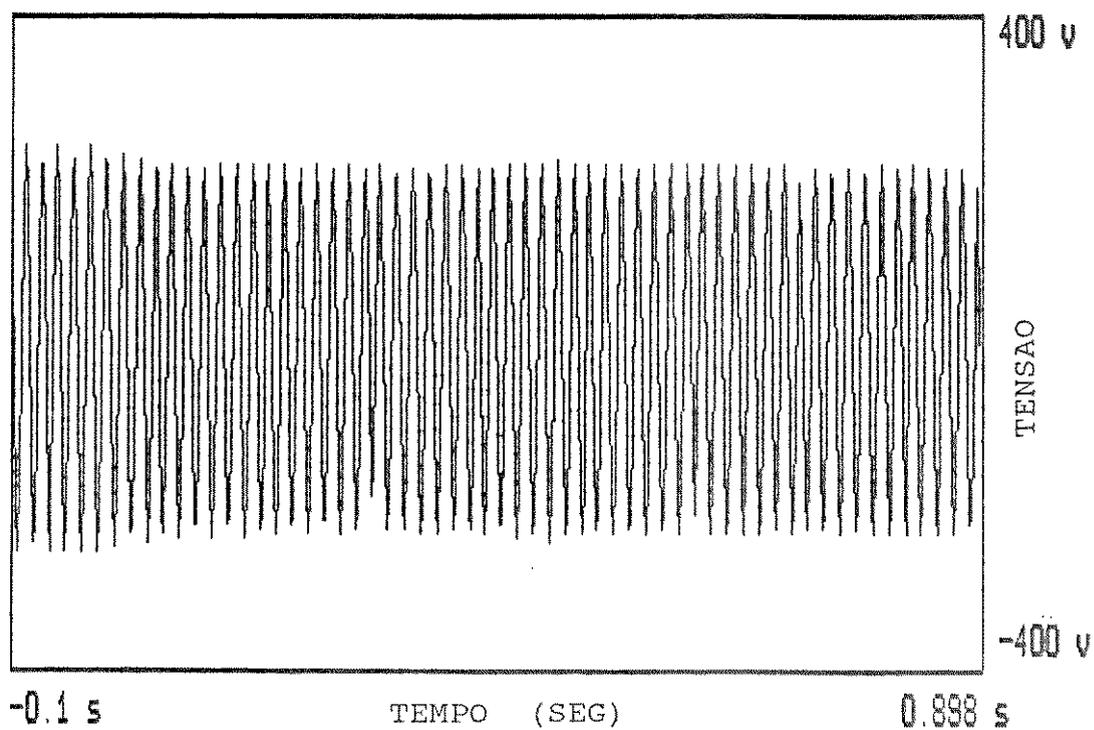


Figura 7.15 -Tensão da máquina síncrona para um aumento de carga com o auxílio da máquina de indução.

As figuras (7.16)-(7.17) mostram respectivamente velocidade angular e ângulo de carga para um distúrbio provocado por um acréscimo de carga no sistema sem a presença da máquina de indução. As figuras (7.18)-(7.19) mostram as mesmas grandezas para a mesma situação, porém agora com o auxílio da máquina de indução.

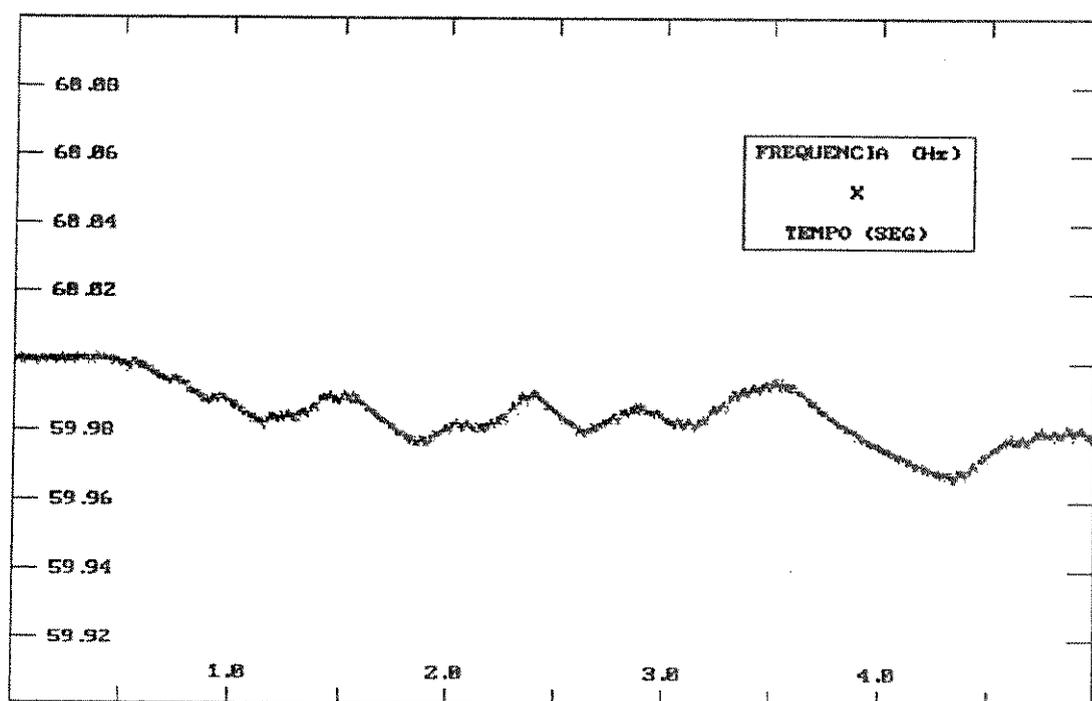


Figura 7.16 - Velocidade angular da máquina síncrona para um aumento de carga sem a presença da máquina de indução

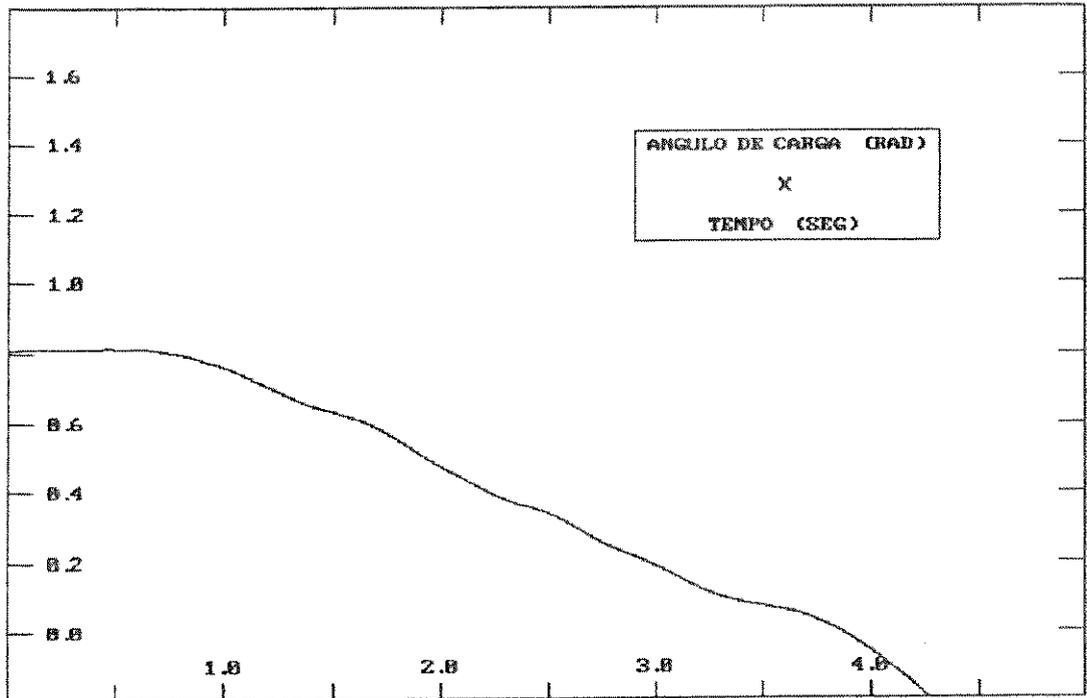


Figura 7.17 - Ângulo de Carga da máquina síncrona para um aumento de carga sem a presença da máquina de indução.

