

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA - FEE

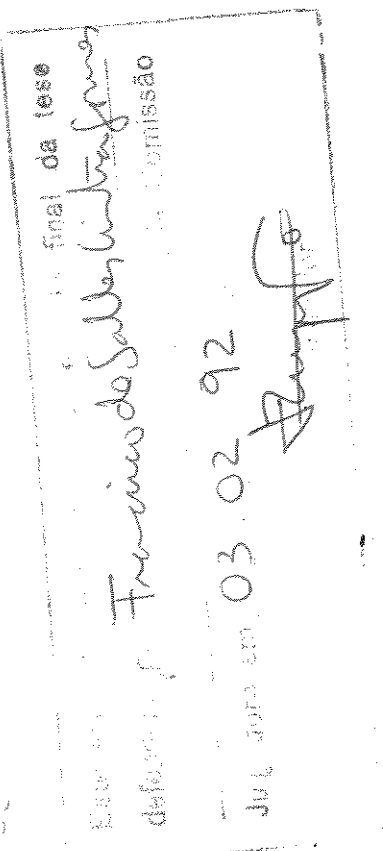
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA - DSCE

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UMA USINA ELÉTRICA ISOLADA
COM GERADOR SÍNCRONO E GERADOR DE INDUÇÃO

FRANCISCO DE SALLES CINTRA GOMES

ORIENTADOR : ERNESTO RUPPERT FILHO

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Elétrica da Universidade Estadual de Campinas,
UNICAMP como parte dos requisitos exigidos
para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHA-
RIA ELÉTRICA.



FEVEREIRO, 1992

BC
 UNICAMP
 S 85
 28097
 667/96
 794.11.00
 24/07/96
 CPD C.M.0009032 1-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
 BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

G585e Gomes, Francisco de Salles Cintra
 Estudo do comportamento de uma usina elétrica isolada
 com gerador síncrono e gerador de indução / Francisco de
 Salles Cintra Gomes.--Campinas, SP: [s.n.], 1992.

Orientador: Ernesto Ruppert Filho.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica.

1. Máquinas elétricas - Corrente alternada. 2. Máquinas
 elétricas de indução. 3. Máquinas elétricas síncronas. 4.
 Usinas elétricas. I. Ruppert Filho, Ernesto. II. Universidade
 Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica.
 III. Título.

Dedico este trabalho aos meus
pais e irmãos

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo o que nos deu e nos dá,
ao Amigo Ernesto Ruppert Filho pela confiança,
paciência e desempenho como orientador,

aos Amigos do Centro Cultural do Castelo que sempre
estiveram ao meu lado, ao Luís, ao Maurício, ao José Lino, ao
Francesco, ao Ronaldo, ao José Carlos, ...e a todos os demais ...

a todos os amigos que, nos momentos difíceis,
tiveram as oportunas palavras de incentivo e apôio para o
desenvolvimento deste trabalho,

aos amigos, colegas e professores da UNICAMP, que
contribuíram de alguma forma para o bom ambiente de trabalho e
tiveram compreensão. Ao Naasson, à Conceição, ao Dante, ao
Toninho, à Salimar, ao Nelson, ao Omar, ao Léo, ao Clíder, à
Eliane, ao Adilson, ao Geraldo, ao Liszt, ao Flávio, ... a todos,

e também aos amigos da General Eletric do Brasil SA,
Pedro Rubio e Massaki Bano, pela gentileza de fornecerem os dados
de máquinas reais,

e também a você que está com esta tese nas mãos...

ÍNDICE

RESUMO	1
ABSTRACT	2
 CAPÍTULO I USINA ELÉTRICA ISOLADA COM GERADOR SÍNCRONO E GERADOR DE INDUÇÃO	 3
I.1. Introdução	3
 CAPÍTULO II MODELAMENTO MATEMÁTICO DE UMA USINA ELÉTRICA ISOLADA CONSTITUÍDA DE UM GERADOR SÍNCRONO E DE UM GERADOR DE INDUÇÃO	 5
II.1. Introdução	5
II.2. Modelamento do Gerador Síncrono	6
II.3. Modelamento do Gerador de Indução	9
II.4. Modelamento da Carga Resistiva-Indutiva	12
II.5. Modelamento do Sistema	13
 CAPÍTULO III SISTEMA EXPERIMENTAL	16
III.1. Introdução	16
III.2. Esquema Experimental	17
III.3. Ensaio com o Sistema Experimental para Verificação de Repartição de Carga	20
III.4. Determinação dos Parâmetros do Sistema	21
 CAPÍTULO IV SIMULAÇÕES COM O SISTEMA EM ESTUDO	28
IV.1. Introdução	28
IV.2. Estudo do Sistema em Regime Permanente	29
IV.3. Estudo do Sistema em Regime Transitório	41

CAPÍTULO V	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	78
APÊNDICE A		80
APÊNDICE B		82
APÊNDICE C		86
APÊNDICE D		87
BIBLIOGRAFIA		97

RESUMO

Estudou-se a operação de uma usina elétrica isolada constituída de gerador síncrono e de gerador de indução.

O objetivo é o de baixar o custo inicial da usina necessária para operar em localidade distantes do grande sistema elétrico.

Desenvolveu-se um modelo matemático apoiado por experiências de laboratório e estudou-se os regimes permanente e transitório.

ABSTRACT

The isolated electrical power plant with synchronous generator and induction generator is studied.

The subject is to save money on the initial cost of the power plant necessary to work in distant sites from the main power system.

The mathematical model based on electrical machine laboratory experiences were developed and both the steady and transient states were studied.

CAPÍTULO I - USINA ELÉTRICA ISOLADA COM GERADOR SÍNCRONO E GERADOR DE INDUÇÃO

I.1 - Introdução

A máquina de indução, para potências até da ordem de 2000 kVA, tem preço menor do que a máquina síncrona.

Como gerador de indução, ligado a um barramento infinito, ela poderia funcionar sem qualquer regulação de velocidade, não necessitando dessa forma nem de sistema de excitação nem de sistema de regulação de velocidade.

Essa idéia levou alguns países (China, EUA, Itália e outros) a utilizarem geradores de indução em pequenas usinas interligadas ao sistema de energia elétrica.

Entretanto o gerador de indução não tem capacidade de gerar energia elétrica reativa sendo necessário que se transfira a ele potência reativa de alguma fonte. Esta fonte pode ser o sistema elétrico, um capacitor ou mesmo um outro gerador síncrono.

O gerador de indução isolado, ligado a um capacitor em paralelo, não funciona bem como gerador porque na ocorrência de um curto-circuito ele se desexcita e não mais constroi sua tensão terminal.

Fabricantes de máquinas elétricas no Brasil tentaram comercializar linhas de geradores de indução com capacitores em paralelo e não tiveram muito sucesso.

Em meados de 1985 algumas concessionárias de energia elétrica pensaram na hipótese de construir pequenas centrais hidrelétricas com máquinas de indução e máquinas síncronas

interligadas ao sistema. Essa idéia não frutificou, talvez por falta de iniciativa de se construir a primeira usina.

No norte do Brasil existem diversas usinas hidrelétricas isoladas e talvez haja necessidade de muitas outras. Poderia ser interessante construí-las, até cerca de 10000 kVA com gerador de indução juntamente com gerador síncrono.

O objetivo deste trabalho é o de estudar o comportamento em regimes permanente e transitório de uma usina isolada com gerador síncrono e gerador de indução.

No capítulo II apresenta-se o modelamento matemático proposto para representar a usina, constituído de equações diferenciais em variáveis referidas a um sistema d'qo colocado no campo girante do gerador síncrono.

No capítulo III apresenta-se resultados obtidos em laboratório referentes à operação do sistema. Neste capítulo, determina-se também os parâmetros dos componentes do sistema necessários para utilização no modelo do capítulo II.

No capítulo IV apresenta-se os resultados de simulação para o sistema do laboratório e para sistemas com máquinas reais e industriais.

No capítulo V são apresentadas as conclusões obtidas no estudo e oferecidas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II - MODELAMENTO MATEMÁTICO DE UMA USINA ELÉTRICA ISOLADA CONSTITUÍDA DE UM GERADOR SÍNCRONO E DE UM GERADOR DE INDUÇÃO.

II.1 - Introdução

A usina elétrica em estudo é constituída de um gerador síncrono trifásico, de um gerador de indução trifásico e de uma carga trifásica dispostos conforme o esquema da figura II-1.

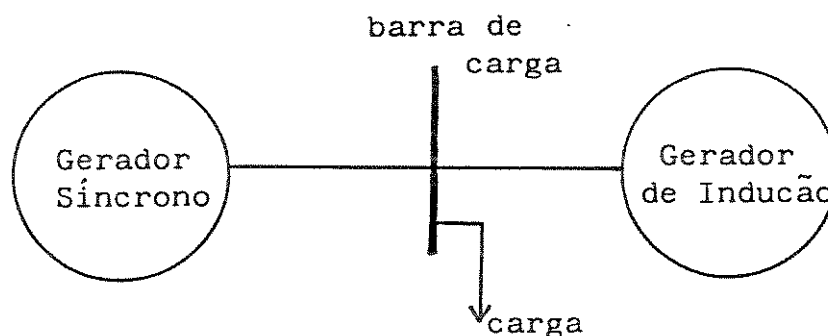


Figura II-1 Esquema do Sistema em Estudo

Apresenta-se neste capítulo os modelos matemáticos utilizados para representar os componentes do sistema bem como a usina, figura II-1.

Considerou-se, para cada modelo das máquinas elétricas envolvidas, que os enrolamentos estatóricos de cada fase são iguais entre si, que a simetria física é perfeita e que o entreferro é constante. O circuito magnético foi considerado

ideal, as perdas magnéticas e a saturação são desprezadas.

Utilizou-se a notação abaixo para as variáveis em estudo.

Índice	Significado
s	- referente ao gerador síncrono
c	- referente à carga
i	- referente ao gerador de indução
r	- referente ao rotor

O presente capítulo, está dividido em duas partes.

Na primeira parte descreve-se os modelos do gerador síncrono, do gerador de indução e da carga.

Na segunda parte, utiliza-se os modelos descritos para o modelamento da usina composta por um gerador síncrono, por um gerador de indução, ambos alimentando uma carga resistiva-indutiva.

II.2 - Modelamento do Gerador Síncrono

O gerador síncrono foi modelado pelas equações de Park, em valores por unidade (pu), conforme [1]. Essas equações são diferenciais e obtidas quando se transforma as variáveis das fases a, b e c da máquina trifásica em variáveis dqo, referidas a um sistema de eixos d e q ortogonais e colocados no campo girante (apêndice B).

Nessas equações os coeficientes são indutâncias e

resistências elétricas constantes. Elas são as seguintes:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_f \\ v_D \\ v_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a - L_d p & L_q \omega_s & L_{ad} p & L_{ad} p & -L_{aq} \omega_s \\ -L_d \omega_s & -r_a - L_q p & L_{ad} \omega_s & L_{ad} \omega_s & L_{aq} p \\ -L_{ad} p & 0 & r_f + L_f p & L_{ad} p & 0 \\ -L_{ad} p & 0 & L_{ad} p & r_D + L_D p & 0 \\ 0 & -L_{aq} p & 0 & 0 & r_Q + L_Q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II-1})$$

$$P_s = -\frac{2}{3} \left(v_d i_d + v_q i_q \right) \quad (\text{II-2})$$

Onde :

v_d = tensão de fase no enrolamento do estator referida ao eixo d, em pu.

v_q = tensão de fase no enrolamento do estator referida ao eixo q, em pu.

v_f = tensão no enrolamento de campo, em pu.

v_D = tensão no enrolamento amortecedor de eixo direto ($v_D=0$; enrolamento amortecedor em curto-circuito).

v_Q = tensão no enrolamento amortecedor de eixo em quadratura, em pu ($v_Q = 0$)

i_d = corrente elétrica de fase no enrolamento de estator referido ao eixo d, em pu.

i_q = corrente elétrica de fase no enrolamento de estator referido ao eixo q, em pu.

i_f = corrente elétrica no enrolamento de campo, em pu.

i_D = corrente elétrica no enrolamento amortecedor de eixo d, em pu.

- i_Q = corrente elétrica no enrolamento amortecedor de eixo q, em pu.
- r_a = resistência elétrica de fase do enrolamento do estator, em pu.
- r_f = resistência elétrica do enrolamento de campo, em pu.
- r_D = resistência elétrica do enrolamento amortecedor de eixo direto, em pu.
- r_Q = resistência elétrica do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura, em pu.
- L_d = indutância própria do enrolamento do estator referido ao eixo d, em pu.
- L_q = indutância própria do enrolamento do estator referido ao eixo q, em pu.
- L_f = indutância própria do enrolamento de campo, em pu.
- L_D = indutância própria de eixo direto do enrolamento amortecedor, em pu.
- L_Q = indutância própria de eixo direto do enrolamento amortecedor, em pu.
- L_{ad} = indutância mútua entre enrolamento do estator e o de campo e também indutância mútua entre o enrolamento de eixo d do estator e o de eixo d do enrolamento amortecedor, em pu.
- p = $\frac{d}{dt}$; derivada em relação ao tempo
- w_s = velocidade angular do rotor, em pu.

A equação (II-1) pode ser escrita de forma mais compacta como :

$$\underline{v}_s = A p \underline{i}_s + w_s B \underline{i}_s + C \underline{i}_s - G v_f \quad (\text{II-3})$$

onde:

$$\underline{v}_s = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \underline{i}_s = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & L_{ad} & L_{ad} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & L_{aq} \\ -L_{ad} & 0 & L_f & L_{ad} & 0 \\ -L_{ad} & 0 & L_{ad} & L_D & 0 \\ 0 & -L_{aq} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 & 0 & -L_{aq} \\ -L_d & 0 & L_{ad} & L_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix}$$

$$G^t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

II.3 - Modelamento do Gerador de Indução

A máquina de indução foi modelada pelas equações de

Park [2] com referencial no campo girante (apêndice B).

As equações são :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_D \\ v_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s - L_s p & L_s w_s & M p & -M w_s \\ -L_s w_s & -r_s - L_s p & M w_s & M p \\ -M p & M(w_s - w_i) & r_r + L_r p & -L_r(w_s - w_i) \\ -M(w_s - w_i) & -M p & L_r(w_s - w_i) & r_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II-4})$$

$$P_i = -\frac{2}{3} \left(v_d i_d + v_q i_q \right) \quad (\text{II-5})$$

onde :

r_s = resistência elétrica do enrolamento do estator,
por fase, em pu

r_r = resistência elétrica do enrolamento do rotor,
por fase, referida ao estator, em pu

M = indutância magnetizante medida em relação ao
estator, em pu

L_s = $l_1 + M$; l_1 = indutância de dispersão do estator,
em pu.

L_r = $l_2 + M$; l_2 = indutância de dispersão do rotor
referida ao estator, em pu.

p = $\frac{d}{dt}$; derivada em relação ao tempo

w_i = velocidade angular do rotor, em pu.

A equação (II-4) pode ser escrita matricialmente

como :

$$\underline{v}_i = H p \underline{i}_i + w_s J \underline{i}_i + w_i K \underline{i}_i + L \underline{\dot{i}}_i \quad (\text{II-6})$$

onde :

$$\underline{v}_i = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ 0 \\ v_D \\ v_Q \end{bmatrix} \quad \underline{i}_i = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} -L_s & 0 & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & 0 & M \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ M & 0 & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} 0 & L_s & 0 & 0 & -M \\ -L_s & 0 & 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 & -L_r \\ -M & 0 & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M & 0 & 0 & L_r \\ M & 0 & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

II-4 - Modelamento da Carga Resistiva-indutiva

A carga, do tipo R-L, num sistema trifásico senoidal a,b,c foi transformada para variáveis dqo (apêndice B) resultando:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r+Lp & -Lw_s & 0 & 0 & 0 \\ Lw_s & r+Lp & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-11})$$

$$P_c = \frac{2}{3} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (\text{II-12})$$

Onde :

L = indutância da carga, em pu

r = resistência elétrica da carga, em pu

$p = \frac{d}{dt}$; derivada em relação ao tempo

Matricialmente, pode-se escrever:

$$\underline{v}_c = Dp\underline{i}_c + w_s E\underline{i}_c + F\underline{i}_c \quad (\text{II-13})$$

Onde :

$$D = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & -L & 0 & 0 & 0 \\ L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

II-5 - Modelamento do Sistema

As equações de tensão que representam o gerador síncrono (II-3), o gerador de indução (II-6) e a carga (II-7) são abaixo reescritas :

$$\underline{v}_s = A p \underline{i}_s + w_s B \underline{i}_s + C \underline{i}_s - G v_f$$

$$\underline{v}_i = H p \underline{i}_i + w_s J \underline{i}_i + w_i K \underline{i}_i + L \underline{i}_i$$

$$\underline{v}_c = D p \underline{i}_c + w_s E \underline{i}_c + F \underline{i}_c$$

Como cada sistema de referência foi colocado no campo girante para os três componentes da usina, pode-se escrever:

$$\underline{v}_C = \underline{v}_S = \underline{v}_i \quad (\text{II-10})$$

$$\underline{i}_C = \underline{i}_S + \underline{i}_i \quad (\text{II-11})$$

De $\underline{v}_S = \underline{v}_C$ e (II-11) tem-se :

$$A p \underline{i}_S + w_S B \underline{i}_S + C \underline{i}_S - G v_f = D p \left(\underline{i}_S + \underline{i}_i \right) + w_S E \left(\underline{i}_S + \underline{i}_i \right) + F \left(\underline{i}_S + \underline{i}_i \right)$$

Agrupando-se tem-se :

$$(A-D) p \underline{i}_S - D p \underline{i}_i = w_S (E-B) \underline{i}_S + w_S E \underline{i}_i + (F-C) \underline{i}_S + F \underline{i}_S + G v_f \quad (\text{II-12})$$

De $\underline{v}_i = \underline{v}_C$ e (II-11) tem-se :

$$(H-D) p \underline{i}_i - D p \underline{i}_S = w_S (E-J) \underline{i}_i + w_S E \underline{i}_S - w_i K \underline{i}_i + (F-L) \underline{i}_i + F \underline{i}_S \quad (\text{II-13})$$

Agrupando-se (II-12) e (II-13) pode-se escrever :

$$\begin{bmatrix} (A-D) & -D \\ -D & (H-D) \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} \underline{i}_S \\ \underline{i}_i \end{bmatrix} = w_S \begin{bmatrix} (E-B) & E \\ E & (E-J) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_S \\ \underline{i}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (F-C) & F \\ F & (F-L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_S \\ \underline{i}_i \end{bmatrix} - w_i \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_S \\ \underline{i}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix} v_f \quad (\text{II-14})$$

Definindo-se :

$$\underline{i} = \begin{bmatrix} \underline{i}_s \\ \underline{i}_i \end{bmatrix}$$

$$c' = \begin{bmatrix} (A-D) & -D \\ -D & (H-D) \end{bmatrix} \quad b' = \begin{bmatrix} (E-B) & E \\ E & (E-J) \end{bmatrix} \quad a' = \begin{bmatrix} (F-C) & -F \\ F & (F-L) \end{bmatrix}$$

$$g' = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pode-se escrever :

$$c' p_i = w_s b' i + a' i - w_i g' i + u v_f \quad (\text{II-15})$$

Definindo :

$$a = c'^{-1} a'$$

$$b = c'^{-1} b'$$

$$c = c'^{-1}$$

$$g = -c'^{-1} g'$$

Pode-se escrever :

$$p_i = a_i + w_s b_i + w_i g_i + u v_f \quad (\text{II-16})$$

A equação (II-16) juntamente com as equações (II-2), (II-5), (II-8) definem o modelo matemático a ser utilizado para a usina considerando-se que, tanto w_s como w_i são mantidos constantes durante os transitórios estudados.

CAPÍTULO III - SISTEMA EXPERIMENTAL

III.1 - Introdução

Montou-se no laboratório um sistema de geração composto por um gerador síncrono trifásico, por um gerador de indução trifásico, ambos ligados num mesmo barramento, e tendo como carga um banco de resistores elétricos.

Os geradores foram acionados, cada um deles, por um motor de corrente contínua com excitação independente em tensão constante, girando com velocidade variável de acordo com cada tipo de experiência.

O gerador síncrono foi acionado de modo a manter a frequência nominal, de 60 Hertz, em sua tensão de saída.

O gerador de indução foi acionado pelo motor de corrente contínua de modo a manter um escorregamento constante ou próximo de um dado valor estabelecido previamente para cada tipo de experiência.

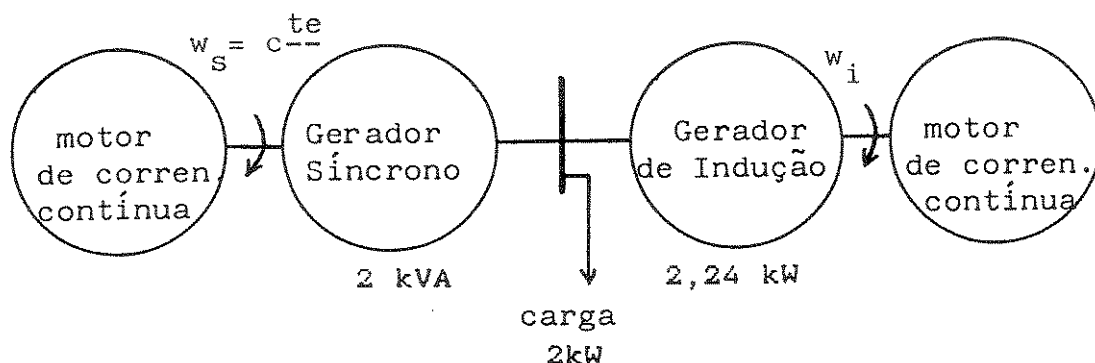


Figura III-1 Sistema de Geração Experimental

As experiências feitas no laboratório proporcionaram um melhor entendimento do funcionamento do sistema,

ainda que as máquinas utilizadas tenham potências nominais bem inferiores às de uma usina de geração real e ainda que, a carga disponível no laboratório fosse de metade da carga nominal do sistema.

O objetivo das experiências executadas foi o de validar o modelo do sistema apresentado no capítulo II em regime permanente, verificando a divisão de potência entre os geradores no caso real e no simulado, bem como estudar o comportamento do sistema real.

II.2 - Esquema do Sistema Experimental

O sistema experimental montado no laboratório é o da figura III.2 e contém os equipamentos e instrumentos a seguir mencionados :

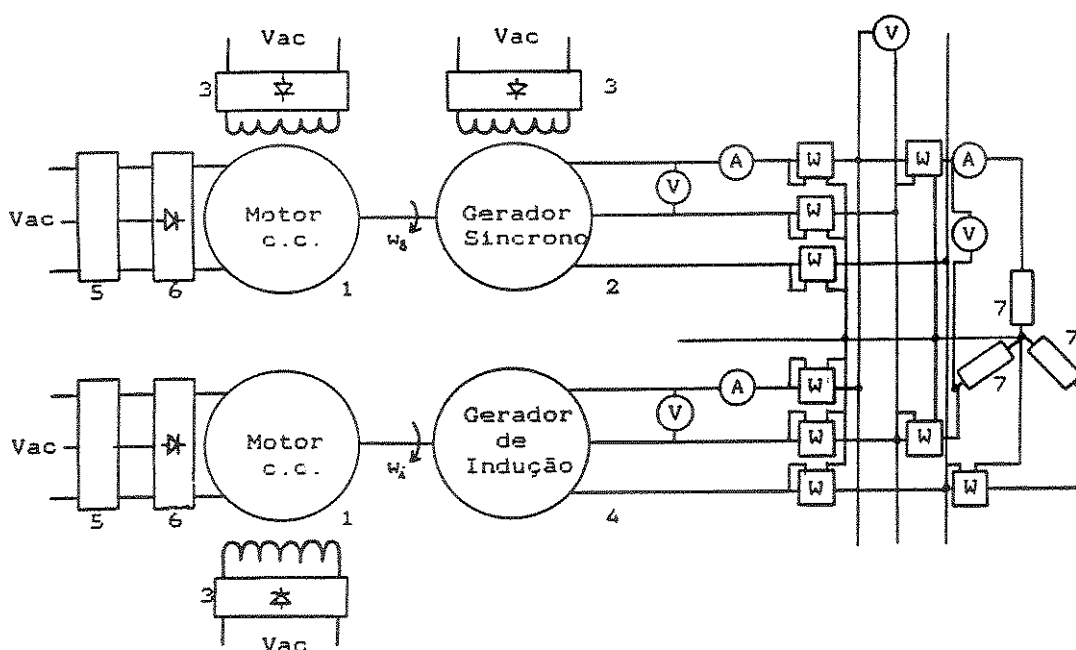


Figura III.2 - Sistema experimental

1. Motor de Corrente contínua

Fabricante	: Equacional
Modelo	: EG C1-4
Potência ativa	: 2kW
Tensão de armadura	: 220 V (contínua)
Rotação	: 1800 RPM
Corrente máxima de campo	: 0,4A

2. Gerador Síncrono

Fabricante	: Equacional
Modelo	: EGT.2.A
Potência aparente	: 2 kVA
Tensão de armadura	: 230 Volts
Rotação	: 1800 RPM
Frequência	: 60 Hz
Fator de potência	: 1,0
Corrente máxima de campo	: 0,6A/220 V
Número de fases	: 3
Corrente nominal	: 5A

3. Excitatriz

Fabricante	: Equacional
Tensão de entrada	: 220 V (alternada)
Tensão de saída	: variável (contínua)

4. Gerador de Indução

Fabricante	: Equacional
------------	--------------

Modelo	: EA 4,5A
Potência ativa	: 2,24 kW
Tensão de armadura	: 220 V
Corrente nominal	: 9,0 A
Rotação	: 1680 RPM
Frequência	: 60 Hz
Número de fases	: 3
Fator de potência	: 0,8
Tipo de rotor	: bobinado

5. Fonte de tensão Trifásica variável

Fabricante	: STP - Sociedade Téc. Paulista
Modelo	: VT - 245
Potência	: 4,5 kVA
Tensão de entrada	: 220 V
Tensão de saída	: 0 a 240 V (11A max)

6. Ponte Retificadora

Trifásica de onda completa : 30A

7. Carga Resistiva (banco de resistores)

Fabricante	: Equacional
Tipo de ligação	: monofásica, com possibilidade de colocar em paralelo até 6 resistores

Os instrumentos de medição utilizados em toda parte

experimental foram os seguintes :

-Estroboscópio

Fabricante : General Rádio
Modelo : 1531-AB STRABOTAC

- Voltímetro Digital

Fabricante : Minipa
Modelo : ET 2001 Multitester

-Medidor LCR Digital

Fabricante : Escort
Modelo : ELC - 130

- Wattímetros, voltímetros e amperímetros da H do Brasil com classe de precisão 0,2 % .

III.3 - Ensaio com o Sistema Experimental para verificação de repartição de carga

O gerador síncrono foi acionado na velocidade síncrona (1800 RPM) pelo motor de corrente contínua e excitado até a tensão desejada (200 v).

O gerador de indução foi acionado pelo motor de corrente contínua numa velocidade superior à síncrona desejada.

A carga aplicada constituída pelo banco de resistores estava com todos os resistores ligados em paralelo de modo a obter a máxima potência (2 kVA).

Foram medidos os valores de potências ativas do gerador síncrono, do gerador de indução e da carga, bem como os valores da tensão na carga e da velocidade do gerador de indução.

A velocidade do gerador de indução foi medida utilizando-se um estrobotac com sinal externo de frequência constante

de 60 Hz. Feita uma marca na secção frontal do eixo, a velocidade foi medida anotando-se o tempo decorrido para que o traço desse um determinado número de voltas.

A seguir variou-se a carga desligando-se um dos resistores do banco. Ajustou-se a velocidade do gerador síncrono em 1800 RPM e anotou-se os valores das grandezas anteriormente medidas. Assim foi feito sucessivamente.

A tabela III-1 mostra alguns resultados obtidos experimentalmente.

A seguir identifica-se os parâmetros do sistema para aplicação no modelo matemático apresentado no capítulo II. No capítulo IV utiliza-se tais parâmetros para calcular as mesmas grandezas da tabela III-1 com o modelo do sistema e consequentemente validá-lo em regime permanente.

Tabela III.1 - Resultados Experimentais

RPM	POTÊNCIAS (WATTS)			TENSÃO (VOLTS)	RESISTÊNCIA DA CARGA Ω /FASE
	SÍNCRONA	INDUÇÃO	CARGA	BARRAMENTO	
1859	415	1305	1740	200	24,17
1858	195	1280	1490	204	29,00
1843	-399	1030	625	209	72,50
1829	-384	720	328	211	145,00

III.4 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA

III.4.1 - Determinação dos Parâmetros do Gerador Síncrono

1. Resistência elétrica por fase do enrolamento do estator (r_a)

A resistência elétrica por fase do enrolamento do

estator foi medida com ohmímetro. O valor obtido foi $1,4 \, \Omega$ por fase, com a máquina aquecida após funcionar durante 2 horas, continuamente, com carga nominal.

2. Reatância síncrona de eixo direto (X_d)

Foram executados ensaios em circuito aberto (ensaio em vazio) e em curto-circuito (3) com o gerador síncrono. As curvas obtidas são mostradas na figura III.3. A tensão de 200 V foi escolhida como tensão nominal pelo motivo de ter sido considerada a melhor tensão para a operação do sistema completo no laboratório.

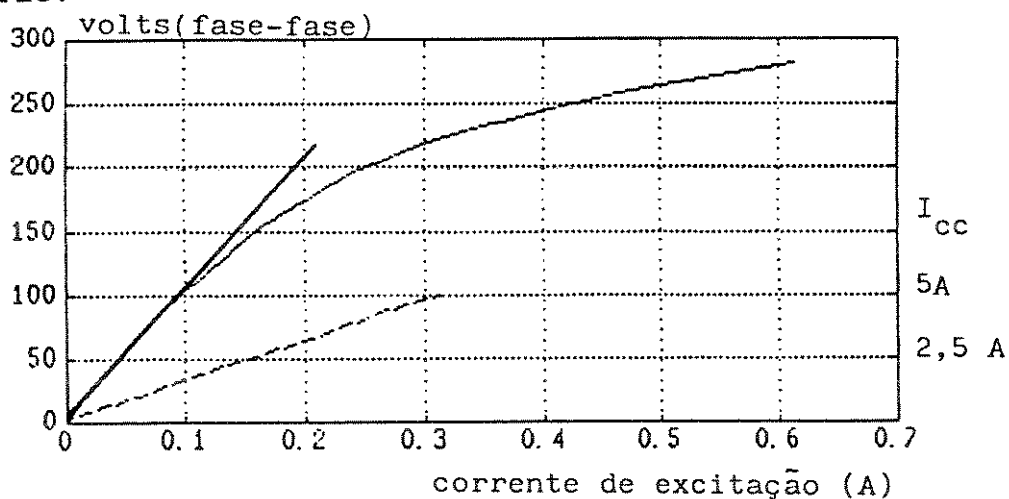


Fig. III.3 - Ensaio em circuito aberto e em curto-circuito do gerador síncrono.

Calculando-se o valor da reatância síncrona de eixo obtém-se $X_d = 38 \, \Omega$.

3. Reatância síncrona de eixo em quadratura (X_q)

O ensaio de baixo escorregamento conforme (3) foi executado obtendo-se $X_d = 34 \, \Omega$ e $X_q = 30 \, \Omega$.

4. Reatâncias do gerador síncrono

Como os valores de X_d e X_q obtidos no ensaio de baixo escorregamento estão muito próximos entre si e próximos do valor X_d obtido nos ensaios em circuito aberto e em curto-circuito resolveu-se, para efeitos de simulação do sistema, considerar $X_d = X_q = 38 \, \Omega$ porque o valor obtido pelos ensaios de circuito aberto e de curto-circuito é sempre mais preciso.

5. Resistência elétrica do enrolamento de campo (r_f)

A resistência elétrica do enrolamento de campo foi medida com ohmímetro. O valor obtido foi de $253 \, \Omega$ com a máquina aquecida após funcionar durante 2 horas, continuamente, com carga.

6. Reatâncias do enrolamento de campo (L_f)

A indutância do enrolamento de campo foi medida com o medidor RLC. Obteve-se $7,7 \, \text{H}$.

