

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SIMULAÇÃO DE MÁQUINA SÍNCRONA

EM COMPUTADOR ANALÓGICO

TESE SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS

ADERILTON PAULO DE SOUZA RODRIGUES

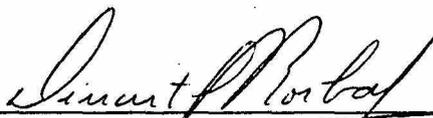
Novembro - 1975

"SIMULAÇÃO DE MÁQUINA SÍNCRONA EM COMPUTADOR ANALÓGICO".

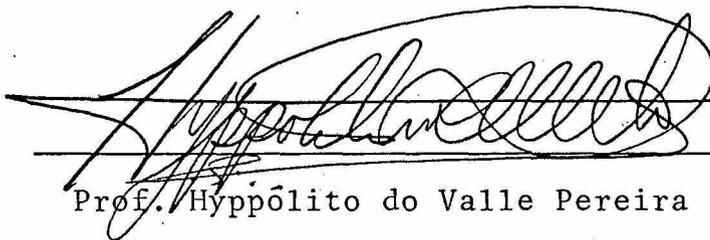
Esta tese fôï julgada adequada para a obtenção do título de

Mestre em Ciências

em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação.



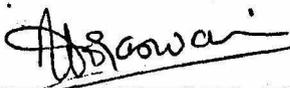
Prof. Dinarte Americo Borba, M.Sc.
Orientador



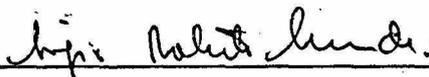
Prof. Hyppólito do Valle Pereira Filho, PhD.
Integrador dos Programas de Pós-Graduação

em Engenharia

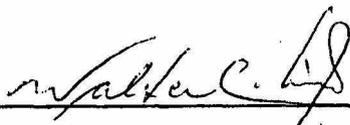
Apresentada perante a banca examinadora composta dos professores



Prof. Rajamani Doraiswami, PhD.



Prof. Sérgio Roberto Arruda, MsSc.



Prof. Walter Celso de Lima, Liv. Doc.

À Nazaré e Tatiana pela vontade
e estímulo que me transmitiram
para a realização deste trabalho.

A meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Rajamani Doraiswami, pela colaboração inestimável na realização deste trabalho.

Ao prof. Dinarte Américo Borba, pela orientação.

Ao Antônio Simões Pires, pela boa vontade que sempre demonstrou em colaborar.

A todas as pessoas que de alguma maneira colaboraram com o autor.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

FÓRMULAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.1 - Introdução	1
1.2 - Proposições	3

CAPÍTULO 2

MATERIAIS E MÉTODOS	4
2.1 - Materiais	4
2.2 - Metodologia	4
2.2.1 - O modelo matemático	4
2.2.2 - Equações da máquina em P.U.	6
2.2.3 - Torque eletromagnético	7
2.2.4 - Equação eletromecânica da máquina	8
2.3 - A simulação da máquina	10
2.3.1 - A simulação por partes	10
2.3.2 - Gerador de base de tempo com paradas programáveis	11
2.3.3 - Obtenção de seno e cosseno do ângulo de carga a partir da derivada deste ângulo	12
2.3.4 - A simulação total do problema	17
2.3.5 - Simulação de curto circuito	19
2.3.6 - Simulação do regulador de frequência	20
2.3.7 - Simulação do regulador de tensão	20
2.3.8 - Simulação de perda de excitação	21

CAPÍTULO 3

RESULTADOS	25
------------------	----

CAPÍTULO 4

DISCUSSÃO	53
4.1 - Discussão do modelo	53

4.2 - Discussão dos métodos	56
4.3 - Discussão dos resultados	58

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES	61
APÊNDICE I - Sistema por unidade (P.U.)	62
APÊNDICE II - Obtenção das equações em P.U.	65
APÊNDICE III - Equações do sistema escalonadas	68
APÊNDICE IV - Solução do sistema em regime	74
APÊNDICE V - Programa para cálculo da máquina em regime	77
BIBLIOGRAFIA	80

SIMBOLOGIA

E	Tensão terminal de armadura
E_d	Tensão de armadura de eixo direto
E_q	Tensão de armadura de eixo de quadratura
E_N	Tensão nominal
E_f	Tensão de excitação
E'_{q}	Tensão atrás da reatância transitória
E_{qd}	Tensão fictícia sobre o eixo de quadratura
ϵ	erro de tensão introduzida no regulador
E_R	Tensão de saída do regulador de tensão
E_{fd}	Tensão de saída da excitatriz
f_n	frequência nominal
I_n	corrente nominal de fase
I_d	corrente de armadura de eixo direto
I_q	Corrente de armadura de eixo de quadratura
I_{nd}	Corrente do enrolamento amortecedor N de eixo direto
I_{mq}	Corrente do enrolamento amortecedor M de eixo de quadratura
J	Momento de inércia
L_d	Indutância própria de eixo direto
L_q	Indutância própria de eixo de quadratura
L_f	Indutância do circuito de excitação
M_{ad}	Indutância mútua entre os enrolamentos do rotor e estator de eixo direto
M_{aq}	Indutância mútua entre os enrolamentos do rotor e estator de eixo de quadratura
P	Potência
p	operador diferencial
$p\delta$	Primeira derivada do ângulo de carga
$p\dot{\delta}$	Segunda derivada do ângulo de carga
P.U.	Sistema por unidade
R	Resistência da armadura
R_f	Resistência do circuito de excitação
R_{nd}	Resistência do enrolamento amortecedor N de eixo direto
R_{mq}	Resistência do enrolamento amortecedor M de eixo de quadratura
s	escorregamento

T_{in}	Torque de inércia
T_m	Torque mecânico
T_e	Torque elétrico
ΔT_m	Variação de torque mecânico
V_{st}	Tensão de estabilizador do sistema de excitação
V_{ref}	Tensão de referência
X_d	Reatância transitória de eixo direto
x_d	reatância síncrona de eixo direto
X_q	reatância síncrona de eixo de quadratura
X_f	Reatância própria do enrolamento de campo
X_{ad}	Reatância mútua entre os enrolamentos do estator e enrolamento amortecedor de eixo direto
X_{aq}	Reatância mútua entre os enrolamentos do estator e enrolamento amortecedor de eixo de quadratura
X_{ld}	Reatância própria do enrolamento amortecedor de eixo direto
X_{lq}	Reatância própria do enrolamento amortecedor de eixo de quadratura
Δx	Variável de saída do governador de velocidade
ω	Velocidade do rotor
ω_s	Pulsação síncrona
ϕ_d	enlaçamento de fluxo de eixo direto
ϕ_q	enlaçamento de fluxo de eixo de quadratura
ϕ_f	enlaçamento de fluxo de circuito de excitação
ϕ_{nd}	Enlaçamento de fluxo do enrolamento amortecedor N de eixo direto
ϕ_{mq}	Enlaçamento de fluxo do enrolamento amortecedor M de eixo de quadratura
δ	ângulo de carga
ϕ	ângulo de fator de potência
γ	ângulo entre o eixo da fase <u>A</u> e o eixo direto
τ	constante de tempo

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar um modelo de simulação analógica de um gerador síncrono que permita análise de seu comportamento na ocorrência de falhas simétricas nos seus terminais.

A simulação foi feita para um gerador de 200 MW com dois enrolamentos amortecedores, um em cada eixo e um enrolamento de campo localizado no eixo direto.

O computador digital PDP 11/40, foi utilizado para simular a máquina operando em regime estático, com finalidade de obter as entradas para a simulação analógica.

No computador TELEFUNKEN RA-770 simulou-se a máquina síncrona propriamente dita e no computador analógico EAI, simulou-se os dispositivos de controle.

Verifica-se o método de simulação através de curto circuito trifásico nos terminais da máquina, quando esta opera com e sem enrolamentos amortecedores.

O processo permitiu análise dos transitórios eletromagnéticos e mecânicos do gerador.

ABSTRACT

The purpose of this work is to present a model for analog simulation of a synchronous generator with the aim of analysing its behaviour on the event of symmetrical faults at its terminals.

The simulation has been applied to a 200 MW generator having two damper windings, one for each axis, and one field winding in the direct axis.

The steady state operation of the machine has been simulated in a digital computer PDP 11/40 with the purpose of obtaining the input data for the analog simulation. The synchronous machine as such, on the other hand, has been simulated in the analog computer TELEFUNKEN RA-770 whereas the simulation of the control devices was carried out in the analog computer EAI TR-20.

The simulation method is tested by the application of a three-phase fault to the machine terminals, considering two alternatives of construction: with and without damper windings.

An interesting feature of the process is its applicability to the analysis of mechanical and electromagnetic transients of the generator which constitutes the final part of this work.

CAPÍTULO 1

1. - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

1.1. - INTRODUÇÃO

O problema de estabilidade nos sistemas de potência, e os fatores que afetam a operação normal de uma máquina síncrona, serão por muito tempo ainda motivos de estudos, considerando-se que cada vez mais, os sistemas tornam-se maiores e complexos.

Esta expansão dos sistemas de potência, e a necessidade de fornecimento contínuo tornou fundamental o conhecimento das características transitórias de uma máquina síncrona.

Desde que BLONDEL (1927), formulou as equações representativas de uma máquina síncrona nos eixos " d " e " q " , que mais tarde foram generalizadas e desenvolvidas por PARK (1933), tem sido feitas suposições e idealizações da máquina, com auxílio de ferramentas computacionais, para estudo destas equações.

Em 1947, CONCORDIA & TEMOSHOK^[2], fizeram suposições para que as expressões para a potência transitória da máquina, ficasse em função apenas do ângulo de carga, em vez de função do tempo.

Com o aparecimento dos analisadores diferenciais em 1930, precursores dos modernos computadores analógicos, abriu-se um novo campo no estudo da dinâmica dos sistemas de potência, devido as vantagens e facilidades que eles ofereciam.

Depois da Segunda Guerra Mundial, quando foram desenvolvidos os computadores digitais, estes, superaram os analisadores, e tornaram-se ferramenta largamente usada na solução de problemas em sistemas de potência.

Por volta de 1959, apareceram os primeiros modernos computadores analógicos, basicamente constituídos dos mesmos elementos do analisador diferencial, com a capacidade de operar com precisão seus integradores paralelamente no tempo.

Esta característica é a vantagem fundamental mantida até hoje sobre os computadores digitais.

Os computadores digitais apresentam entretanto ,

outras vantagens que não podem ser obtidas com computadores analógicos como: a capacidade de armazenamento, a velocidade de cálculo aritmético, a capacidade de controle em tempo real.

Em 1960, devido as deficiências de cada um desses computadores, surgiu a idéia de interligá-los por meio de conversores permitindo assim as vantagens computacionais de cada tipo, ^[3]isso permite simular problemas específicos em sistemas de potência.

Neste caso, o computador analógico é usado para simular todos os componentes do sistema, e, o computador digital é usado somente para monitoração e controle.

O ponto de partida das modernas simulações de máquinas síncronas usando apenas computador analógico, e o trabalho apresentado por THOMAS KRAUSE ^[4](1956), onde as equações aparecem na forma conveniente para simulação.

Neste trabalho pela primeira vez, foi levado em conta os termos derivados dos enlaces de fluxo, e as malhas algébricas foram eliminadas, expressando todas as correntes nas equações, em função do fluxo. Isto possibilitou ser levada em consideração a saturação, e permitiu fácil investigação das oscilações do rotor em termos da velocidade síncrona.

Entretanto nesta representação, as correntes foram eliminadas da simulação básica, uma vez que não eram soluções das equações diferenciais.

Embora tenha havido várias modificações no modelo apresentado por THOMAS & KRAUSE ^[4], ele é o mesmo usado ainda hoje no estudo de máquinas síncronas em computador analógico. Aplicações práticas da formulação proposta em seu trabalho podem ser mostradas no estudo do comportamento assíncrono da máquina.