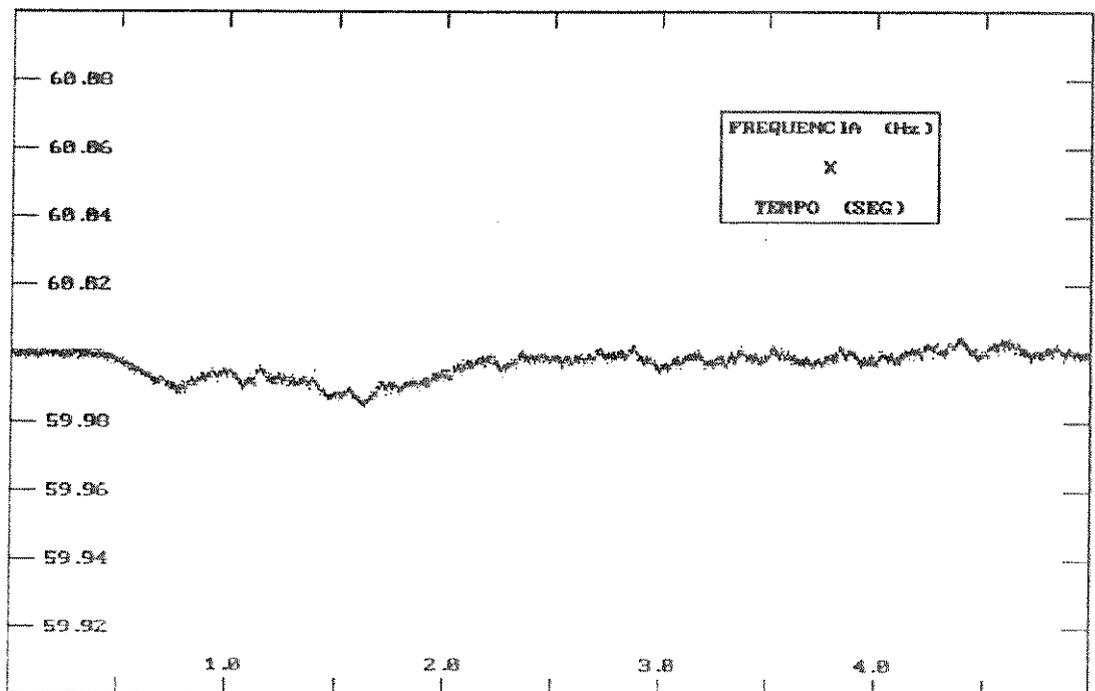


Figura 7.18 - Velocidade angular da máquina síncrona para um aumento de carga com o auxílio da máquina de indução

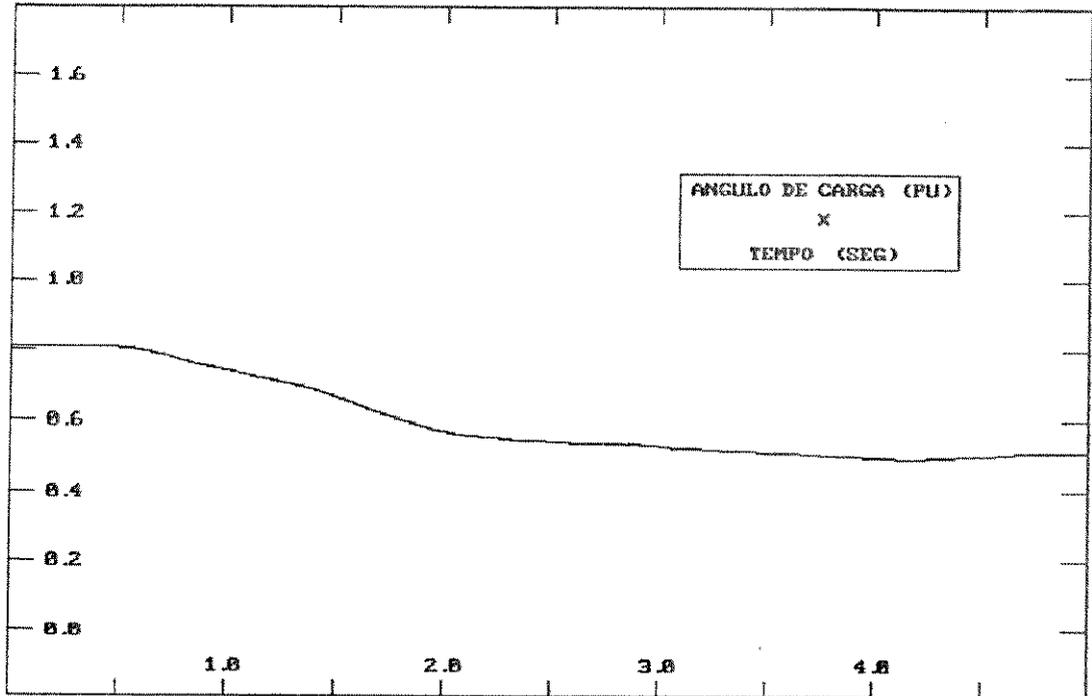


Figura 7.19 - Ângulo de Carga da máquina síncrona para um aumento de carga com o auxílio da máquina de indução.

As figuras (7.20)-(7.21) mostram respectivamente velocidade angular e ângulo de carga para um distúrbio provocado por um decréscimo de carga no sistema sem a presença da máquina de indução. As figuras (7.22)-(7.23) mostram as mesmas grandezas para a mesma situação, porém agora com o auxílio da máquina de indução.

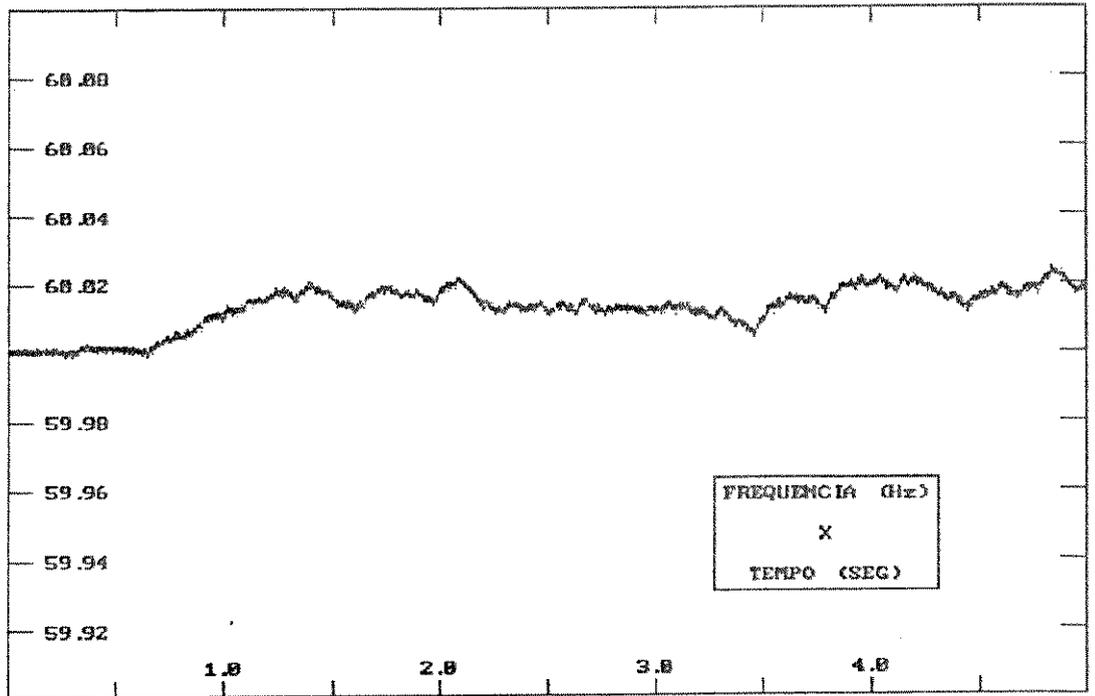


Figura 7.20 - Velocidade angular da máquina síncrona para um decréscimo de carga sem a presença da máquina de indução