7. Valores em pu

Considerando a tensão de $200 \, \text{V}$ como tensão de base e a potência aparente nominal do gerador síncrono ($2 \, \text{kVA}$) como potência de base e que:

$$Z_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}^2}{S_{\text{base}}}$$

Obtém-se:

$$Z_{\text{base}} = 20 \, \Omega$$

Dessa maneira:

$$r_a = 0,07 \, \text{pu}$$

$$x_d = x_q = 1,9 \text{ pu}$$

e

$$L_d = L_q = 1,9 \text{ pu}$$

O valor L_{ad} , também necessário no modelo, foi calculado como segue:

$$L_d = L_e + L_{ad}$$

onde

L_e = indutância de dispersão do enrolamento do estator.

Para máquinas pequenas $L_e \approx 10\%$ de L_d

$$L_{ad} = L_d - 0,1 L_d = 1,9 - 0,19 = 1,71 \text{ pu}$$

Para calcular as grandezas de campo (r_f , L_f) em pu é necessário estabelecer as bases de campo da mesma maneira que a referência (1) estabelece para obtenção das equações (II-1).

Com o gerador síncrono em circuito aberto a equação (II-1) fornece:

$$v_q = L_{ad} \omega_s i_f \quad (\text{III-1})$$

Lembrando que a equação (III-1) está em pu e que $v_q(\text{pu}) = 1,2247$ (Capítulo IV) corresponde à tensão terminal da máquina igual a 200 V, e que $\omega_s(\text{pu}) = 1$, escreve-se:

$$i_f = \frac{v_q}{L_{ad}} = 0,716 \text{ pu}$$

Da curva de magnetização do gerador síncrono (figura III.3) obtém-se para tensão terminal do gerador de 200 V, $i_f = 0,249$ A.

Dessa maneira

$$i_{f_{base}} = \frac{0,249}{0,716} = 0,348 \text{ A}$$

$$\text{Como } S_{base} = \frac{3}{2} V_{f_{base}} i_{f_{base}} \text{ (Apêndice C) tem-se:}$$

$$V_{f_{base}} = \frac{S_{base}}{3/2 i_{f_{base}}} = 3831,4 \text{ V}$$

$$Z_{f_{base}} = \frac{V_{f_{base}}}{i_{f_{base}}} = 11009,8 \Omega$$

Dessa maneira as grandezas de campo em pu serão:

$$r_f = \frac{253}{11009,8} = 0,023 \text{ pu}$$

$$L_f = \frac{2\pi \times 60 \times 7,7}{11009,8} = 0,264 \text{ pu}$$

III. 4.2 - Determinação dos Parâmetros do Gerador de Indução

1. Resistência elétrica por fase do enrolamento do estator (r_s)

A resistência elétrica por fase do enrolamento do estator foi medida com ohmímetro. O valor obtido foi de $0,66 \Omega$ por fase, com a máquina aquecida após funcionar 2 horas, continuamente, com carga nominal.

2. Determinação da resistência elétrica do rotor referida ao estator (r_r) e das indutâncias do enrolamento de estator (L_s) e indutância magnetizante (M), todas referidas ao rotor.

Para essa determinação foi necessária a realização de ensaios no gerador de indução funcionando como motor em vazio e com rotor bloqueado.

No ensaio em vazio obteve-se para a tensão de 200 V no estator, a corrente de estator de 3,6 A e potência de 304 W.

Com esses dados, de acordo com (3) obteve-se:

$$Z_0 = \frac{200/\sqrt{3}}{3,6} = 32,08 \, \Omega$$

$$R_0 = \frac{304/3}{3,6^2} = 7,81 \, \Omega$$

$$X_0 = \sqrt{32,08^2 - 7,82^2} = 31,11 \, \Omega$$

No ensaio de rotor bloqueado para a corrente nominal da máquina no estator de 9,0 A obteve-se a tensão de estator de 65 V e a potência de 350 W.

Com esses dados, de acordo com (3), obteve-se:

$$Z_b = \frac{65/\sqrt{3}}{3,9} = 4,17 \, \Omega$$

$$R_b = \frac{360/3}{9^2} = 1,44 \, \Omega$$

$$X_b = \sqrt{4,17^2 - 1,44^2} = 3,91 \, \Omega$$

Ainda de acordo com (3) calcula-se r_r e X_s e X_m da seguinte maneira:

$$K_{sr} = 1 - \frac{X_b}{2X_0} = 1 - \frac{3,91}{2 \times 31,11} = 0,937$$

$$r_r = \frac{R_b - r_s}{K_{sr}^2} = \frac{1,44 - 0,66}{(0,937)^2} = 0,89 \, \Omega$$

$$X_e = \frac{X_b}{1 + \alpha K_{sr}} = \frac{3,91}{1 + 1 \times 0,937} = 2,03 \, \Omega$$

$$X_m = X_0 - X_s = 31,11 - 2,03 = 29,08 \, \Omega$$

$$X_s = X_e + X_m = 31,11 \, \Omega$$

$$X_r = X_s = 31,11 \, \Omega$$

Com $Z_{base} = 20 \, \Omega$ obtêm-se os seguintes valores em pu

$$r_r = 0,045 \, \text{pu}$$

$$L_s = L_r = 1,56 \, \text{pu}$$

$$M = 1,46 \, \text{pu}$$

III.4.3 - Determinação da resistência de carga

A carga resistiva trifásica utilizada foi composta por 3 bancos monofásicos de seis resistores em paralelo com resistência elétrica de $145 \, \Omega$, cada um, ou $7,25 \, \text{pu}$. Esses resistores, à medida do necessário, são ligados ou desligados.

CAPÍTULO IV - SIMULAÇÕES COM O SISTEMA EM ESTUDO

IV.1 - Introdução

O modelo apresentado no capítulo II foi utilizado para simular a operação do sistema em estudo, tanto em regime permanente, como em regime transitório, em quatro casos distintos.

Os casos são os mostrados na tabela IV-1. Os dados de cada máquina que aparecem na tabela são apresentados no apêndice A.

Tabela IV-1 - Casos estudados (ver apêndice A)

CASO	GERADOR SÍNCRONO	MÁQUINA DE INDUÇÃO COMO MOTOR	USINA	OBS
A	2kVA/220V 1800 rpm	2,8kVA/220V 1680 rpm/fp=.8	4,8 kVA	Máquinas do Laboratório
B	875kVA/450V 1200 rpm	492kVA/450V 1180 rpm/fp=.9	1367 kVA *	Máquinas Industriais
C	625kVA/480V 1200 rpm	698kVA/480V 1185 rpm/fp=.9	1323 kVA *	Máquinas Industriais
D	312,5kVA/450V 1800 rpm	492kVA/450V 1780 rpm/fp=.9	1353,5kVA *	Máquinas Industriais

(*) As potências aparentes das usinas nos casos B, C e D podem ser consideradas iguais.

Em regime permanente estudou-se a repartição de potência ativa entre as máquinas bem como o carregamento da usina.

Em regime transitório estudou-se o comportamento das máquinas quando o barramento de carga é submetido a um curto-circuito trifásico instantâneo e também à uma rejeição de carga de 70%.

IV.2 - Estudo do sistema em regime permanente

IV.2.1 - Equações do Sistema em Regime Permanente em pu

As equações que representam o comportamento do sistema são mostradas no capítulo II (16). Em regime permanente o termo " π " é nulo podendo-se escrever :

$$\underline{i} = - \left(a + w_s b + w_i g \right) c \underline{u} v_f \quad (\text{IV-1})$$

Para cada velocidade da máquina de indução (ω_i) resolve-se iterativamente as equações (IV-1), como será visto mais adiante, para determinação das tensões na carga e das potências de cada máquina e da carga.

Como as equações (IV-1) estão escritas em pu é necessário determinar o valor da tensão nominal requirida para a carga em pu.

As tensões na carga, em regime permanente senoidal são :

$$\begin{aligned} v_a &= v_{\max} \cos \left(\omega t + \phi \right) \\ v_b &= v_{\max} \cos \left(\omega t + \phi - 120^\circ \right) \\ v_c &= v_{\max} \cos \left(\omega t + \phi + 120^\circ \right) \end{aligned} \quad (\text{IV-2})$$

Aplicando-se a transformação para o sistema de referência no campo girante (apêndice B) obtem-se :

$$\begin{aligned}
 v_d &= \sqrt{\frac{3}{2}} \quad v_{\max} \cos \phi \\
 v_q &= \sqrt{\frac{3}{2}} \quad v_{\max} \sin \phi \\
 v_o &= 0
 \end{aligned}
 \tag{IV-3}$$

Utilizando como base de tensão $v_{\text{base}} = v_{\max}$, pode-se escrever as tensões v_d e v_q em pu como :

$$v_d = \sqrt{\frac{3}{2}} \cos \phi \quad \text{e} \quad v_q = \sqrt{\frac{3}{2}} \sin \phi \tag{IV-4}$$

Dessa maneira a tensão nominal na barra de carga, em pu, será :

$$v = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} = \sqrt{\frac{3}{2}} = 1,2247 \text{ pu} \tag{IV-5}$$

Esse valor será o valor nominal da tensão da barra de carga em todos os casos de simulação.

A tensão na barra de carga, em cada instante, é determinada através do seguinte algoritmo :

1. Utilizando um valor inicial da tensão de campo (v_f), estimado, calcula-se as correntes pela equação (IV-1).
2. Com essas correntes calcula-se v_d e v_q usando-se as equações de tensão do gerador síncrono (II-3) em regime permanente.

$$\underline{v}_s = \left(w_s B + C \right) \underline{i} \tag{IV-6}$$

3. Com v_d e v_q calcula-se v através da equação (IV-5).
4. Compara-se o valor de v com 1,2247. O método da bissecção é

utilizado para ajustar o valor de v_f a cada iteração.

5. As potências ativas são calculadas usando-se as equações (II-2), (II-5) e (II-8).

O programa que permite a determinação das tensões na carga (SISVF) é mostrado no apêndice D.

IV.2.2 - Resultados

As tabelas IV-2 a IV-10 e as figuras IV-1 a IV-8 mostram o comportamento do sistema nos 4 casos em estudo para carga nominal da usina e carga tal que não sobrecarregue o gerador síncrono quando o gerador de indução está com sua maior potência ativa admissível.

Em todos esses casos variou-se a velocidade da máquina de indução e ajustou-se a tensão de campo de modo a ter a tensão nominal na barra de carga ($V = 1,2247$ pu).

Tabela IV-2 - Resultados obtidos usando o modelo do sistema em regime permanente nas mesmas condições de w_i , resistência de carga e corrente de campo do gerador síncrono da Tabela III-1 (experimental).

RPM	POTÊNCIAS (WATTS)			TENSÃO (VOLTS) BARRAMENTO	RESISTÊNCIA DA CARGA Ω /FASE
	SÍNCRONA	INDUÇÃO	CARGA		
1859	415	1240	1655	200	24,17
1858	165	1256	1421	203	29,00
1843	-385	992	607	210	72,50
1829	-378	699	321	215	145,00

Observa-se que as tabelas III-1 e IV-2 apresentam resultados muito próximos o que valida o modelo apresentado, em regime permanente.

Tabela IV-3 - Caso A com potência nominal da usina.
Resultados em regime permanente, em valores por unidade.

Gerador síncrono	2,0 kVA
Gerador de indução	2,8 kVA
Tensão de linha (eficaz) na carga	200 V ($v=1,2247$ pu)
Potência de base (S)	2,0 kVA
Tensão de base (valor de fase)	163 V

Potência Ativa			Tensão carga	Velocidade gerador de indução
sinc.	induç.	carga		
2.2186	0.1814	2.4000	1.2247	1.0100
2.0242	0.3758	2.4000	1.2247	1.0200
1.8324	0.5676	2.4000	1.2247	1.0300
1.6456	0.7544	2.4000	1.2247	1.0400
1.4660	0.9340	2.4000	1.2247	1.0500
1.2954	1.1046	2.4000	1.2247	1.0600
1.1358	1.2642	2.4000	1.2247	1.0700
0.9883	1.4117	2.4000	1.2247	1.0800
0.8542	1.5458	2.4000	1.2247	1.0900
0.7341	1.6659	2.4000	1.2247	1.1000
0.6283	1.7717	2.4000	1.2247	1.1100
0.5370	1.8630	2.4000	1.2247	1.1200
0.4599	1.9401	2.4000	1.2247	1.1300
0.3964	2.0036	2.4000	1.2247	1.1400
0.3459	2.0541	2.4000	1.2247	1.1500
0.3075	2.0925	2.4000	1.2247	1.1600
0.2803	2.1197	2.4000	1.2247	1.1700
0.2633	2.1367	2.4000	1.2247	1.1800
0.2555	2.1445	2.4000	1.2247	1.1900
0.2559	2.1441	2.4000	1.2247	1.2000
0.2636	2.1364	2.4000	1.2247	1.2100
0.2776	2.1224	2.4000	1.2247	1.2200
0.2970	2.1030	2.4000	1.2247	1.2300
0.3212	2.0788	2.4000	1.2247	1.2400
0.3493	2.0507	2.4000	1.2247	1.2500
0.3806	2.0194	2.4000	1.2247	1.2600
0.4147	1.9853	2.4000	1.2247	1.2700
0.4510	1.9490	2.4000	1.2247	1.2800
0.4890	1.9110	2.4000	1.2247	1.2900
0.5284	1.8716	2.4000	1.2247	1.3000

Tabela IV-4 - Caso A com potência da usina tal que não sobrecarregue o gerador síncrono quando o gerador de indução estiver com sua maior potência ativa. Resultados em regime permanente, em valores por unidade.

Gerador síncrono	2,0 kVA
Gerador de indução	2,8 kVA
Tensão de linha (eficaz) na carga	200 V ($V=1,2247$ pu)
Potência de base (S)	2,0 kVA
Tensão de base (valor de fase)	163 V

Potência Ativa			Tensão carga	Velocidade gerador de indução
sinc.	induç.	carga		
2.9631	0.1814	2.1445	1.2247	1.0100
2.7687	0.3758	3.1445	1.2247	1.0200
2.5769	0.5676	3.1445	1.2247	1.0300
2.3901	0.7544	3.1445	1.2247	1.0400
2.2105	0.9340	3.1445	1.2247	1.0500
2.0399	1.1046	3.1445	1.2247	1.0600
1.8802	1.2642	3.1445	1.2247	1.0700
1.7328	1.4117	3.1445	1.2247	1.0800
1.5987	1.5458	3.1445	1.2247	1.0900
1.4786	1.6659	3.1445	1.2247	1.1000
1.3728	1.7717	3.1445	1.2247	1.1100
1.2815	1.8630	3.1445	1.2247	1.1200
1.2044	1.9401	3.1445	1.2247	1.1300
1.1409	2.0036	3.1445	1.2247	1.1400
1.0904	2.0541	3.1445	1.2247	1.1500
1.0520	2.0925	3.1445	1.2247	1.1600
1.0248	2.1197	3.1445	1.2247	1.1700
1.0078	2.1367	3.1445	1.2247	1.1800
1.0000	2.1445	3.1445	1.2247	1.1900
1.0004	2.1441	3.1445	1.2247	1.2000
1.0081	2.1364	3.1445	1.2247	1.2100
1.0221	2.1224	3.1445	1.2247	1.2200
1.0415	2.1030	3.1445	1.2247	1.2300
1.0657	2.0788	3.1445	1.2247	1.2400
1.0938	2.0507	3.1445	1.2247	1.2500
1.1251	2.0194	3.1445	1.2247	1.2600
1.1592	1.9853	3.1445	1.2247	1.2700
1.1955	1.9490	3.1445	1.2247	1.2800
1.2335	1.9110	3.1445	1.2247	1.2900
1.2729	1.8716	3.1445	1.2247	1.3000
1.0000	2.1453	3.1453	1.2247	1.1945 *

(*) maior potência do gerador de indução

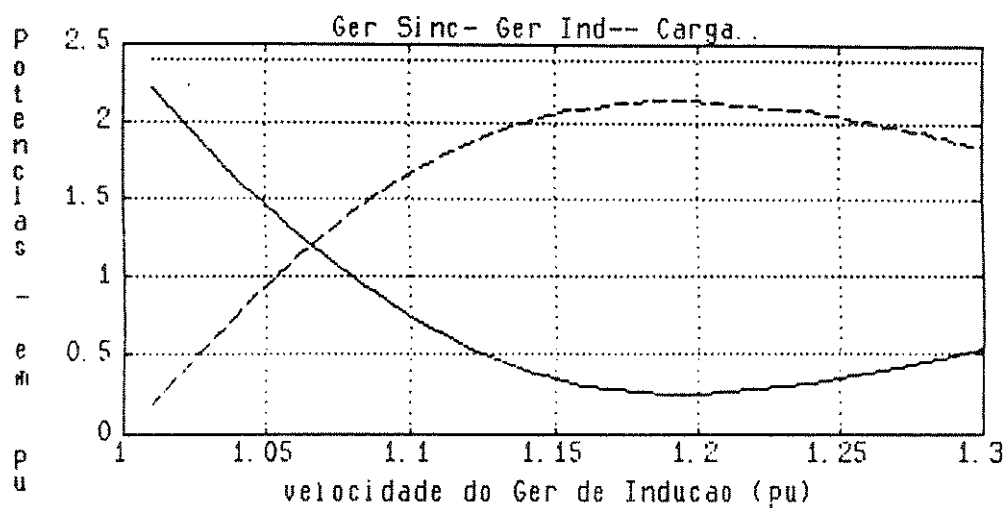


Figura IV-1 - Caso A com potência nominal da usina

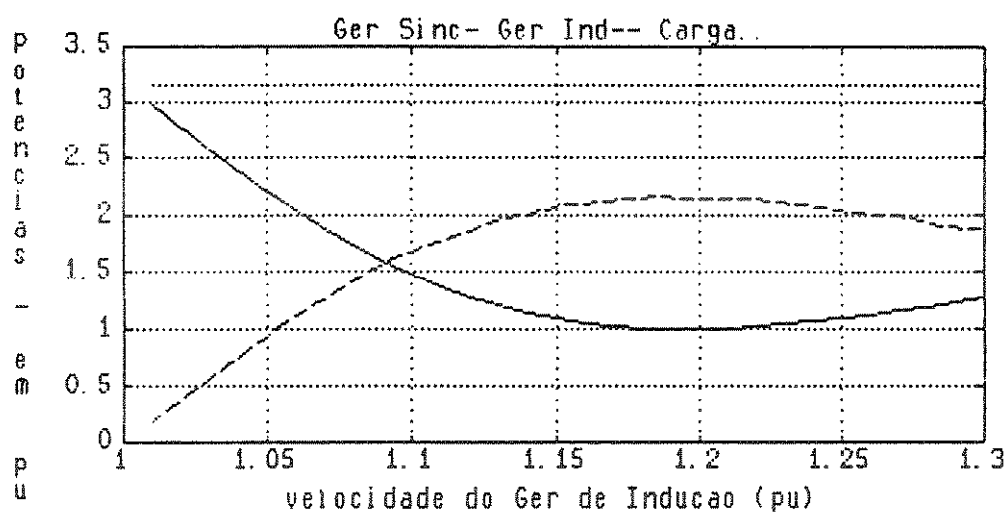


Figura IV-2 - Caso A correspondente a tabela IV-4

Tabela IV-5 - Caso B com potência nominal da usina

Resultados em regime permanente, em valores por unidade. Resultados em regime permanente, em valores por unidade.

Gerador síncrono	875 kVA
Gerador de indução	492 kVA
Tensão de linha (eficaz) na carga	450 V ($V=1,2247$ pu)
Potência de base (S)	875 kVA
Tensão de base (valor de fase)	367 V

Potência Ativa			Tensão carga	Velocidade gerador de indução
sinc.	assinc.	carga		
1.4590	0.1033	1.5623	1.2247	1.0100
1.3701	0.1922	1.5623	1.2247	1.0200
1.3056	0.2567	1.5623	1.2247	1.0300
1.2668	0.2955	1.5623	1.2247	1.0400
1.2493	0.3130	1.5623	1.2247	1.0500
1.2468	0.3155	1.5623	1.2247	1.0600
1.2537	0.3086	1.5623	1.2247	1.0700
1.2659	0.2963	1.5623	1.2247	1.0800
1.2808	0.2815	1.5623	1.2247	1.0900
1.2966	0.2657	1.5623	1.2247	1.1000
1.4168	0.1455	1.5623	1.2247	1.2000
1.4737	0.0886	1.5623	1.2247	1.3000

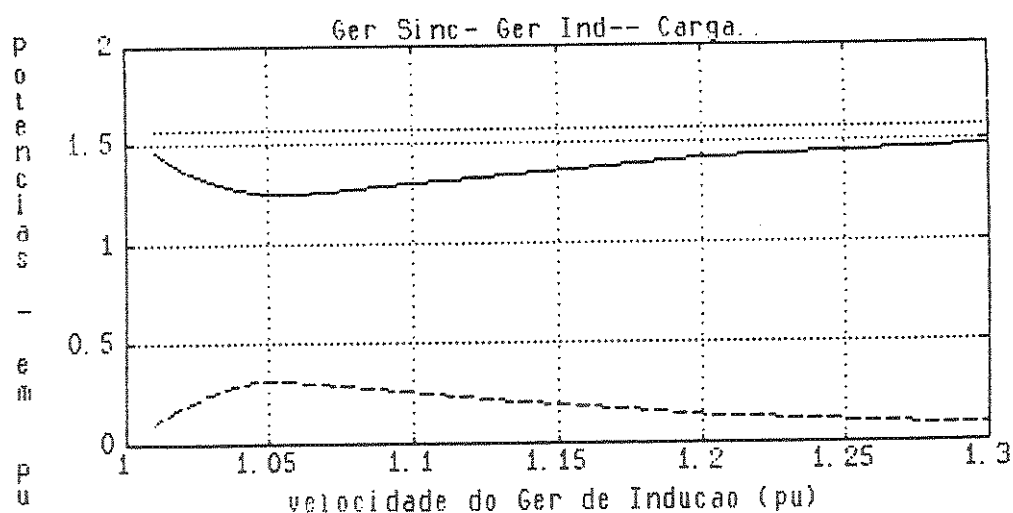


Figura IV-3 - Caso B com Potência Nominal da Usina

Tabela IV-6 - Caso B com potência da usina tal que não sobrecarregue o gerador síncrono quando o gerador de indução estiver com sua maior potência ativa. Resultados em regime permanente, em valores por unidade.

Gerador síncrono	875 kVA
Gerador de indução	492 kVA
Tensão de linha (eficaz) na carga	450 V
Potência de base (S)	875 kVA
Tensão de base (valor de fase)	367 V

Potência Ativa			Tensão carga	Velocidade gerador de indução
sinc.	assinc.	carga		
1.2122	0.1033	1.3155	1.2247	1.0100
1.1233	0.1922	1.3155	1.2247	1.0200
1.0588	0.2567	1.3155	1.2247	1.0300
1.0200	0.2955	1.3155	1.2247	1.0400
1.0025	0.3130	1.3155	1.2247	1.0500
1.0000	0.3155	1.3155	1.2247	1.0600
1.0069	0.3086	1.3155	1.2247	1.0700
1.0192	0.2963	1.3155	1.2247	1.0800
1.0340	0.2815	1.3155	1.2247	1.0900
1.0498	0.2657	1.3155	1.2247	1.1000
1.1700	0.1455	1.3155	1.2247	1.2000
1.2269	0.0886	1.3155	1.2247	1.3000
1.0000	0.3160	1.3160	1.2247	1.0570 *

* Maior potência do gerador de indução.

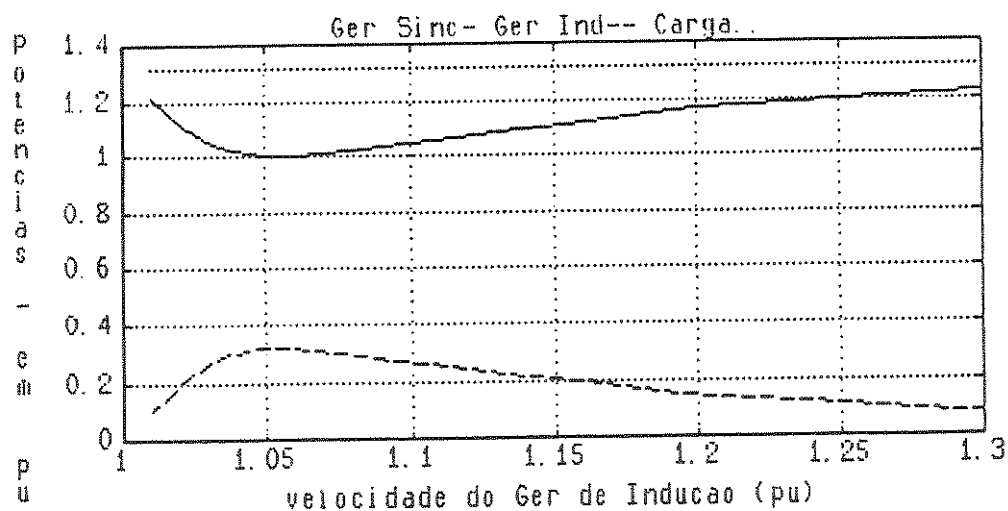


Figura IV-4 - Caso B correspondente a Tabela IV-6

Tabela IV-7 - Caso C com potência Nominal da Usina.

Resultados em regime permanente, em valores por unidade.

Gerador síncrono	625 kVA
Gerador de indução	698 kVA
Tensão de linha (eficaz) na carga	480 V (1,2247 pu)
Potência de base (S)	625 kVA
Tensão de base (valor de fase)	392 V

Potência Ativa			Tensão carga	Velocidade gerador de indução
sinc.	assinc.	carga		
1.8007	0.3161	2.1168	1.2247	1.0100
1.5440	0.5728	2.1168	1.2247	1.0200
1.3787	0.7381	2.1168	1.2247	1.0300
1.2986	0.8182	2.1168	1.2247	1.0400
1.2795	0.8373	2.1168	1.2247	1.0500
1.2973	0.8195	2.1168	1.2247	1.0600
1.3344	0.7824	2.1168	1.2247	1.0700
1.3798	0.7370	2.1168	1.2247	1.0800
1.4274	0.6894	2.1168	1.2247	1.0900
1.4741	0.6427	2.1168	1.2247	1.1000
1.7810	0.3358	2.1168	1.2247	1.2000
1.9134	0.2029	2.1168	1.2247	1.3000

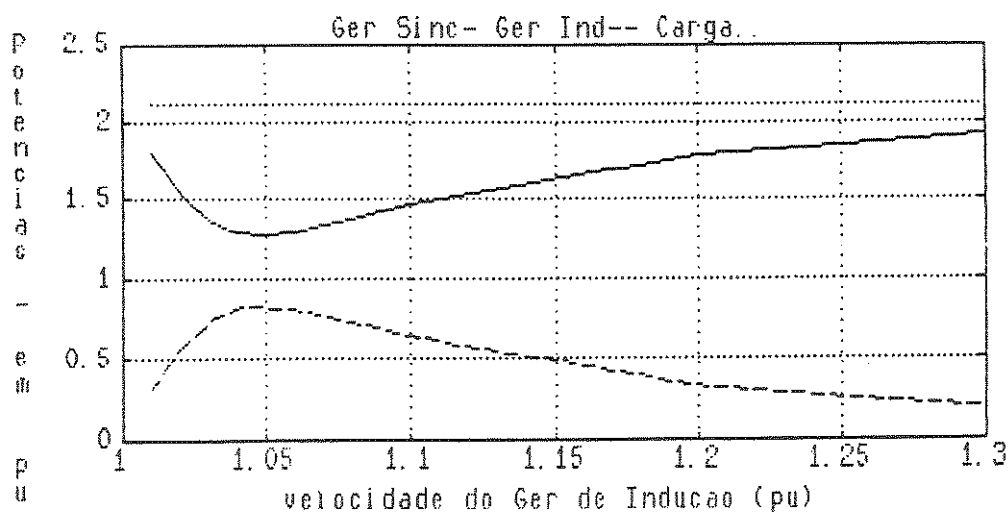


Figura IV-5 - Caso C com potência nominal da usina

Tabela IV-8 - Caso C com potência da usina tal que não sobrecarregue o gerador síncrono quando o gerador de indução estiver com sua maior potência ativa. Resultados em regime permanente, em valores por unidade.

Gerador síncrono	625 kVA
Gerador de indução	698 kVA
Tensão de linha (eficaz) na carga	480 V (1,2247 pu)
Potência de base (S)	625 kVA
Tensão de base (valor de fase)	392 V

Potência Ativa			Tensão carga	Velocidade gerador de indução
sinc.	assinc.	carga		
1.5211	0.3161	1.5623	1.2247	1.0100
1.2645	0.5728	1.5623	1.2247	1.0200
1.0992	0.7381	1.5623	1.2247	1.0300
1.0191	0.8182	1.5623	1.2247	1.0400
1.0000	0.8373	1.5623	1.2247	1.0500
1.0178	0.8195	1.5623	1.2247	1.0600
1.0548	0.7824	1.5623	1.2247	1.0700
1.1003	0.7370	1.5623	1.2247	1.0800
1.1479	0.6894	1.5623	1.2247	1.0900
1.1945	0.6427	1.5623	1.2247	1.1000
1.5015	0.3358	1.5623	1.2247	1.2000
1.6344	0.2029	1.5623	1.2247	1.3000
1.0000	0.8374	1.8374	1.2247	1.0492 *

(*) Maior potência do gerador de indução.

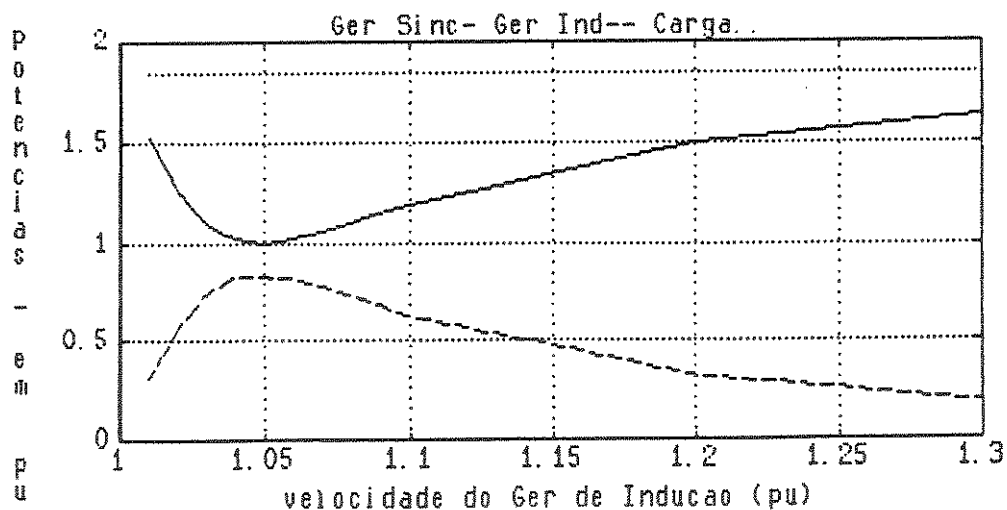


Figura IV-6 - Caso C correspondente a Tabela IV-8

Tabela IV-9 - Caso D com potência Nominal da Usina.

Resultados em regime permanente, em valores por unidade.