Num sistema de potência ideal, um gerador não perderia a estabilidade sob as mais diversas condições de falha. Muitas vezes entretanto, a perda de sincronismo de um gerador nos sistemas reais não pode ser evitada, e neste caso, torna-se essencial determinar se o gerador resincronizará, ou não, depois que cesse a falha que provocou tal perda.

Devido a esse fato, muito se tem feito na tentativa de encontrar um controle ótimo que permita essa condição ideal de funcionamento. Hoje, devido a ação de reguladores de alta

velocidade de resposta, quase sempre é possível trazer de volta um gerador a operação normal que devido a uma falha razoável tenha perdido o sincronismo com o sistema.

Entretanto, se em um caso extremo ocorre fa lha no próprio circuito de excitação, os sistemas de controle se e xistissem seriam inoperantes, e, nesse caso o gerador re sin cro za ria ou não, desde que cessasse a falha que provocou a perda.

Evidentemente, se a excitação não fosse restabelecida, o gerador não resincronizaria, restando neste caso alternativa de desligar a máquina do sistema e reparar o defeito no ci rc ui to.

Assim, o uso de computador analógico em simulação de máquina síncrona, é válido, principalmente se o objetivo for uma análise qualitativa. As vantagens oferecidas por este tipo de estudo são, principalmente: permitir acesso imediato a qualquer ponto da máquina que se deseje e grande velocidade de cálculo.

1.2. - PROPOSIÇÕES

Propõe-se neste trabalho simular uma máquina síncrona com e sem enrolamentos amortecedores em computador analógico, com os seguintes objetivos:

1. Fazer teste de curto circuito trifásico nos terminais da máquina, quando esta opera com e sem enrolamentos amortecedores, com a finalidade de testar a simulação feita.
2. Verificar as influências dos dispositivos de controle, no regime transitório e permanente da máquina síncrona.
3. Estudar o comportamento da máquina síncrona quando ela perde a excitação gradualmente.
4. Verificar a possibilidade de acontecer re sin cro n iza ção com o restabelecimento da ex ci ta ção.

CAPÍTULO 2

2. - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. - MATERIAIS

Foram usados os computadores analógicos TELEFUNKEN modelo RA 770, e EAI modelo TR 20, além de um computador digital PDP modelo 11/40.

Considerando-se que o computador TELEFUNKEN encontra-se incompleto, não foi possível simular todo o problema nesta máquina. Devido a este fato, foi usado um dispositivo para nivelar as tensões dos dois computadores analógicos, permitindo que o computador EAI funcione como escravo do computador TELEFUNKEN.

No computador TELEFUNKEN foi simulada a máquina síncrona propriamente dita, e no computador EAI, foram simulados os reguladores e um gerador de seno e cosseno.

O computador digital foi usado para simular a máquina em operação normal, utilizando a linguagem BASIC, com a finalidade de obter os valores de regime estático do torque mecânico, tensão de excitação e ângulo de carga, que são as entradas para a simulação analógica.

A representação da máquina em funcionamento normal do PDP, permitiu obter facilmente os diversos valores de entradas e situações para várias cargas consideradas na simulação analógica, vide APÊNDICE V.

2.2 - METODOLOGIA

2.2.1 - O MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático utilizado foi o da teoria das duas reações PARK^[1] (1933). No sistema de equações Nº1 considera-se a máquina com N enrolamentos amortecedores no eixo direto e M no eixo de quadratura.

$$E_d = \frac{1}{\omega_s} p \phi_d - \frac{\omega}{\omega_s} \phi_q - R I_d$$

$$E_q = \frac{1}{\omega_s} p \phi_q - \frac{\omega}{\omega_s} \phi_d - R I_q$$

$$E_f = \frac{1}{\omega_s} p \phi_f + R_f I_f$$

$$0 = \frac{1}{\omega_s} p \phi_{1d} + R_{1d} I_{1d}$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$0 = \frac{1}{\omega_s} p \phi_{nd} + R_{nd} I_{nd}$$

$$0 = \frac{1}{\omega_s} p \phi_{1q} + R_{1q} I_{1q}$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$0 = \frac{1}{\omega_s} p \phi_{mq} + R_{mq} I_{mq}$$

$$\phi_d = -L_d I_d + M_{ad} I_f + \sum_{n=1}^n M_{ad} I_{nd}$$

$$\phi_q = -L_q I_q + \sum_{j=1}^m M_{aq} I_{jq}$$

$$\phi_f = L_f I_f - \frac{3}{2} M_{ad} I_d - \sum_{n=1}^n M_{ad} I_{nd}$$

$$\phi_{1d} = -L_{1d} I_{1d} + \frac{3}{2} M_{ad} I_d + M_{ad} I_f + \sum_{n=2}^{n-1} M_{ad} I_{nd}$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$\phi_{nd} = -L_{nd} I_{nd} + \frac{3}{2} M_{ad} I_d + M_{ad} I_f + \sum_{n=2}^{n-1} M_{ad} I_{nd}$$

$$\phi_{1q} = -L_{1q} I_{1q} + \frac{3}{2} M_{aq} I_q + \sum_{j=2}^m M_{aq} I_{jq}$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\phi_{mq} = -L_{mq} I_{mq} + \frac{3}{2} M_{aq} I_q + \sum_{j=1}^{m-1} M_{aq} I_{jq}$$

$$j p \dot{\delta} + K_c p \delta = T_m - \frac{3}{2} (\phi_d I_q - \phi_q I_d)$$

Sistema Nº 1

Embora tenha havido várias modificações neste sistema de equações para simulação de máquinas síncronas, ele é base para toda representação nos eixos "d" e "q".

2.2.2 - EQUAÇÕES DA MÁQUINA EM P. U.

Em todo estudo de máquina síncrona, seja em computador analógico ou digital, colocar as equações representativas do sistema em por unidade (P.U.), permite tornar a velocidade do rotor em regime, igual a unidade e as indutâncias numericamente iguais às reatâncias.

A obtenção das equações da máquina em P.U., é feita dividindo-as pelas respectivas bases.

Considerando-se, que a máquina usada neste trabalho tem um enrolamento amortecedor em cada eixo, o sistema Nº 1 torna-se:

$$\frac{1}{\omega_s} p \phi_d = E_d + \phi_q + \frac{p\delta}{\omega_s} \phi_q + R_d I_d$$

$$\frac{1}{\omega_s} p \phi_q = E_q - \phi_d - \frac{p\delta}{\omega_s} \phi_d + R_q I_q$$

$$\frac{1}{\omega_s} p \phi_f = E_f - R_f I_f$$

$$\frac{1}{\omega_s} p \phi_{1d} = -R_{1d} I_{1d}$$

$$\frac{1}{\omega_s} p \phi_{1q} = -R_{1q} I_{1q}$$

$$I_d = \frac{-\phi_d}{X_d} + \frac{X_{ad}}{X_d} I_f + \frac{X_{ad}}{X_d} I_{1d}$$

$$I_q = \frac{-\phi_q}{X_q} + \frac{X_{aq}}{X_q} I_{1q}$$

$$I_f = \frac{\phi_f}{f} + \frac{X_{ad}}{X_f} I_d - \frac{X_{ad}}{X_f} I_{1d}$$

$$I_{1d} = \frac{\phi_{1d}}{X_{1d}} + \frac{X_{ad}}{X_{1d}} I_d - \frac{X_{ad}}{X_{1d}} I_f$$

$$I_{1q} = \frac{\phi_{1q}}{X_{1q}} + \frac{X_{aq}}{X_{1q}} I_q$$

$$p \dot{\delta} = \frac{1}{\omega_s T_y} T_m - \phi_d I_q + \phi_q I_d$$

Sistema Nº 2

Mostra-se no APÊNDICE II, alguns exemplos de obtenção das equações em P. U.

2.2.3 - TORQUE ELETROMAGNÉTICO

Sendo a potência de saída da máquina ^[5]

$$P = E_d I_d + E_q I_q + 2 E_o I_o \quad (2.1)$$

e substituindo na equação acima, os valores de E_d e E_q do sistema

Nº 2 , obtêm-se:

$$P = I_d p \phi_d - (1 + s) \phi_q - R I_d + I_q p \phi_q + (1 + s) \phi_d - R I_q + 2 I_o p \phi_o - R I_o \quad (2.2)$$

Dividindo-se a equação acima pela velocidade do rotor, obtêm-se o torque eletromagnético de um gerador.

$$T_e = \phi_d I_q - \phi_q I_d \quad (2.3)$$

2.2.4 - EQUAÇÃO ELETROMECAÂNICA DA MÁQUINA

A equação eletromecânica de uma máquina síncrona leva em conta o conjugado de inércia, o conjugado eletromagnético resultante da conversão de energia, e o conjugado mecânico do eixo do gerador.

$$T_{in} = T_{eixo} - T_e \quad (2.4)$$

Entretanto, como se está interessado não só em condições de regime, como também em condições transitórias, a equação encontrada deverá servir para os dois casos a serem considerados. Sabe-se que se um gerador não está funcionando em regime sua frequência não é constante, daí não ser válido considerar como referência o movimento do rotor. Devido a esse fato, deve-se tomar outro referencial que gire com velocidade síncrona, embora o movimento do rotor seja assíncrono^[6].

Do gráfico apresentado na Fig. 1, onde ω_s é o eixo síncrono, deslocado da fase A. depois de um tempo t de funcionamento assíncrono, pode-se escrever:

$$\delta = \gamma - \omega_s t - \pi/2 \quad (2.5)$$

Derivando-se a expressão acima sucessivamente, relaciona-se a frequência com o ângulo de carga.

$$p\delta = p\gamma - \omega_s$$

$$p\dot{\delta} = p\dot{\gamma}$$

Por outro lado, sabe-se que o conjugado de inércia de uma máquina síncrona é o produto da aceleração angular pelo momento de inércia

$$T_{in} = J \omega$$

Lembrando que:

$$\omega = p\dot{\delta} = p\dot{\gamma}$$

Pode-se escrever

$$T_{in} = J p\dot{\delta} \quad (2.6)$$

Substituindo-se na expressão (2.4) as equações (2.3) e (2.6), obtém-se:

$$J p\dot{\delta} = T_m - (\phi_d I_q - \phi_q I_d)$$

O torque eletromagnético (T_e) tem duas componentes, uma chamada de torque de amortecimento, que varia linearmente com o afastamento de $p\delta$ da velocidade síncrona, e outra chamada de torque síncrono, resultante do próprio funcionamento da máquina síncrona, dada pela equação (2.3).