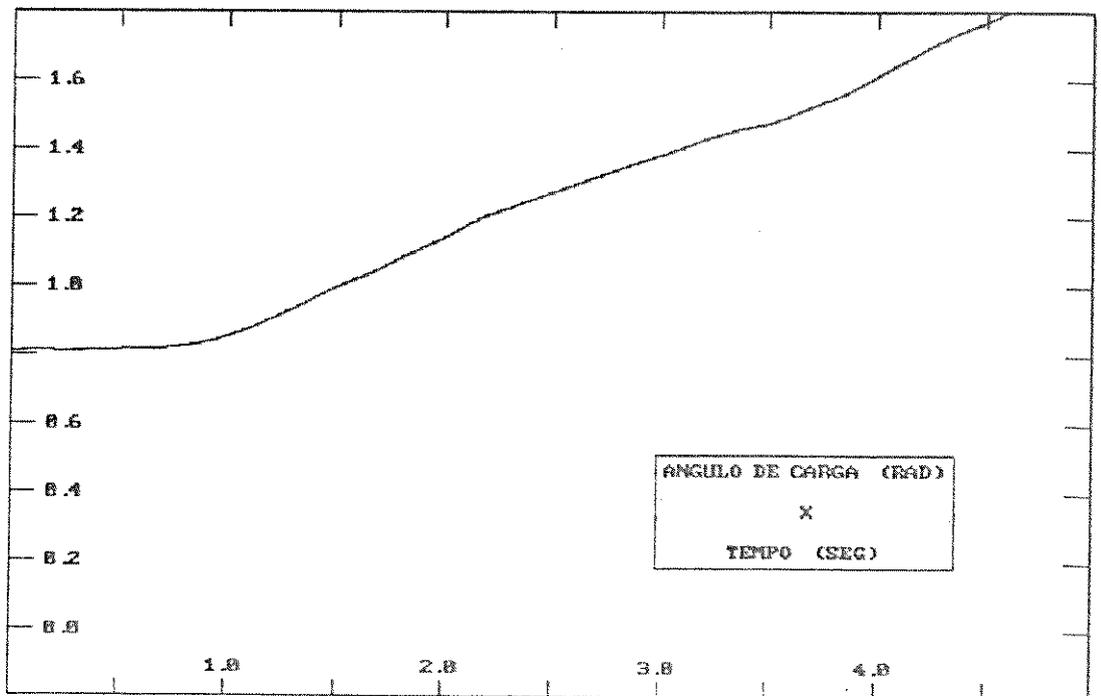


Figura 7.21 - Ângulo de Carga da máquina síncrona para um decréscimo de carga sem a presença da máquina de indução.

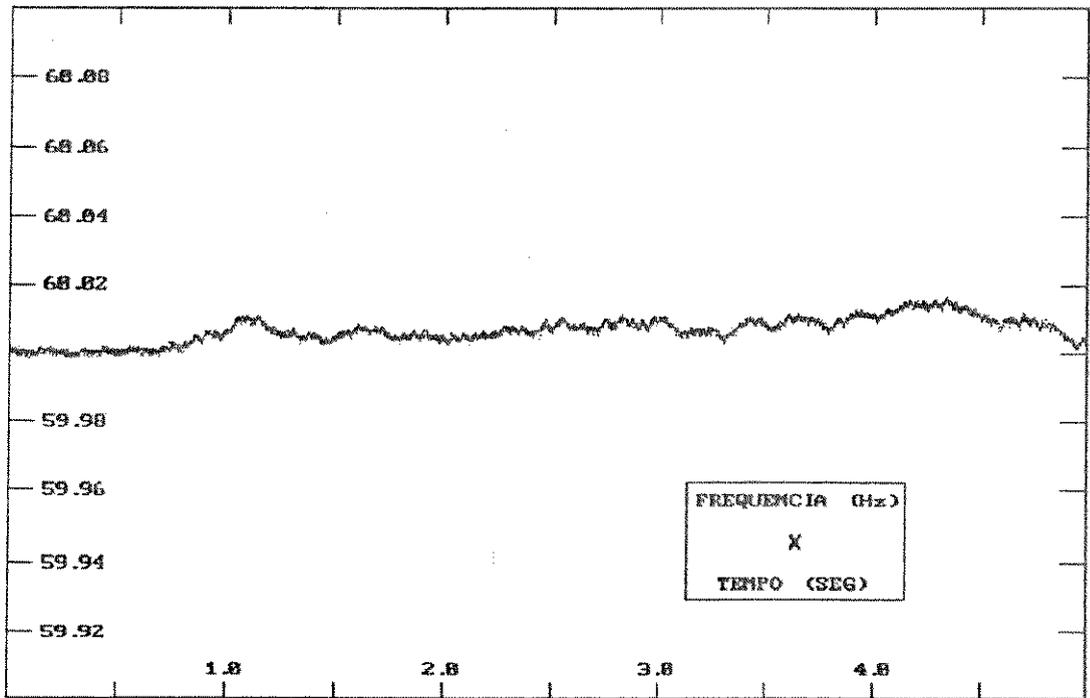


Figura 7.22 - Velocidade angular da máquina síncrona para um decréscimo de carga com o auxílio da máquina de indução

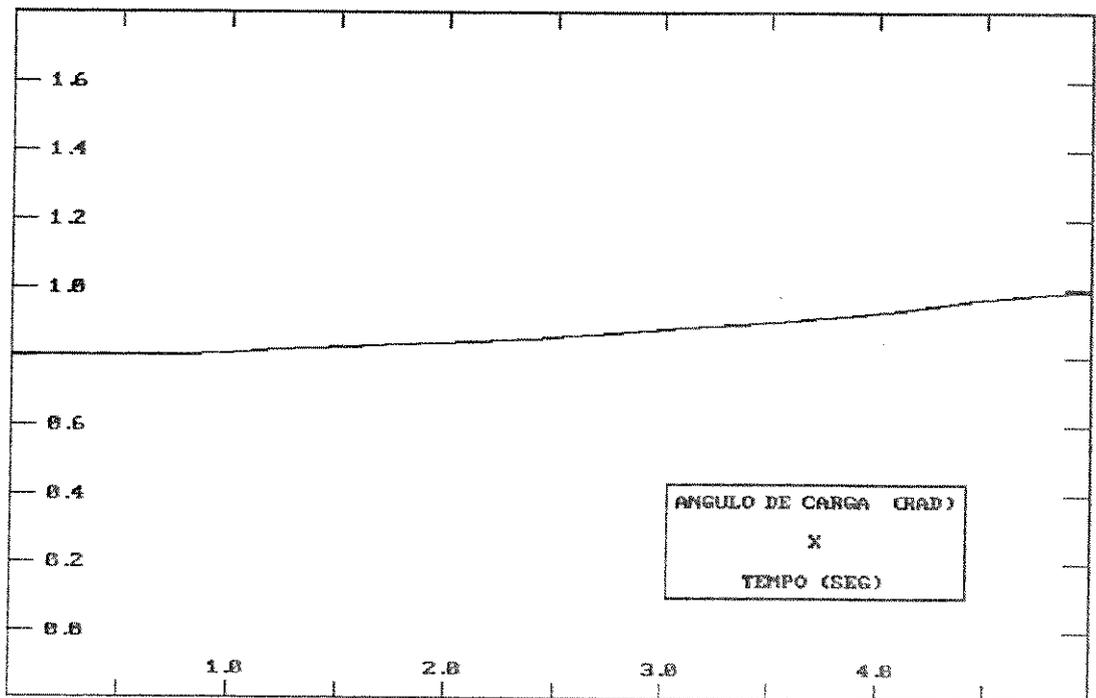


Figura 7.23 - Ângulo de Carga da máquina síncrona para um decréscimo de carga com o auxílio da máquina de indução.

As figuras (7.24)-(7.25) mostram respectivamente velocidade angular e ângulo de carga para um distúrbio provocado por um acréscimo de carga no sistema sem a presença da máquina de indução. As figuras (7.26)-(7.27) mostram as mesmas grandezas para a mesma situação, porém agora com o auxílio da máquina de indução.

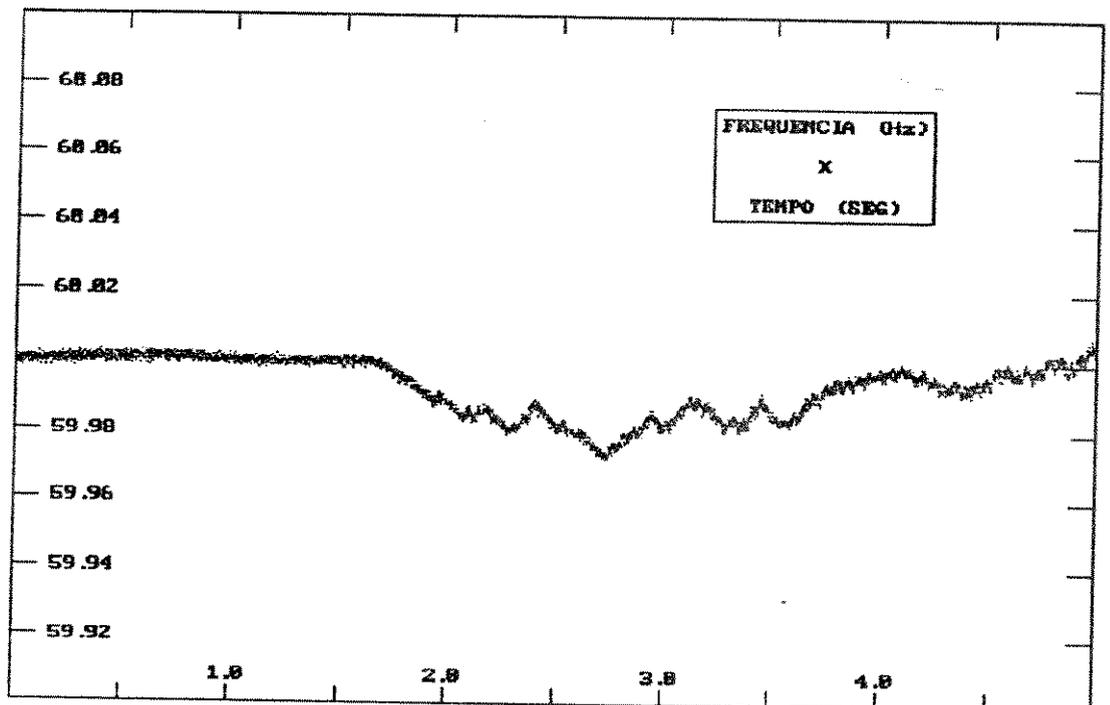


Figura 7.24 - Velocidade angular da máquina síncrona para um aumento de carga sem a presença da máquina de indução