Gerador síncrono	312,5 kVA
Gerador de indução	1041 kVA
Tensão de linha (eficaz) na carga	450 V
Potência de base (S)	312,5 kVA
Tensão de base (valor de fase)	367 V

Potência Ativa			Tensão carga	Velocidade gerador de indução
sinc.	assinc.	carga		
3.4187	0.9125	4.3312	1.2247	1.0100
2.7199	1.6113	4.3312	1.2247	1.0200
2.3224	2.0088	4.3312	1.2247	1.0300
2.1757	2.1555	4.3312	1.2247	1.0400
2.1868	2.1444	4.3312	1.2247	1.0500
2.2798	2.0514	4.3312	1.2247	1.0600
2.4077	1.9235	4.3312	1.2247	1.0700
2.5449	1.7863	4.3312	1.2247	1.0800
2.6790	1.6522	4.3312	1.2247	1.0900
2.8044	1.5268	4.3312	1.2247	1.1000
2.5632	0.7680	4.3312	1.2247	1.2000
2.8741	0.4571	4.3312	1.2247	1.3000

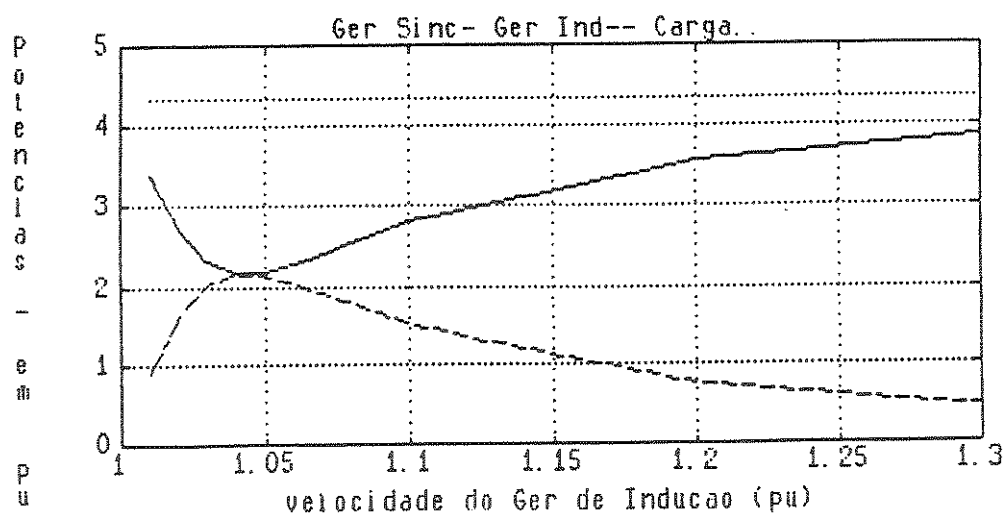


Figura IV-7 - Caso D com potência da usina.

Tabela IV-10 - Caso D com potência da usina tal que não sobrecarregue o gerador síncrono quando o gerador de indução estiver com sua maior potência ativa. Resultados em regime permanente, em valores por unidade.

Gerador síncrono	312,5 kVA
Gerador de indução	1041 kVA
Tensão de linha (eficaz) na carga	450 V
Potência de base (S)	312,5 kVA
Tensão de base (valor de fase)	367 V

Potência Ativa			Tensão carga	Velocidade gerador de indução
sinc.	assinc.	carga		
2.2430	0.9125	3.1555	1.2247	1.0100
1.5441	1.6113	3.1555	1.2247	1.0200
1.1467	2.0088	3.1555	1.2247	1.0300
1.0000	2.1555	3.1555	1.2247	1.0400
1.0111	2.1444	3.1555	1.2247	1.0500
1.1041	2.0514	3.1555	1.2247	1.0600
1.2319	1.9235	3.1555	1.2247	1.0700
1.3692	1.7863	3.1555	1.2247	1.0800
1.5032	1.6522	3.1555	1.2247	1.0900
1.6286	1.5268	3.1555	1.2247	1.1000
2.3875	0.7680	3.1555	1.2247	1.2000
2.6984	0.4571	3.1555	1.2247	1.3000
1.0000	2.1651	3.1651	1.2247	1.0438 *

(*) Maior potência do gerador de indução.

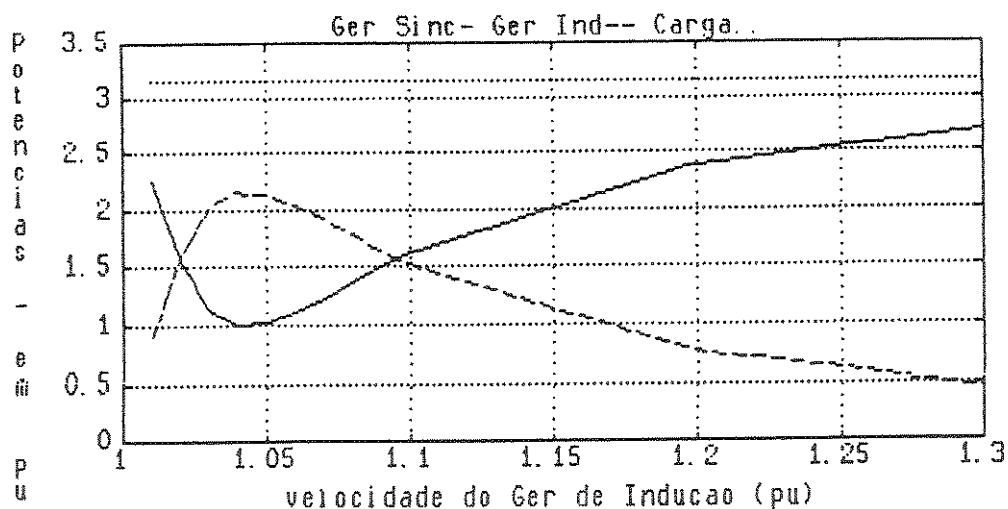


Figura IV-8 - Caso B corresponde a tabela IV-10

Observa-se nestes resultados que nos casos B, C e D a usina não consegue produzir a sua potência nominal, correspondente à soma das potências nominais dos geradores síncrono e de indução, sem que o gerador síncrono se sobrecarregue em todos os casos. No caso A ela consegue produzir mais do que a potência nominal.

No caso A as máquinas são pequenas e nos B, C e D são grandes. Isso mostra que cada caso deve ser estudado em particular.

O gerador de indução fornece sempre a mesma potência (em pu), qualquer que seja a potência solicitada pela carga para cada velocidade de acionamento (w_i), mantida a tensão.

Isto mostra que o gerador de indução pode precisar de regulação.

O gerador de indução aumenta sua potência fornecida quando a tensão na barra de carga aumenta.

Observa-se também que a máxima potência do gerador de indução ocorre num escorregamento de cerca de 3 a 4 vezes do que o escorregamento nominal.

IV.3 - ESTUDO DO SISTEMA EM REGIME TRANSITÓRIO

IV.3.1 - Equações do Sistema em Regime Transitório, em pu

As equações que representam o comportamento dinâmico do sistema em regime permanente são as (II-16), (II-2), (II-5) e (II-8).

Estuda-se a seguir dois tipos de transitórios a saber: curto-circuito trifásico instantâneo na barra de carga e

rejeição de 70% da carga.

A solução das equações diferenciais (II-16) é obtida utilizando o método de Runge-Kutta de 4ª ordem com passo constante, implementado externamente dentro da estrutura do aplicativo matemático MATLAB.

Os programas que permitem simular transitórios são SISD2, SISP, TORQUE, SIS, SISG apresentados no apêndice D.

IV.3.2 - Curto-circuito Trifásico Instantâneo

IV.3.2.1 - Introdução

O curto-circuito foi simulado colocando-se como carga no sistema uma resistência elétrica extremamente pequena (0,0001 pu).

O sistema de equações (II-16) foi resolvido para uma carga resistiva tal que o gerador síncrono forneça a sua potência nominal. Deixou-se o sistema em regime permanente durante algum tempo e aplicou-se o curto-circuito.

O instante de aplicação do curto-circuito foi considerado instante como zero. Simulou-se também a retirada do curto-circuito após um determinado intervalo de tempo de duração do mesmo.

IV.3.2.2 - Resultados

As figuras IV-9 a IV-15 mostram o comportamento do sistema durante o curto-circuito na barra de carga e após a retirada do mesmo no caso B. São mostradas as curvas da corrente de curto-circuito na barra de carga (3 fases) e nos geradores

(fase a) bem como as potências no barramento de carga e nos geradores, a tensão na fase a da barra de carga e a corrente de campo do gerador síncrono.

As figuras IV-16 a IV-22 mostram os mesmos resultados para o caso C e as figuras IV-23 a IV-29 para o caso D.

IV.3.2.3 - Comentários

Observa-se que as correntes de curto-circuito no gerador de indução desapareceram rapidamente e o gerador síncrono mantém a corrente de curto-circuito na barra de carga. Dessa maneira é bem provável que o gerador de indução dispense a proteção contra curto-circuito.

Entretanto durante o curto-circuito o conjugado resistente oferecido pelo gerador síncrono à turbina é nulo, com isso a turbina tende a disparar. É necessário evitar-se esse disparo mecanicamente, com controle de vazão.

O modelo apresentado permite verificar o pico da corrente de curto-circuito para projeto do disjuntor adequado à cada máquina.

IV.3.3 - Rejeição de 70% da Carga

IV.3.3.1 - Introdução

A rejeição de carga foi simulada retirando-se 70% de carga, em potência, através da variação de resistência do reostato de carga.

Da mesma maneira que no caso do curto-circuito, deixou-se o sistema em regime permanente com carga resistiva tal

que o gerador síncrono forneça sua potência nominal em seguida rejeitou-se 70% da carga. Esse instante foi denominado zero. Simulou-se também a retomada de carga.

IV.3.3.2 - Resultados

As figuras IV-30 a IV-35 mostram o comportamento do sistema durante e após a rejeição de carga no caso B. São mostradas curvas de correntes na carga (3 fases), correntes nos geradores, potências na barra de carga e nos geradores e tensões na barra de carga (3 fases).

As figuras IV-36 a IV-41 mostram os mesmos resultados para o caso C e as figuras IV-42 a IV-47 para o caso D.

IV.3.3.3 - Comentários

Durante a rejeição de carga a tensão na barra de carga aumenta, com isso o gerador de indução passa a fornecer maior potência ativa do que em regime permanente enquanto o gerador síncrono diminui o fornecimento de potência ativa podendo até se motorizar.

A tensão na barra de carga, entretanto, não aumenta tanto durante a rejeição, quanto aumentaria no caso de usina com gerador síncrono somente.

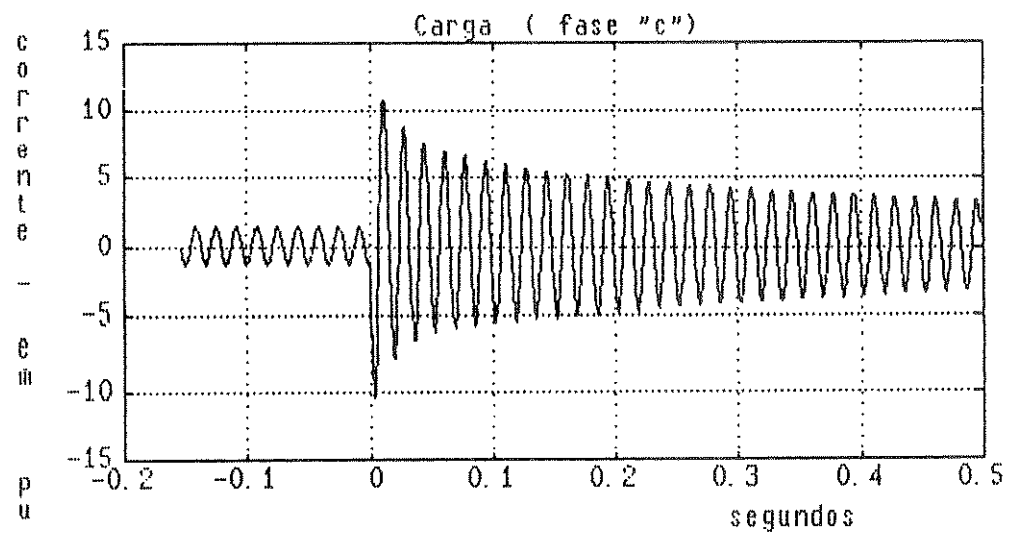
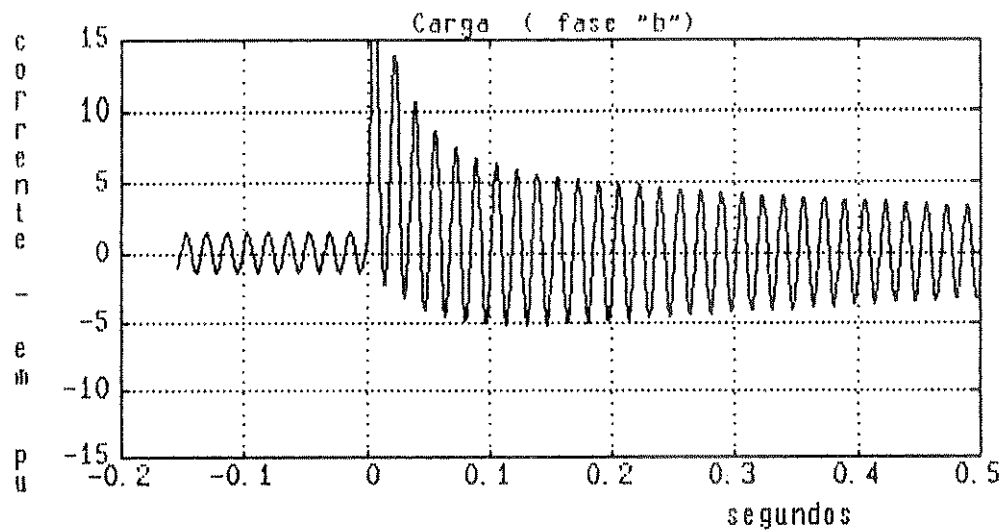
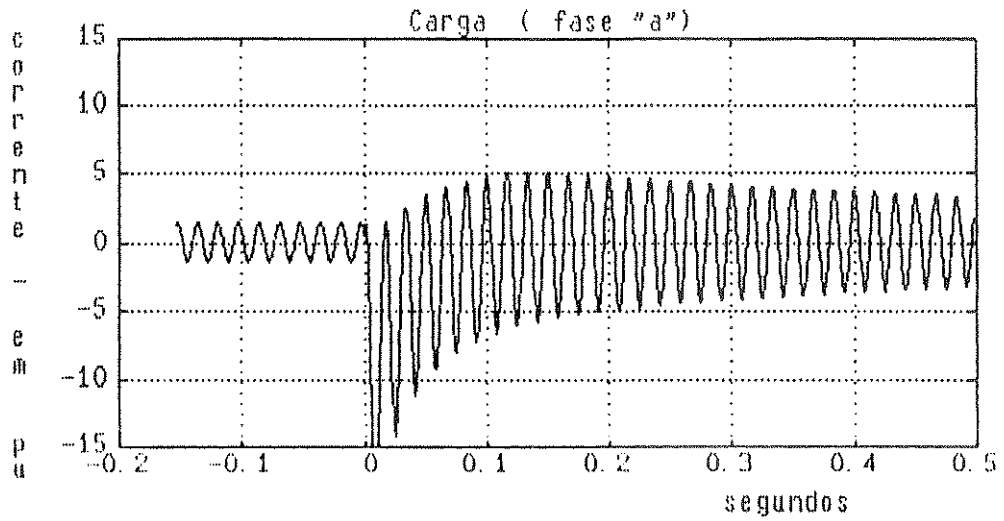


Figura IV-9 Caso B - Correntes de curto-circuito na carga.

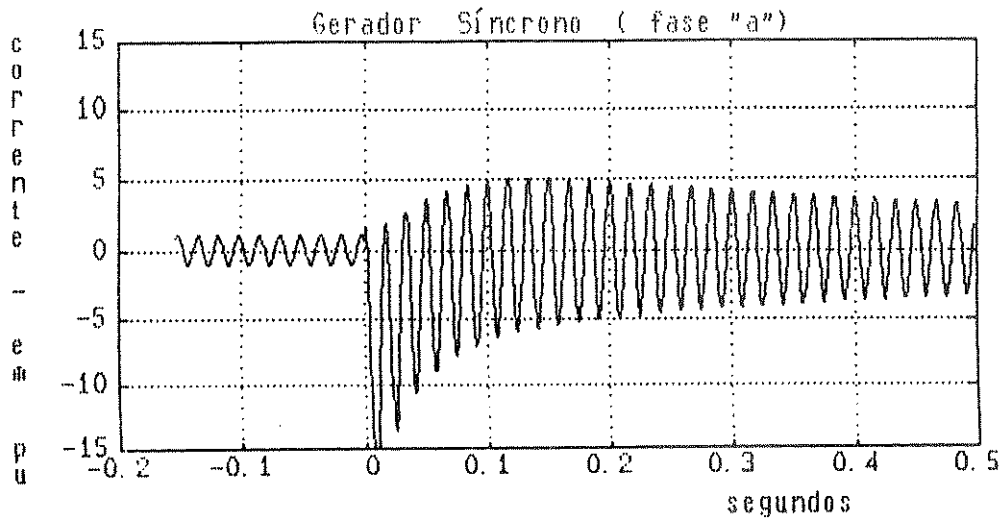


Figura IV-10 Caso B - Correntes de curto-circuito na fase A do Gerador Síncrono.

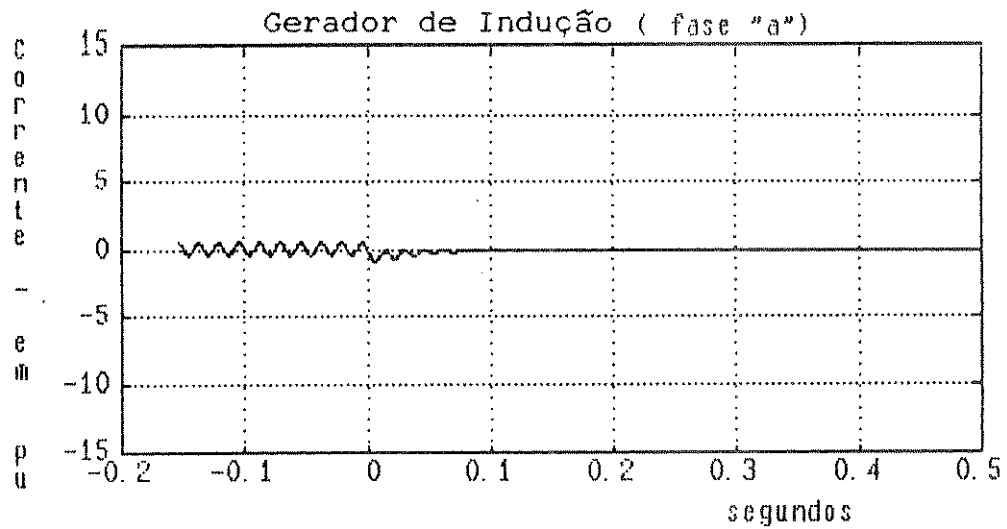


Figura IV-11 Caso B - Correntes de curto circuito na fase A do Gerador de Indução.

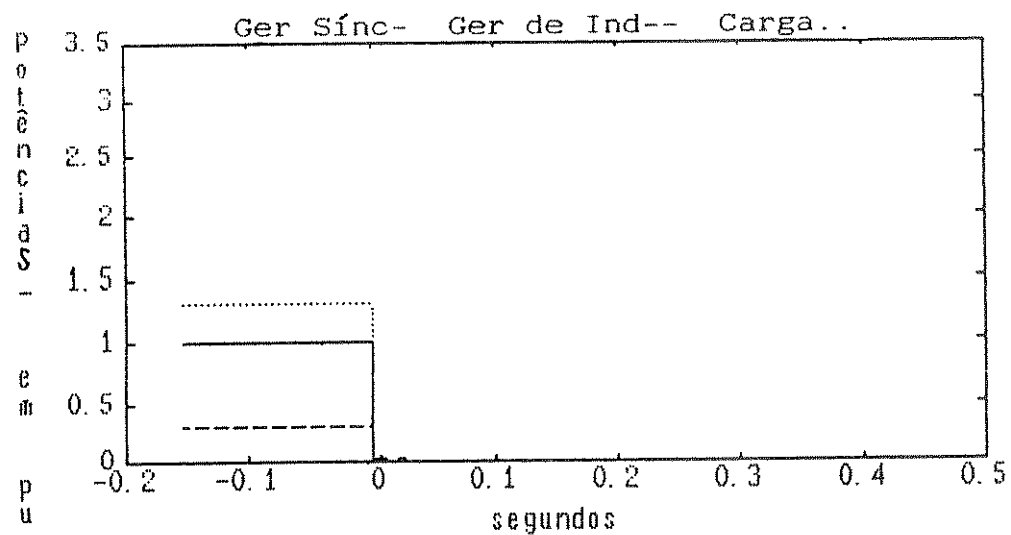


Figura IV-12 Caso B - Potências no Sistema em curto-circuito.

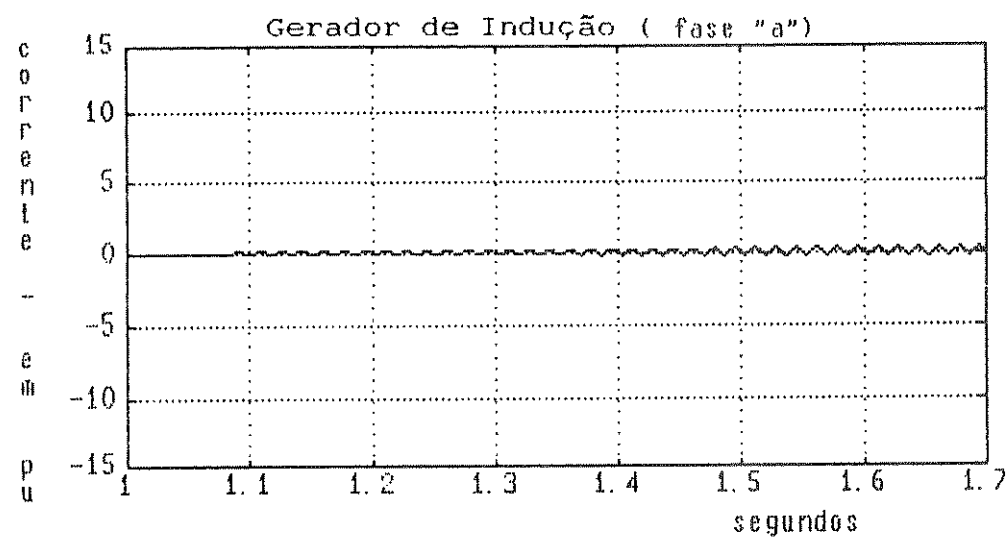
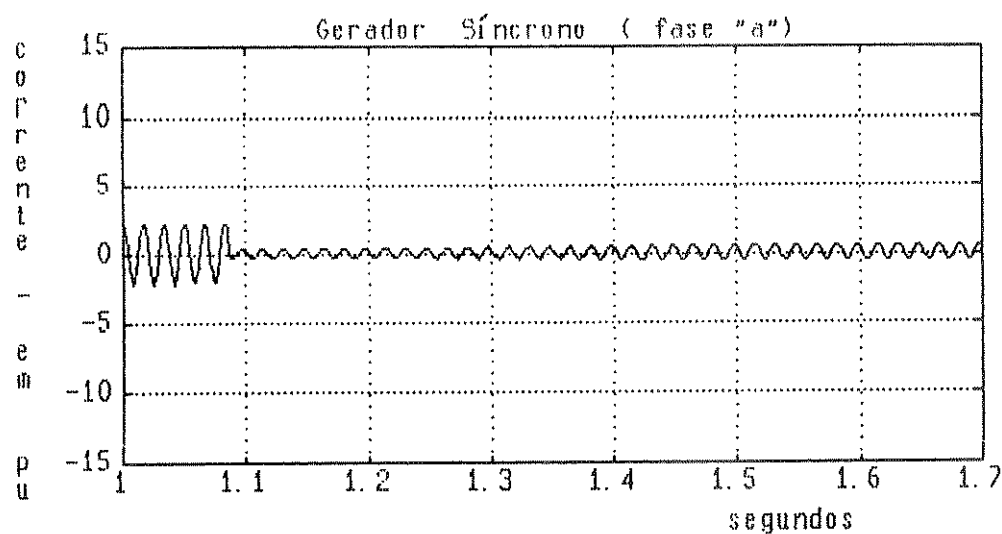
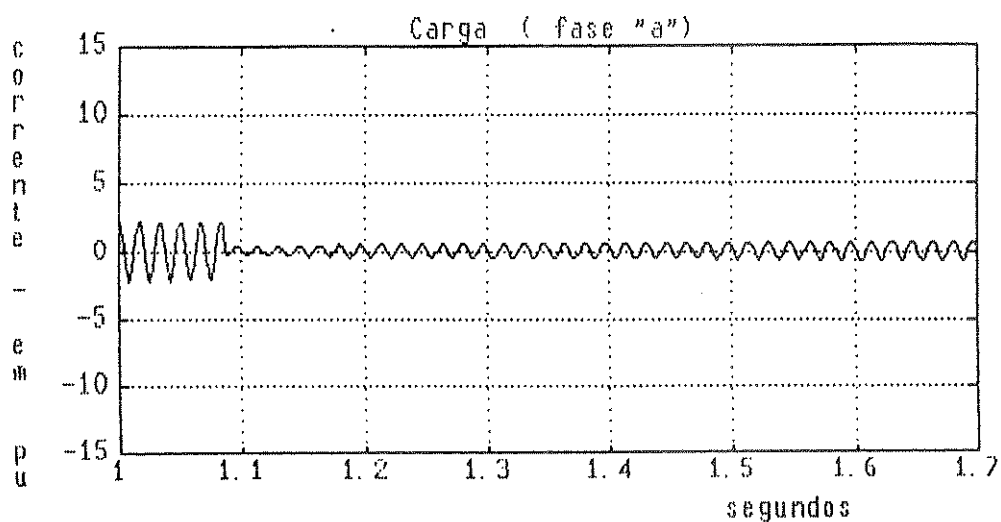


Figura IV-13 Caso B - Retirada do curto-circuito.

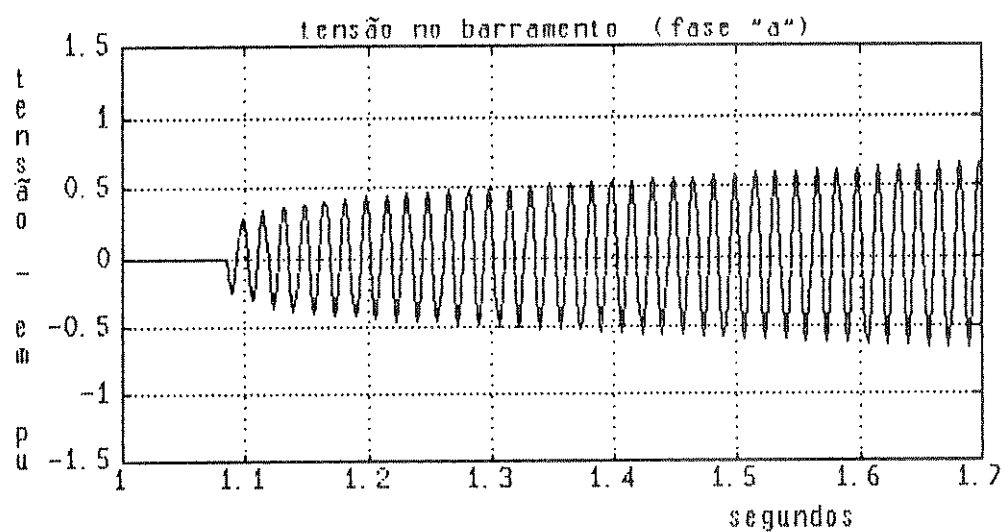
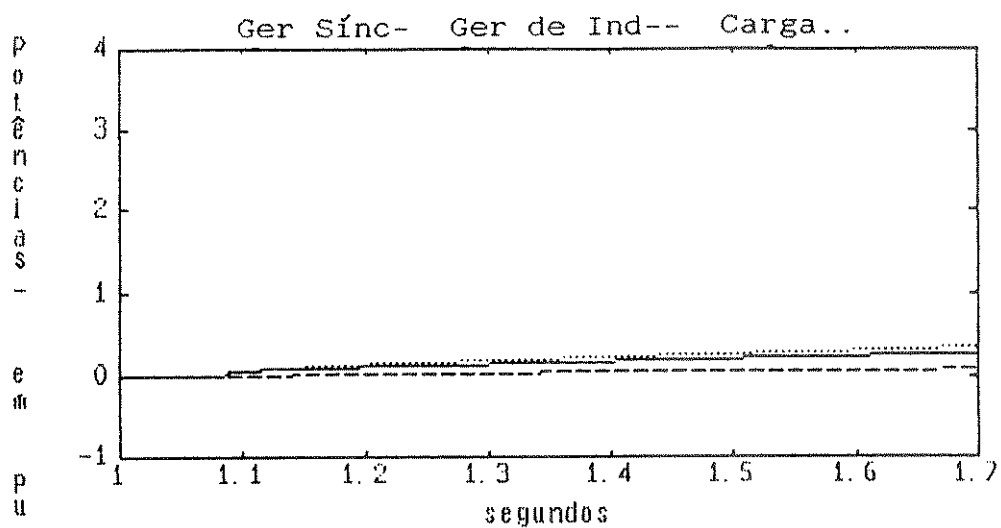


Figura IV-14 Caso B - Retirada do curto-circuito.

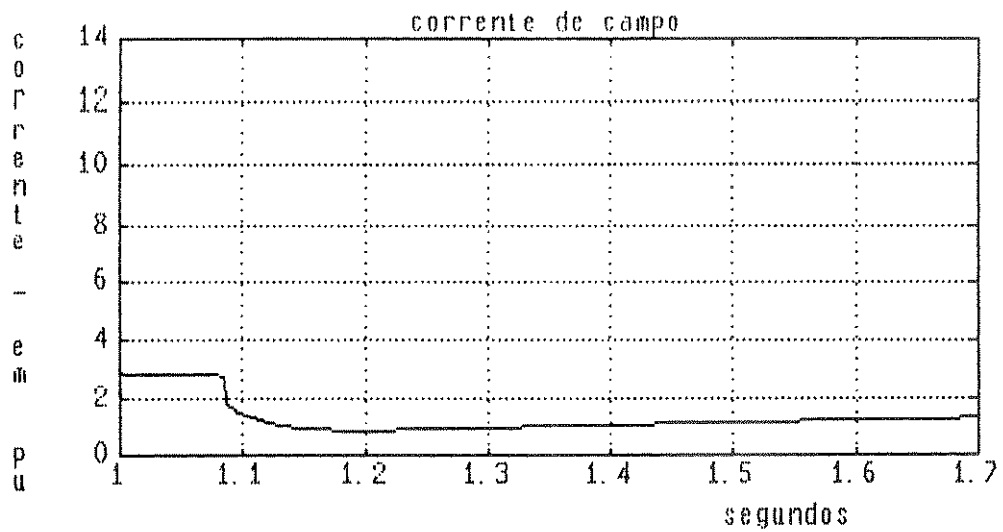
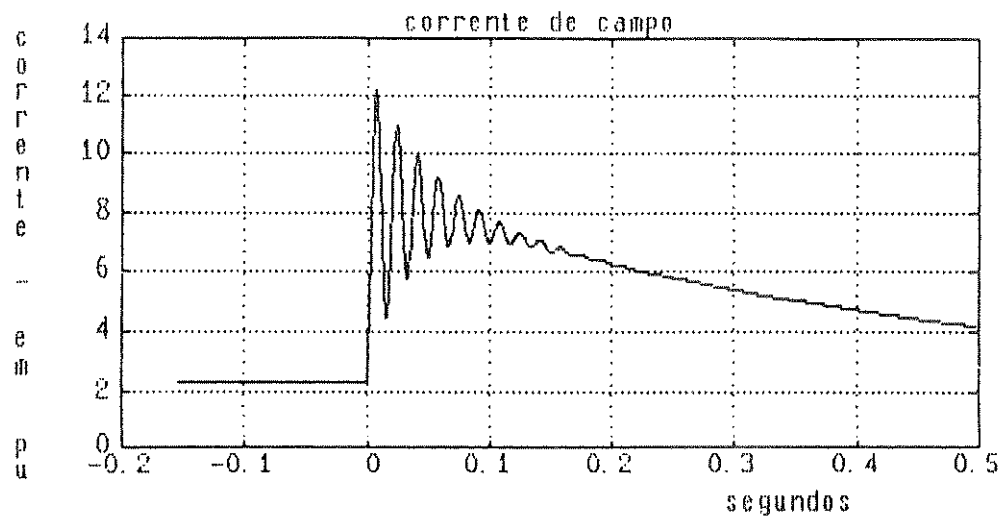


Figura IV-15 Caso B - Correntes de campo do Gerador Síncrono no curto-circuito e na retirada do curto-circuito.