Então pode-se escrever agora a expressão geral eletromecânica de uma máquina síncrona funcionando como gerador:

$$J p\dot{\delta} = T_m (\phi_d I_q - \phi_q I_d) - K_c p\delta \quad (2.7)$$

Nota-se que a expressão acima para uma máquina funcionando em condições de regime permanente, torna-se:

$$T_m = \phi_d I_q - \phi_q I_d$$

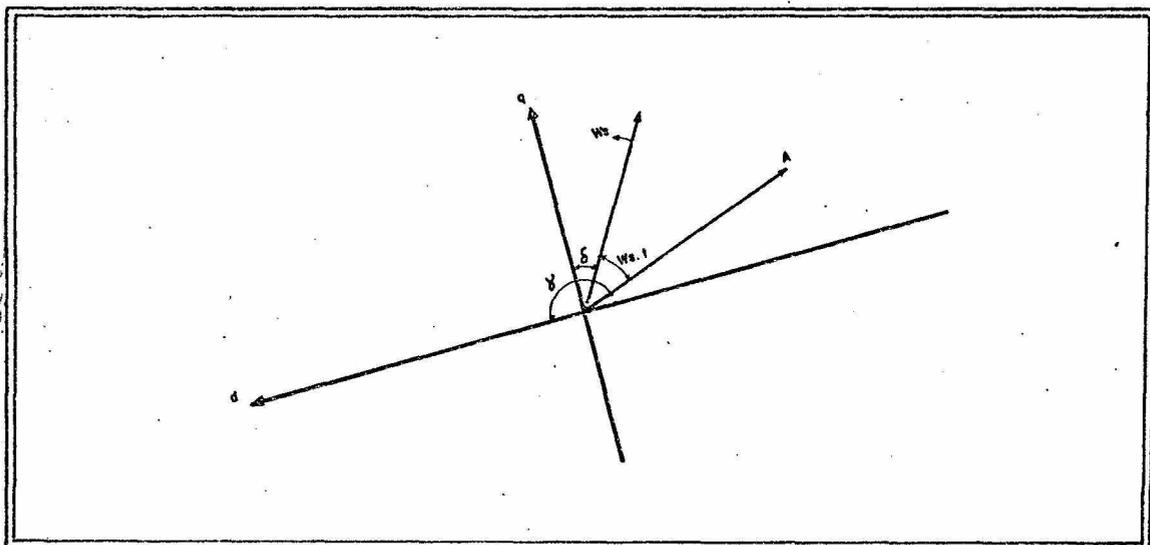


Fig. 1

2.3 - SIMULAÇÃO DA MÁQUINA

A partir das equações mostradas no sistema Nº 2, desenvolveu-se o diagrama de programação analógica para simulação da máquina.

Considera-se o problema de obter soluções em regime estático e transitório e pressupõe-se que:

- A onda de fluxo é distribuída senoidalmente no espaço.
- São desprezíveis a saturação e a perda no ferro.

2.3.1 - A SIMULAÇÃO POR PARTES

Na simulação completa apenas da máquina, utilizou-se: 9 integradores, 6 multiplicadores, 32 potenciômetros, 6 somadores e 15 inversores.

Considerando-se que o computador usado no trabalho encontra-se incompleto, a simulação imediata de todo o processo tornou-se impossível, sendo necessário dividir o problema em três partes, correspondentes ao eixo direto, eixo de quadratura e equação do balanço de energia.

Essa solução, permitiu uma melhor visualiza

Quanto a parte referente ao eixo de quadratura, mostra-se na figura 3.

Nota-se que o único sinal de entrada é o fluxo de eixo de quadratura (ϕ_q). Leu-se os valores de corrente de eixo de quadratura (I_q), e constatou-se que a corrente do enrolamento amortecedor de eixo de quadratura (I_{1q}), e o fluxo provocado por este enrolamento (ϕ_{1q}) em regime permanente são iguais a zero.

Esta parte da simulação se tornou mais simples de que a de eixo direto, devido se estar representando o circuito de excitação apenas no eixo direto.

A parte referente à equação do balanço de energia, foi testada de três maneiras:

Simulou-se a equação do balanço de energia primeiramente, usando o simulador de função seno e cosseno do próprio computador.

Colocou-se convenientemente no diagrama analógico representativo da equação do balanço de energia da figura 4 e obteve-se os resultados esperados.

A segunda maneira de representar esta parte da simulação, foi usando um gerador de função. O diagrama para simulação é mostrado na figura 5.

Entretanto, as maneiras apresentadas anteriormente para representar o seno do ângulo de carga, não são corretas quando se deseja fazer testes de perda de sincronismo, que se está também interessado.

Assim, usou-se uma geração de seno implícita a partir da derivada do ângulo de carga, uma vez que a falha, mesmo que o ângulo cresça indefinidamente e rapidamente sua derivada é praticamente constante. Nesta representação foram usados dois multiplicadores e quatro integradores, fig. 6.

Apresenta-se curvas no plano de fase e do ângulo de carga do processo de sincronização, onde foi usado o diagrama da figura 6.

2.3.2 - GERADOR DE BASE DE TEMPO COM PARADAS PROGRAMÁVEIS

Com a finalidade de fazer paradas no pro-

cesso de cálculo, foi necessário confeccionar o diagrama da figura 7, possibilitando mudar as condições de funcionamento e assim simular a partida até atingir o regime permanente, fazer curto circuito e posteriormente, voltar a operação normal.

Usando a parte lógica do computador, programou-se paradas convenientes, com a finalidade de fazer mudanças nas condições de operação da máquina síncrona, sempre num mesmo ponto de cálculo.

Usou-se o próprio integrador de geração de base de tempo, para comparar as tensões reguladas nos potenciômetros do diagrama, com a tensão de saída deste integrador.

Para simular, por exemplo, curto circuito nos terminais da máquina, é necessário fazer as tensões representativas a E_d e E_q , iguais a zero. Para isso operou-se mudança de posição de algumas chaves, que permaneceram nesta posição até o valor da tensão de saída do inversor quarenta e cinco (45), dado pelo valor regulado no potenciômetro trinta e um (31), ser igual a tensão na saída do integrador trinta e três (33), quando ocorre então a segunda parada no cálculo.

O processo de resincronização, é simulado com a volta das chaves à posição primitiva, até saturar o integrador de base de tempo.

2.3.3 - OBTENÇÃO DE SENO E COSSENO DO ÂNGULO DE CARGA, A PARTIR DA DERIVADA DESTE ÂNGULO.

O ângulo do rotor de uma máquina síncrona tem um valor constante, durante a operação síncrona de regime permanente. Perdendo o sincronismo devido a uma falha como por exemplo curto circuito trifásico, este ângulo cresce indefinidamente.^[7]

Esse fato, gera um problema de como representar este ângulo do rotor em simulação analógica, uma vez que sob falha, depois de certo tempo, atingirá a tensão de saturação dos amplificadores do computador.

Entretanto, o cálculo do ângulo do rotor propriamente dito não é fundamental, desde que se obtenha a tensão representativa de seu seno e cosseno necessários à simula-

ção e perfeito conhecimento de cada parte simulada.

Colocou-se no lugar dos multiplicadores, constantes correspondentes aos valores de regime estático permanente, (determinado pelo programa digital no APÊNDICE V), que possibilitou verificar respostas exatas já conhecidas.

No entanto, a leitura dessas mesmas variáveis eram diferentes, quando se introduzia na simulação os multiplicadores.

Essas respostas incorretas, eram provocadas pela não sincronização da máquina. Consequentemente na saída do integrador sessenta e dois (62), vide diagrama analógico de simulação geral, fig. 9, obtinha-se um valor diferente de zero. Isto não deve acontecer se a máquina atinge o regime permanente.

Este valor aumentava, até atingir a tensão de saturação devido a integração deste erro.

Verificou-se que este erro era devido à não simetria na saída dos multiplicadores noventa e cinco (95) e zero quatro (04), que somados davam valor um pouco diferente do regulado no potenciômetro quarenta e três (43), onde se representa a potência de entrada na máquina (torque mecânico).

Devido a esse fato indesejável na simulação e nos sistemas reais, uma vez que deve existir sempre balanço de energia, foi introduzida uma correção nos potenciômetros noventa e três (93) e quarenta e quatro (44), para valores um pouco diferentes do real obtido no escalonamento, atenuando assim o erro e obtendo a igualdade desejada.

A parte da simulação referente ao eixo direito onde se representa além do enrolamento amortecedor o circuito de excitação é mostrado na fig. 2.

Observa-se que os únicos sinais de entrada na simulação, são a tensão de excitação (E_f) e o fluxo de eixo direto (ϕ_d), nos quais colocou-se os valores constantes de regime.

Assim foi possível ler no voltímetro os valores de fluxo provocado pelo enrolamento de excitação (ϕ_f), corrente de excitação (I_f), corrente de eixo direto (I_d), e constatar que em regime permanente, não circulam correntes pelo enrolamento amortecedor (I_{1d}), e não existe, consequentemente fluxo provocado por este enrolamento (ϕ_{1d}).

ção.

[8]
Segundo HOOG (1968), foi possível representar o seno e cosseno do ângulo de carga, a partir da derivada deste ângulo, que se tem disponível na simulação usada.

Mostra-se na figura 8, a maneira de realizar isto.

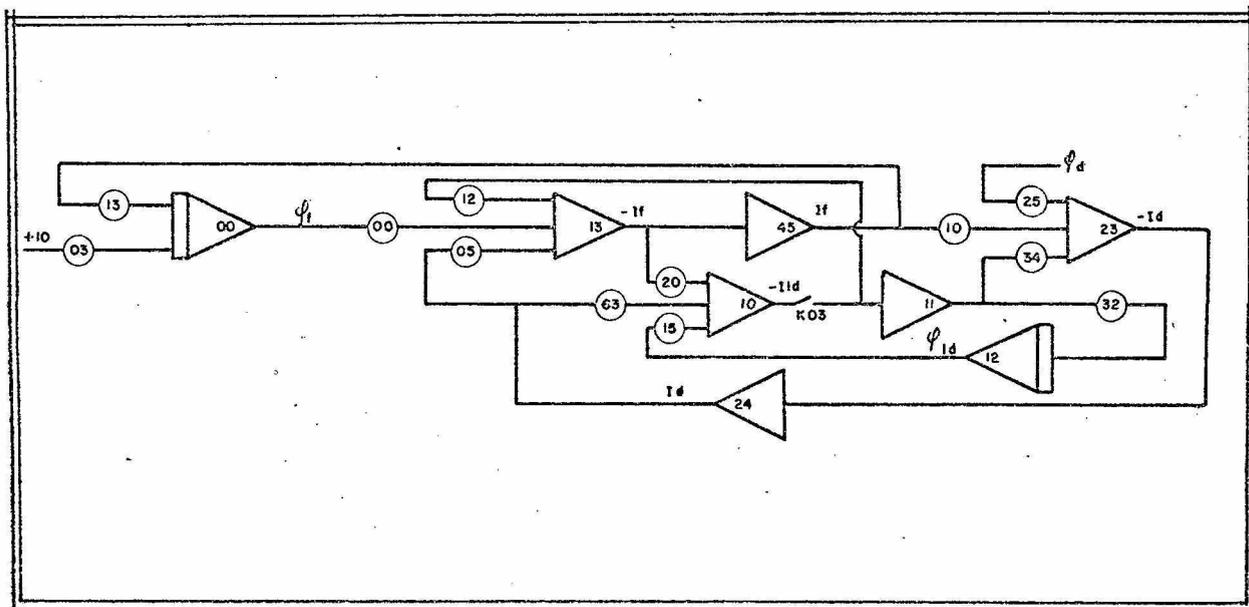


Fig. 2 - Diagrama analógico para simulação referente ao eixo direto.

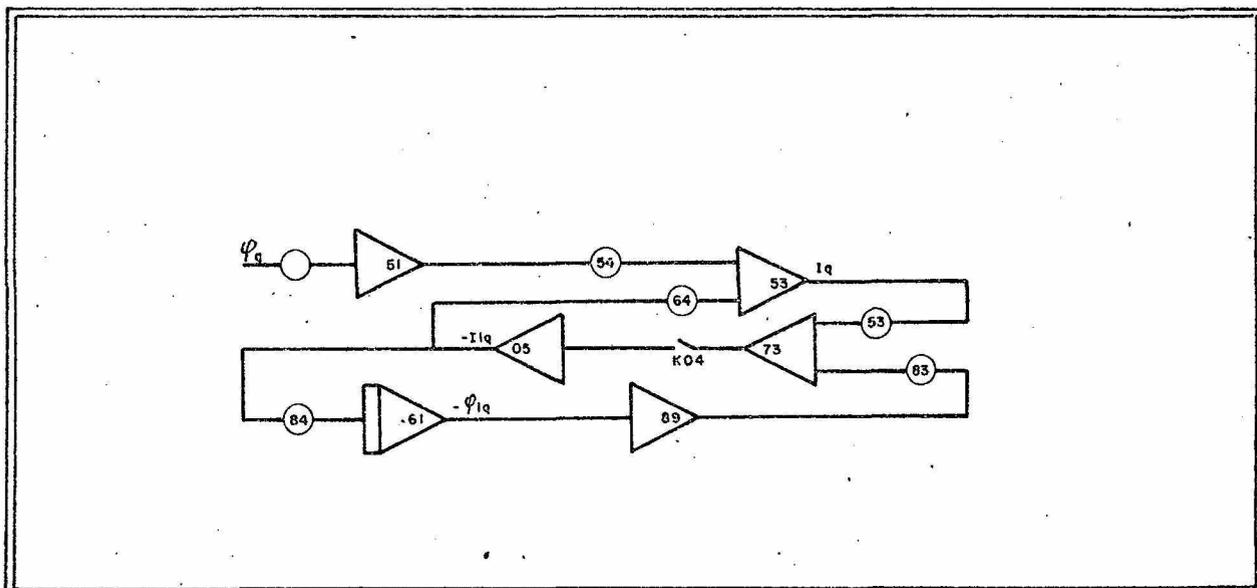


Fig. 3 - Diagrama analógico para simulação referente ao eixo de quadratura.