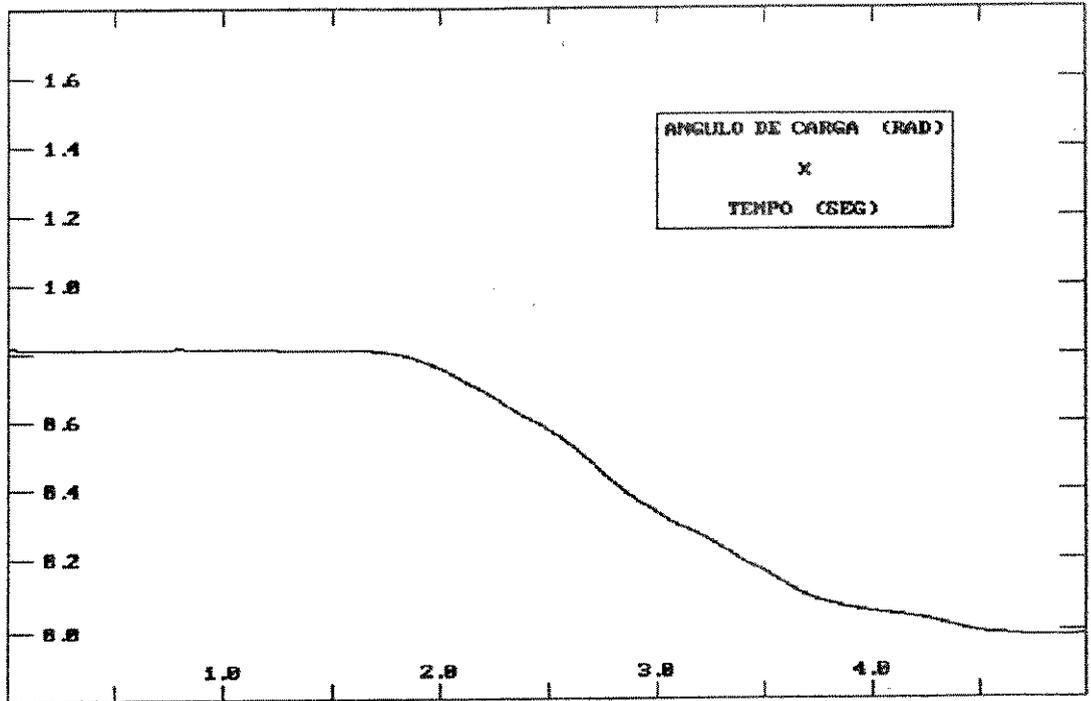


Figura 7.25 - Ângulo de Carga da máquina síncrona para um aumento de carga sem a presença da máquina de indução.

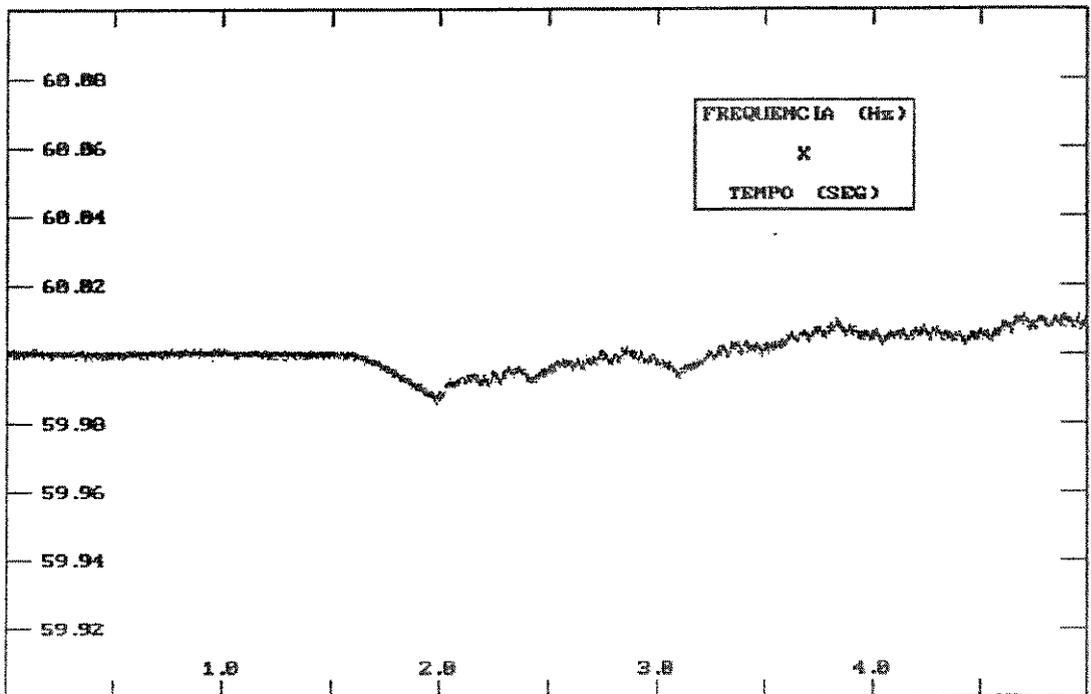


Figura 7.26 - Velocidade angular da máquina síncrona para um aumento de carga com o auxílio da máquina de indução

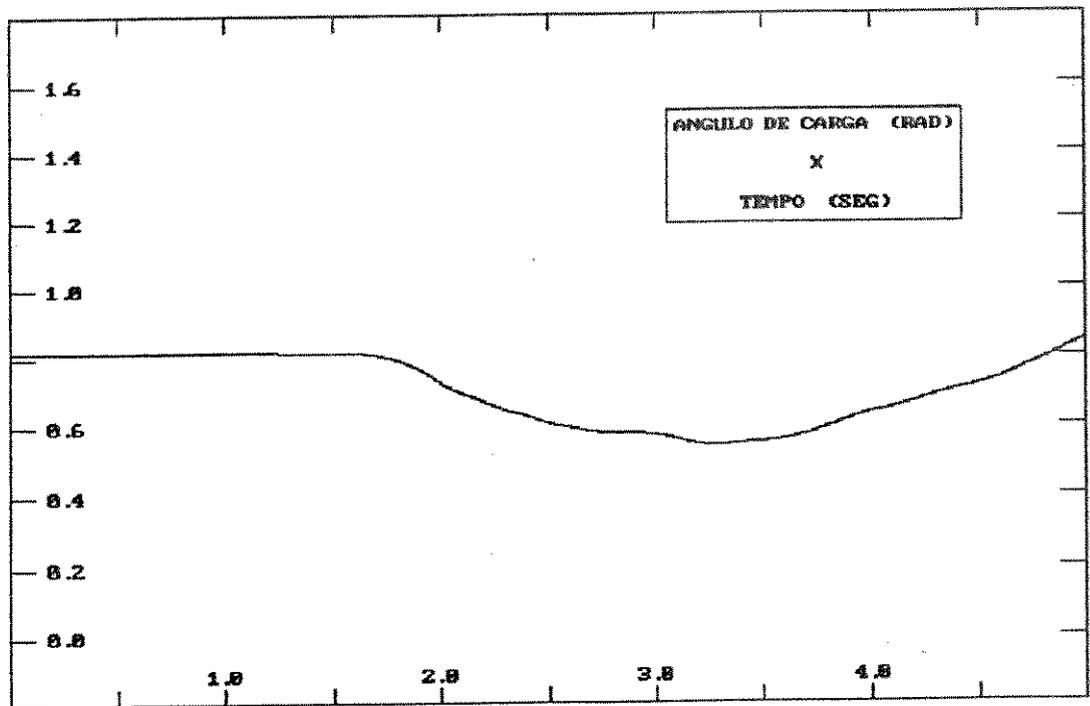


Figura 7.27 - Ângulo de Carga da máquina síncrona para um aumento de carga com o auxílio da máquina de indução.