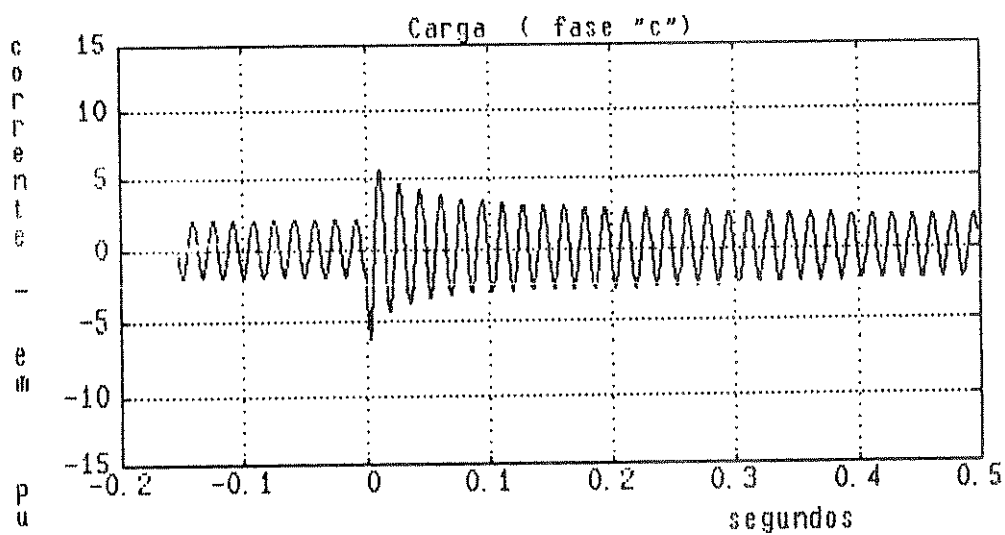
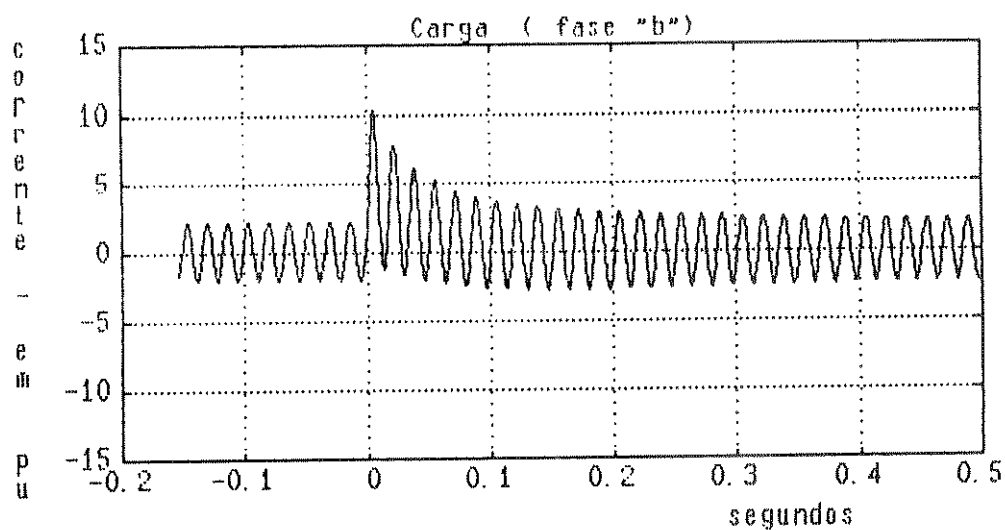
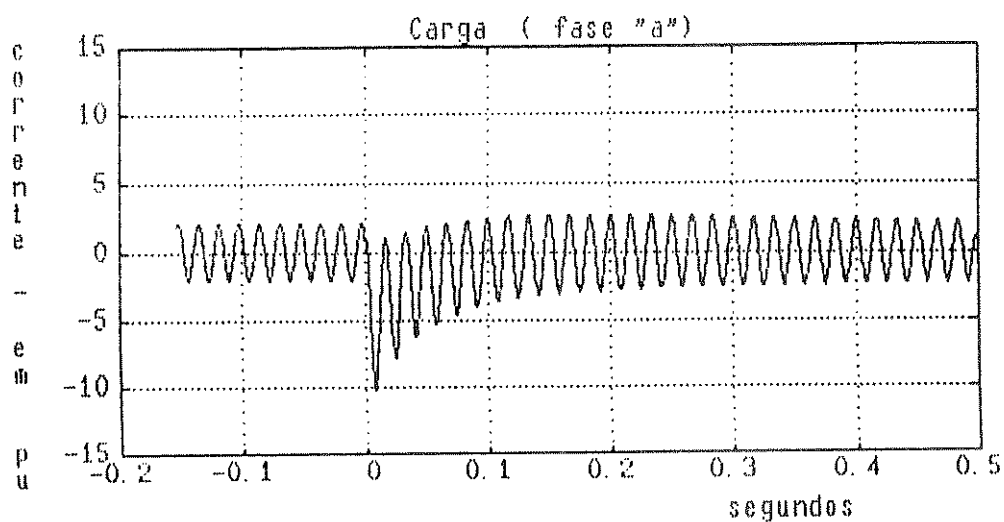


Figura IV-16 Caso C - Correntes de curto-circuito na carga.

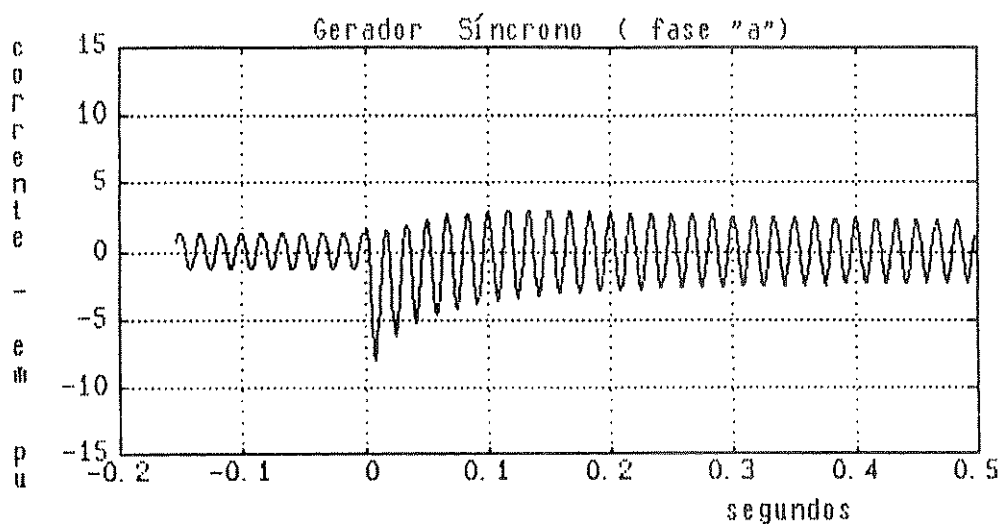


Figura IV-17 Caso C - Correntes de curto-circuito na fase A do Gerador Síncrono.

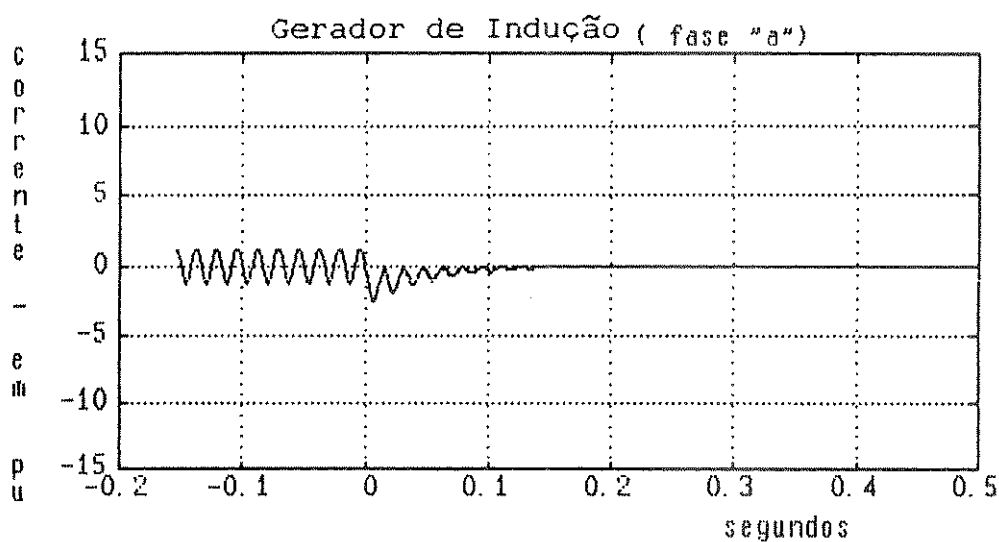


Figura IV-18 Caso C - Correntes de curto circuito na fase A do Gerador de Indução.

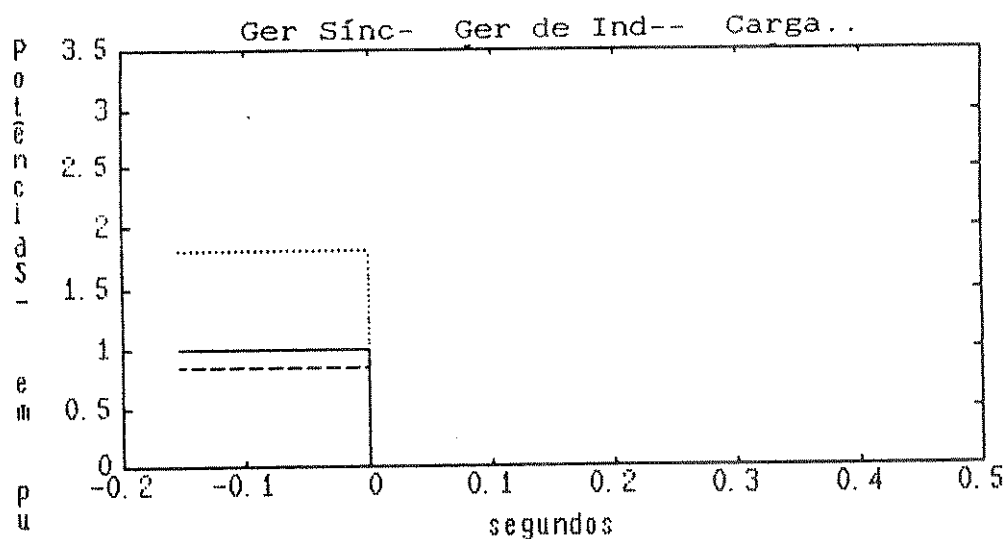


Figura IV-19 Caso C - Potências no Sistema em curto-circuito.

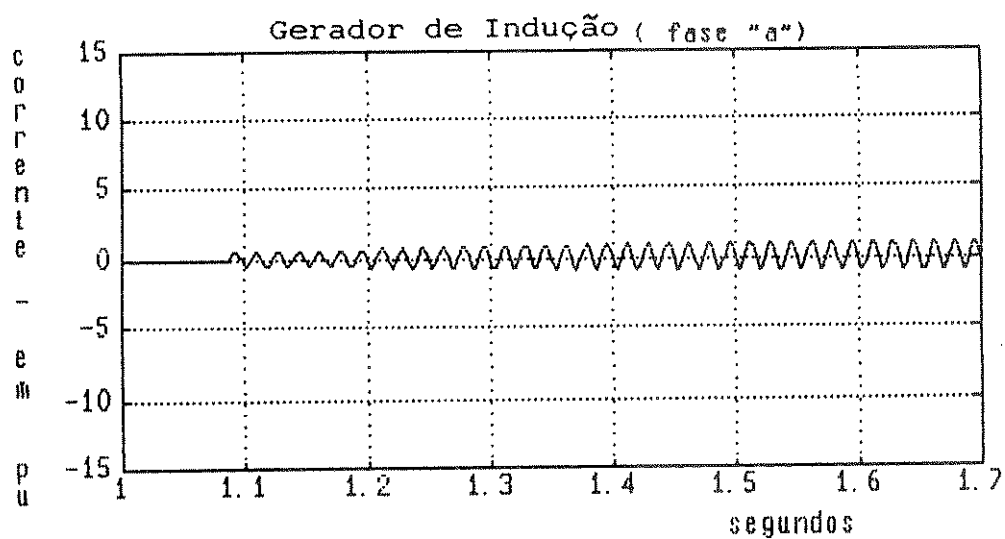
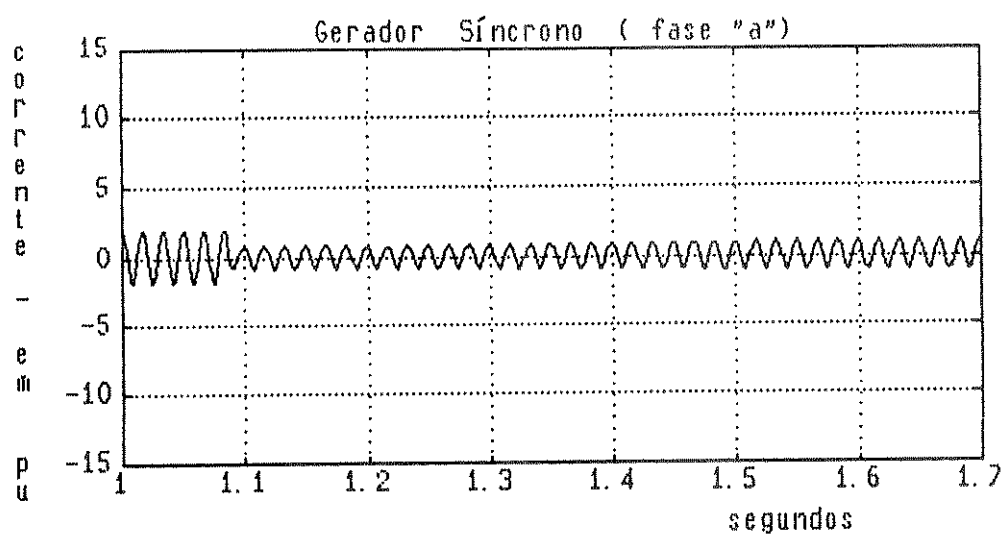
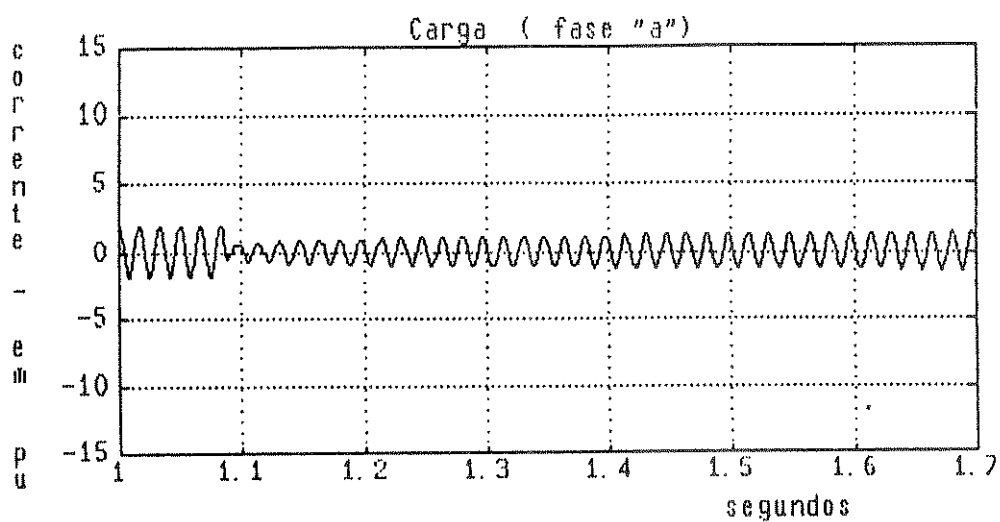


Figura IV-20 Caso C - Retirada do curto-circuito.

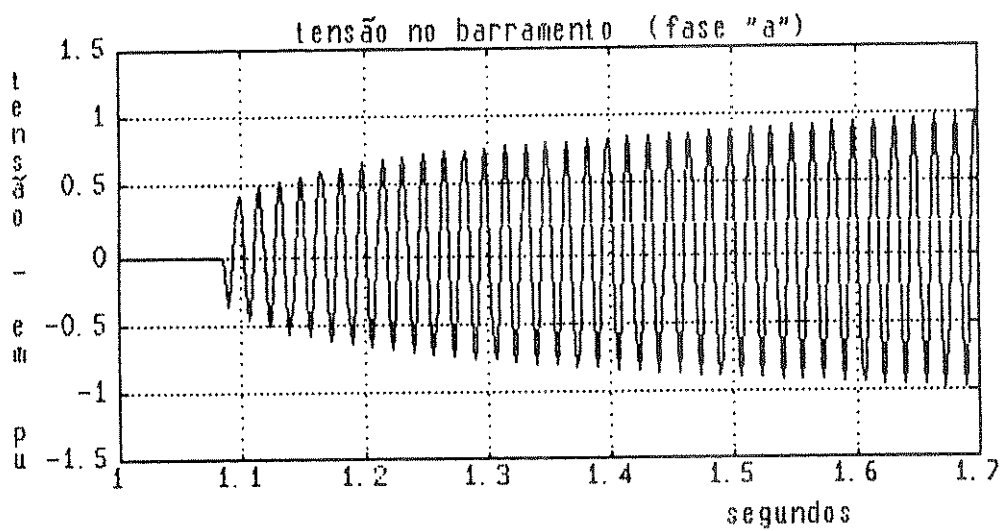
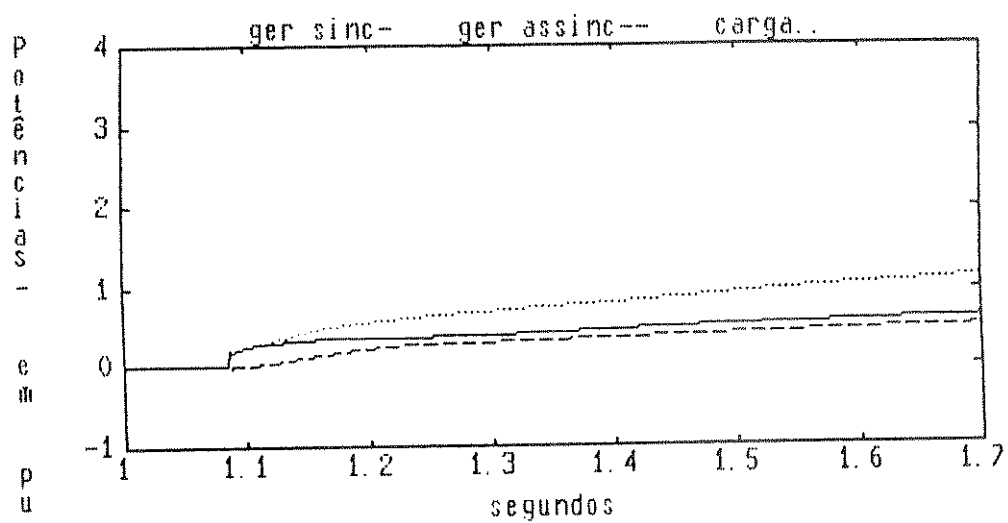


Figura IV-21 Caso C - Retirada do curto-circuito.

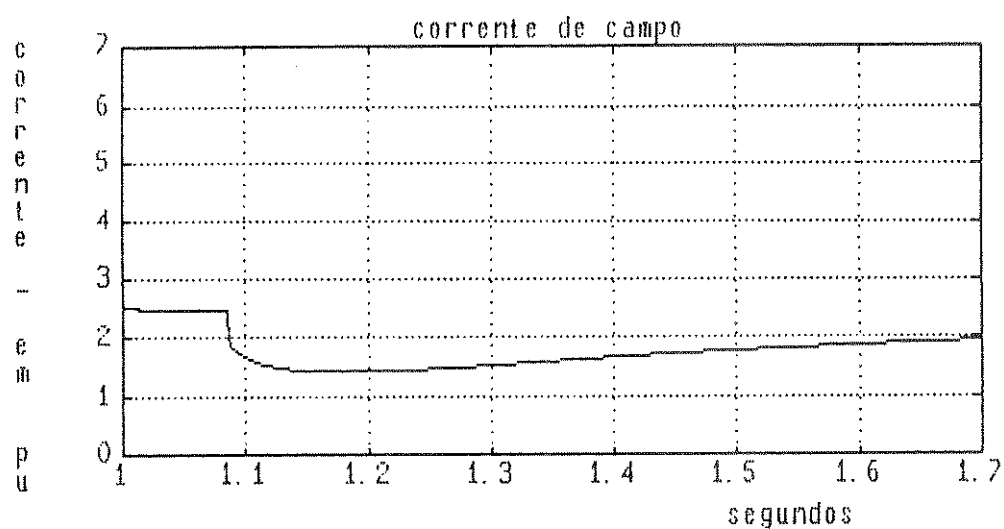
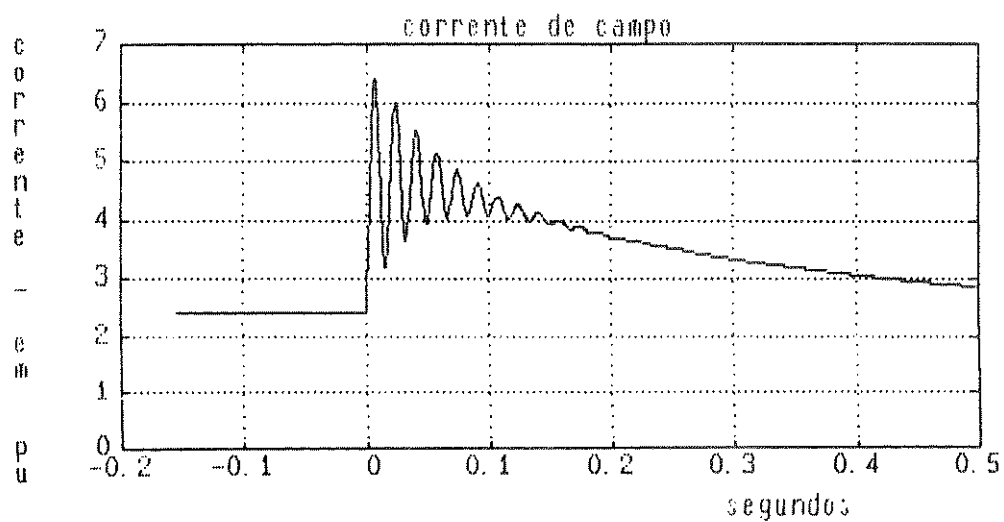


Figura IV-22 Caso C - Correntes de campo do Gerador Sín-
crons no curto-circuito e na retirada do
curto-circuito.

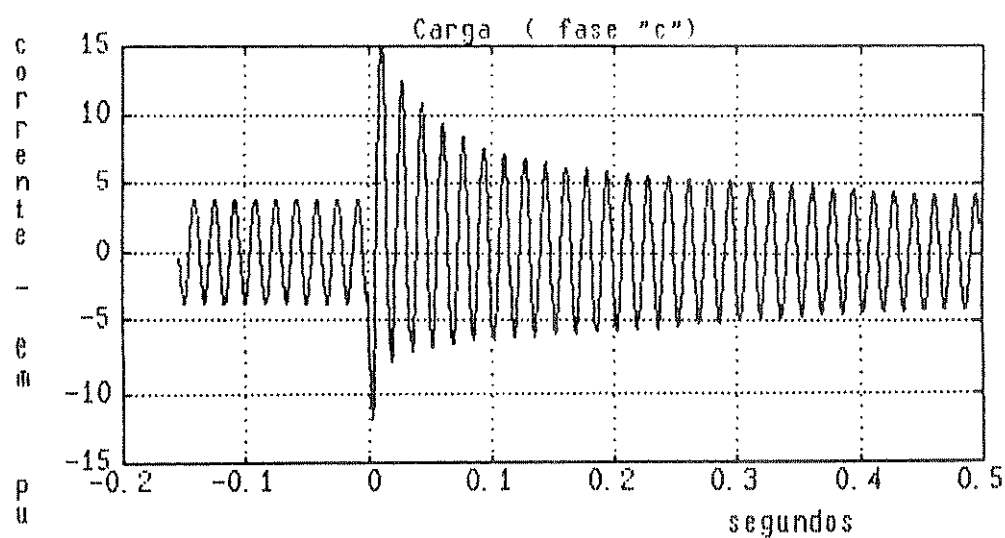
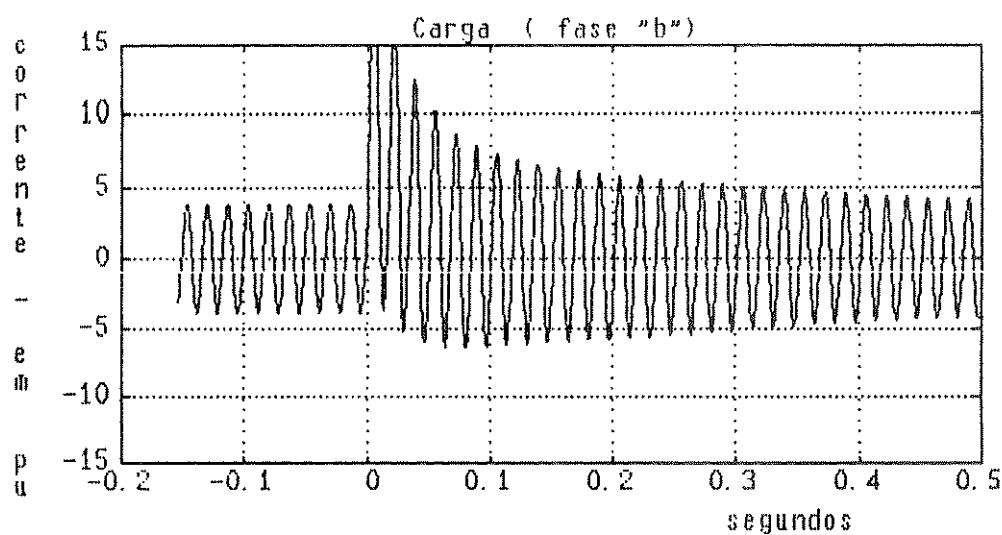
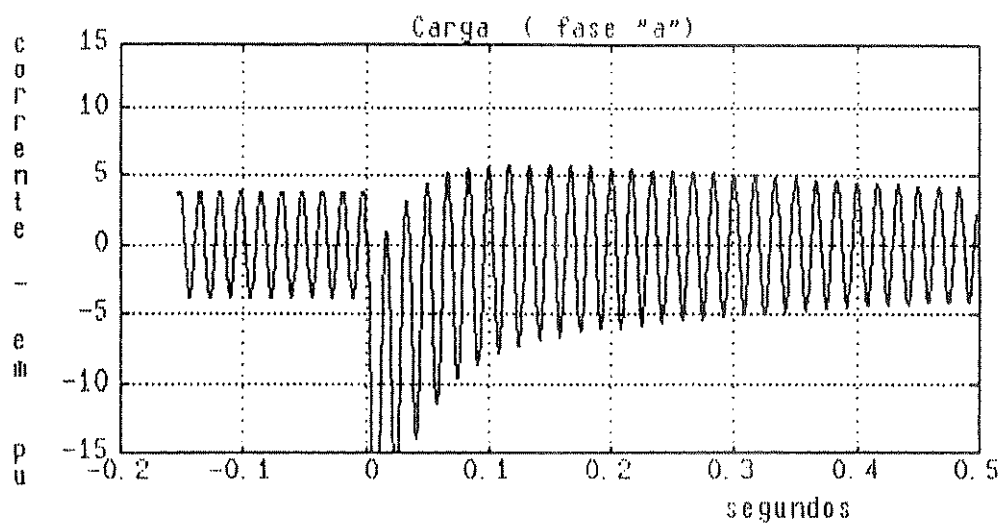


Figura IV-23 Caso D - Correntes de curto-circuito na carga

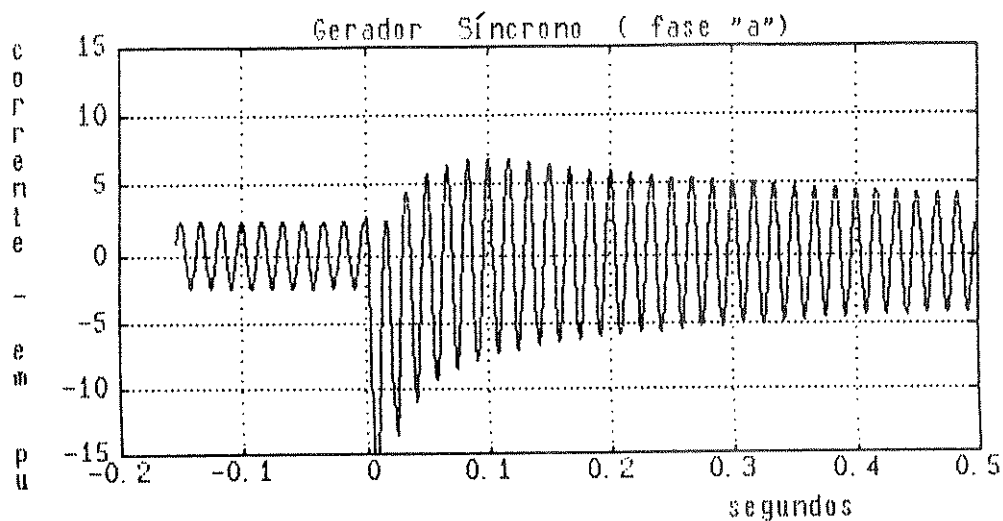


Figura IV-24 Caso D - Correntes de curto-circuito na fase A do Gerador Síncrono.

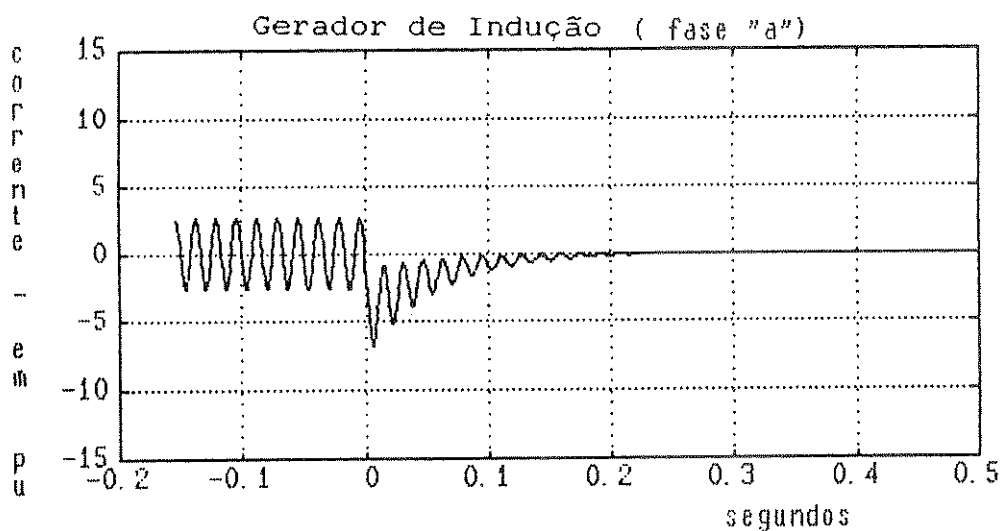


Figura IV-25 Caso D - Correntes de curto circuito na fase A do Gerador de Indução.

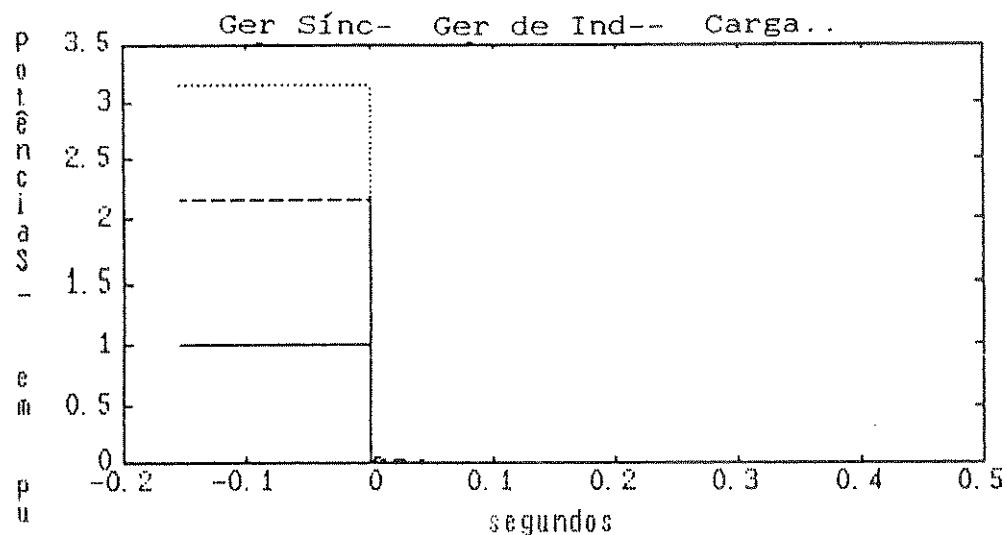


Figura IV-26 Caso D - Potências no Sistema em curto-circuito.