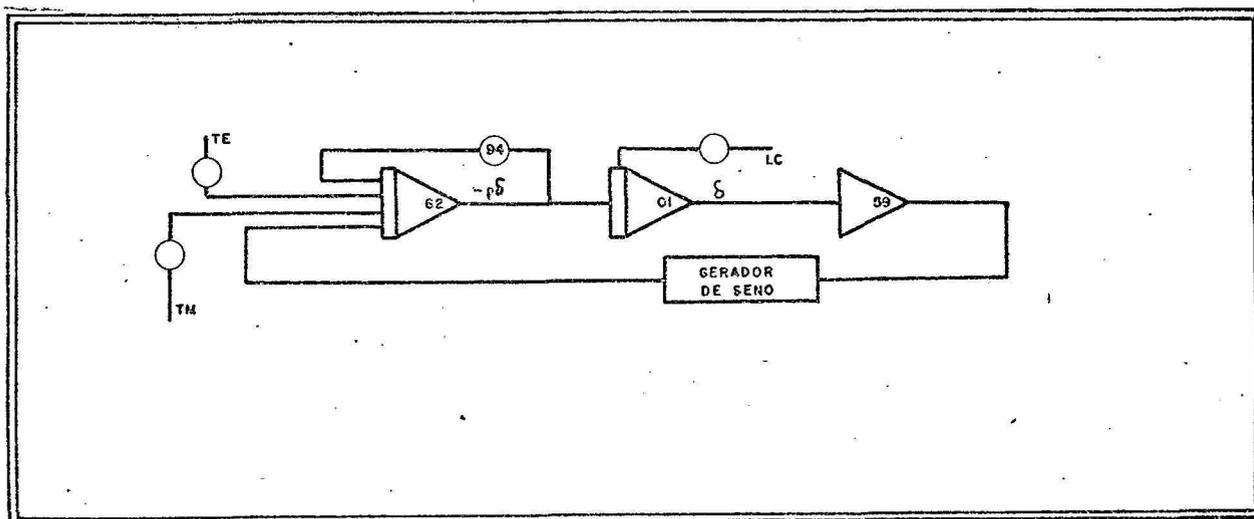


Fig. 4 - Diagrama para simulação da equação de balanço de energia usando gerador de seno

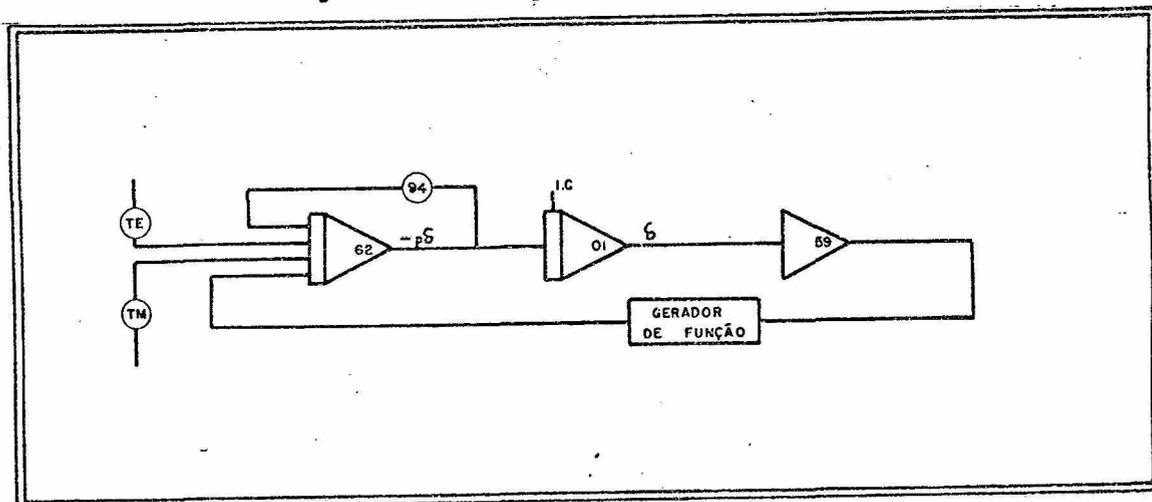


Fig. 5 - Diagrama para simulação da equação de balanço de energia usando gerador de função

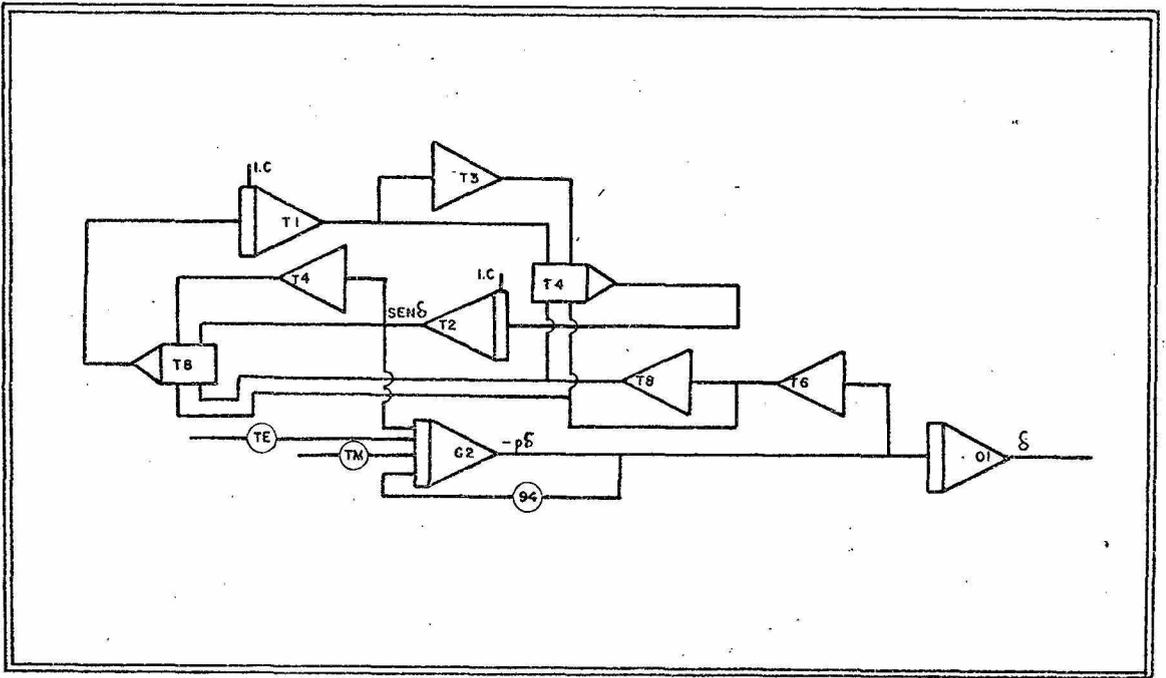


Fig. 6 - Diagrama para simulação da equação de balanço, usando geração implícita de seno e cosseno