CAPITULO 8

CONCLUSÕES

No estudo realizado do sistema isolado, tendo em vista o comportamento tanto do gerador síncrono como da máquina de indução, pode-se observar a influência que a máquina de indução teve na estabilidade do sistema. Ficou evidenciado através dos resultados obtidos uma melhora na estabilidade, sendo que esta melhora se caracterizou por uma diminuição tanto na amplitude máxima como na duração dos transitórios estudados. No entanto apesar de satisfatório, o modelo deste sistema possuía limitações se o estudo a ser realizado fosse de sistemas reais.

O estudo de sistemas reais foi realizado através da implementação das equações dinâmicas da máquina de indução e de seu regulador de velocidade em um programa de estabilidade transitória. Tal programa é caracterizado por sua boa estrutura computacional, mostrando-se confiável e preciso nas simulações realizadas. O método de integração trapezoidal implícito utilizado pelo programa mostrou-se bastante simples e eficiente nas simulações realizadas. Após a implementação do modelo dinâmico da máquina de indução no programa, uma série de situações transitórias foram simuladas observando-se sempre o comportamento do sistema sem e com o auxílio da máquina de indução. A influência da máquina de indução na estabilidade do

sistema foi sempre evidenciada através dos resultados das simulações. Pode-se concluir que foram satisfatórios estes resultados, haja visto a melhora obtida na estabilidade do sistema. Em casos extremos onde houve a perda de estabilidade do gerador síncrono devido a um transitório acentuado, com o auxílio da máquina de indução para o mesmo transitório a instabilidade não é observada.

A análise de parâmetros da máquina de indução mostrou que as máquina convencionais especificadas pelos fabricantes são adequadas à utilização proposta. Os testes foram realizados variando parâmetros tais como: T_0' (constante de tempo transitória), X' (reatância de rotor bloqueado), H (constante de inércia), etc. A influência que a máquina de indução teve nos transitórios estudados com a variação destes parâmetros foi compatível com o comportamento da máquina operando normalmente.

Finalmente foram realizados ensaios em laboratório onde procurou-se reproduzir na prática todo o estudo teórico realizado anteriormente. A montagem foi feita utilizando um gerador síncrono com uma máquina de indução conectados a um barramento infinito. Os transitórios foram provocados por uma variação de carga na barra em que se encontravam as máquinas, que por sua vez tinham suas grandezas elétricas e mecânicas monitoradas. Os testes realizados apresentaram resultados compatíveis com os resultados teóricos

obtidos anteriormente, ou seja houve sempre uma melhora na estabilidade do sistema quando a máquina de indução participava do processo transitório auxiliando a máquina síncrona, evidenciando novamente sua influência no comportamento dinâmico do sistema.

O trabalho desenvolvido obviamente não é conclusivo. Sugere-se assim que outros estudos envolvendo este assunto sejam realizados, principalmente no que se refere ao laboratório, onde a parte do regulador de velocidade pode vir a ser implementada. Um levantamento dos parâmetros das máquinas e linhas de transmissão pode ser feito quando se repetir os ensaios. Este levantamento é importante, pois pode-se assim utilizar nas simulações os parâmetros encontrados e confrontar os resultados com os aqueles obtidos nos ensaios.

REFERÊNCIAS

- [01] ANDERSON, P.M. ; FOUAD, A.A. , Power System Control and Stability, The Iowa State University Press, Ames, Iowa: U.S.A., 1977, 464 p.
- [02] FITZGERALD, A.E. ; KINGSLEY JR., CHARLES , Electric Machinery - The Dynamics and Statics of Electromechanical Energy Conversion , McGraw-Hill Book Company , Inc., Second Edition, 1961, 568 p.
- [03] PACHECO, E.J.P. , Induction Motor Starting in an Electrical Power System Transient Stability Program, M.Sc. Dissertation, UMIST, 1975, 147 p.
- [04] ARNOLD C.P. , Solutions of the Multi-Machine Power System Stability Program, Ph. D. Thesis, UMIST, 1976, 220 p.
- [05] ARRILAGA, J. ; ARNOLD, C.P. and HARKER, B.J. , Computer Modelling of Electrical Power Systems , John Wiley & Sons Ltd., 1983, 423 p.
- [06] MARTINS NETO, LUCIANO ; Motor de Indução Assimétrico Funcionando como Conversor de Numero de Fases, Tese de Doutorado , Escola de Engenharia de São Carlos, USP,

1980, 243 p.

- [07] SPECKHART, FRANK H. ; GREEN, WALTER L., A guide to using CSMP - The Continuous System Modelling Program, Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J., 1976, 325 p.
- [08] SALERNO, C.H. , Análise de Estabilidade de um Sistema Elétrico utilizando a Máquina de Indução como Elemento de controle , Tese de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1989, 144 p.
- [09] ERTEM, S. ; BAGHZOUZ, Y., Simulation of Induction Machinery for Power System Studies, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 4, No. 1, march 1989, pp 88-94.
- [10] BRERETON, D.S. ; LEWIS D.G. ; YOUNG, C.C., Representation of Induction Motor Loads during Power System Stability Studies, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 76, august 1957, pp 451-461.
- [11] SKVARENINA, T.L. ; KRAUSE, P.C., Accuracy of a Reduced Order Model of Induction Machines in Dynamic Stability Study, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 98, no. 4, July/August 1979, pp 1192-1197

- [12] HALLEY, H.J. ; HIGGINS, T.A. ; YOUNG P.L. ; SNIDER, W.L.,
A comparison of Induction Motor Models for Bus Transfer
Studies, IEEE Trans.on Energy Conv.,v. 5, no. 2,June/90
- [13] KRAUSE, P.C. ; RODRIGUEZ, F.D. ; WASYNCZUK, O. ; MOJICA
D.A., Neglecting Stator Transients When Representing
Isolated Operation of Induction Machines, IEEE
Trans.on Power Systems, Vol. PWRS 2, no. 1, February/87.
- [14] KHALIL, A.K. ; TAN, O.T. ; BARAN, U.B., Reduced Order
Models for Double-Cage Induction Motors, IEEE
Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS
101, no. 9, September 1982, pp 3135-3140.
- [15] SHANKLE, D.F. ; MURPHY, C.M. ; LONG, R.W. ; HRDER E.L.,
Transient Stability Studies I : Synchronous and
Induction Machines, AIEE Power Apparatus and Systems,
vol. 73, February 1955, pp 1563-1580.
- [16] KELLY, A.R., Induction Motor Model for Industrial Power
System computations, Paper 62-173, AIEE Winter General
Meeting, NY, July 1962, pp 166-172.
- [17] MAGINNISS, F.J. ; SCHULTZ, N.R., Transient Performance of
Induction Motors, AIEE Transactions, vol. 63, September
1944, pp 641-646.

- [18] DINELEY, J.L. ; POWNER, E.T., Power System Governor Simulation, IEE Proceedings, vol. 111, no. 1, January/1964, pp 115-124.
- [19] IEEE COMMITTEE REPORT, Dynamic Models for Steam and Hydroturbines in Power System Studies, IEEE Power Engineering Society, IEEE PES Winter Meeting, New York, January 28 - February 2 / 1973.
- [20] WRIGHT, R.M., Understanding Modern Generator Control, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 4, no. 3, september 1989, pp 453-458.
- [21] DOMMEL, H.W. ; SATO, N. , Fast Transient Stability Solutions, IEEE Transactions Power Apparatus Systems, vol. PAS 91 (4), 1972, pp 1643-1650.
- [22] LAW, C.W., A Fast Transient Stability Program, M.Sc. Dissertation, UMIST, 1972.
- [23] RAMEY, D.G. ; SKOGLUND, J.W., Detailed Hydrogovernor Representation for System Stability Studies, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 89, no. 1, january 1970, pp 106-111.

- [24] IEEE Guide for operation and Maintenance of Turbine Generators, ANSI/IEEE Standard No. 67 - 1972, reaffirmed 1980, no change.
- [25] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance, Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, no. 1, February 1992, pp 167-179.
- [26] VASCONCELOS, A. B.; Contribuições para a modelagem de cargas, definição de parâmetros de reguladores e rejeição de cargas em estudos de estabilidade, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1987, pp. 05-54.
- [27] VIEIRA FILHO, X.; Operação de Sistemas de Potência com controle automático de geração, Eletrobrás, Editora Campus Ltda., caps. 1 e 2.