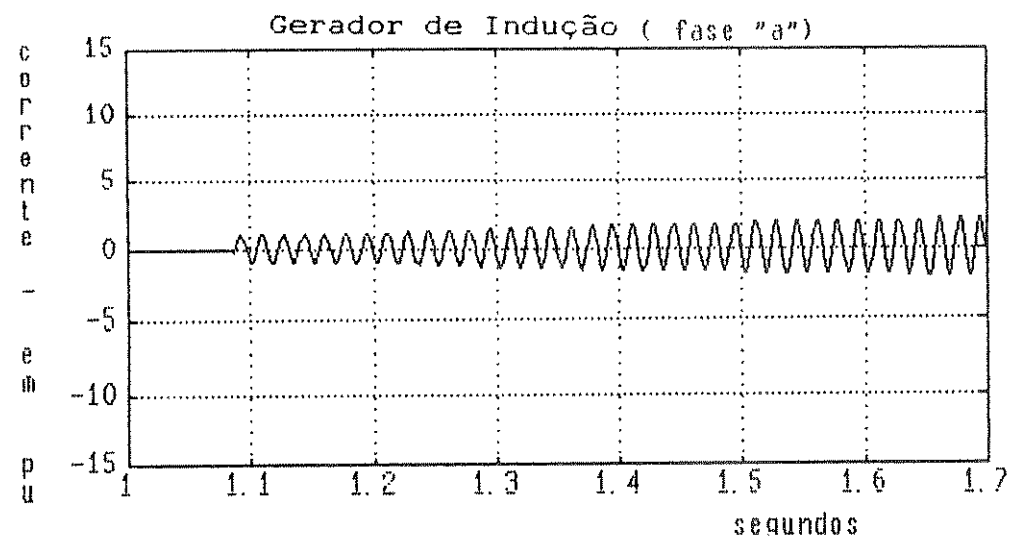
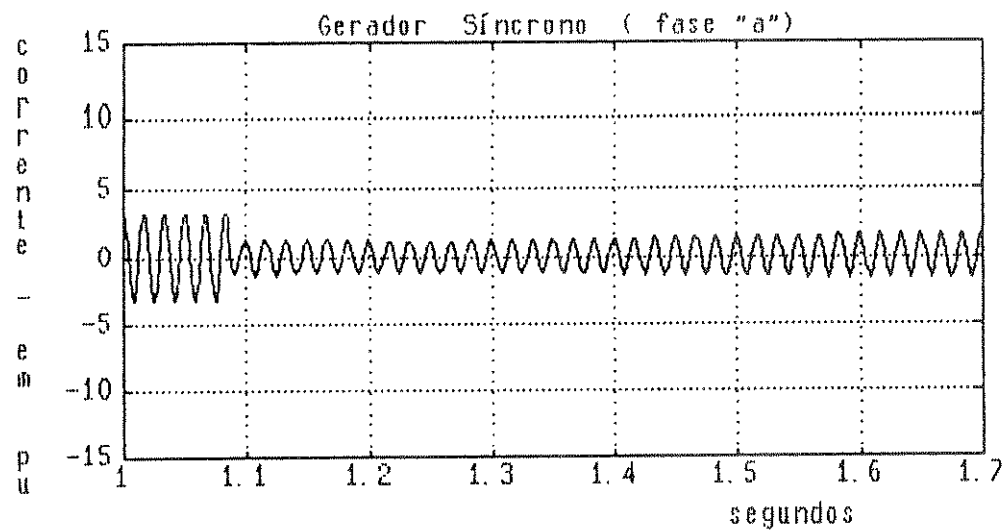
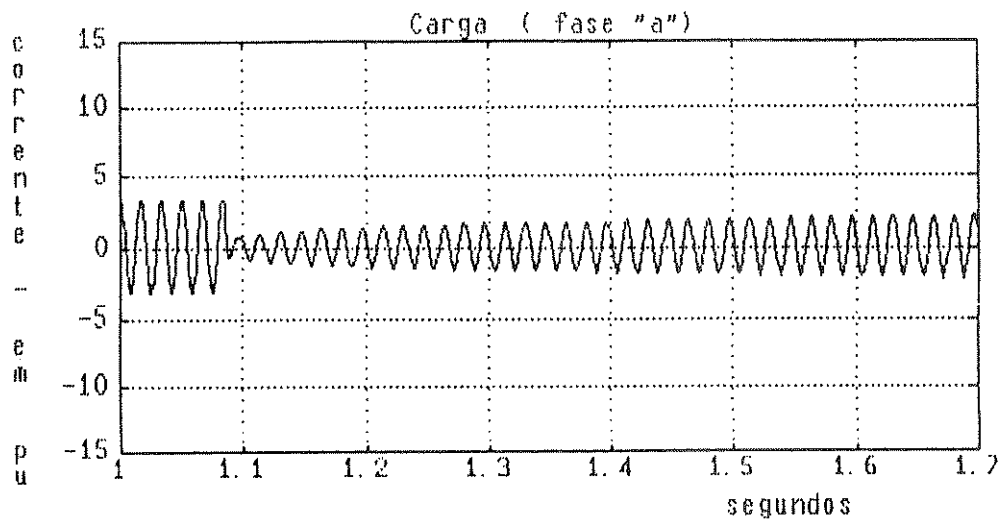


Figura IV-27 Caso D - Retirada do curto-circuito.

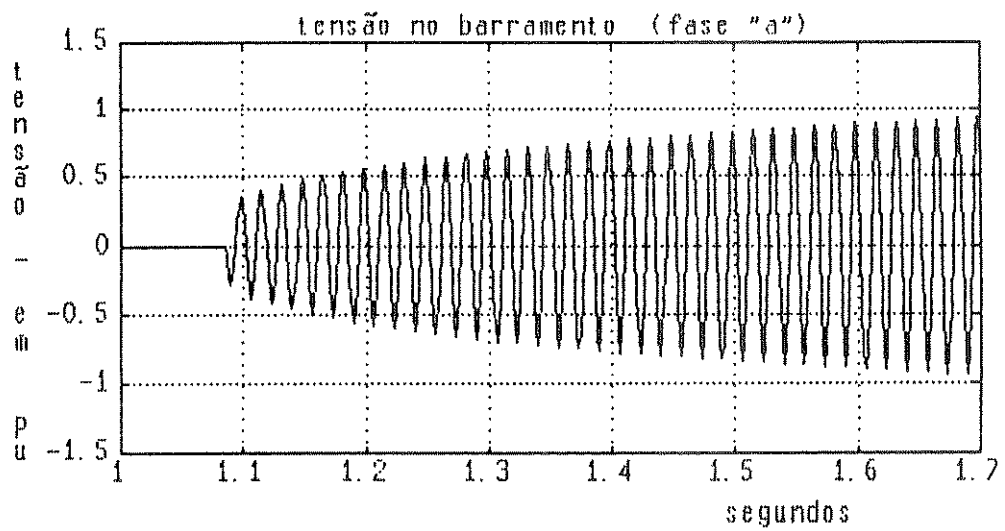
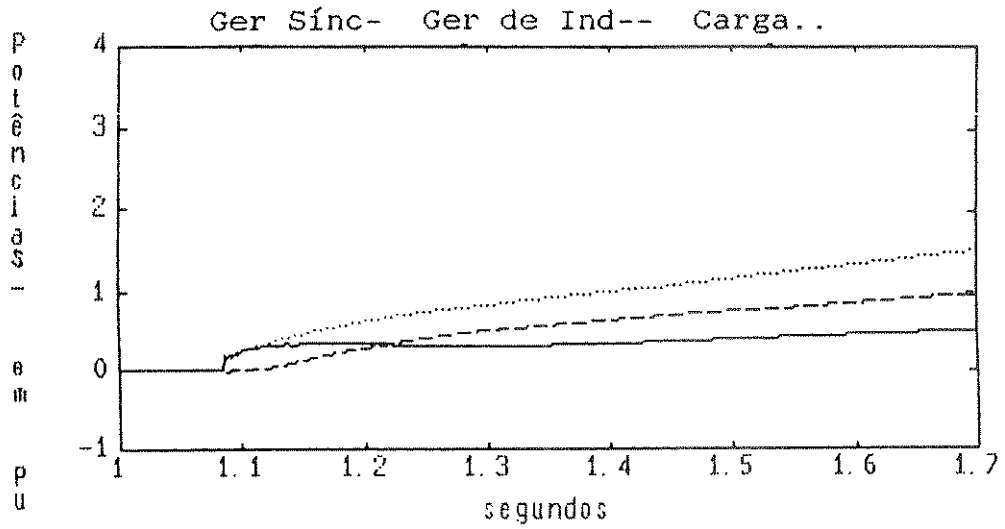


Figura IV-28 Caso D - Retirada do curto-circuito.

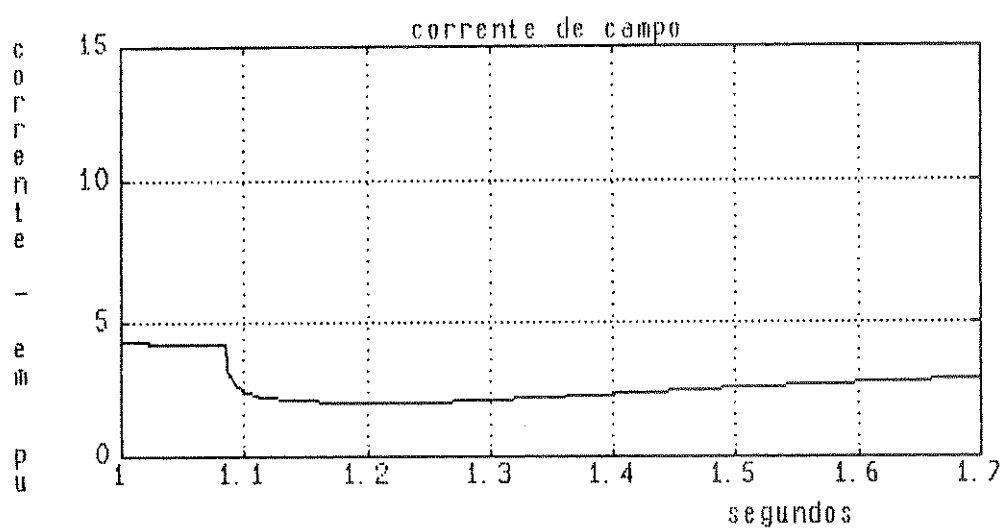
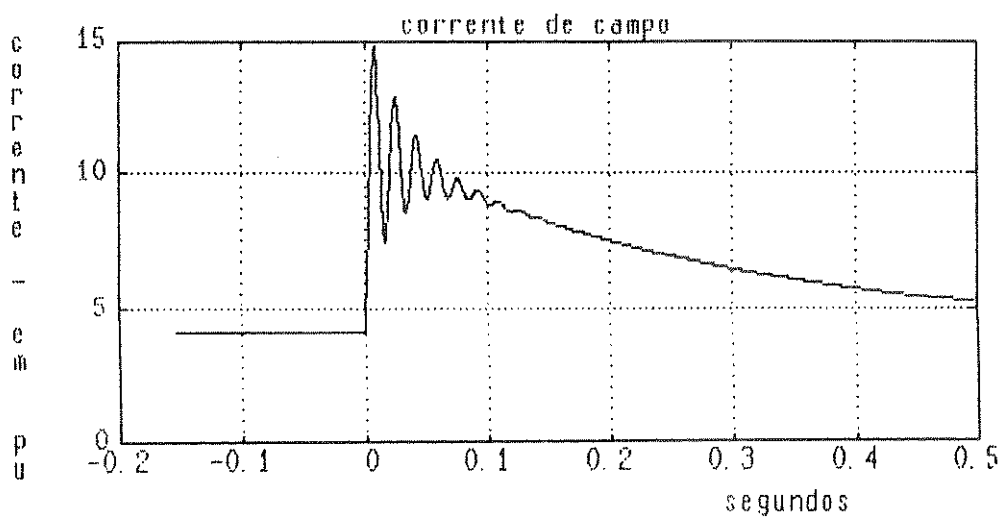


Figura IV-29 Caso D - Correntes de campo do Gerador Sincrono no curto-circuito e na retirada do curto-circuito.

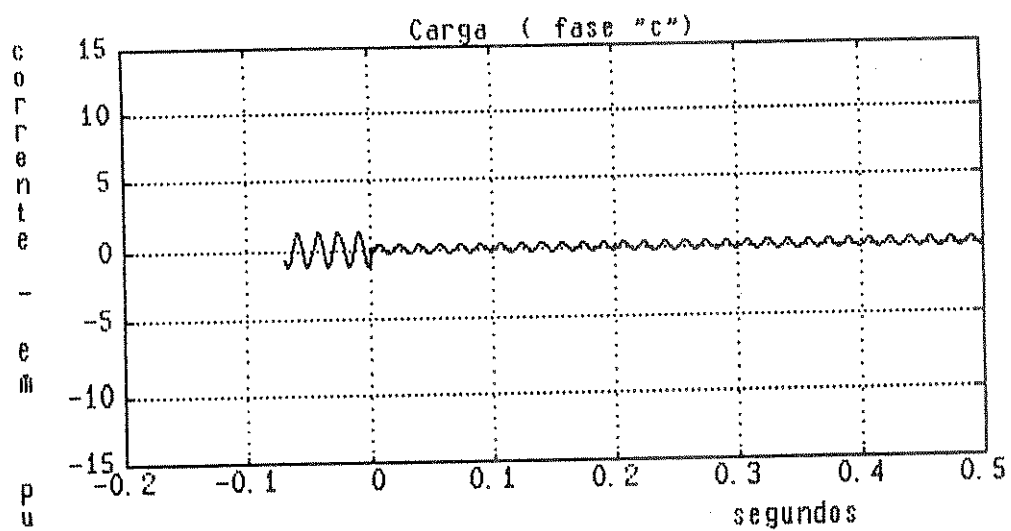
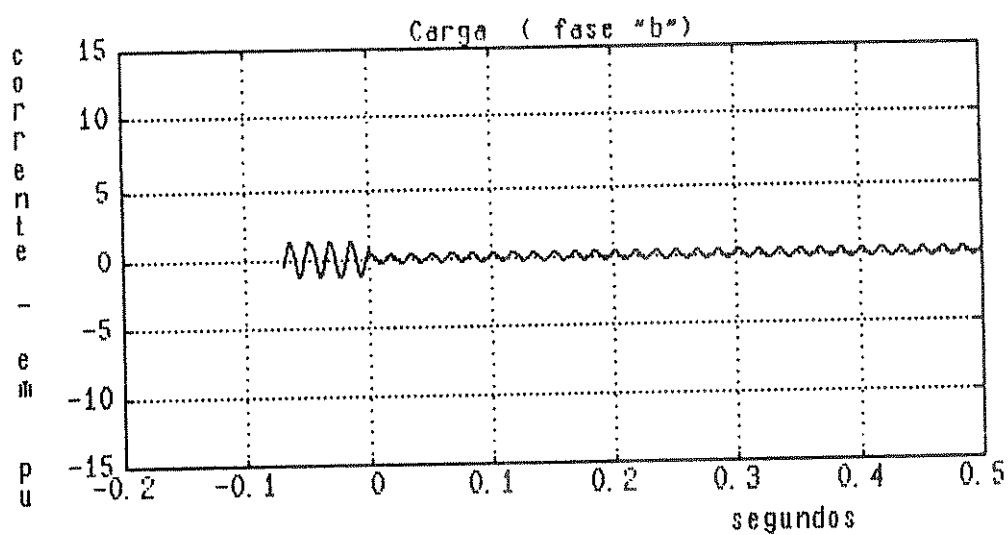
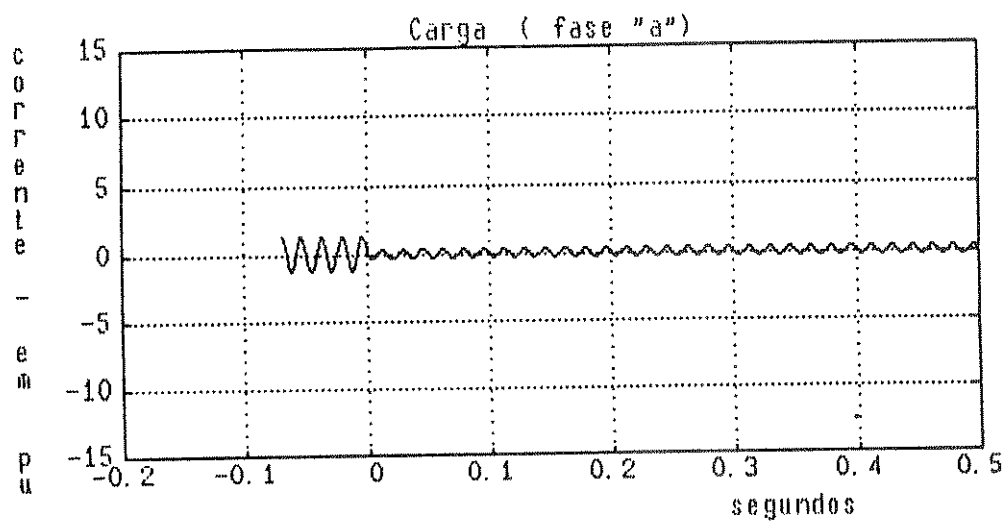


Figura IV-30 Caso B - Rejeição de 70% da carga.

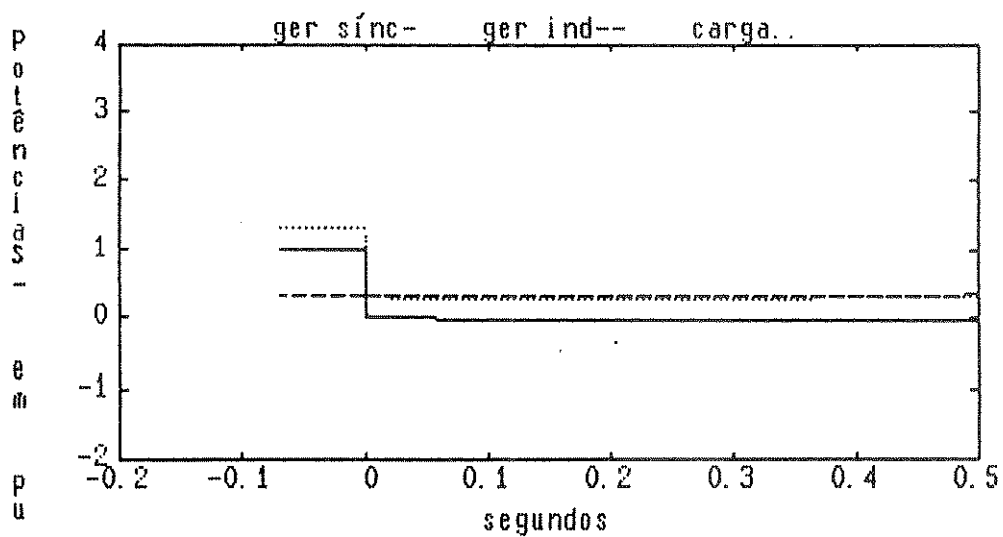
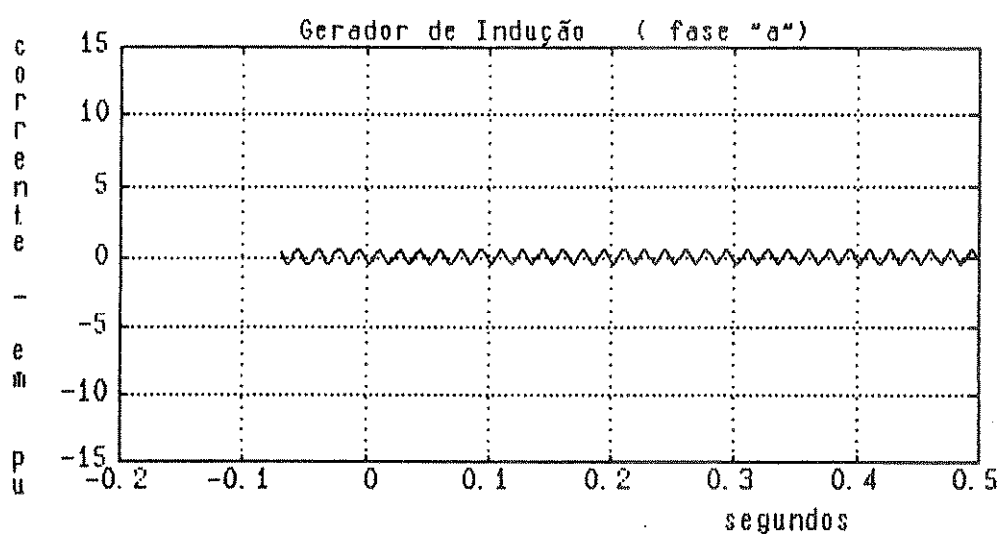
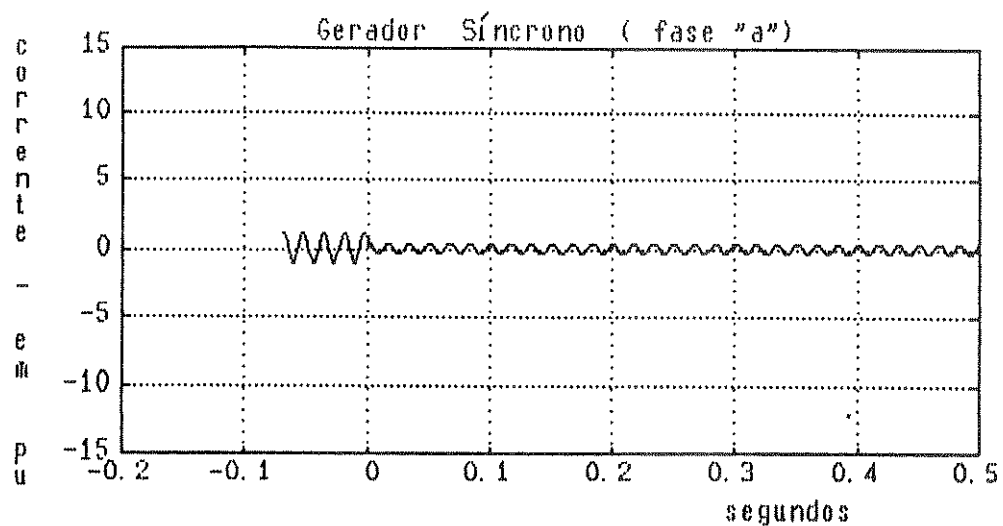


Figura IV-31 Caso B - Rejeição de 70% da carga.

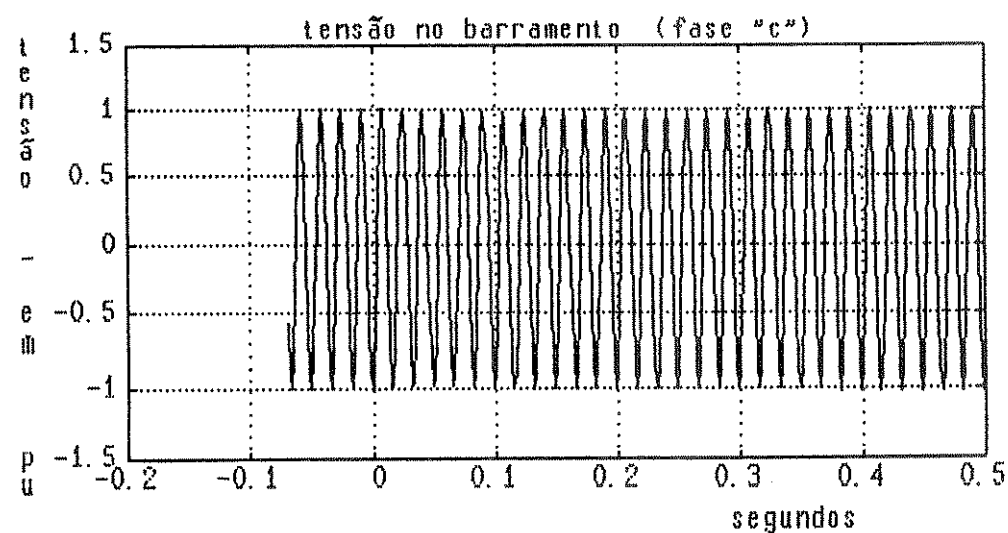
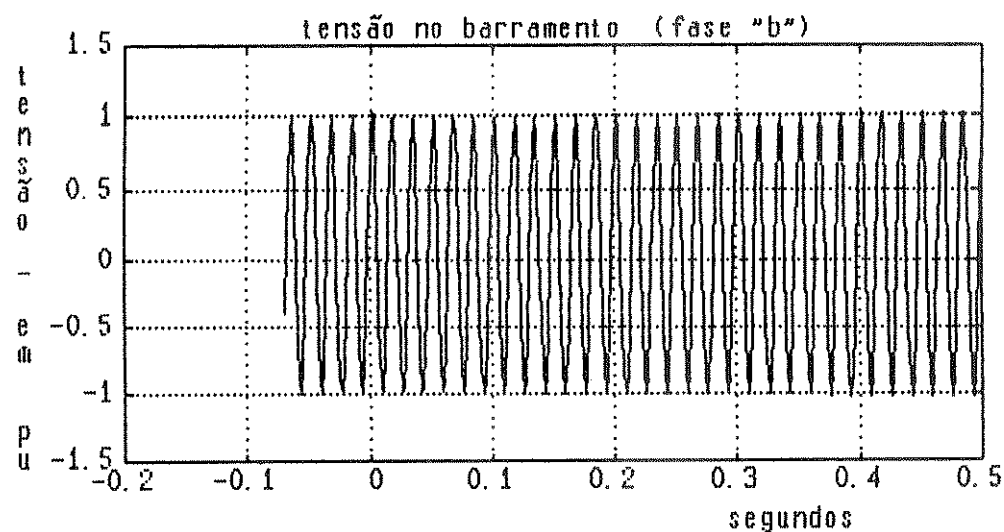
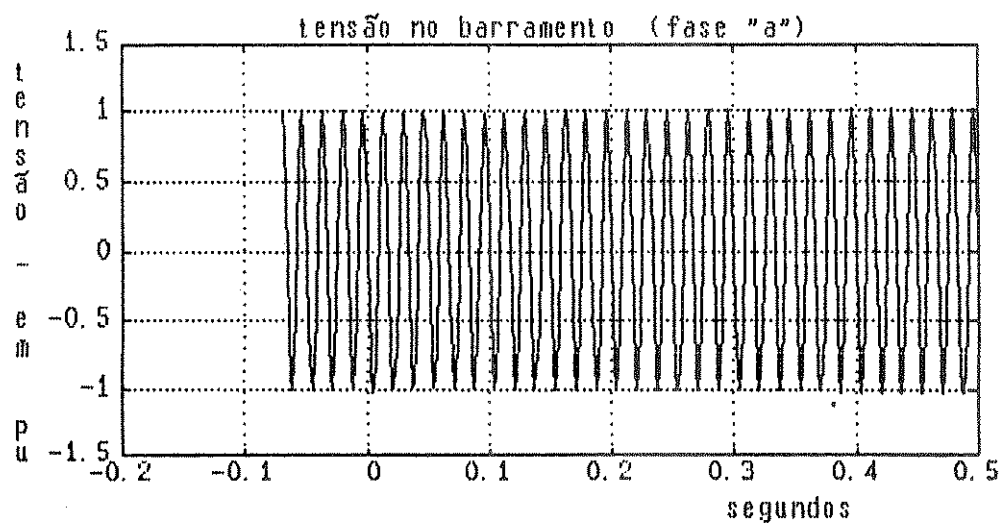


Figura IV-32 Caso B - Rejeição de 70% da carga.

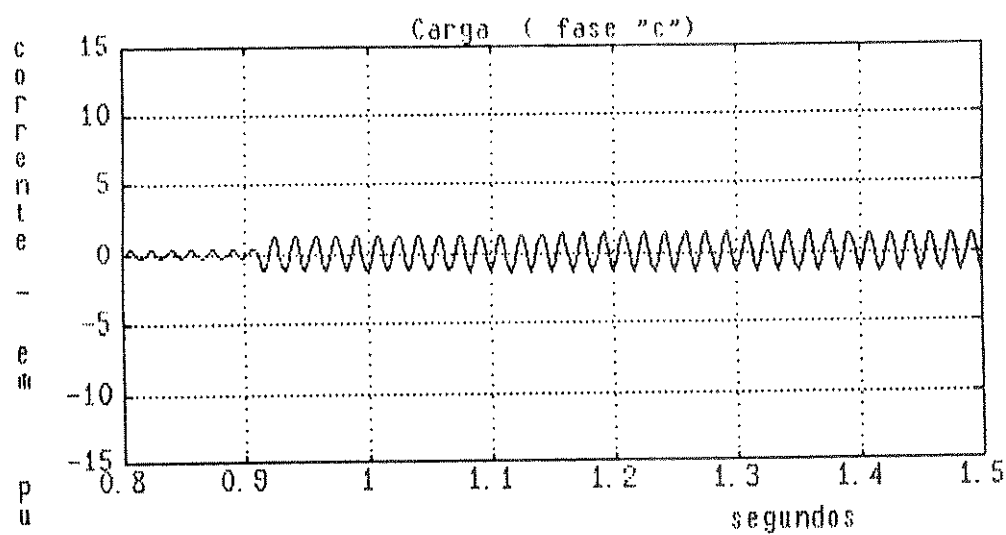
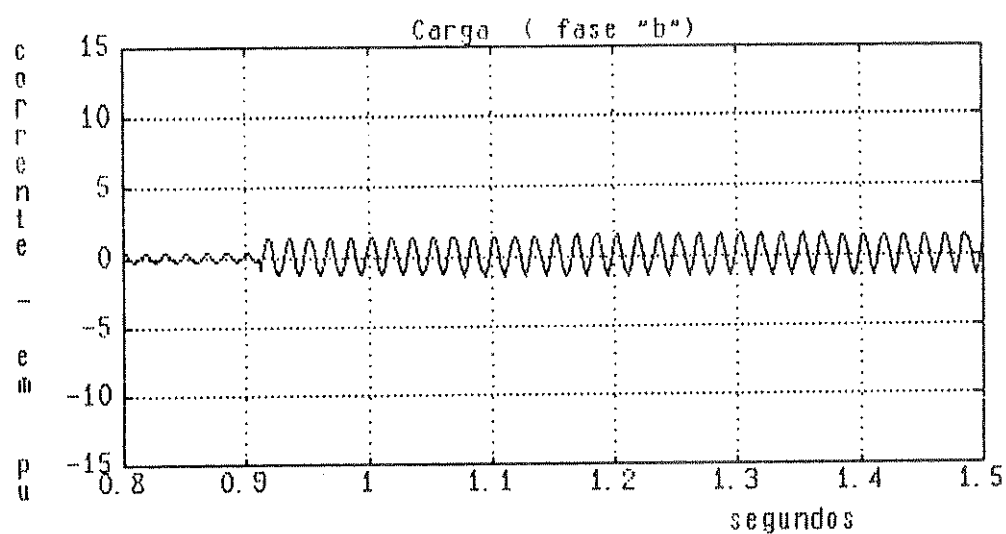
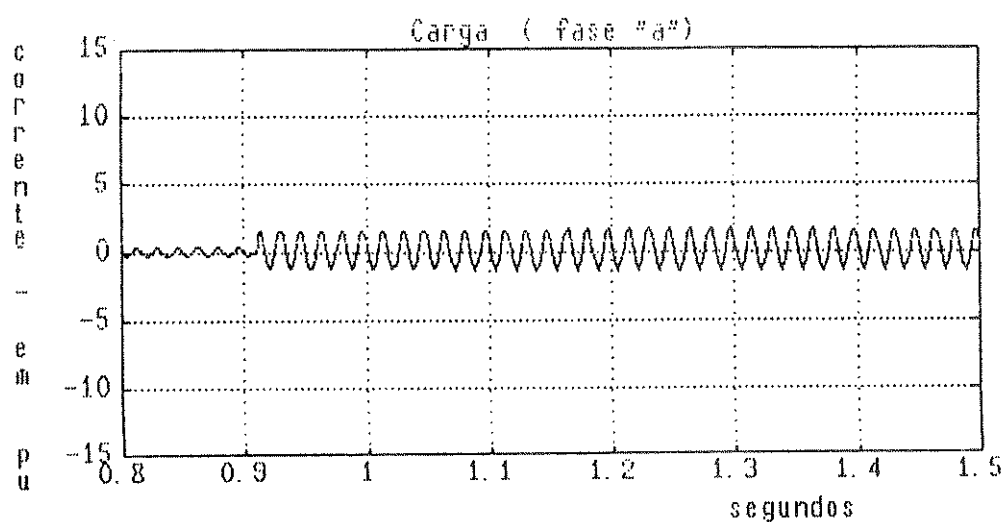


Figura IV-33 Caso B - Retomada de carga após a rejeição de 70% da carga.