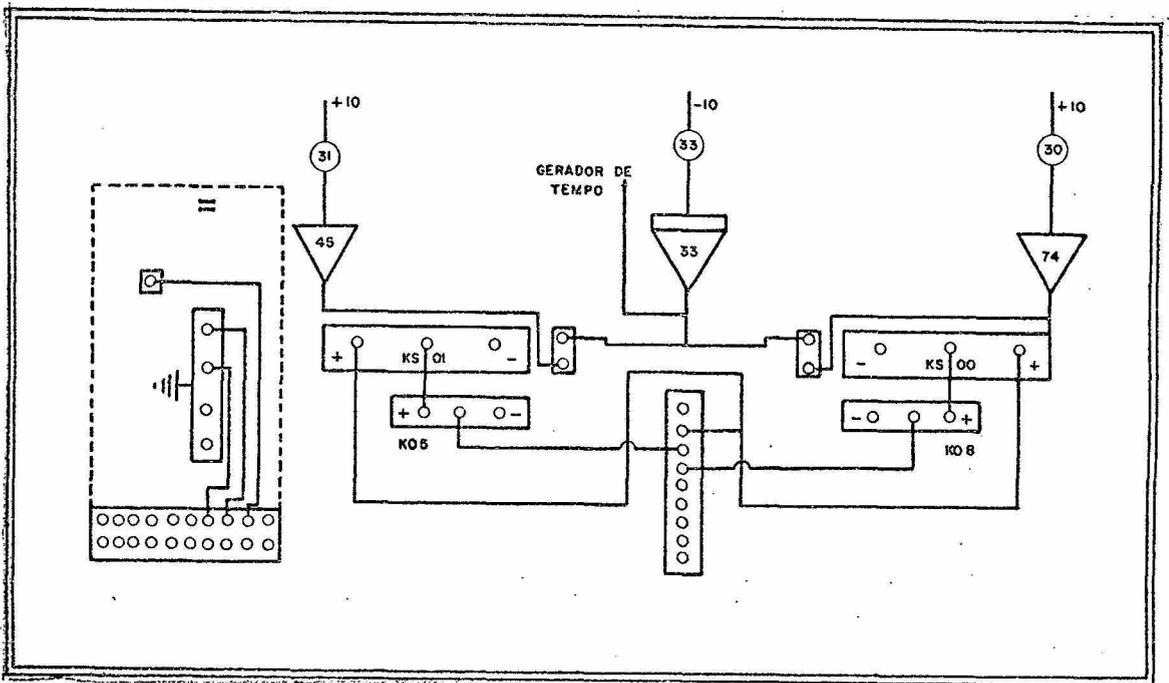


Fig. 7 - Diagrama para simulação de base de tempo com paradas programáveis

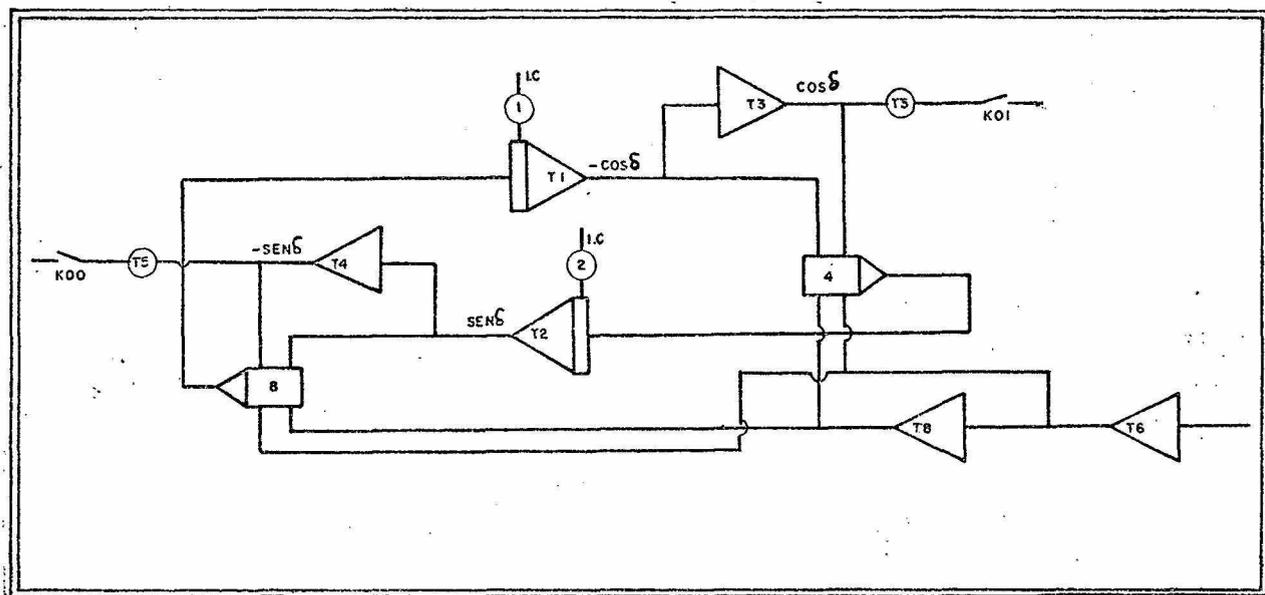


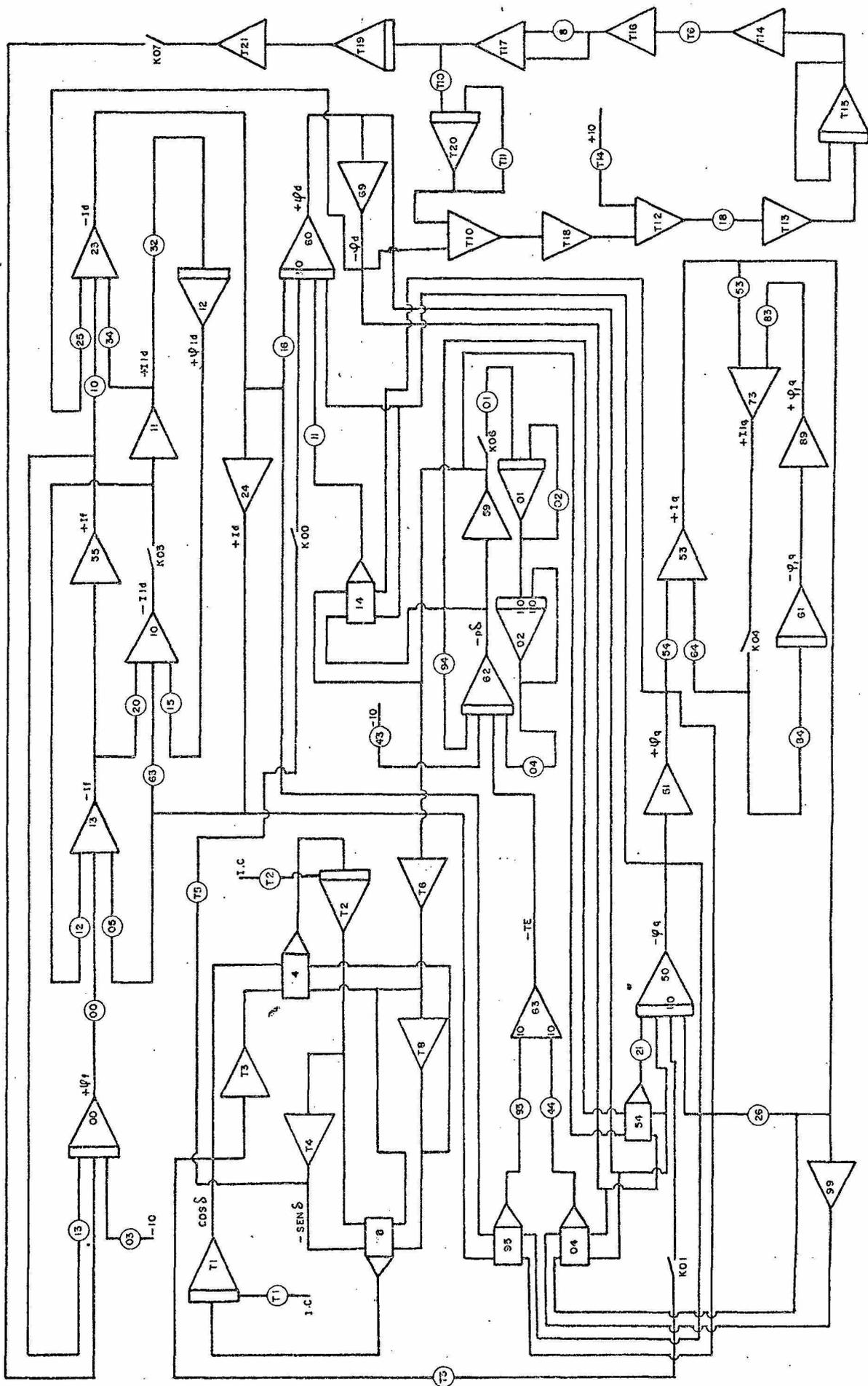
Fig. 8 - Diagrama para obtenção de seno e cosseno

2.3.4 - SIMULAÇÃO TOTAL DO PROBLEMA

O diagrama analógico para simulação total da máquina, consistiu simplesmente em juntar os diagramas analógicos representativos a cada parte já mostrada.

Apresenta-se a seguir, na figura 9, o diagrama geral em blocos, da máquina síncrona e os reguladores de tensão e velocidade.

No APÊNDICE III, apresenta-se as equações representativas do modelo, escalonadas.



— FIG. 9 —

2.3.5 - SIMULAÇÃO DE CURTO CIRCUITO

Após a máquina ter atingido o regime, foi aplicado um curto circuito trifásico em seus terminais durante 0,5 segundos.

Considera-se neste primeiro teste que a máquina está funcionando em vazio, para melhor observação e comparação com resultados obtidos por autores como KIMBARK e CONCORDIA.

Para uma máquina sem enrolamentos amortecedores, o sistema de equações Nº 2, se reduz a:

$$p \phi_d = E_o \sin \delta + \phi_q + p\delta \phi_q + R_d I_d$$

$$p \phi_q = E_o \cos \delta - \phi_d - p\delta \phi_d + R_q I_q$$

$$p \phi_f = E_f - R_f I_f$$

$$\phi_d = -X_d I_d + X_{ad} I_f$$

$$\phi_q = -X_q I_q$$

$$\phi_f = X_f I_f - X_{ad} I_d$$

$$p\delta = \frac{1}{\omega_s T_y} (T_m - \phi_d I_q + \phi_q I_d - K_c p\delta)$$

Para estabelecer curto circuito nos terminais da máquina na simulação usada, é suficiente mudar a posição das chaves de função, fig. 10.

Sabe-se que em curto circuito trifásico:

$$E_d = 0$$

$$E_q = 0$$

Como

$$E_d = E_o \sin \delta$$

$$E_q = E_o \cos \delta$$

Para simular a máquina operando em curto circuito é necessário, então, que:^[9]

$$E_o \sin \delta = 0$$

$$E_o \sin \delta = 0$$

2.3.6 - SIMULAÇÃO DO REGULADOR DE FREQUÊNCIA

Num sistema de potência, consistindo de várias máquinas ou mesmo de uma única, a condição de igualdade entre o torque entregue ao rotor da máquina com a soma do torque síncrono mais o torque assíncrono deve ser sempre satisfeita.

O problema de balanceamento de torque é facilmente solucionado se a máquina está conectada a um sistema infinito, uma vez que qualquer excesso de potência gerada sobre a potência consumida é sempre transmitida para o sistema.

Entretanto se a máquina é única no sistema qualquer diferença entre essas potências, causará aceleração ou desaceleração na máquina, desde que não haja nenhum mecanismo para balancear os torques no rotor.^[10]

Devido a esse fato, foi usado um modelo de regulador de frequência de ALDRED^[11] (1962), cujo diagrama de bloco para simulação no computador analógico é mostrado na fig. 11.

2.3.7 - SIMULAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO

Quando existe uma diferença entre a tensão terminal e a tensão necessária para que uma máquina permaneça em sincronismo (tensão de referência), o regulador atua.^[12]

Esta diferença é amplificada e usada para controlar o excitador principal.

A maneira de representar um regulador real não considerando a saturação, é como representada na figura 12.

Num sistema de potência, usa-se a tensão de saída do gerador, para alimentar o regulador que segundo suas

variações aumenta ou diminui a tensão de excitação da máquina.

Pelo modelo de simulação apresentado, para se obter esta tensão de saída seriam necessários mais três multiplicadores, que não se dispõe no momento no computador usado.

O diagrama analógico para realizar esta simulação é mostrado na figura 13.

Embora conhecendo-se todo o processo necessário para se obter a tensão terminal da máquina, o regulador usado para fins de testes e comprovações de sua influência no funcionamento do sistema simulado, foi alimentado com a tensão representativa ao fluxo de eixo direto.

Apresenta-se na figura 14, o diagrama analógico de simulação do regulador de tensão usado na simulação.

2.3.8 - SIMULAÇÃO DE PERDA DE EXCITAÇÃO

Num sistema de potência ideal um gerador não perderia a estabilidade, entretanto, esta maneira de funcionamento nos sistemas reais é impossível, uma vez que sempre ocorrem falhas, ocasionando perda de sincronismo.

Esta perda muitas vezes, não é devida ao rigor da falha, mas sim ao tempo que ela permanece no sistema.

Para teste de perda de excitação, considera-se a máquina alimentando uma carga de 0,8 P.U.

A tensão de excitação, é reduzida passo a passo, até o caso extremo de perda total dessa tensão.

Para simular esta perda, procedeu-se da seguinte maneira:

Na figura 15, E_f (03) é a tensão de excitação para a carga simulada, dada pelo programa digital, regulada para o valor determinado pelo escalonamento.

A tensão E_{f1} (04), é regulada para cada teste, com valores correspondentes às percentagens de perda de excitação, que se desejava representar.

Inicialmente, a chave de função, estava conectada ao potenciômetro onde representa-se a tensão de excitação com a qual a máquina atinge o sincronismo.

Após a máquina ter atingido o regime permanente, parou-se o processo de cálculo e mudou-se a chave para a

posição E_{fl} .

Traçou-se curvas de torque eletromagnético para os valores percentuais de perda de tensão de excitação correspondentes a vinte e cinco (25), cinquenta (50), setenta e cinco (75) e cem (100) por cento.