BIBLIOGRAFIA

- [1] SARMO, MULUKUTLA S. ; Synchronous Machines (Their Theory, Stability and excitation Systems), Gordon and Breach, Science Publishers, Inc. 1979, 581 p.
- [2] O'KELLY, D.; SIMMONS, S. ; Introduction to Generalized Electrical Machine Theory, McGraw-Hill Puplicing Company Limited, 1968, 299 p.
- [3] MEISEL, J. ; Principles of Electromechanical Energy Conversion, McGraw-Hill, 632 p.
- [4] NETO, L.M.; SALERNO, C.H.; MISKULIN, M.S.; Study and Evaluation of Induction Generator Parameters for Stability Control in Large Interconnected Power Systems, ICEM/92, UMIST, U.K.
- [5] NETO, L.M.; SALERNO, C.H.; MISKULIN, M.S.; Transient Stability analysis of a Power System Using an Induction Machine as a Control Device, Paper submitted to IEEE/Winter Meeting, 1993.
- [6] ROGERS, G.J.; SMITH J.R.; BUCKLEY, G.; Aplication of Induction motor Simulation Model to Industrial Drives, IEEE, Conf.(IAS), Paper no. 44A, pp.1175-1179, 1976

APÊNDICE A

MODELO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE

As equações de tensão de uma máquina de indução de gaiola simples após aplicada a transformada de Park fica:

$$v_{1d} = p\lambda_{1d} + R_1 i_{1d} + W_N \lambda_{1q} \quad (A1)$$

$$v_{1q} = p\lambda_{1q} + R_1 i_{1q} - W_N \lambda_{1d} \quad (A2)$$

$$v_{2d} = p\lambda_{2d} + R_2 i_{2d} + (W_N - W_R) \lambda_{2q} \quad (A3)$$

$$v_{2q} = p\lambda_{2q} + R_2 i_{2q} - (W_N - W_R) \lambda_{2d} \quad (A4)$$

com as equações de fluxo concatenado dadas por:

$$\lambda_{1d} = L_{11} i_{1d} + L_m i_{2d} \quad (A5)$$

$$\lambda_{1q} = L_{11} i_{1q} + L_m i_{2q} \quad (A6)$$

$$\lambda_{2d} = L_{22} i_{2d} + L_m i_{1d} \quad (A7)$$

$$\lambda_{2q} = L_{22} i_{2q} + L_m i_{1q} \quad (A8)$$

onde L_{11} , L_{22} e L_m são as auto indutâncias do estator e rotor e indutância magnetizante respectivamente.

Desprezando o transitório do estator, $p\lambda_{1d} = p\lambda_{1q} = 0$ e substituindo (A5) e (A6) em (A1) e (A2), fica:

$$v_{1d} = R_1 i_{1d} + WNL_{11} i_{1q} + WNL_m i_{2q} \quad (A9)$$

$$v_{1q} = R_1 i_{1q} - WNL_{11} i_{1d} - WNL_m i_{2d} \quad (A10)$$

As correntes do rotor podem ser obtidas de (A7) e (A8) como:

$$i_{2d} = (\lambda_{2d} - L_m i_{1d})/L_{22} \quad (A11)$$

$$i_{2q} = (\lambda_{2q} - L_m i_{1q})/L_{22} \quad (A12)$$

Substituindo (A12) em (A9), fica:

$$\begin{aligned} v_{1d} &= R_1 i_{1d} + WNL_{11} i_{1q} + WNL_m (\lambda_{2q} - L_m i_{1q})/L_{22} \\ v_{1d} &= R_1 i_{1d} + (WNL_{11} - WNL_m^2/L_{22}) i_{1q} + (WNL_m/L_{22}) \lambda_{2q} \\ v_{1d} &= R_1 i_{1d} + X' i_{1q} + (WNL_m/L_{22}) \lambda_{2q} \end{aligned} \quad (A13)$$

onde:

$$X' = WNL_{11} - WNL_m^2/L_{22} \quad (A14)$$

Da mesma forma, substituindo (A11) em (A10), fica:

$$v_{1q} = R_1 i_{1q} - X' i_{1d} - (WNL_m/L_{22}) \lambda_{2d} \quad (A15)$$

Agora substituindo (A11) e (A12) nas equações do rotor (A3) e (A4) e supondo que o rotor está curto circuitado ($v_{2d} = v_{2q} = 0$), obtém-se as seguintes expressões:

$$0 = p\lambda_{2d} + (R_2/L_{22})\lambda_{2d} + (W_N - W_R)\lambda_{2q} - (R_2L_m/L_{22})i_{1d} \quad (A16)$$

$$0 = p\lambda_{2q} + (R_2/L_{22})\lambda_{2q} - (W_N - W_R)\lambda_{2d} - (R_2L_m/L_{22})i_{1q} \quad (A17)$$

definindo:

$$\lambda_{2d}' = (L_m/L_{22})\lambda_{2d} \quad (A18)$$

$$\lambda_{2q}' = (L_m/L_{22})\lambda_{2q} \quad (A19)$$

então as equações (A16), (A17), (A13) e (A15) podem ser reescritas como:

$$p\lambda_{2d}' = -(R_2/L_{22})\lambda_{2d}' - (W_N - W_R)\lambda_{2q}' + (R_2L_m^2/L_{22}^2)i_{1d} \quad (A20)$$

$$p\lambda_{2q}' = -(R_2/L_{22})\lambda_{2q}' - (W_N - W_R)\lambda_{2d}' + (R_2L_m^2/L_{22}^2)i_{1q} \quad (A21)$$

$$v_{1d} = R_1 i_{1d} + X' i_{1q} + W_N \lambda_{2q}' \quad (A22)$$

$$v_{1q} = R_1 i_{1q} + X' i_{1d} - W_N \lambda_{2d}' \quad (A23)$$

Um novo grupo de variáveis complexas podem ser definidas:

$$\phi_{2'} = \lambda_{2d}' - j\lambda_{2q}' \quad (A24)$$

$$V_t = v_{1d} - jv_{1q} \quad (A25)$$

$$I_1 = i_{1d} - ji_{1q} \quad (A26)$$

Agora usando (A24)-(A25) nas equações (A20)-(A23)

fica:

$$p\phi_2' = -(R_2/L_{22})\phi_2' - j(W_N - W_R)\phi_2' + (R_2L_m^2/L_{22}^2)I_1 \quad (A27)$$

$$V_t = R_1I_1 + jX'I_1 + jW_N\phi_2' \quad (A28)$$

$$\phi_2' = (L_m/L_{22})\phi_2 \quad (A29)$$

A tensão complexa E' proporcional ao fluxo concatenado ϕ_2' pode ser definida por:

$$E' = jW_N\phi_2' \quad (A30)$$

Substituindo o valor de ϕ_2' obtido em (A30), em (A27), fica:

$$pE' = -(R_2/L_{22})E' - j(W_N - W_R)E' + j(W_N R_2 L_m^2 / L_{22}^2) I_1 \quad (A31)$$

A constante transitória de circuito aberto T_0' e a reatância de circuito aberto da máquina X_0 são respectivamente definidas como:

$$T_0' = L_{22}/R_2 \quad (A32)$$

$$X_0 = W_N L_{11} \quad (A33)$$

Utilizando (A32) e (A14) em (A31) fica:

$$pE' = -(1/T_0')E' - j(W_N - W_R)E' + j(1/T_0')(X_0 - X') \quad (A34)$$

Sabendo que $W_N - W_R = 2\pi f S$, onde "S" é o escorregamento do rotor e "f" a frequência nominal, (A34) pode

ser escrita na forma:

$$pE' = -(1/T_0) [E' - j(X_0 - X')I_1] - j2\pi f S E' \quad (A35)$$

Agora substituindo (A30) em (A28), fica:

$$V_t = (R_1 + j X')I_1 + E' \quad (A36)$$

As equações (A35) e (A36) são apresentadas no capítulo 5 e representam o comportamento dinâmico de uma máquina de indução de gaiola simples, não se levando em conta os transitórios do estator.