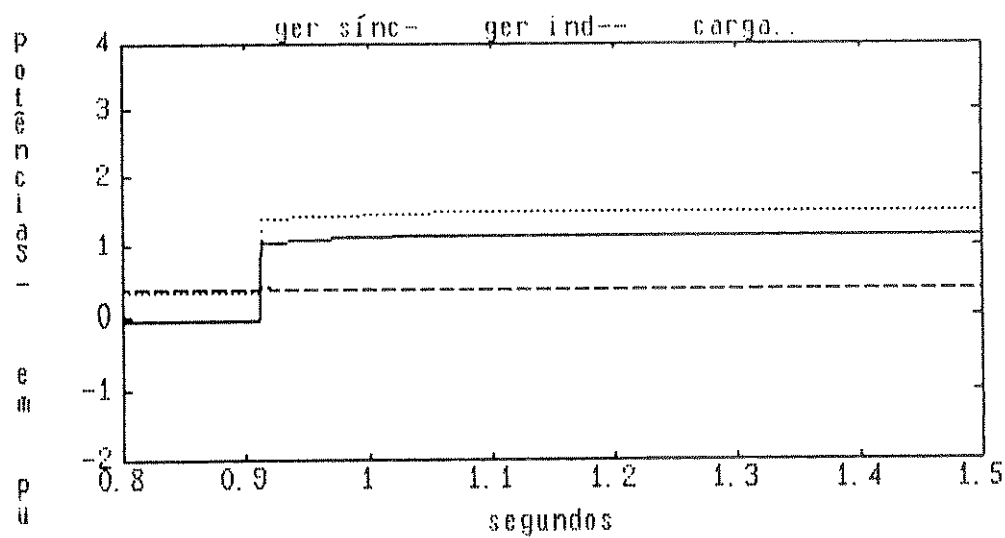
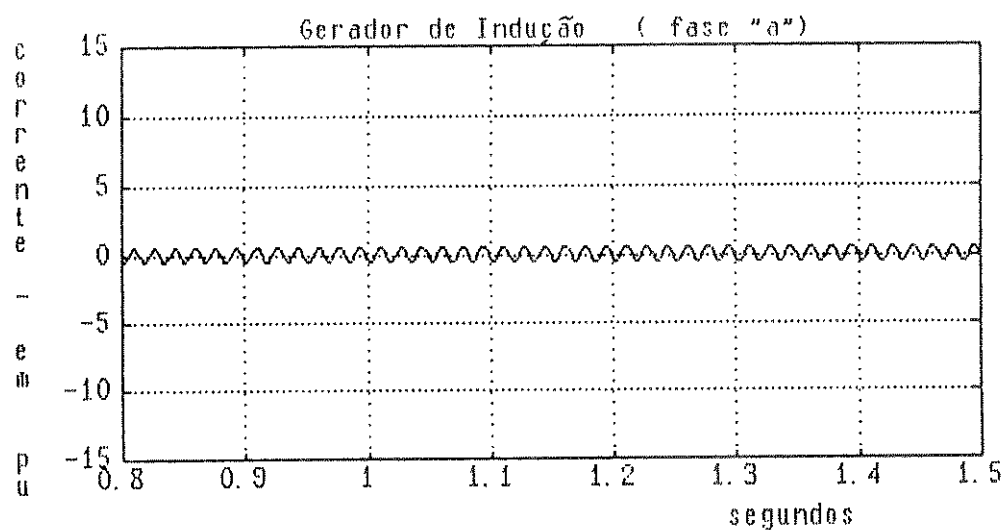
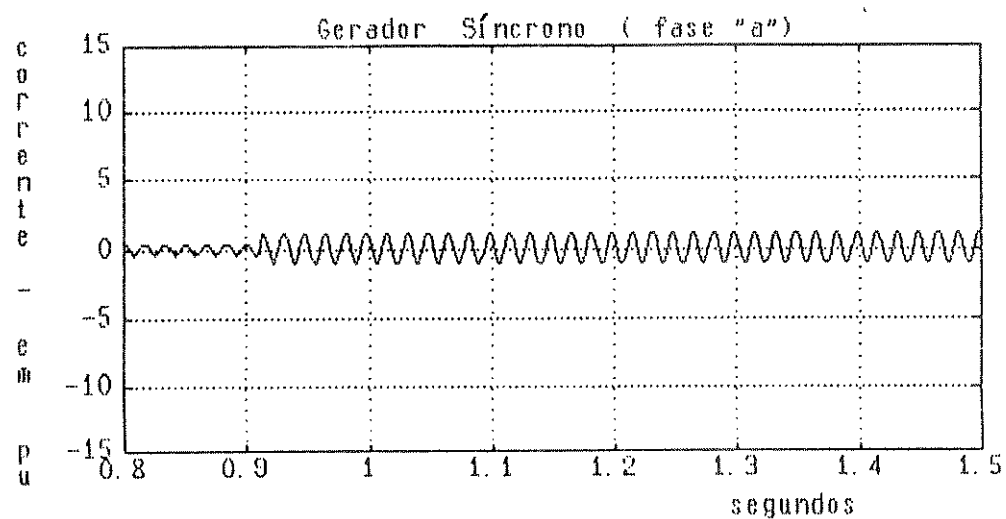


Figura IV-34 Caso B - Retomada de carga após a rejeição de 70% da carga.

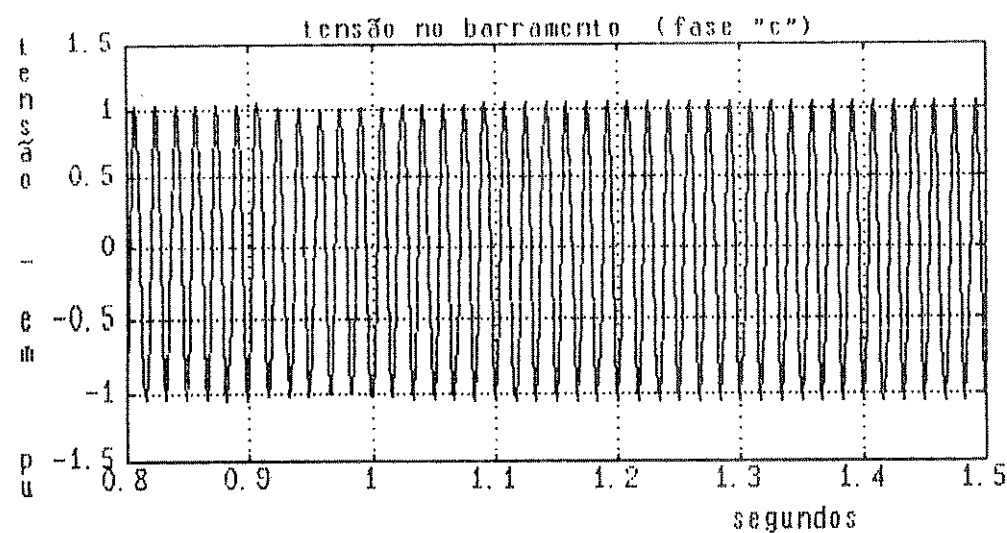
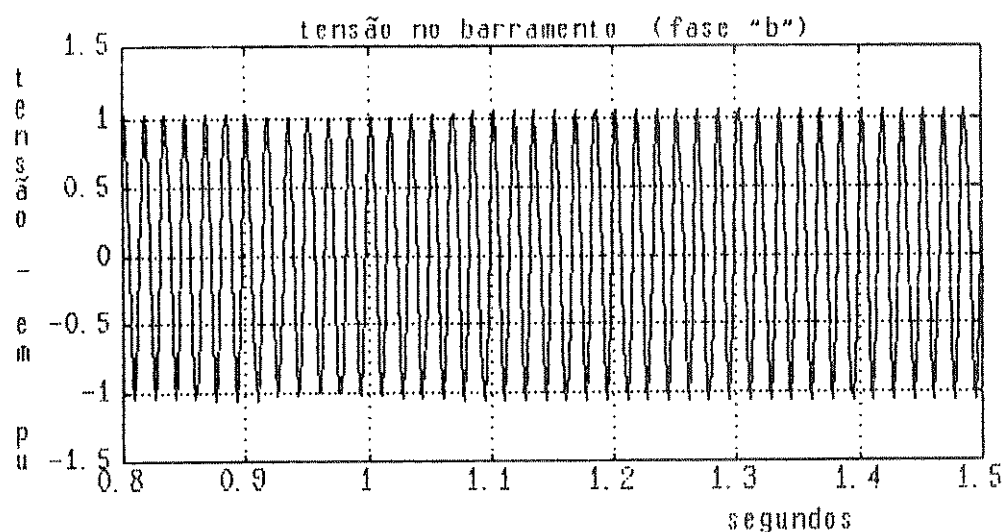
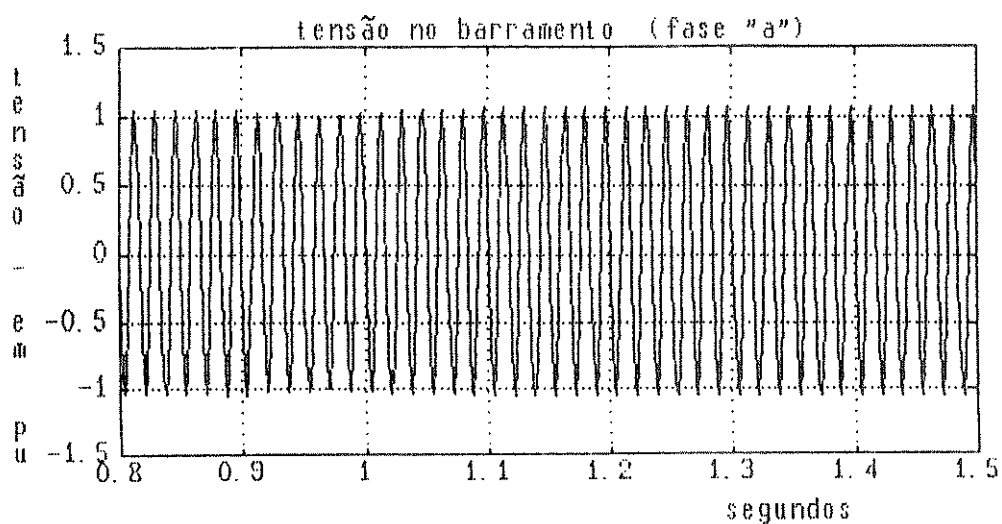


Figura IV-35 Caso B - Retomada de carga após a rejeição de 70% da carga.

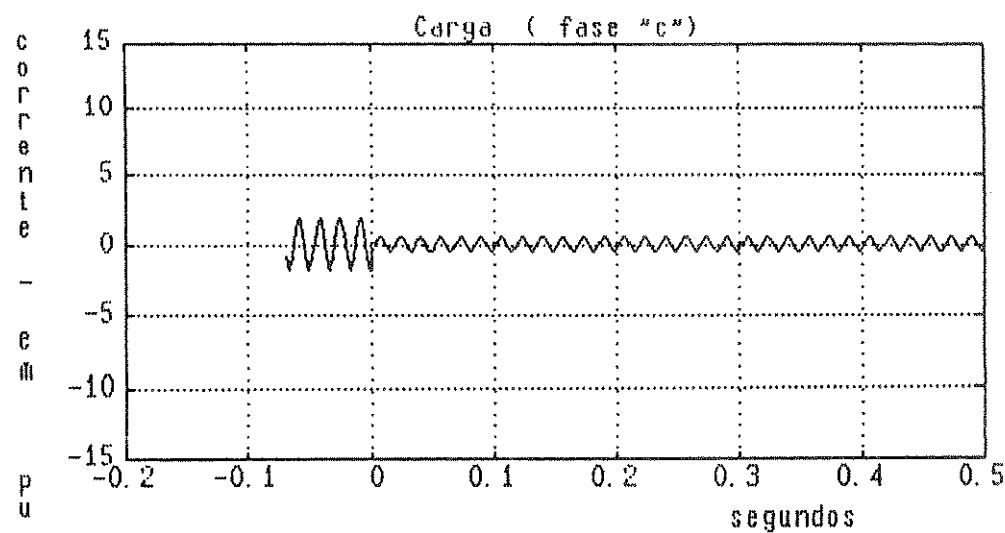
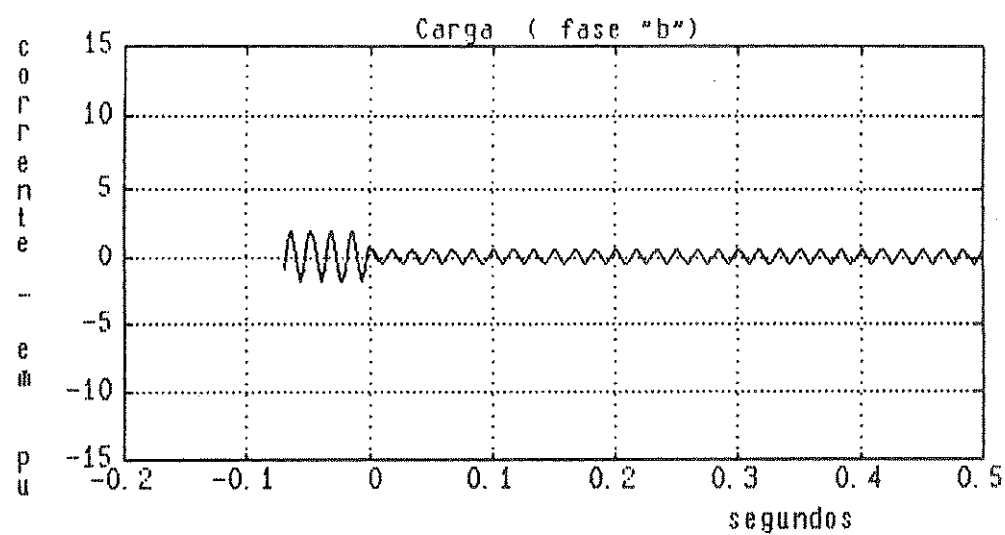
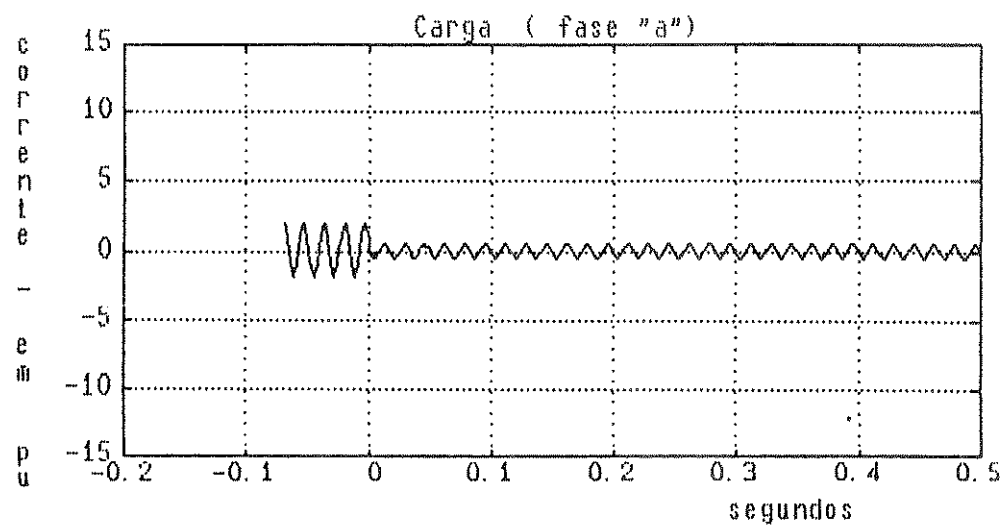


Figura IV-36 Caso C - Rejeição de 70% da carga.

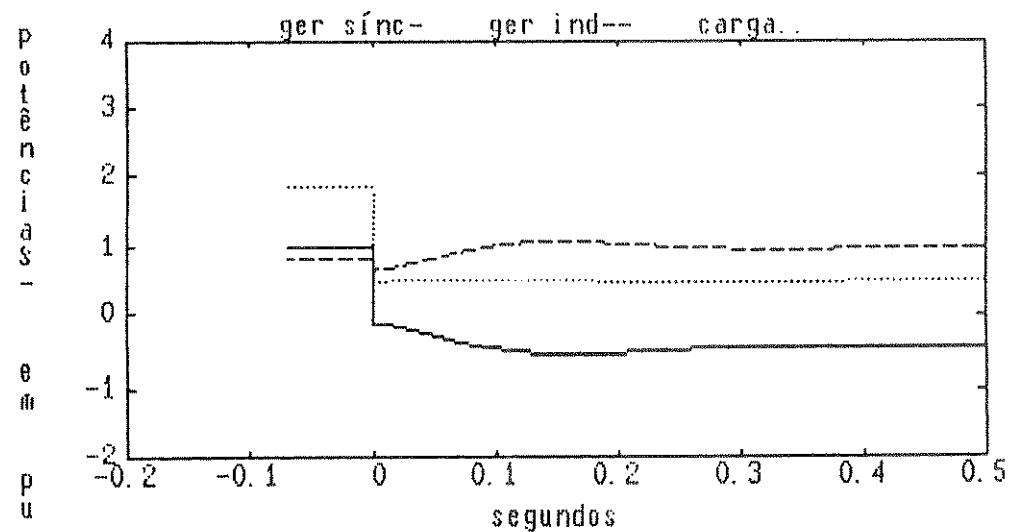
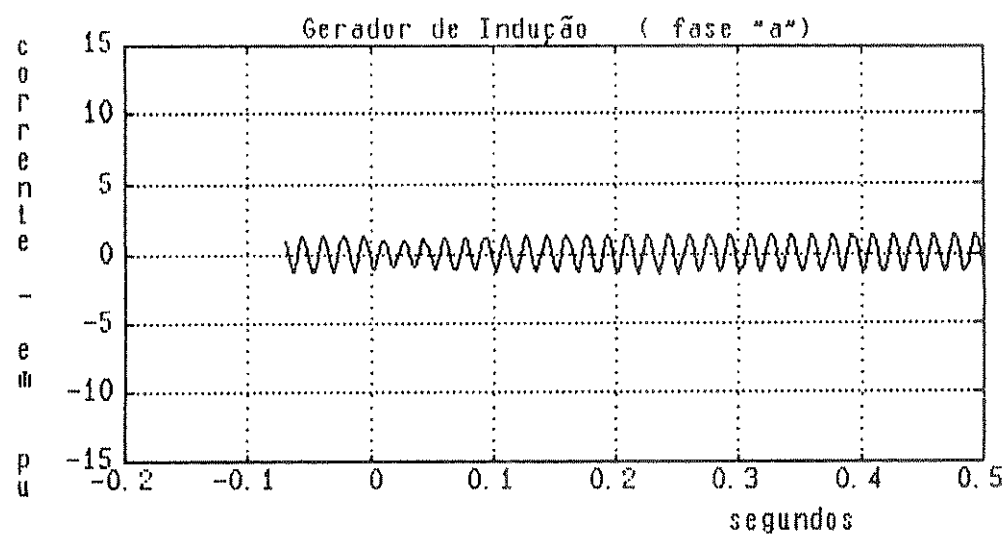
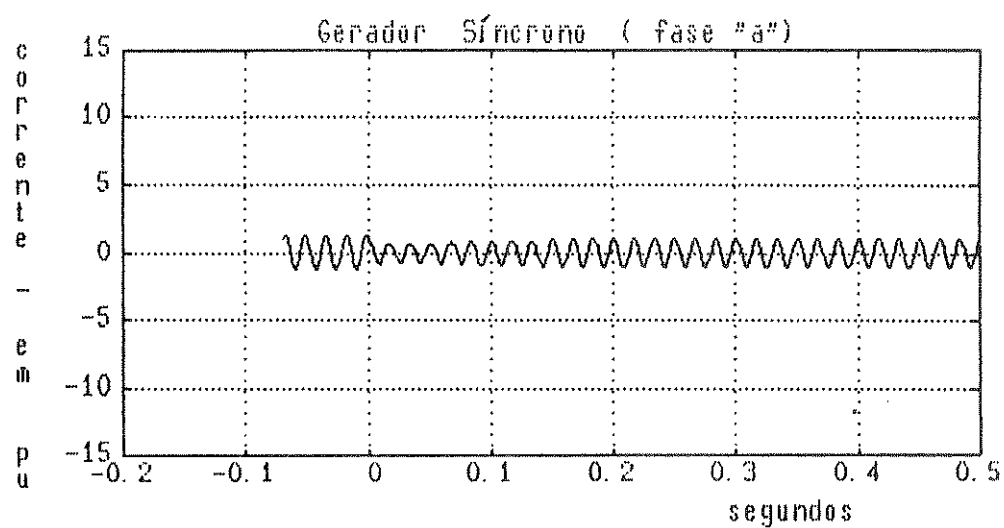


Figura IV-37 Caso C - Rejeição de 70% da carga.

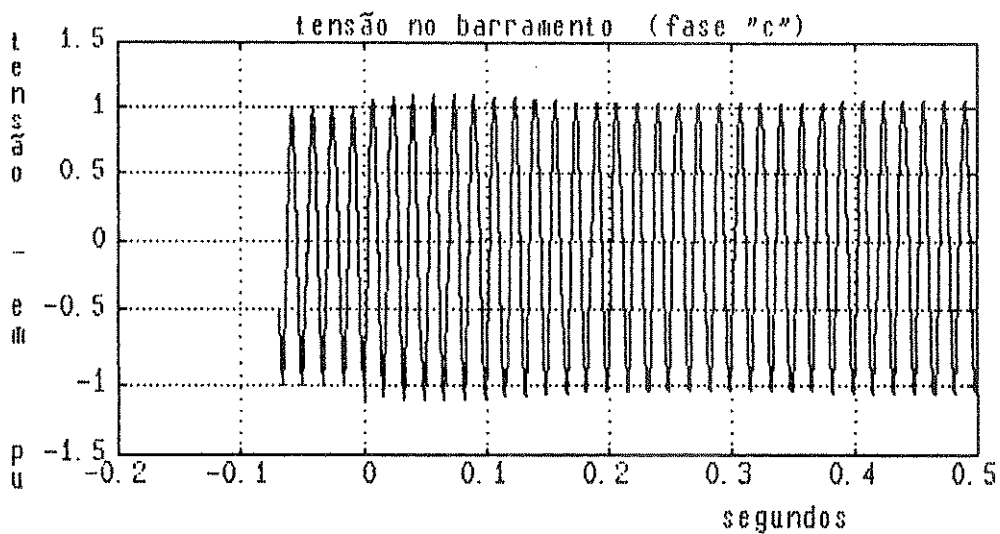
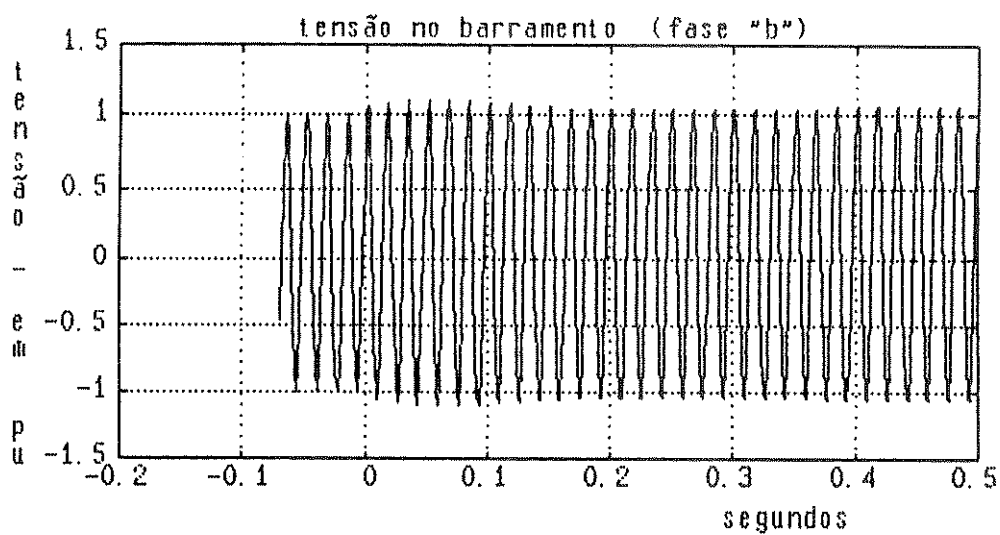
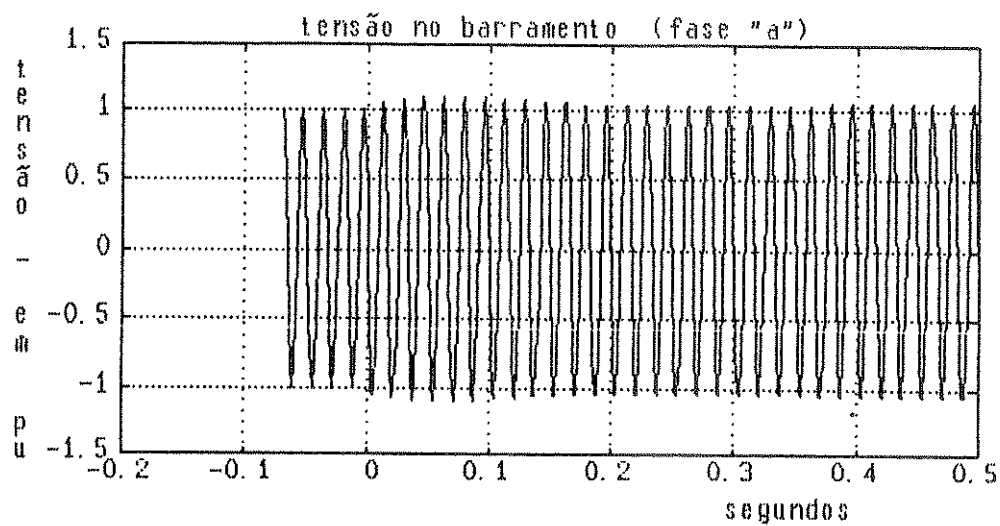


Figura IV-38 Caso C - Rejeição de 70% da carga.

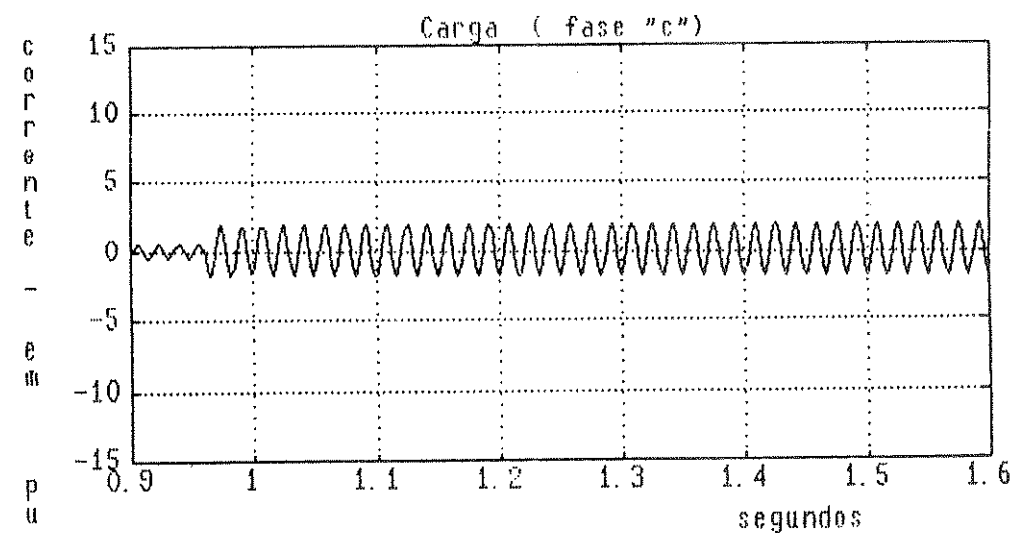
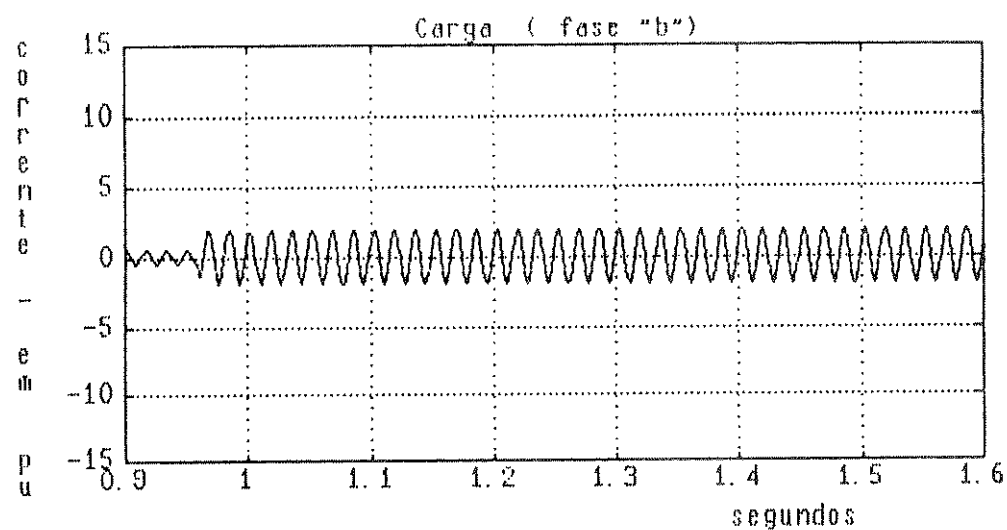
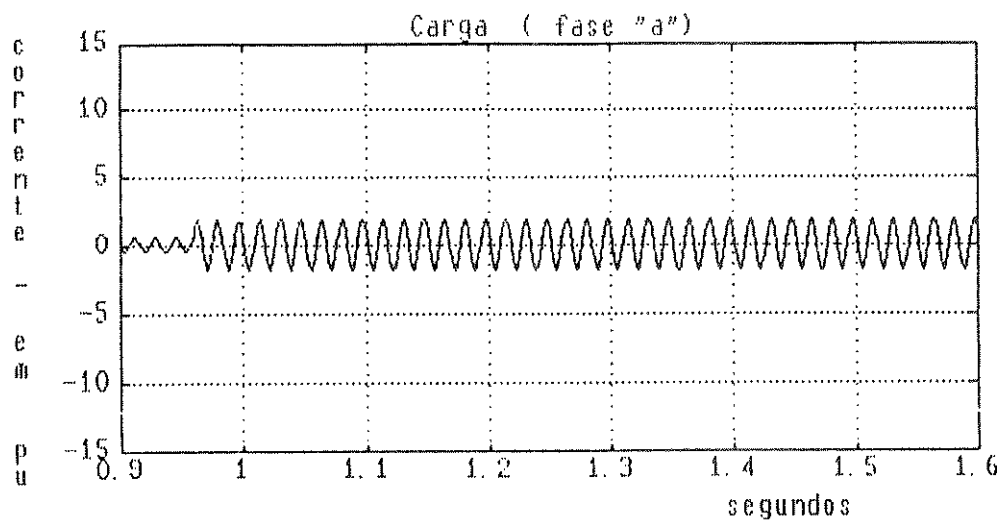


Figura IV-39 Caso C - Retomada de carga após a rejeição de 70% da carga.