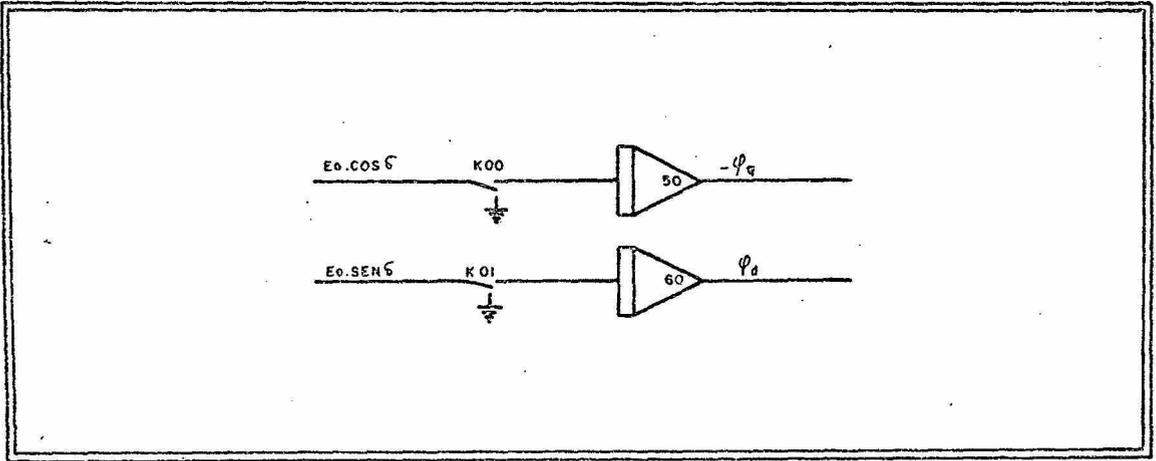


Fig. 10 - Diagrama para simulação de curto circuito

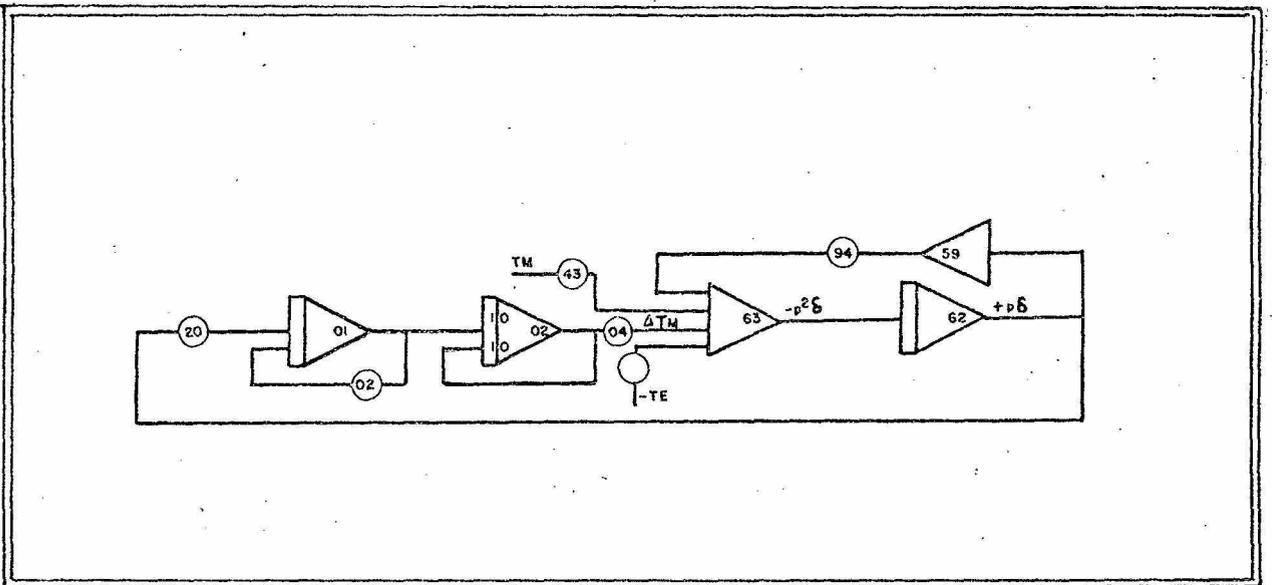


Fig. 11 - Diagrama para simulação do regulador de frequência.

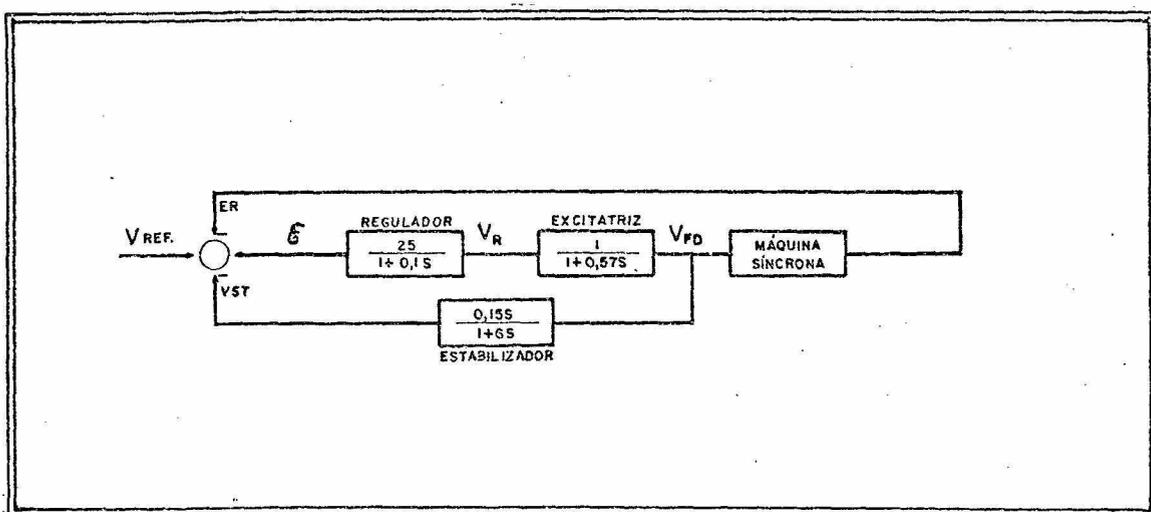


Fig. 12 - Regulador de tensão

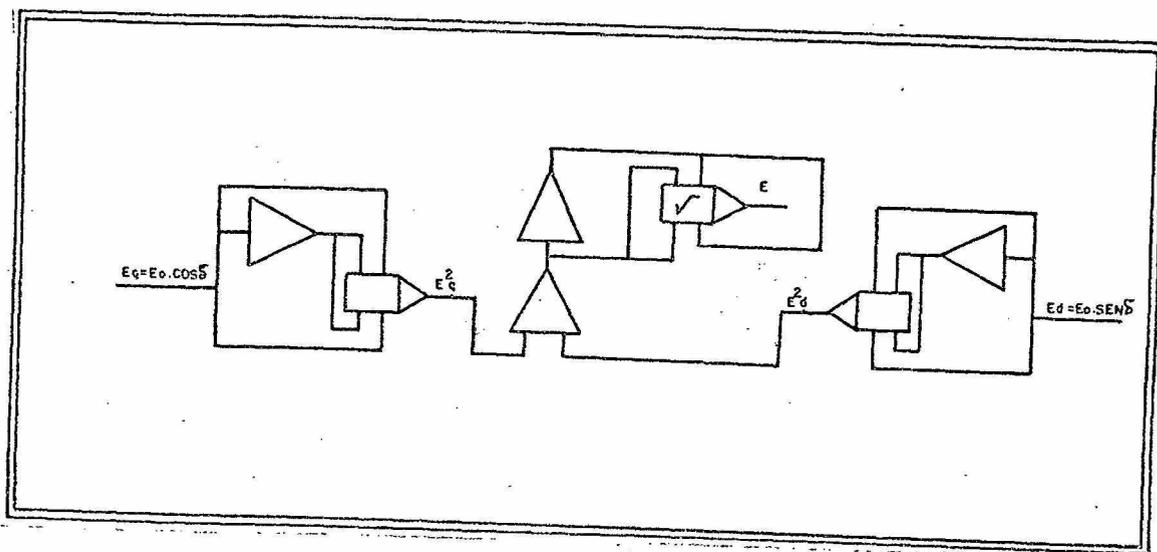


Fig. 13 - Diagrama para obtenção da tensão de saída da máquina

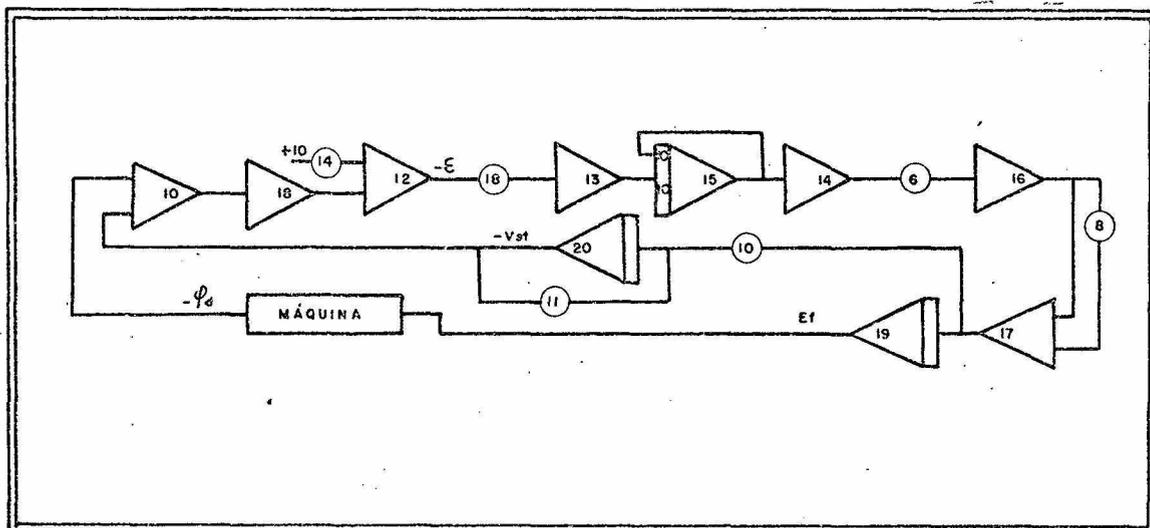


Fig. 14 - Diagrama analógico de simulação do regulador de tensão

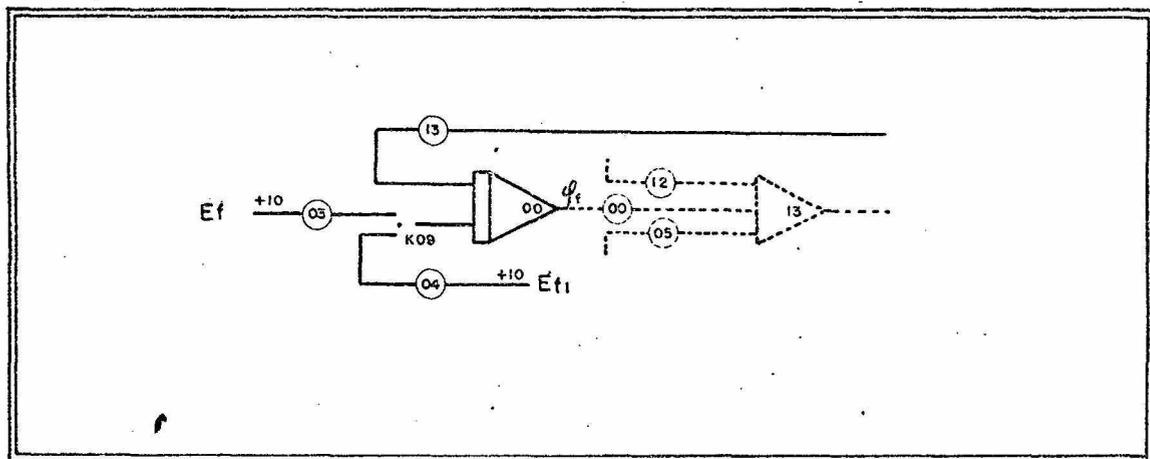
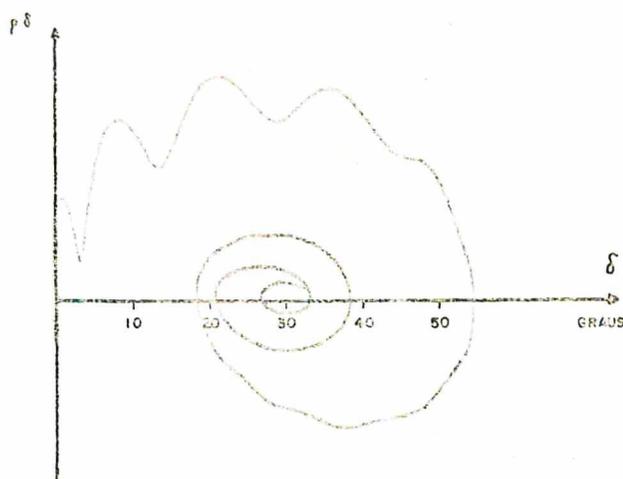