APÊNDICE B

OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DA MÁQUINA EQUIVALENTE PARA MODELAGEM EM PROGRAMAS DE ESTABILIDADE

Para a condição de regime permanente a potência $P_b + jQ_b$ de uma barra é determinada pelo cálculo do fluxo de carga do sistema. Pode-se então através de uma metodologia [26] obter os parâmetros de uma máquina de indução a ser incorporada no programa de estabilidade de tal forma que a potência seja mantida com o mesmo valor. Assim quando não se conhece os parâmetros de uma determinada máquina a ser utilizada, eles podem ser obtidos através deste processo, desde que se conheça a parcela $P + jQ$ da máquina. A figura ilustra a substituição:

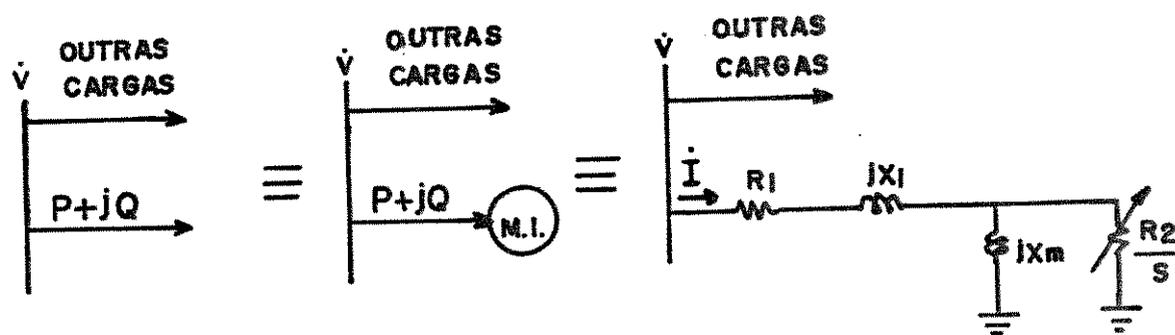
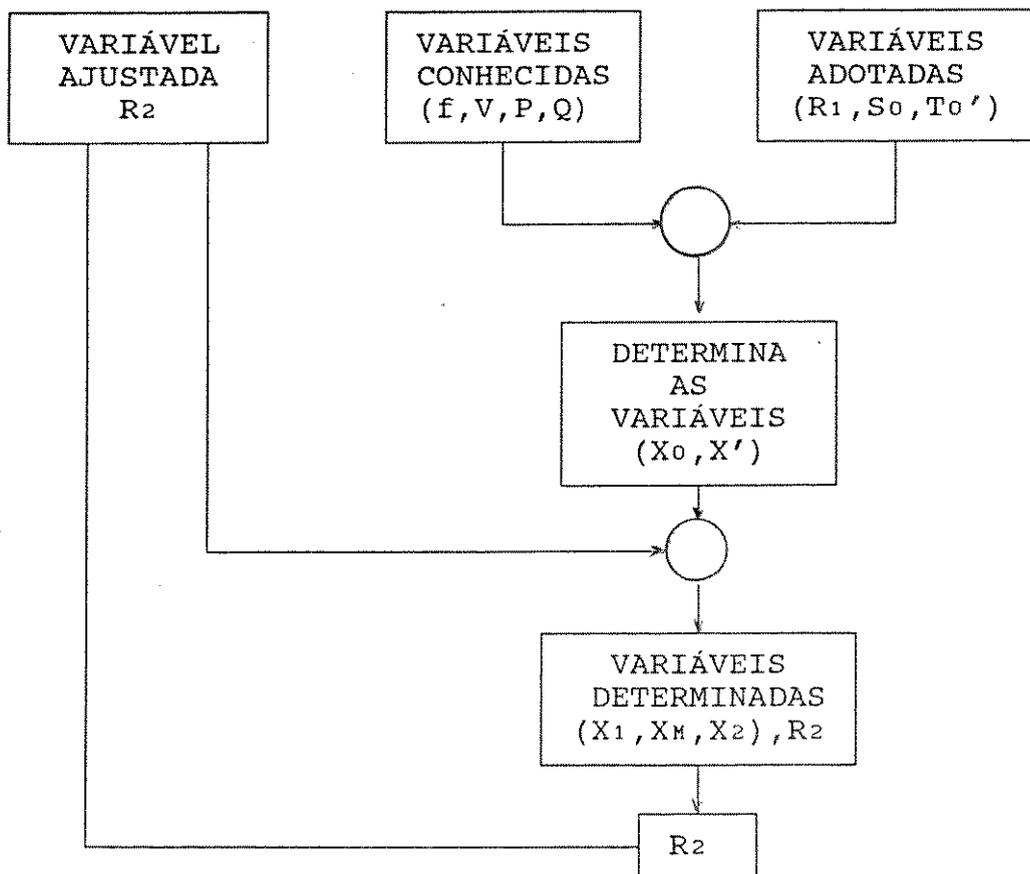


Figura B1 - Máquina de indução de gaiola simples equivalente ao consumo $P + jQ$.

Além do consumo de potência em regime permanente, da tensão e da frequência da barra, para a obtenção dos

parâmetros da máquina, são também necessários outros elementos que devem ser especificados. São o escorregamento inicial, resistência do estator e constante de tempo a circuito aberto, no entanto seus valores são típicos e obtidos na literatura. Pode-se ajustar a resistência do rotor de modo a se conseguir valores próximos para as reatâncias de estator e rotor já que isto se verifica nos projetos de máquinas de indução.

O diagrama de blocos mostra a metodologia para o abtenção dos parâmetros.



Como para um mesmo valor de S (potência aparente) existem inúmeras combinações para P e Q , sendo que cada uma delas resulta em diferentes valores para os parâmetros, eles serão determinados a partir da relação P/Q e da constante de tempo T_0' desejada.

Todos os parâmetros são expressos em p.u. na base da máquina, com exceção da constante de tempo transitória T_0' que é expressa em segundos. Com relação aos valores adotados para a resistência do estator e escorregamento inicial, eles foram feitos igual a 1%.

Dividindo a equação (5.23) pela equação (5.24), obtém-se:

$$\frac{P}{Q} = \frac{R_1 - Y_e X' + Y_e X_0 + R_1 Y_e^2}{X' Y_e^2 + X_0} \quad (B1)$$

chamando P/Q de A o valor de X' é dado por:

$$X' = \frac{X_0 [Y_e - A] + R_1 [Y_e^2 + 1]}{(Y_e + A Y_e^2)} \quad (B2)$$

O parâmetro X_0 pode ser determinado pela expressão:

$$A_1 X_0^2 + A_2 X_0 + A_3 = 0 \quad (B3)$$

onde:

$$A_1 = Q + \frac{k_3^2 Y_e^2 Q}{k_5^2} \quad (B4)$$

$$A_2 = \frac{2R_1 k_3 k_4 Y_e^2 Q}{k_5^2} - \frac{k_3 Y_e^2 V_t^2}{k_5} + 2R_1 Q Y_e - V_t^2 \quad (B5)$$

$$A_3 = \frac{R_1^2 k_4^2 Y_e^2 Q}{k_5^2} - \frac{2R_1^2 k_4 Y_e Q}{k_5} + R_1^2 Y_e^2 Q + R_1^2 Q - \frac{R_1 k_4 Y_e^2 V_t^2}{k_5} \quad (B6)$$

sendo:

$$k_3 = Y_e - A \quad (B7)$$

$$k_4 = Y_e^2 + 1 \quad (B8)$$

$$k_5 = Y_e + Y_e^2 A \quad (B9)$$

Assim após a determinação de X_0 e X' , conhecendo-se S_0 , R_1 e T_0' pode-se determinar X_2 , X_m e X_1 para a máquina desejada através das equações:

$$X_2 = k_1 \pm \sqrt{k_1 (X_0 - X')} \quad (B10)$$

$$X_m = k_1 - k_1 \pm \sqrt{k_1 (X_0 - X')} \quad (B11)$$

$$X_1 = X_0 \pm \sqrt{k_1 (X_0 - X')} \quad (B12)$$

As figuras (B2) - (B5) mostram os gráficos resultantes da simulação das equações:

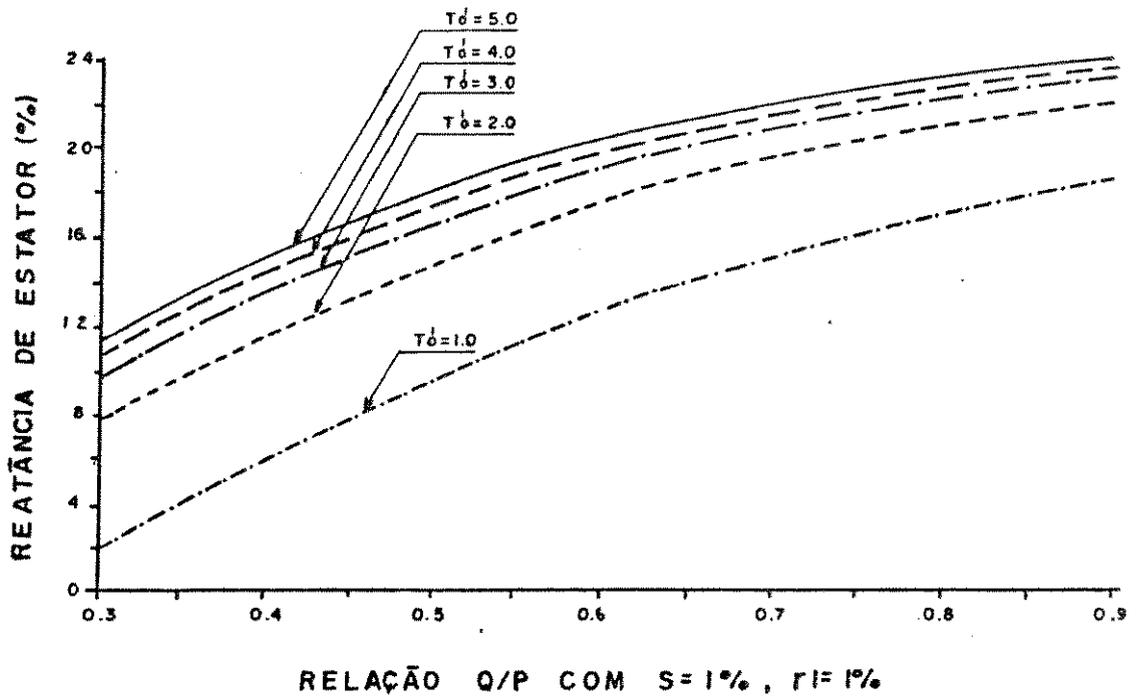


Figura B2 - Curvas para determinação da reatância do estator (X_1) de uma máquina de indução.