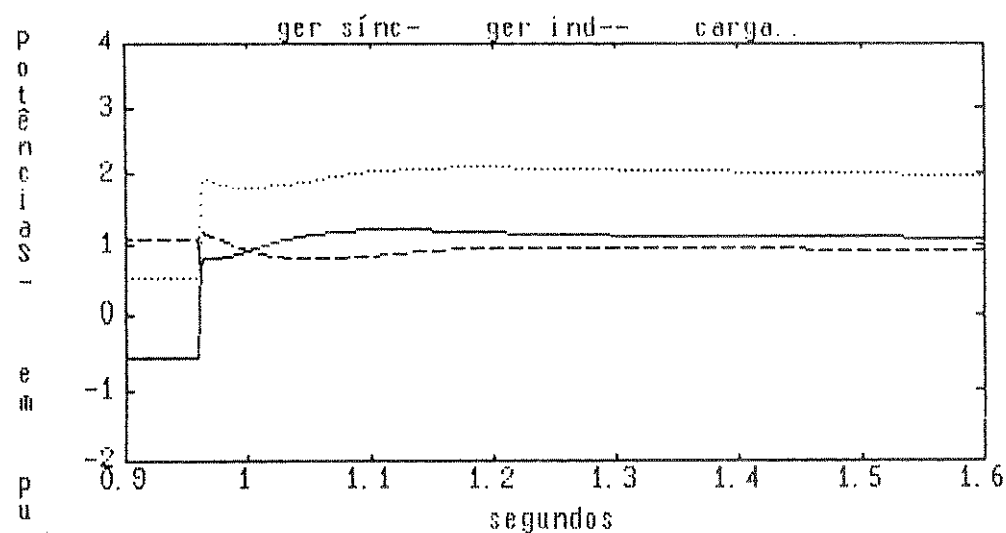
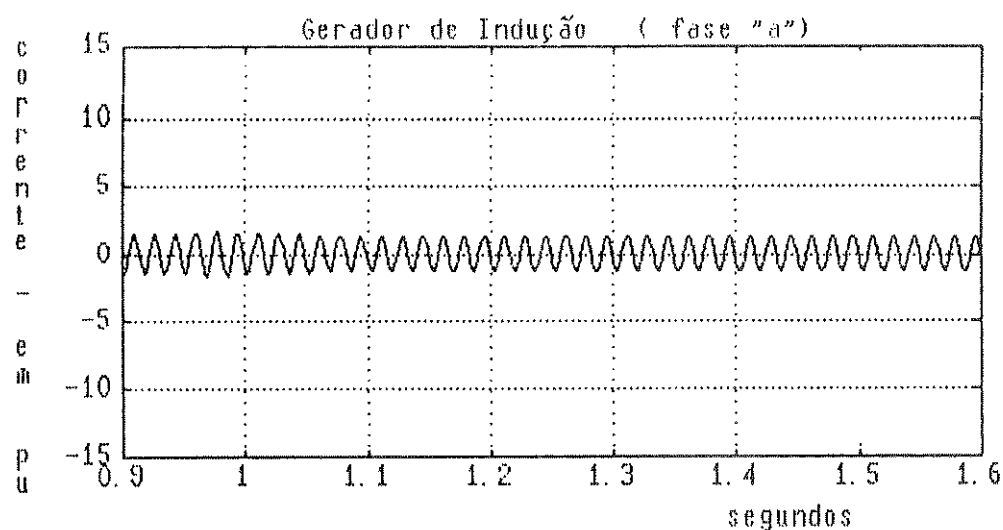
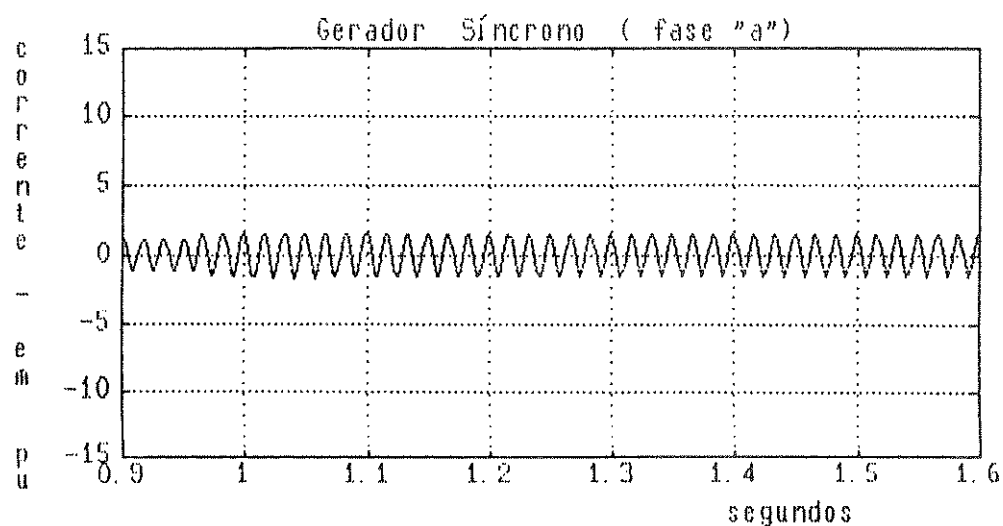


Figura IV-40 Caso C - Retomada de carga após a rejeição de 70% da carga.

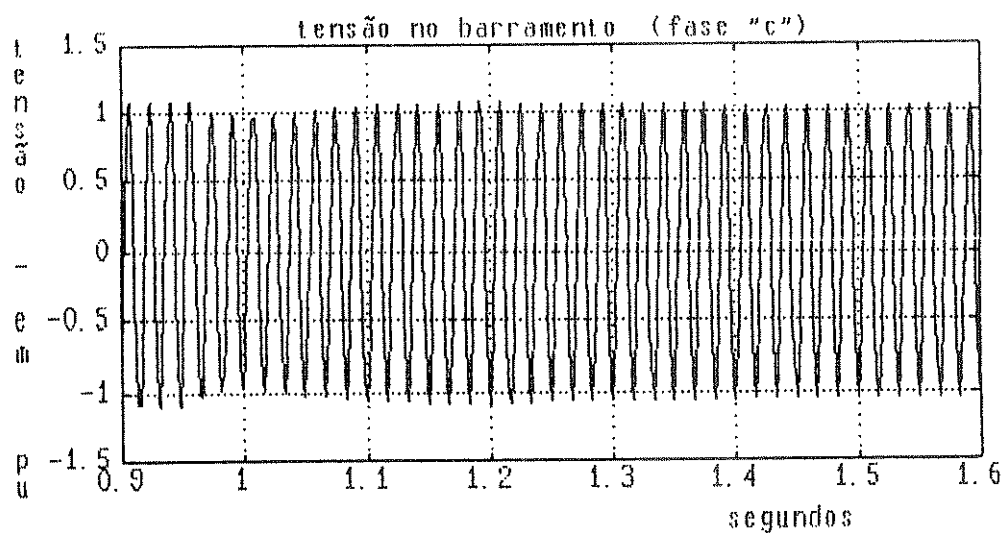
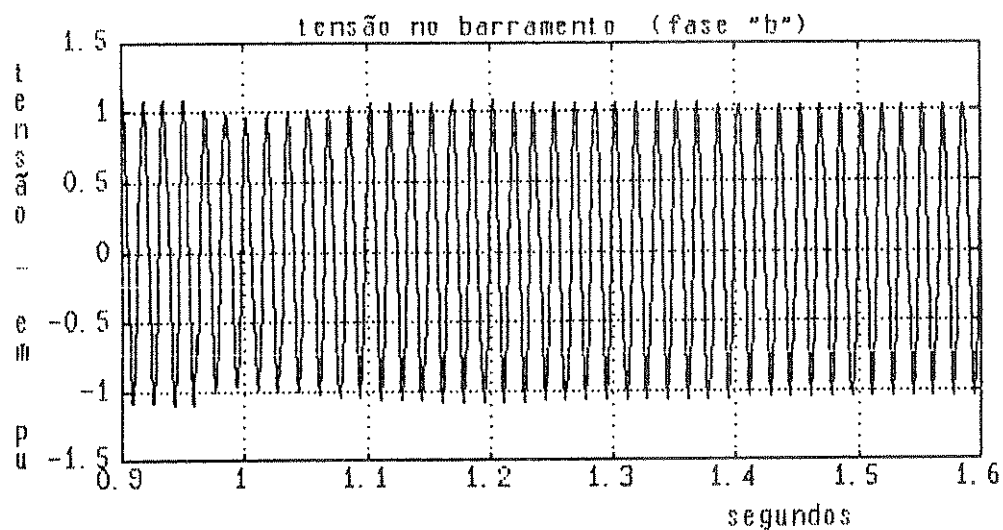
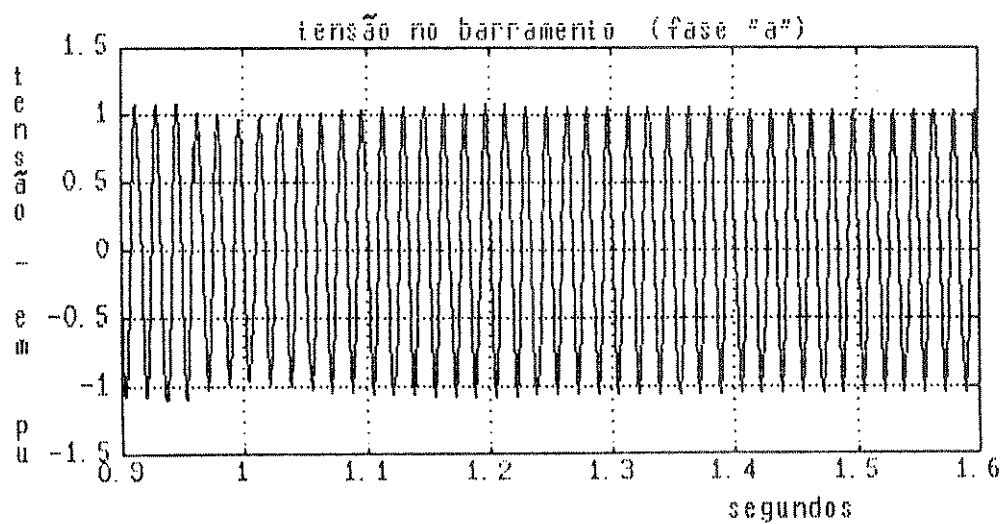


Figura IV-41 Caso C - Retomada de carga após a rejeição de 70% da carga.

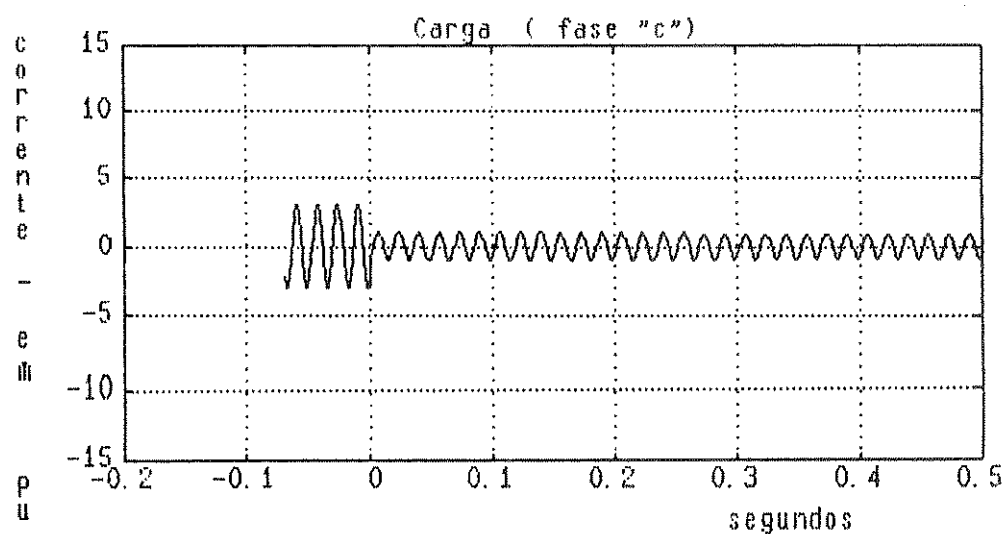
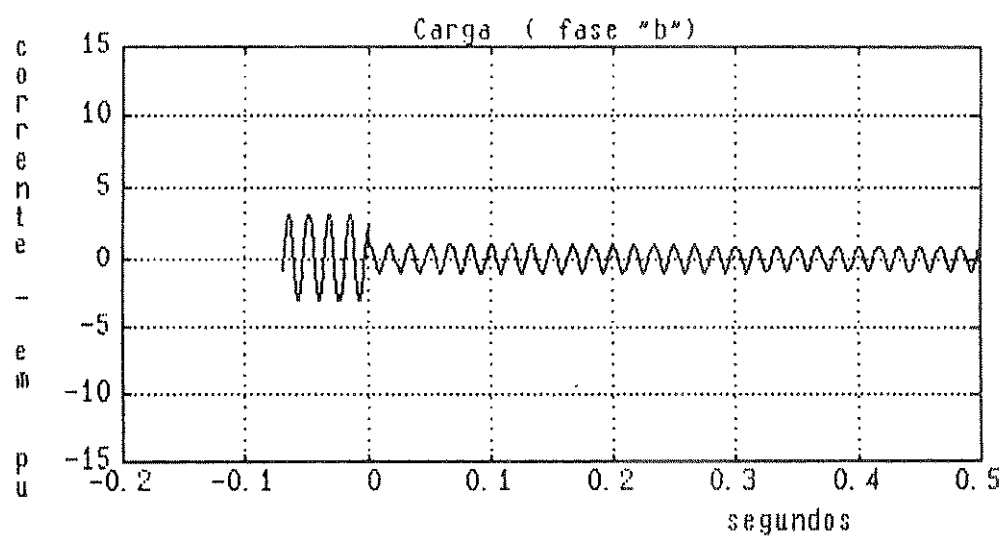
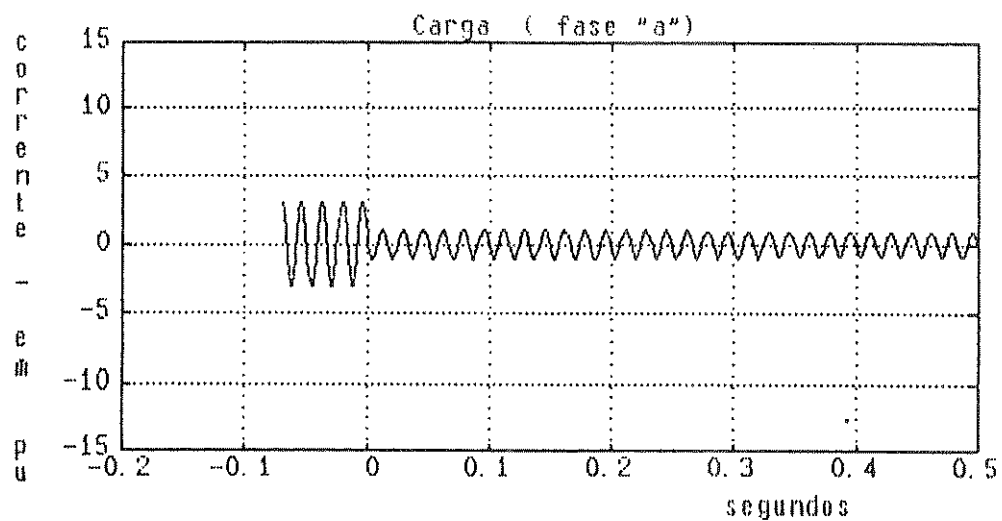


Figura IV-42 Caso D - Rejeição de 70% da carga.

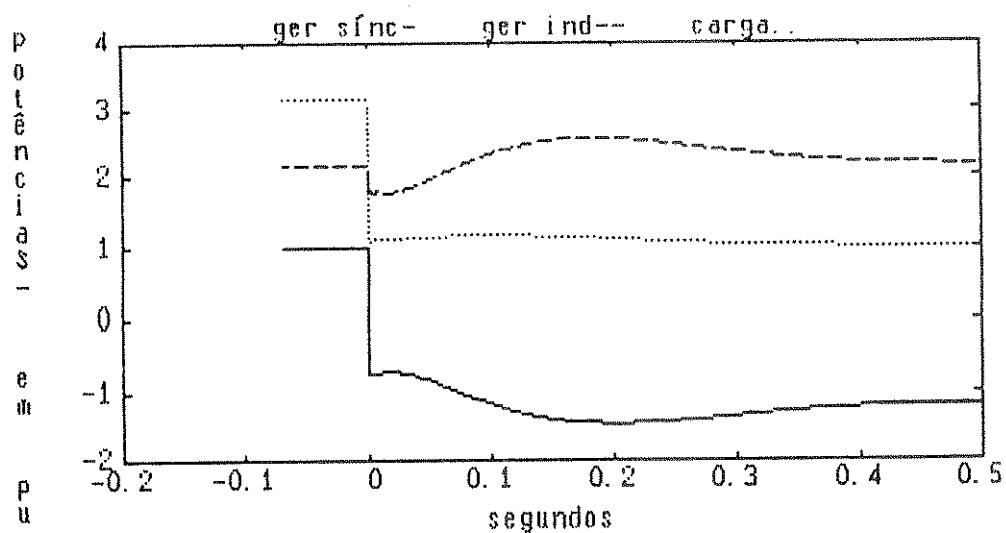
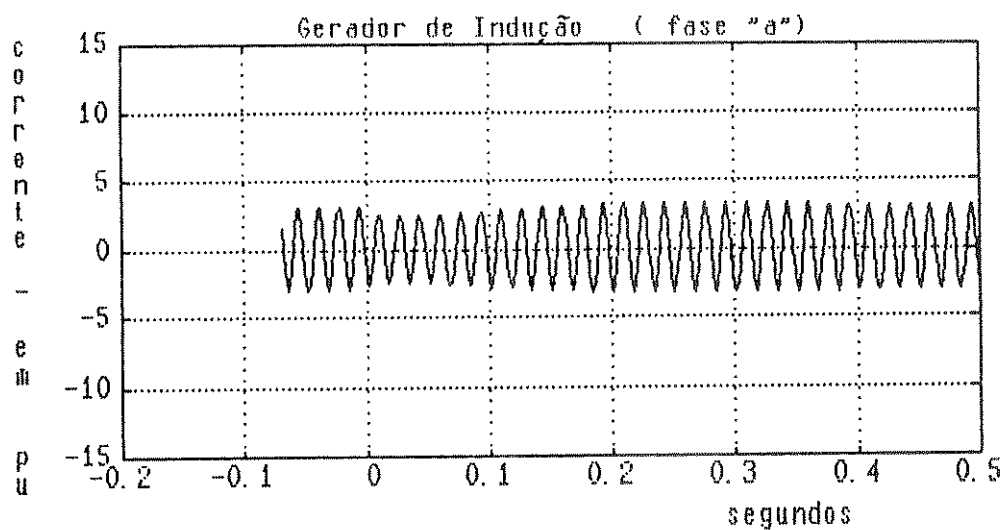
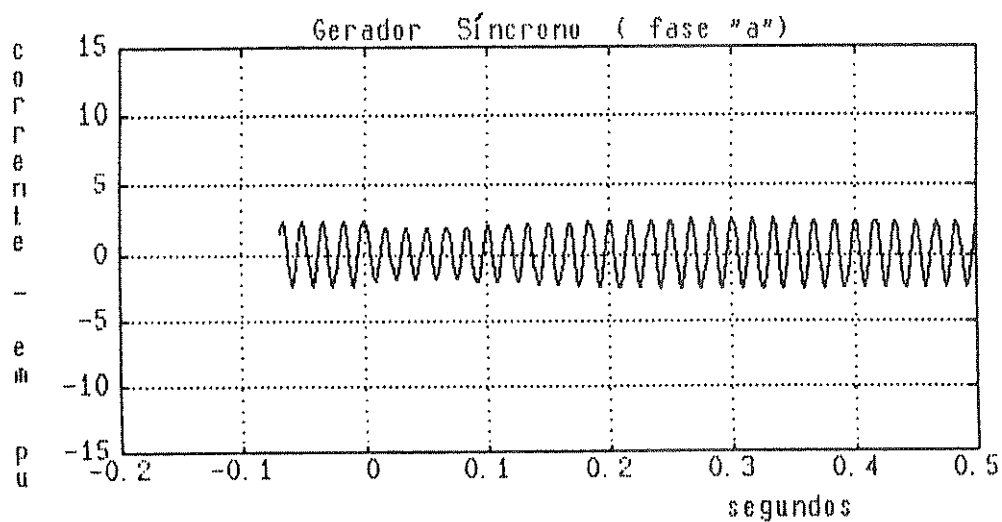


Figura IV-43 Caso D - Rejeição de 70% da carga.

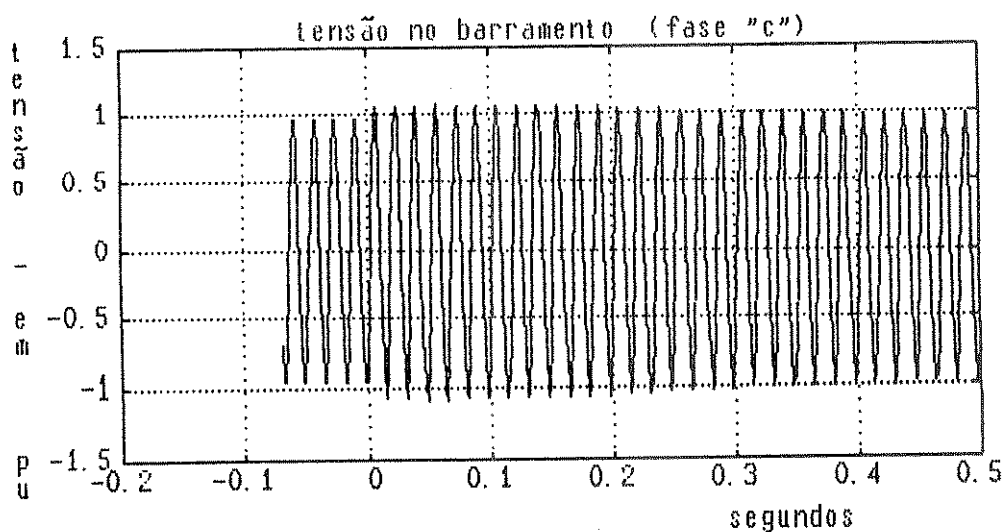
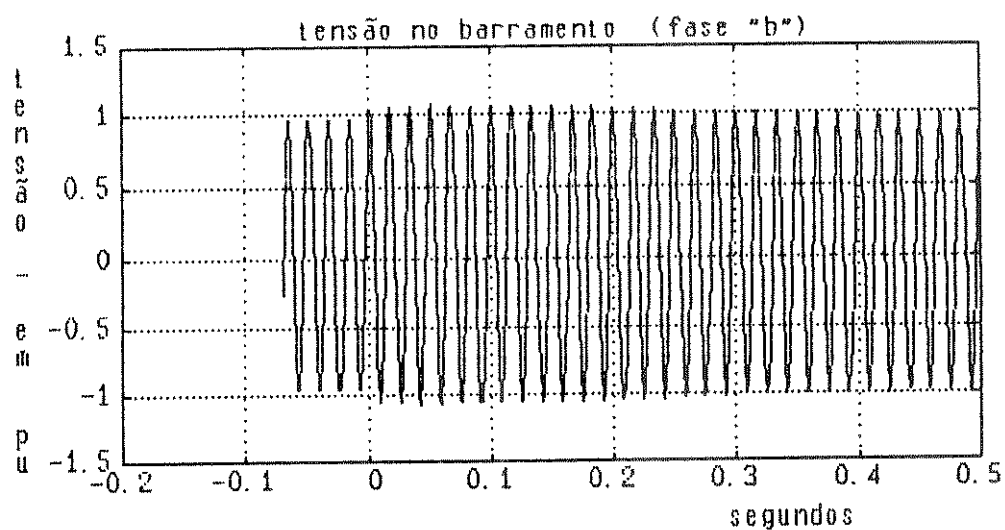
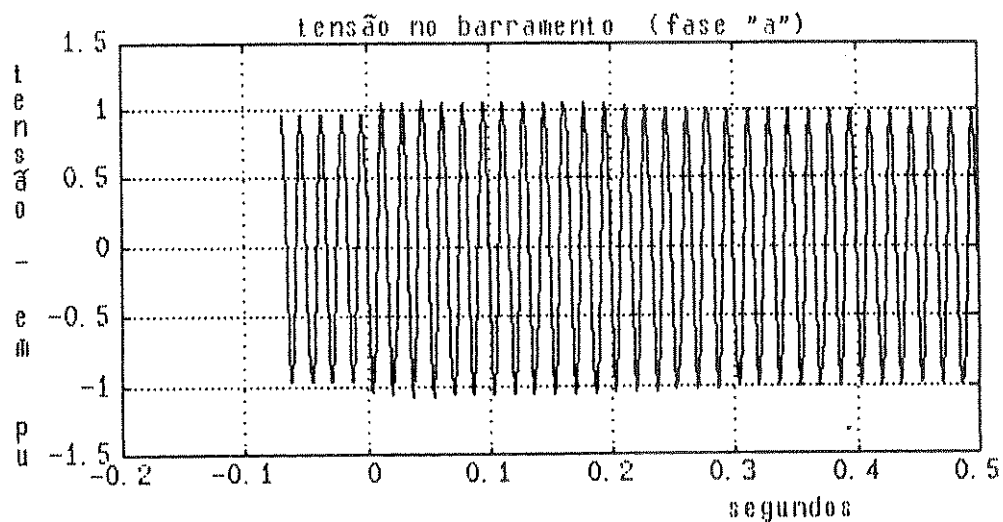


Figura IV-44 Caso D - Rejeição de 70% da carga.

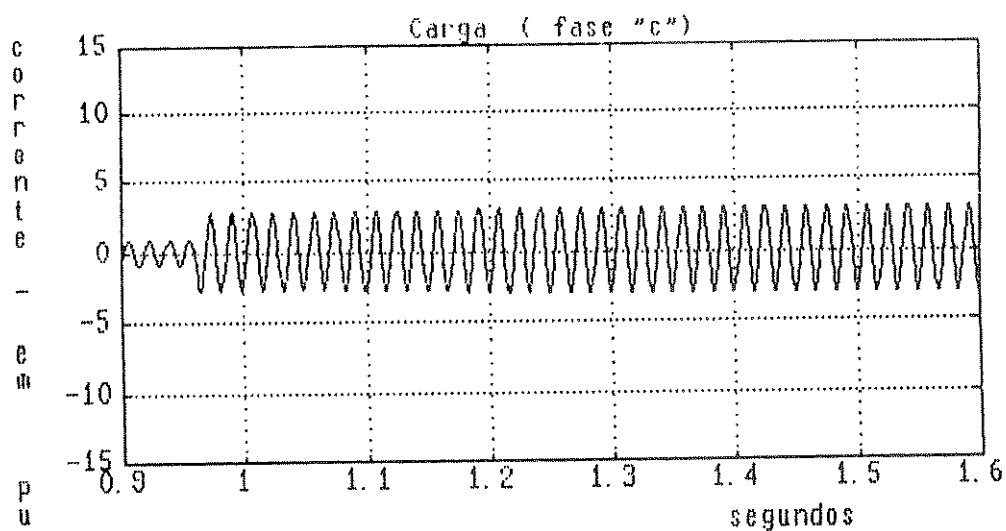
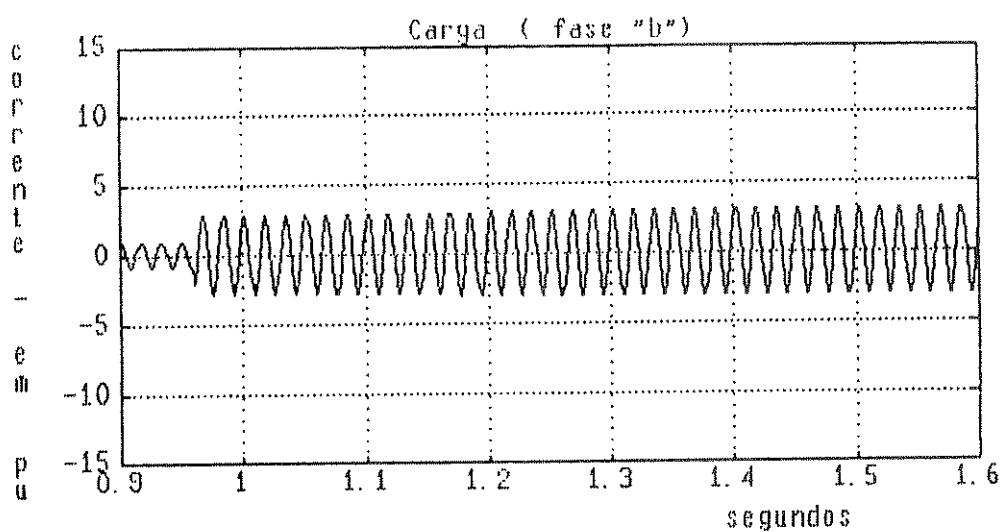
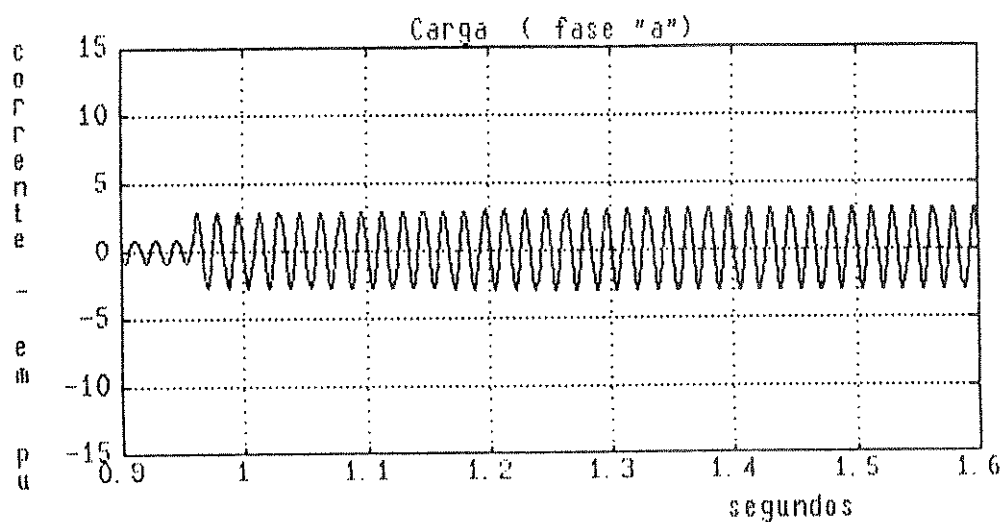


Figura IV-45 Caso D - Retomada de carga após a rejeição de 70% da carga.