Fig. 15 - Diagrama para simulação de perda de excitação

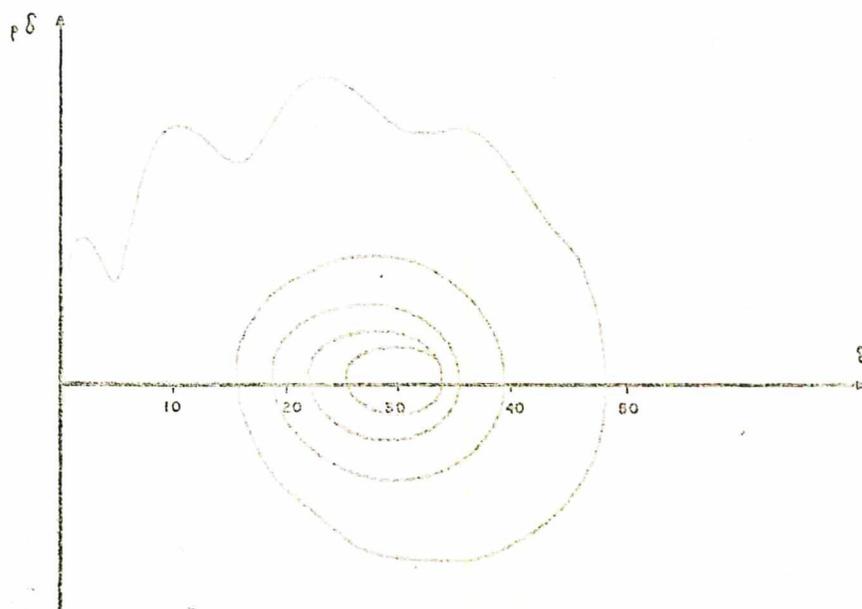
CAPÍTULO 3

3 - RESULTADOS

Os resultados obtidos da simulação, são apresentados em forma de curvas traçadas no "ploter" do computador TELEFUNKEN.