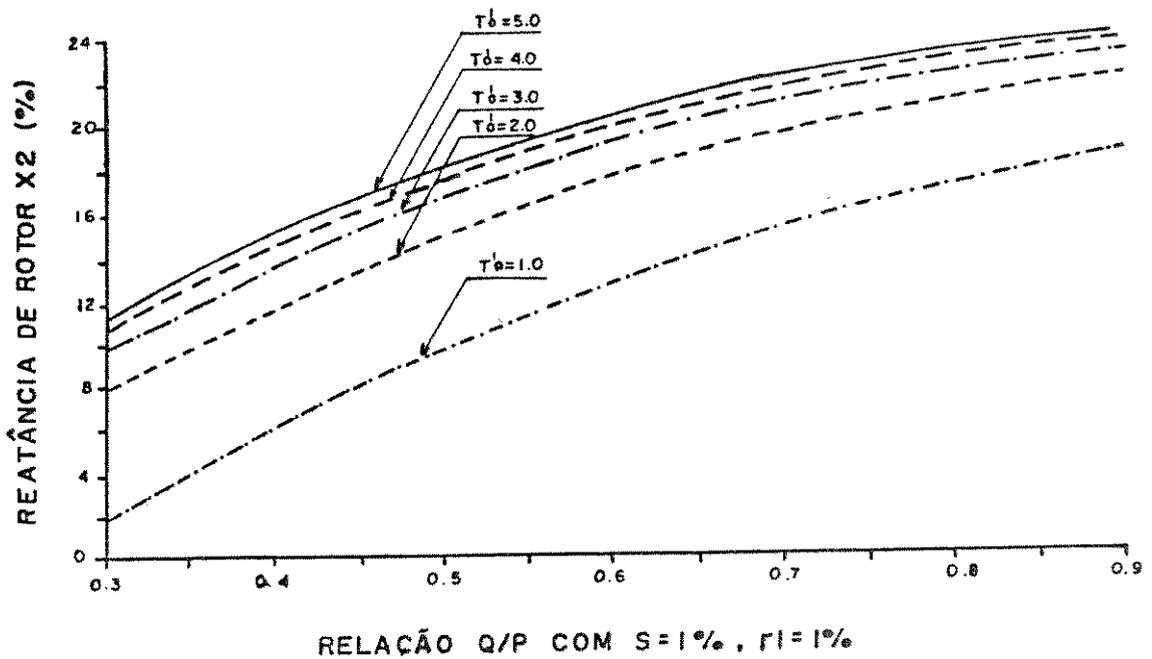


Figura B3 - Curvas para determinação da reatância do rotor (X_2) de uma máquina de indução.

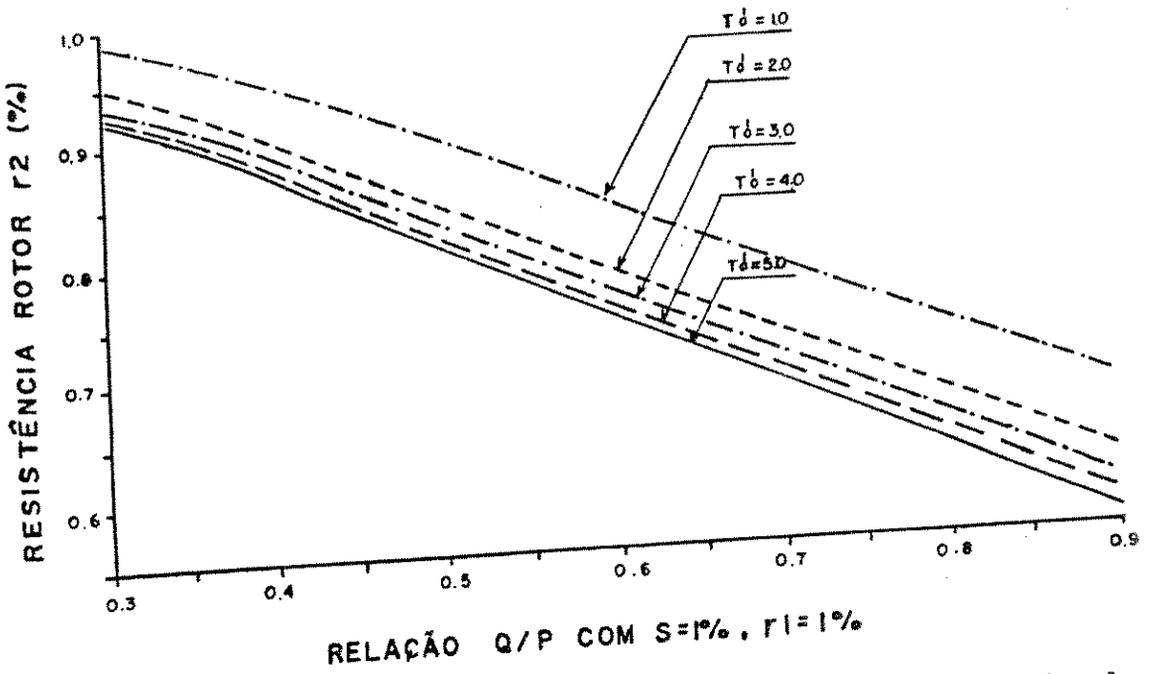


Figura B4 - Curvas para determinação de resistência do rotor (R_2) de uma máquina de indução.

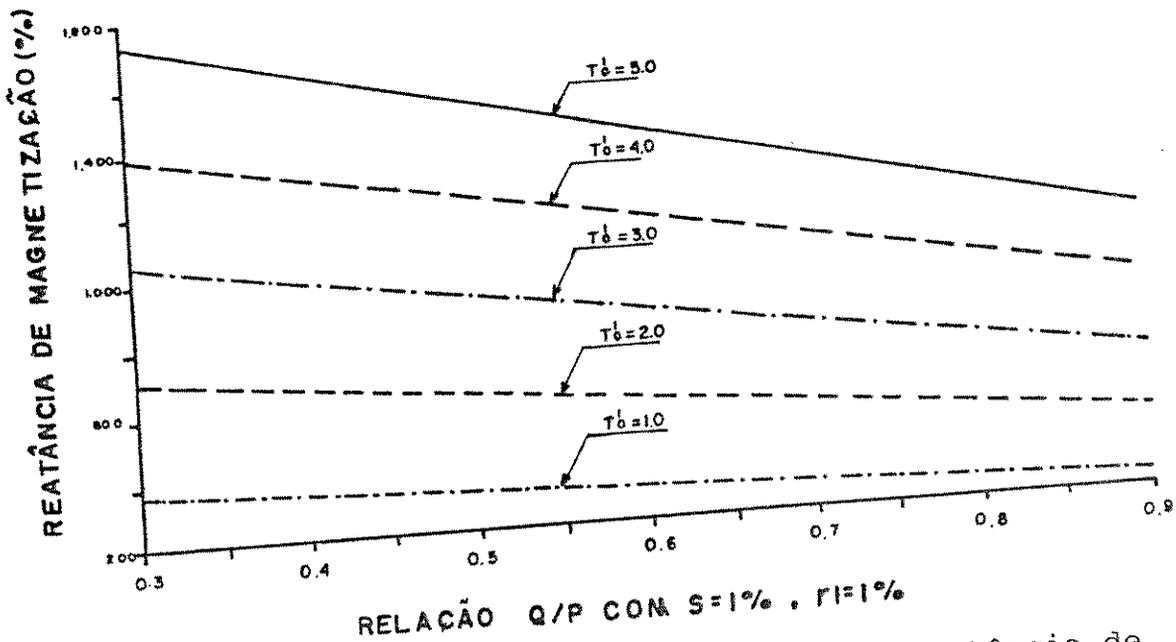


Figura B5 - Curvas para determinação da reatância de magnetização (X_m) de uma máquina de indução.