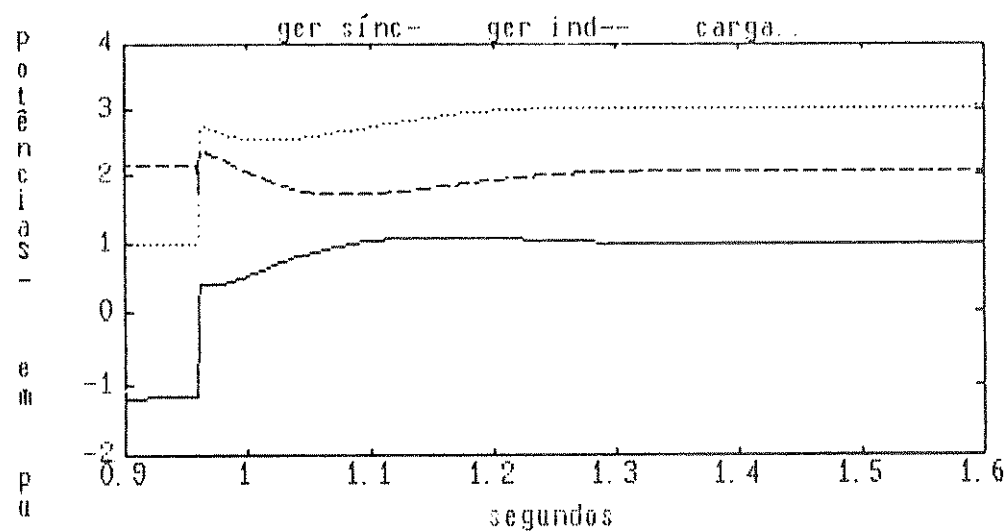
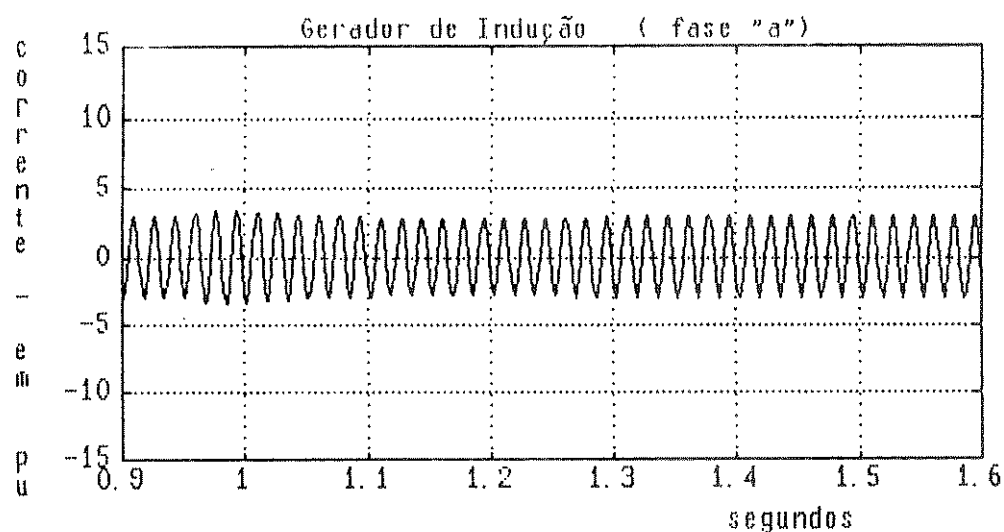
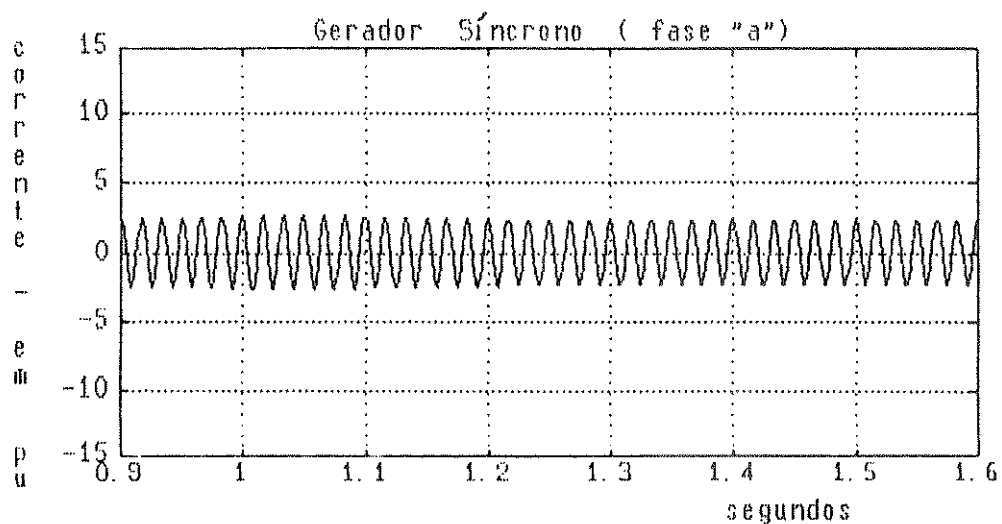


Figura IV-46 Caso D - Retomada de carga após a rejeição de 70% da carga.

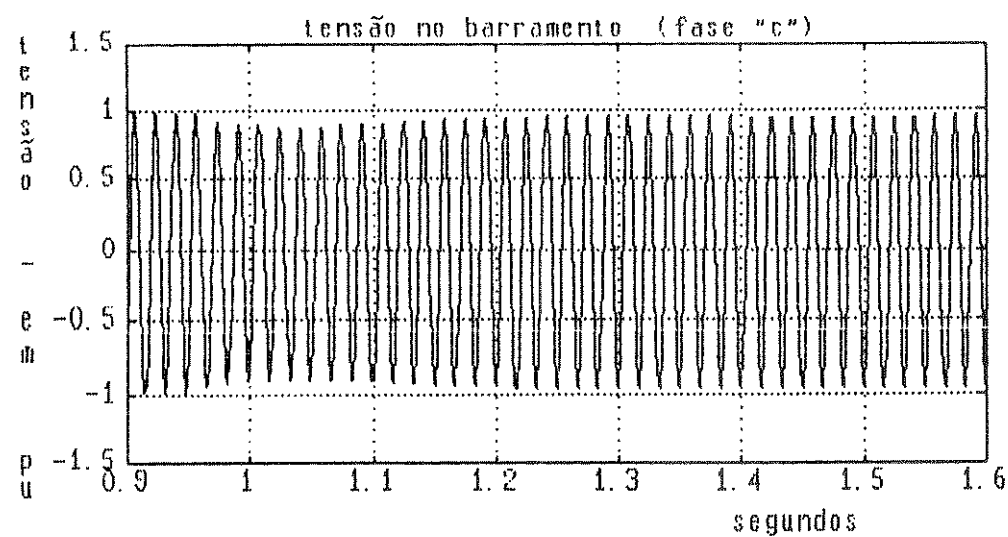
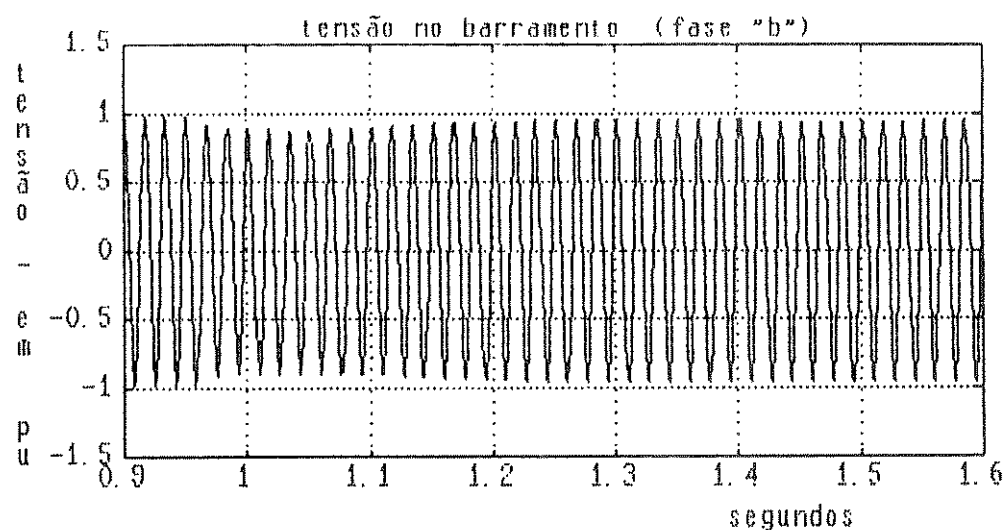
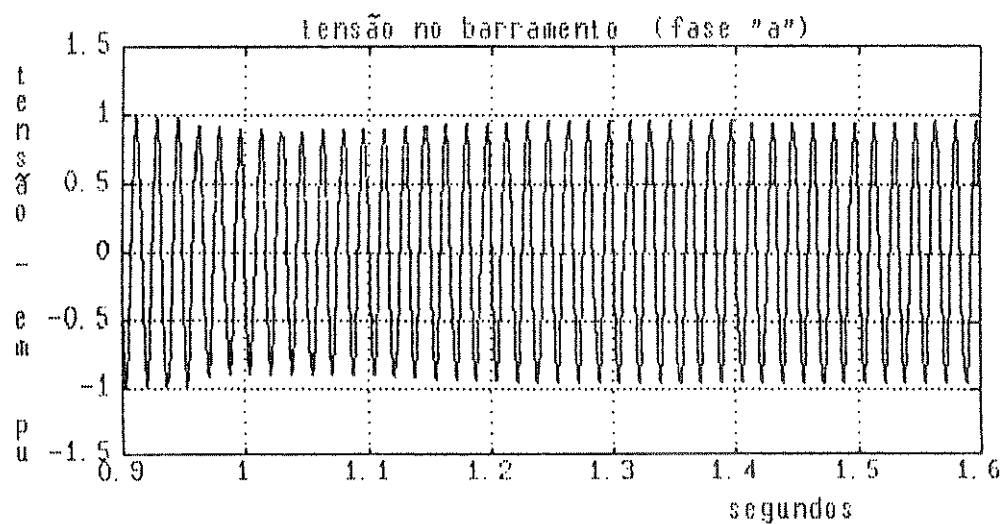


Figura IV-47 Caso D - Retomada de carga após a rejeição de 70% da carga

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com o estudo realizado pode-se concluir que, em princípio é possível a utilização de geradores de indução juntamente com geradores síncronos em uma usina isolada.

O modelo matemático desenvolvido permite a escolha de máquinas para que se tenha uma adequada repartição de potência entre elas. É necessário que a usina possa fornecer a sua potência aparente nominal, ou seja, a soma das potências aparentes dos geradores ou, pelo menos, uma alta porcentagem dela sem sobrecarregar o gerador síncrono.

O modelo permite determinar a velocidade do gerador de indução na qual ele fornecerá a potência máxima. Esse deverá ser o ponto de operação da usina.

O estudo do aproveitamento dos recursos energéticos determinará essa velocidade e o modelo permitirá a escolha das potências dos geradores adequados bem como permitirá uma certa previsão dos parâmetros que as máquinas deverão apresentar.

No que diz respeito à necessidade de regulação do gerador de indução, pode-se verificar que ela é necessária para evitar motorização do gerador síncrono quando há rejeição de cargas.

Pode-se verificar também que uma usina deste tipo não pode operar com baixa carga sem regulação da velocidade da máquina de indução.

Entretanto, este trabalho está longe de esgotar o assunto. Para melhores conclusões sobre a operação de uma usina deste tipo seria conveniente implementar modelos onde a carga fosse representada por potência constante e por corrente constante e, compará-los com os resultados deste trabalho onde ela foi

representada por impedância constante e resistiva.

É necessário incluir no modelo a equação de equilíbrio de energia para permitir a verificação do comportamento das velocidades das máquinas durante os transitórios. Neste trabalho foi suposto que elas não variam ou variam pouco como mencionado na literatura (4).

Sugere-se também incluir os controles de velocidade dos geradores e de tensão de campo do gerador síncrono, as turbinas no modelo bem como, a saturação magnética dos geradores. Da mesma forma propõe-se, um melhor estudo de operação com a exploração da variação dos parâmetros das máquinas para a escolha de melhores máquinas.

APÊNDICE A -Dados e parâmetros de máquinas industriais.

1. Geradores Síncronos

Potência Aparente (KVA)	312,5	625	875
Tensão de linha-eficaz (Volts)	450	480	450
Fator de potência	0,8	0,8	0,8
Frequência (Hz)	60	60	60
Número de pólos	4	6	6
1. L_d (pu)	1,19280	1,70100	0,86550
2. L_q (pu)	0,76009	1,10799	0,54438
3. L_{ad} (pu)	1,15620	1,58400	0,82530
4. L_f (pu)	1,28322	1,85705	0,95079
5. L_{aq} (pu)	0,72500	0,99096	0,50420
6. L_D (pu)	1,23054	1,78027	0,90725
7. L_Q (pu)	0,81114	1,18648	0,57626
8. r_a (a 75°C) (pu)	0,00896	0,01522	0,00620
9. r_f (pu)	0,00154	0,00352	0,00111
10. r_D (pu)	0,03627	0,04489	0,01487
11. r_Q (pu)	0,02907	0,04895	0,01387
L_e (pu)	0,0366	0,11701	0,04018
GD^2 (Kg m ²)	34	120	270

2. Máquinas de Indução

Potência Aparente (KVA)	492	698	1041
Tensão de linha-eficaz (Volts)	460	460	460
Frequência (Hz)	60	60	60
Número de pólos	6	6	4
Velocidade nominal			
1. X_s (Ohms)	5,9000	4,1040	4,2700
2. X_r (Ohms)	5,8740	4,0830	4,2300
3. X_m (Ohms)	5,7300	3,9900	4,1400
4. r_s (Ohms)	0,0189	0,0098	0,0062
5. r_r (Ohms)	0,0205	0,0107	0,0064
GD^2 (Kg m ²)	27,8	32,5	18,9

APÊNDICE B - VARIÁVEIS α , β , 0 e dco

Apresenta-se inicialmente as transformações necessárias para se obter as equações de Park. A primeira transformação é a α , β , 0 (ítem 1) e a segunda é a dco (ítem 2).

Aplica-se no final deste apêndice (ítem 3) novas transformações para uma carga resistiva-indutiva.

1. Transformações α , β , 0 (1) (2)

Representação em dois enrolamentos, que estão a 90° elétricos um do outro, de um mesmo fenômeno elétrico produzido em três enrolamentos, que estão a 120° elétricos um do outro.

Transformação de a, b, c em α , β , 0

$$T_{\alpha,\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} ;$$

exemplo:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Transformação inversa, de α , β , 0 para a, b, c.

$$T_{\alpha,\beta}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

2. Transformação dqo (1) (2)

Essa transformação visa eliminar as funções dependentes do ângulo (θ), isto é, de ωt , tornando as equações lineares. Essa transformação é utilizada em máquinas elétricas para a obtenção das Equações de Park.

Adotando o referencial no campo girante, tem-se:
Transformação de $\alpha, \beta, 0$ para dqo.

$$T_{dqo} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

exemplo:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = T_{dqo} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix}$$

Transformação de dqo para $\alpha, \beta, 0$

$$T_{dqo}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

onde ψ : - para as tensões e correntes do estator, $\psi = \omega_s t$

(ω_s = velocidade angular síncrona;

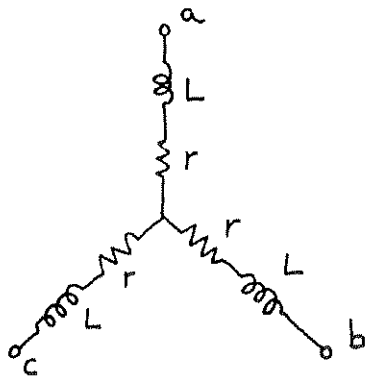
t = instante de tempo)

- para as tensões e correntes do rotor, $\psi = (\omega_s - \omega_n) t$

(ω_m = velocidade angular do rotor)

3. Aplicação das demais transformações a uma carga resistiva-indutiva

A carga trifásica resistiva-indutiva pode ser representada como sendo três cargas monofásicas ligadas entre si em um único ponto (N), como mostra a figura 1.



r = valor da resistênci em
Ohms (Ω);

L = valor da indutância em
Henry(H)

Figura 1 - Carga Resistiva-Indutiva

As equações elétricas da carga da figura 1 são escritas abaixo:

$$v_a = ri_a + pLi_a$$

$$v_b = ri_b + pLi_b$$

$$v_c = ri_c + pLi_c$$

onde, as tensões trifásicas de fase aplicadas nos terminais a, b, c podem ser escritas:

$$v_a = V_{\max} \cos(\omega t + \phi)$$

$$v_b = V_{\max} \cos(\omega t + \phi - 120^\circ)$$

$$v_c = V_{\max} \cos(\omega t + \phi + 120^\circ)$$

Desconsiderando nas indutâncias (L) as possíveis mútuas e a sua variação com o tempo ($L(t) = L$) pode-se escrever matricialmente:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

onde

$$Z = \begin{bmatrix} r + Lp & 0 & 0 \\ 0 & r + Lp & 0 \\ 0 & 0 & r + Lp \end{bmatrix}$$

Aplicando-se as transformadas $\alpha, \beta, 0$ e dqo e as respectivas transformadas inversas, tem-se:

Transformação $\alpha, \beta, 0$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \cdot Z \cdot T_{\alpha,\beta,0}^{-1} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}$$

Transformação $\alpha, \beta, 0$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = T_{dq0} (T_{\alpha,\beta,0} \cdot Z \cdot T_{\alpha,\beta,0}^{-1}) T_{dq0}^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

Resultado:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r + Lp & -Lw & 0 \\ Lw & r + Lp & 0 \\ 0 & 0 & R + Lp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

APÊNDICE C - Sistema por Unidade (pu)

1. Valores de base (1)

S_{base} = Potência trifásica de fase (em VA)

V_{base} = Tensão de fase na fase (valor eficaz) =
 $V_{linha\ nominal} / \sqrt{3}$

I_{base} = Corrente de fase na fase (valor eficaz)

$V_{max\ de\ base}$ = Tensão de pico na fase = $V_{base} \cdot \sqrt{2}$

$I_{max\ de\ base}$ = Corrente de pico na fase = $V_{base} \cdot \sqrt{2}$

Z_{base} = Impedância de fase = V_{base} / I_{base}

ω_{base} = Velocidade angular de fase

L_{base} = Indutância de fase = Z_{base} / ω_{base}

t_{base} = tempo de base = $1 / \omega_{base}$

Sendo:

$$S_{base} = 3 V_{base} \cdot I_{base} = \frac{3}{2} V_{max\ base} \cdot I_{max\ base}$$

2. Para o gerador síncrono

Escolhendo os valores de base convenientes, de acordo com as relações:

$$\begin{aligned} V_{max\ base} \cdot I_{max\ base} &= v_F\ base \cdot i_F\ base = \\ &= v_D\ base \cdot i_D\ base = v_Q\ base \cdot i_Q\ base ; \end{aligned}$$

tem-se as seguintes simplificações em pu (1):

$$L_{ad} = L_{af} = L_{aD}$$

$$L_{aq} = L_{aQ}$$

APÊNDICE D - PROGRAMAS UTILIZADOS

Os programas foram feitos para serem utilizados no aplicativo MATLAB.

Todos os dados de entrada e de saída dos programas devem estar em valores por unidade (pu).

A seguir apresenta-se as listagens dos programas utilizados e um breve resumo do que cada um executa. Realça um ou outro ponto que facilite o entendimento.

1. SISD2.M

A partir dos dados e parâmetros do gerador síncrono, do gerador de indução e da carga resistiva-indutiva, este programa monta todas as matrizes descritas no capítulo II.

```
% nome: sisd2.m
% organiza os dados na forma matricial

% maquina sincrona *****
% *****

% estas equacoes estao na configuracao de motor

Ld = ds(1); Lq = ds(2); Lad = ds(3); Lf = ds(4); Laq = ds(5); LD = ds(6);
LQ = ds(7); ra = ds(8); rf = ds(9); rD = ds(10); rQ = ds(11);
L = dc(1); R = dc(2); cap = dc(3);

A = [ Ld  0  Lad  Lad  0
      0  Lq  0    0    Laq
      Lad 0  Lf  Lad  0
      Lad 0  Lad  LD  0
      0  Laq  0    0    LQ ];

B = [ 0  -Lq  0    0    -Laq
      Ld  0  Lad  Lad  0
      0  0  0    0    0
      0  0  0    0    0
      0  0  0    0    0  ];
```

```
C = [ ra  0  0  0  0
      0  ra  0  0  0
      0  0  rf  0  0
      0  0  0  rD  0
      0  0  0  0  rQ ];
```

```
D = [ L  0  0  0  0
      0  L  0  0  0
      0  0  0  0  0
      0  0  0  0  0
      0  0  0  0  0  ];
```

```
E = [ 0 -L  0  0  0
      L  0  0  0  0
      0  0  0  0  0
      0  0  0  0  0
      0  0  0  0  0  ];
```

```
F = [ R  0  0  0  0
      0  R  0  0  0
      0  0  0  0  0
      0  0  0  0  0
      0  0  0  0  0  ];
```

```
G = [ 0
      0
      1
      0
      0 ]; % vfz: tensao de campo; nas equacoes: G*vfz
```

```
I = [ 1  0  0  0  0
      0  1  0  0  0
      0  0  1  0  0
      0  0  0  1  0
      0  0  0  0  1  ];
```

```
% a transformacao abaixo inverte os sinais de id e iq
% para se ter a configuracao de gerador
```

```
i = [-1 -1  1  1  1
      -1 -1  1  1  1
      -1 -1  1  1  1
      -1 -1  1  1  1
      -1 -1  1  1  1  ];
```

```
A = A.*i; B = B.*i; C = C.*i;
```

```
% matriz do capacitor *****
```

```
N = [ 0 -1  0  0  0
      1  0  0  0  0
      0  0  0  0  0
      0  0  0  0  0
      0  0  0  0  0  ];
```

```
% *****
% *****
% *****
```

```
% maquina de inducao ****
```

```
Ls = di(1); Lr = di(2); mm = di(3); Rs = di(4); Rr = di(5);
```

```
H = [ Ls 0 0 mm 0
       0 Ls 0 0 mm
       0 0 1 0 0
       mm 0 0 Lr 0
       0 mm 0 0 Lr ];
```

```
J = [ 0 -Ls 0 0 -mm
       Ls 0 0 mm 0
       0 0 0 0 0
       0 -mm 0 0 -Lr
       mm 0 0 Lr 0 ];
```

```
K = [ 0 0 0 0 0
       0 0 0 0 0
       0 0 0 0 0
       0 mm 0 0 Lr
       -mm 0 0 -Lr 0 ];
```

```
L = [ Rs 0 0 0 0
       0 Rs 0 0 0
       0 0 1 0 0
       0 0 0 Rr 0
       0 0 0 0 Rr ];
```

```
R = [ 0 0 0 0 -mm
       0 0 0 mm 0
       0 0 0 0 0
       0 0 0 0 0
       0 0 0 0 0 ]; % matriz utilizada no torque
```

```
% a transformacao abaixo inverte as correntes id e iq
% para se ter a configuracao de gerador
```

```
i = [-1 -1 1 1 1
      -1 -1 1 1 1
      -1 -1 1 1 1
      -1 -1 1 1 1
      -1 -1 1 1 1 ];
```

```
H = H.*i; J = J.*i; K = K.*i; L = L.*i;
```

```
% ****
```

```
% matrizes para o sistema
```

```
c = inv( [A-D -D; -D H-D]);
a = c*[F-C F; F F-L];
b = c*[E-B E; E E-J];
u = [G; G-G];
g = -c*[K-K K-K; K-K K];
```

```
d = -c*[D D-D;D-D D];
```

```
e = -c*[E E-E;E-E E];
```

```
f = -c*[F F-F;F-F F];
```

```
% equacao do sistema com capacitor
```

```
% dx = ax + wbx + cuvzf + d*dx4 + wex4 + fx4 + vgx
```

```
% sem o capacitor
```

```
% dx = ax + wbx + cuvzf + vgx
```

```
end
```

```
% auto-valores
```

```
eig(a+b+v*g)
```

```
end;
```

2. SISP.M

Resolve numericamente pelo método de Runge-Kutta a equação diferencial descrita no final do capítulo II.

x = vetor das correntes (i) = $[i_s^t \ i_i^t]^t$

cix = condição inicial de "x"

time = tempo

cit = condição inicial de "time"

lr = passo da dispersão

mp = número de pontos resolvidos

```
% nome sisp.m
```

```
% valores iniciais *****
```

```
x=cix ; time=cit; p=[time x'];
```

```
% metodo de runge-kutta *****
```

```
for i=1:mp
```

```
dx = ((a+w*b+v*g)*x+c*u*vzf); k1=h*dx;
```

```
time = time + h/2;
```

```
x = x + k1/2;
```

```
dx = ((a+w*b+v*g)*x+c*u*vzf); k2=h*dx;
```

```
x = x - k1/2 + k2/2;
```

```
dx = ((a+w*b+v*g)*x+c*u*vzf); k3=h*dx;
```

```

time = time + h/2;
x = x - k2/2 + k3;
dx = ((a+w*b+v*g)*x+c*u*v*fz); k4=h*dx;

x = x - k3 + (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4)/6;

p=[p;time x'];

end
    torque
    cix=x; cit=time;

end

```

3. TORQUE.M

Calcula a partir do vetor "x":

- as tensões (v_s)
- a potência ativa do gerador síncrono (p_s)
- a potência ativa do gerador de indução (p_{ind})
- a potência ativa na carga (p_c)
- conjugado elétrico do gerador síncrono (T_e)
- conjugado elétrico do gerador de indução (T_{ei})

É utilizado tanto para o regime permanente como para o transitório.

```

% nome torque

Te = (2/3)*ppolos*x(1:5)'*B*x(1:5);

Tei= (2/3)*ppoloi*x(6:10)'*R*x(6:10);

vs = A*dx(1:5) + w*B*x(1:5) + C*x(1:5);

vtf = sqrt(vs(1)^2 + vs(2)^2);

ps =( vs(1)*x(1) + vs(2)*x(2) )*2/3;

pind =( vs(1)*x(6) + vs(2)*x(7) )*2/3;

pc =( vs(1)*( x(1)+x(6) ) + vs(2)*( x(2) + x(7) ) )*2/3;

end

```

4. SIS.M

Gerencia o programa SISP.M e organiza os dados de saída em seus respectivos vetores

- np = número de vezes que é executado SISP.M
- tt = vetor dos instantes de tempo em valor real
(em segundos)

```
% nome sis.m

for j=1:np
    sisp
    sp=size(p);

% correntes na maquina sincrona
    id=[id;x(1)];iq=[iq;x(2)];iff=[iff;x(3)];

% correntes na maquina de inducao
    idi=[idi;x(6)];iqi=[iqi;x(7)];

% tensao no barramento de carga
    vd=[vd;vs(1)];vq=[vq;vs(2)];

% potencias
    vps=[vps;ps];vpind=[vpind;pind];vpc=[vpc;pc];

% tempo
    tt=[tt;time/(2*pi*60)];

end;
end
```

5. SISVF.M

Calcula a tensão de campo (v_{fz}) para se obter a tensão nominal na barra de carga conforme foi descrito no capítulo III.

É utilizado em regime permanente. Em regime transitório apenas calcula os valores iniciais de corrente.

```

% nome sisvf.m

dx=0*cix;

% busca do valor da tensao de campo (v_fz)
% v_fz esta representada pela variavel "z"

z=100;z1=100;z2=0;vtf2=3;
for i=1:40

if vtf2>sqrt(3/2) z1=z;z=(z1+z2)/2;end
if vtf2<sqrt(3/2) z2=z;z=(z1+z2)/2;end

M2 = a+w*b+v*g;
i2 = -inv(M2)*c*u*z;

vs2=(w*B+C)*i2(1:5);
vtf2=sqrt(vs2(1)^2 + vs2(2)^2);

end
x=i2;
torque
v_fz=z;

end

```

6. SISVFE.M

Calcula todas as correntes e tensões em regime permanente a partir da tensão de Campo (v_{fz}).

```

% nome: sisvfe.m

M2 = a+w*b+v*g;
i2 = -inv(M2)*c*u*v_fz;

vs2=(w*B+C)*i2(1:5);
vtf2=sqrt(vs2(1)^2 + vs2(2)^2);

x=i2;

itf2=sqrt(i2(1)^2 + i2(2)^2);

torque

resp=[ps pind pc vtf2 v_fz x(3) v]
respt=[ps pind pc vtf2 Te Tei v]
end

```

7. SISG.M

Com os dados armazenados pelo programa SIS.M, faz a transformação inversa - das variáveis "dgo" para o sistema trifásico em variáveis "abc" -, e apresenta graficamente os resultados.

```
% nome: sisg.m

% if do ger sinc *****

p1=[tt];
p2=[iff];

plot(p1,p2)
title(' corrente de campo ')
xlabel(' segundos ')
ylabel(' corrente - em pu')
grid
pause

end% nome: sisg.m

% id e iq do ger sinc *****

clear p2;p2=[id];p3=[iq];
p4=[idi];p5=[iqi];

% ia da carga *****

ia=sqrt(2/3)*((p2+p4).*cos(2*pi*60*p1)-(p3+p5).*sin(2*pi*60*p1));
plot(p1,ia)
title(' Carga ( fase "a") ')
xlabel(' segundos ')
ylabel(' corrente - em pu')
grid
pause

% ib da carga *****

tet=2*pi/3;clear ia;

ia=sqrt(2/3)*((p2+p4).*cos(2*pi*60*p1-tet)-(p3+p5).*sin(2*pi*60*p1-tet)
plot(p1,ia)
title(' Carga ( fase "b") ')
xlabel(' segundos ')
ylabel(' corrente - em pu')
grid
pause

% ic da carga *****
```

```

clear ia;
ia=sqrt(2/3)*((p2+p4).*cos(2*pi*60*p1+tet)-(p3+p5).*sin(2*pi*60*p1+tet));
plot(p1,ia)
title(' Carga ( fase "c")')
xlabel(' segundos ')
ylabel(' corrente - em pu')
grid
pause

% ia ger sinc *****
clear ia;
ia=sqrt(2/3)*((p2).*cos(2*pi*60*p1)-(p3).*sin(2*pi*60*p1));
plot(p1,ia)

title(' Gerador Sincrono ( fase "a")')
xlabel(' segundos ')
ylabel(' corrente - em pu')
grid
pause

% ia ger de inducao *****
clear ia;
ia=sqrt(2/3)*((p4).*cos(2*pi*60*p1)-(p5).*sin(2*pi*60*p1));
plot(p1,ia)
title(' Gerador de Inducao ( fase "a")')
xlabel(' segundos ')
ylabel(' corrente - em pu')
grid
pause

% potencias *****
clear p2;clear p3;clear p4; clear p5;
p2=[vps];p3=[vpind];p4=[vpc];

plot(p1,p2,p1,p3,p1,p4)

ylabel(' Potencia - em pu ')
xlabel(' segundos ')
title(' ger sinc- ger ind-- carga.. ')
%grid
pause
end;

% tensao no barramento *****
clear p2;clear p3;clear p4;clear p5
p2=[vd];
p3=[vq];
va=sqrt(2/3)*(p2.*cos(2*pi*60*p1)-p3.*sin(2*pi*60*p1));
plot(p1,va)
title(' tensao no barramento (fase "a")')
xlabel(' segundos ')
ylabel(' tensao - em pu')
grid
pause

% tensao no barramento *****
va=sqrt(2/3)*(p2.*cos(2*pi*60*p1-tet)-p3.*sin(2*pi*60*p1-tet));
plot(p1,va)
title(' tensao no barramento (fase "b")')
xlabel(' segundos ')
ylabel(' tensao - em pu')
grid
pause

```

```

% tensao no barramento
va=sqrt(2/3)*(p2.*cos(2*pi*60*p1+tet)-p3.*sin(2*pi*60*p1+tet));
plot(p1,va)
title(' tensao no barramento  (fase "c")')
xlabel('                                segundos ')
ylabel(' tensao - em pu')
grid
pause

% id e iq do ger sinc *****
clear p2;clear p3;clear va;
p2=[iff];

% if do ger sinc *****

plot(p1,p2)
title(' corrente de campo ')
xlabel('                                segundos ')
ylabel(' corrente - em pu')
grid
pause

```

8. Exemplos de aplicação do MATLAB

Algoritmo para simulação da Usina em carga com a perturbação de um curto-circuito instantâneo.

1. Fornecer todos os dados e parâmetros
2. SISD2 (montagem das matrizes)
3. SISVF (cálculo dos valores em carga)
4. Valores iniciais:


```

cix = x
cit = "valor inicial do tempo (em pu)"

```
5. SIS (simulação em carga)
6. Curto-circuito instantâneo:


```

dc(1) = 0 (indutância de carga igual a zero)
dc(2) = 0,0001 (resistência de carga próxima de
              zero)

```
7. SISD2 (montagem das matrizes)
8. SIS (simulação do curto-circuito)

BIBLIOGRAFIA

- [1] ALTINO, L. "Máquinas Síncronas: teoria e aplicações", Editora Universidade (UFPE), Recife, 1984
- [2] BARBI, I. "Teoria fundamental do motor de indução", Editora da UFSC, Florianópolis, 1985.
- [3] BOFFI, L.V., SOBRAL Jr., M. E DANGELO, J.C. "Conversão Eletromecânica de Energia", Edusp, São Paulo, 1977.
- [4] KRAUSE, P., "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill Book Company, 1986