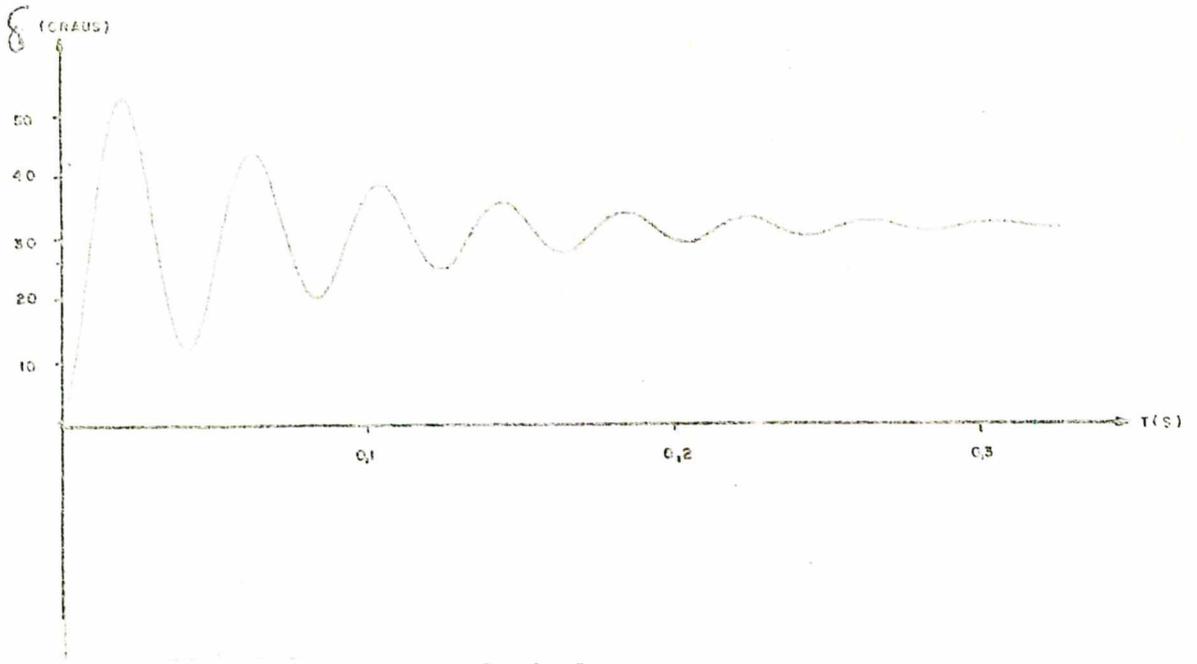


a - com enrolamentos amortecedores

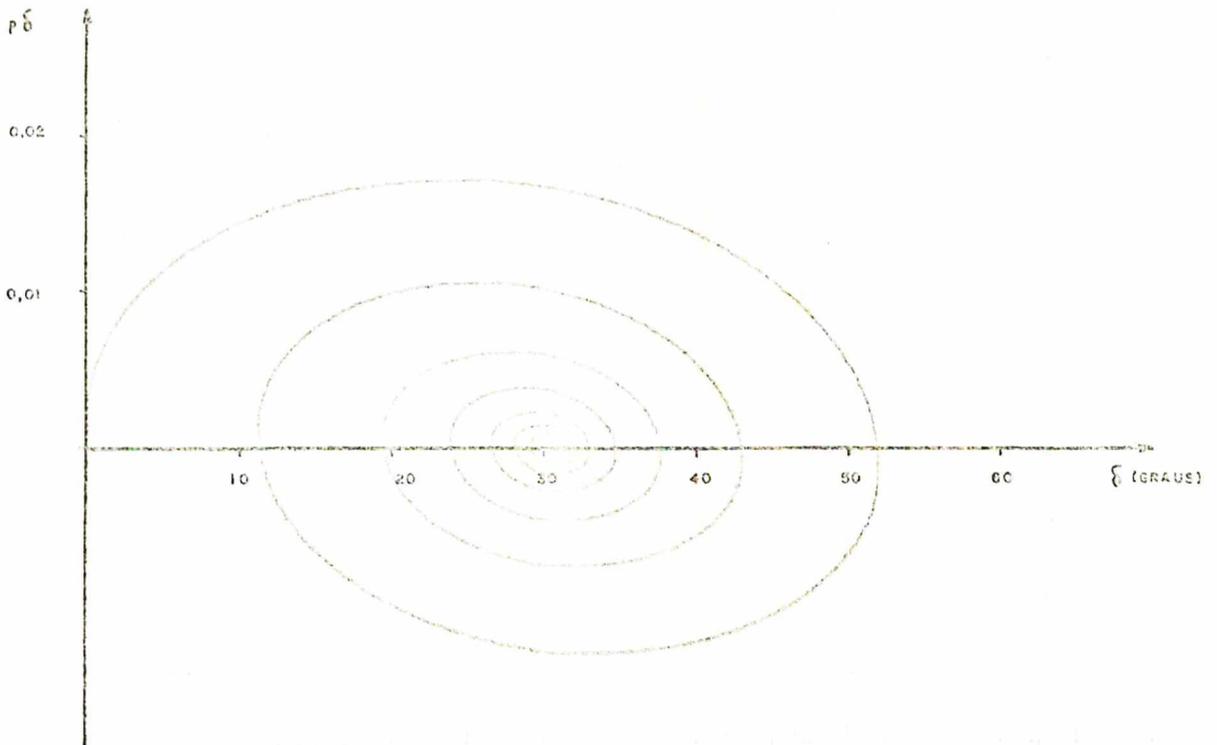


b - sem enrolamentos amortecedores

Fig. 16 - Curvas no plano de fase, onde observa-se o processo de sincronização



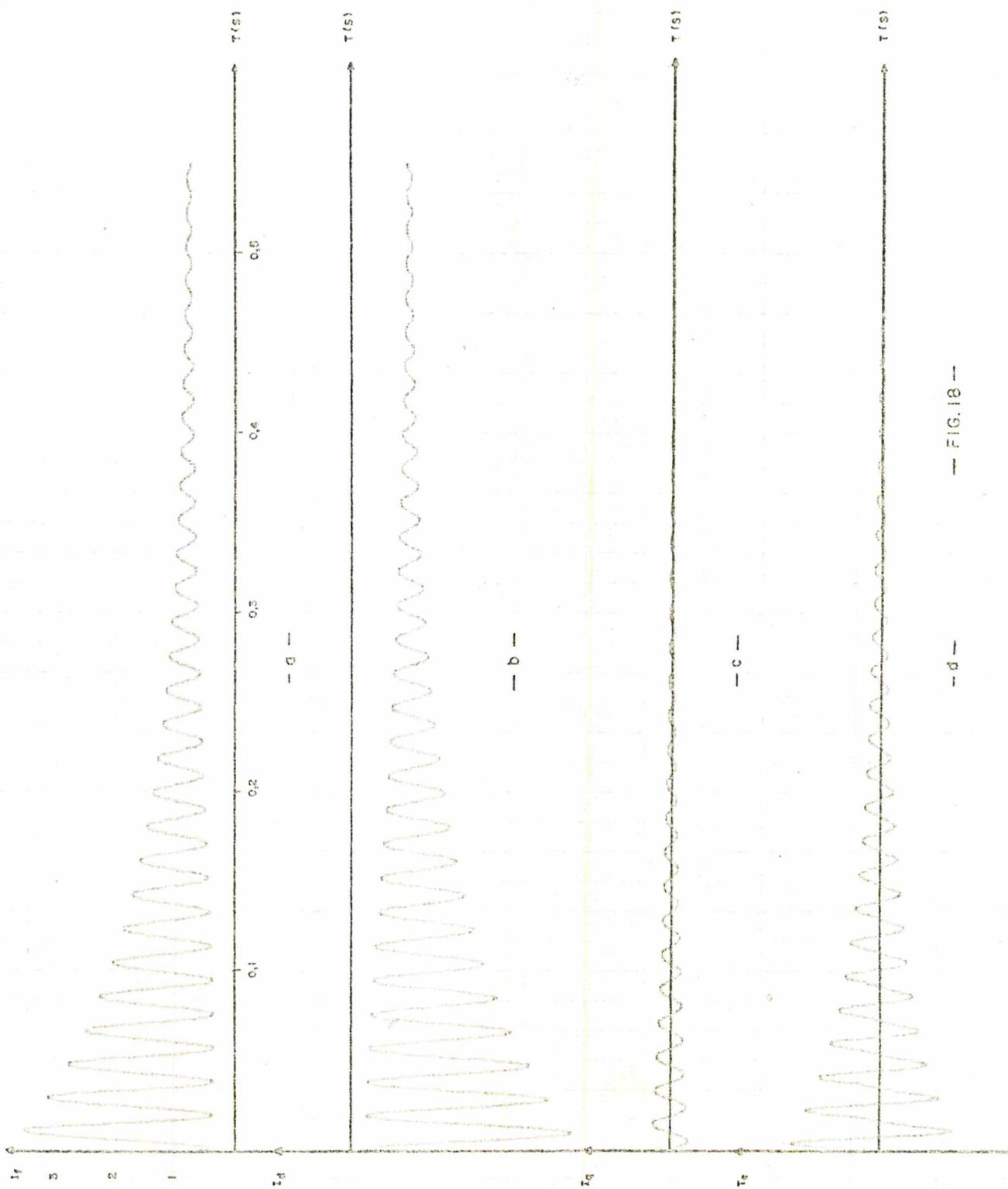
a- curva de balanço



b - curva no plano de fase

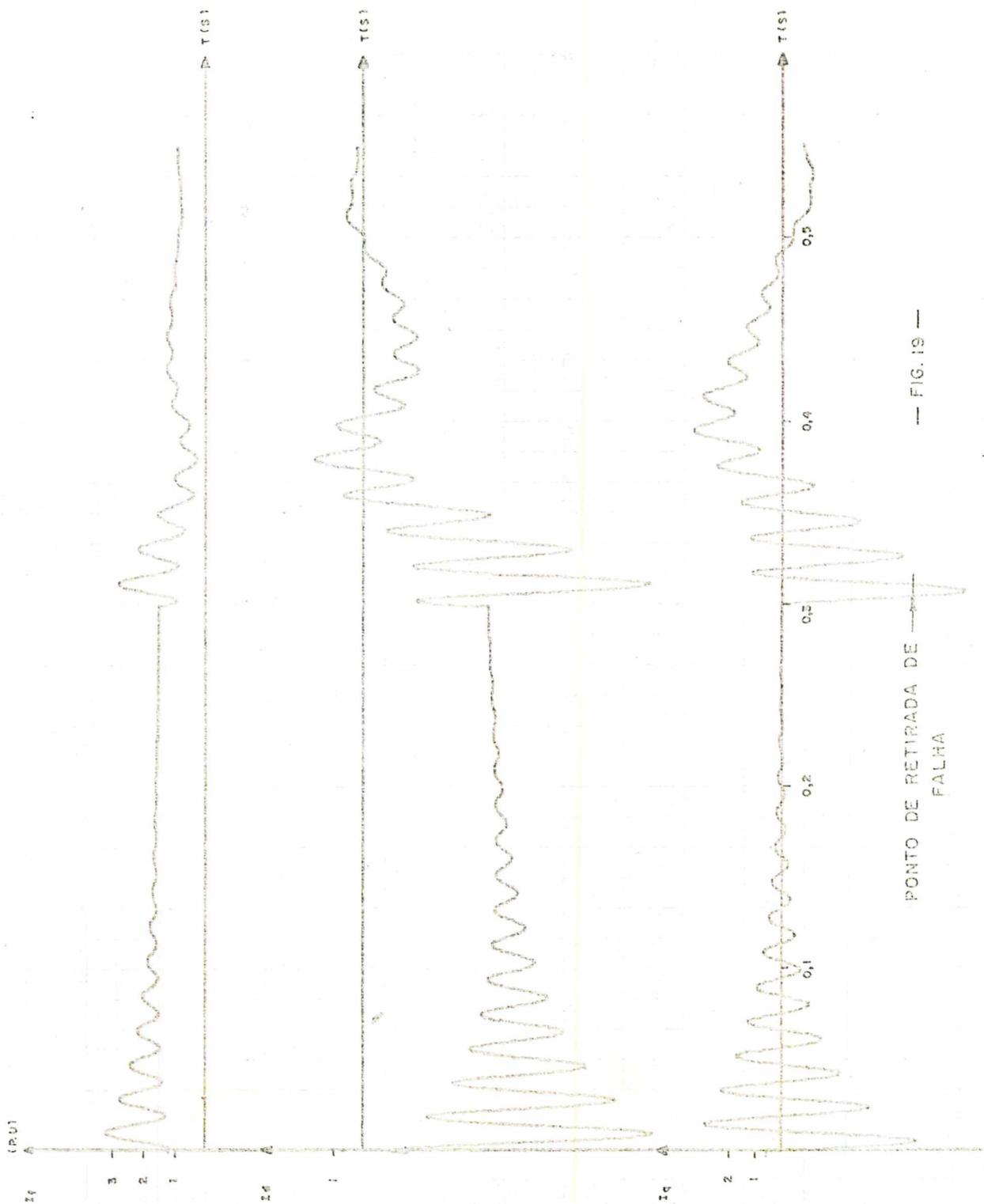
Fig. 17 - Curvas obtidas com simulação da equação de balanço, usando geração implícita de seno e cosseno

Curvas de curto circuito trifásico nos terminais da máquina funcionando a vazio, sem enrolamentos amortecedores e sem reguladores.



-- FIG. 18 --

Curvas de curto circuito trifásico nos terminais da máquina, funcionando com enrolamentos amortecedores, sem reguladores e com carga de 0,8 P.U.



— FIG. 19 —

PONTO DE RETIRADA DE
FALHA



PONTO DE RETIRADA DE FALHA

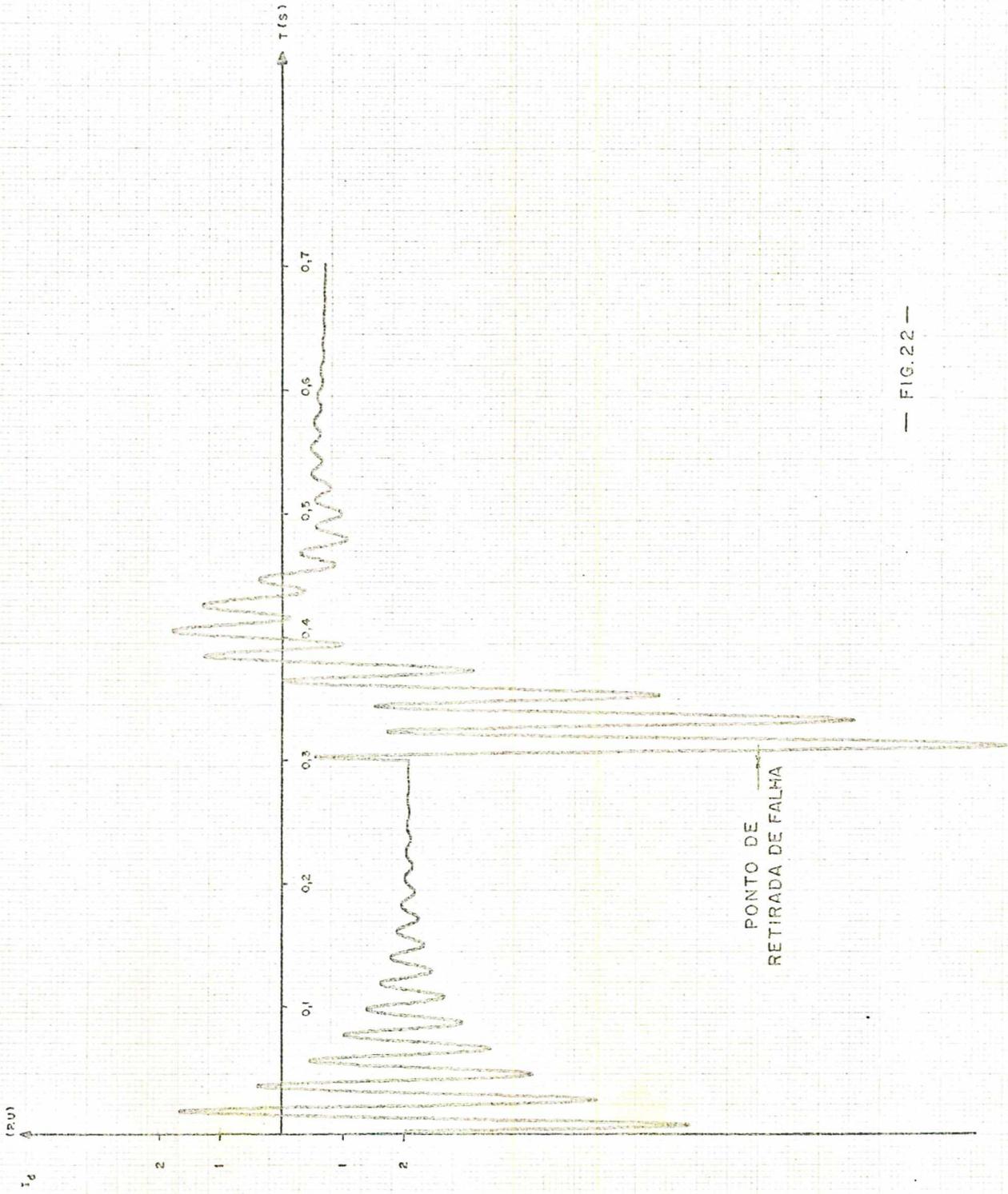
--- FIG. 20 ---

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS - UNICAMP



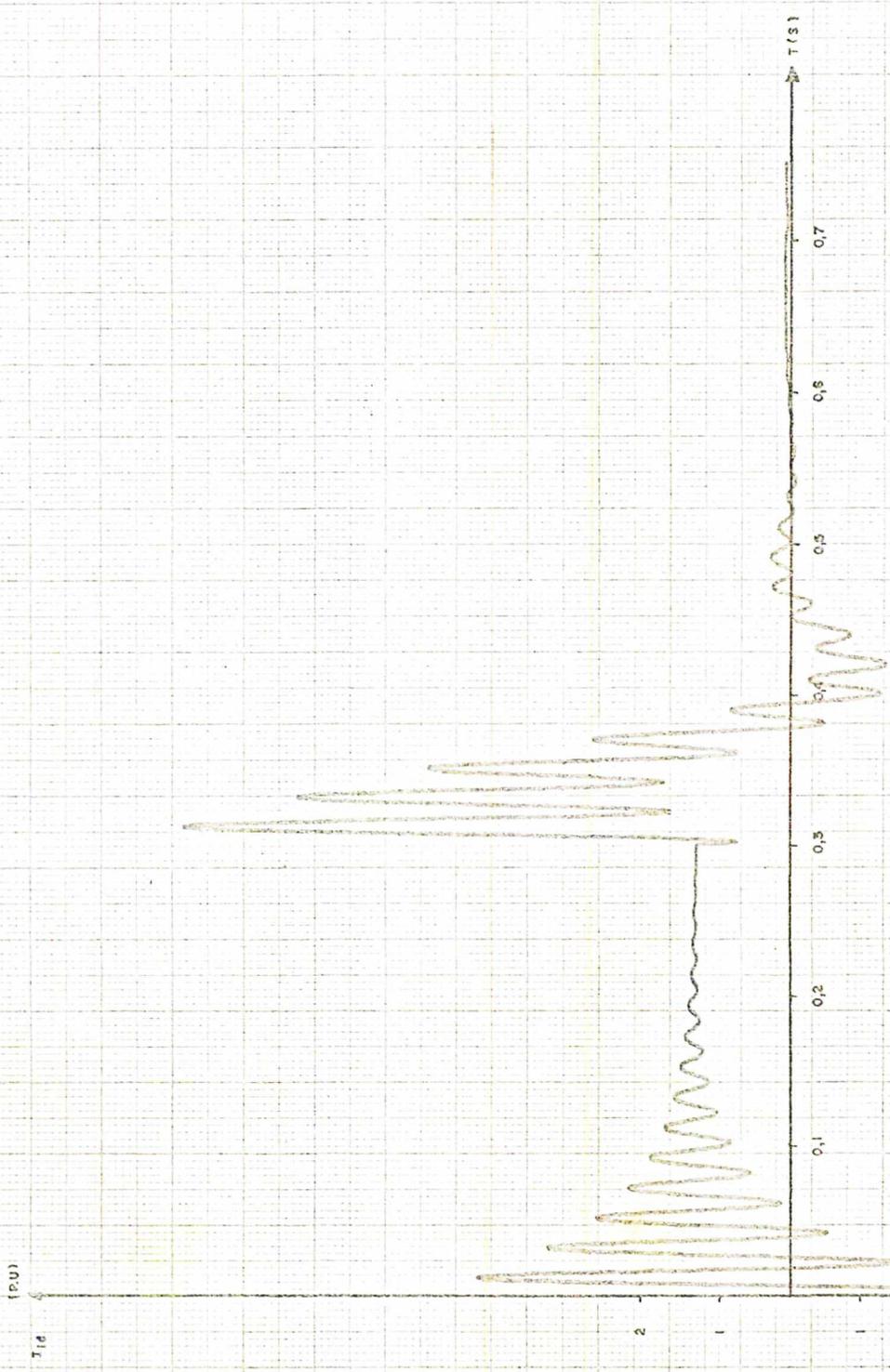
PUNTO DE RETIRADA DE   FIG. 21 --
 FALHA  FIG. 21

Curvas de curto circuito trifásico nos terminais da máquina, funcionando com reguladores, com enrolamentos amortecedores e com carga de 0,8 P.U.



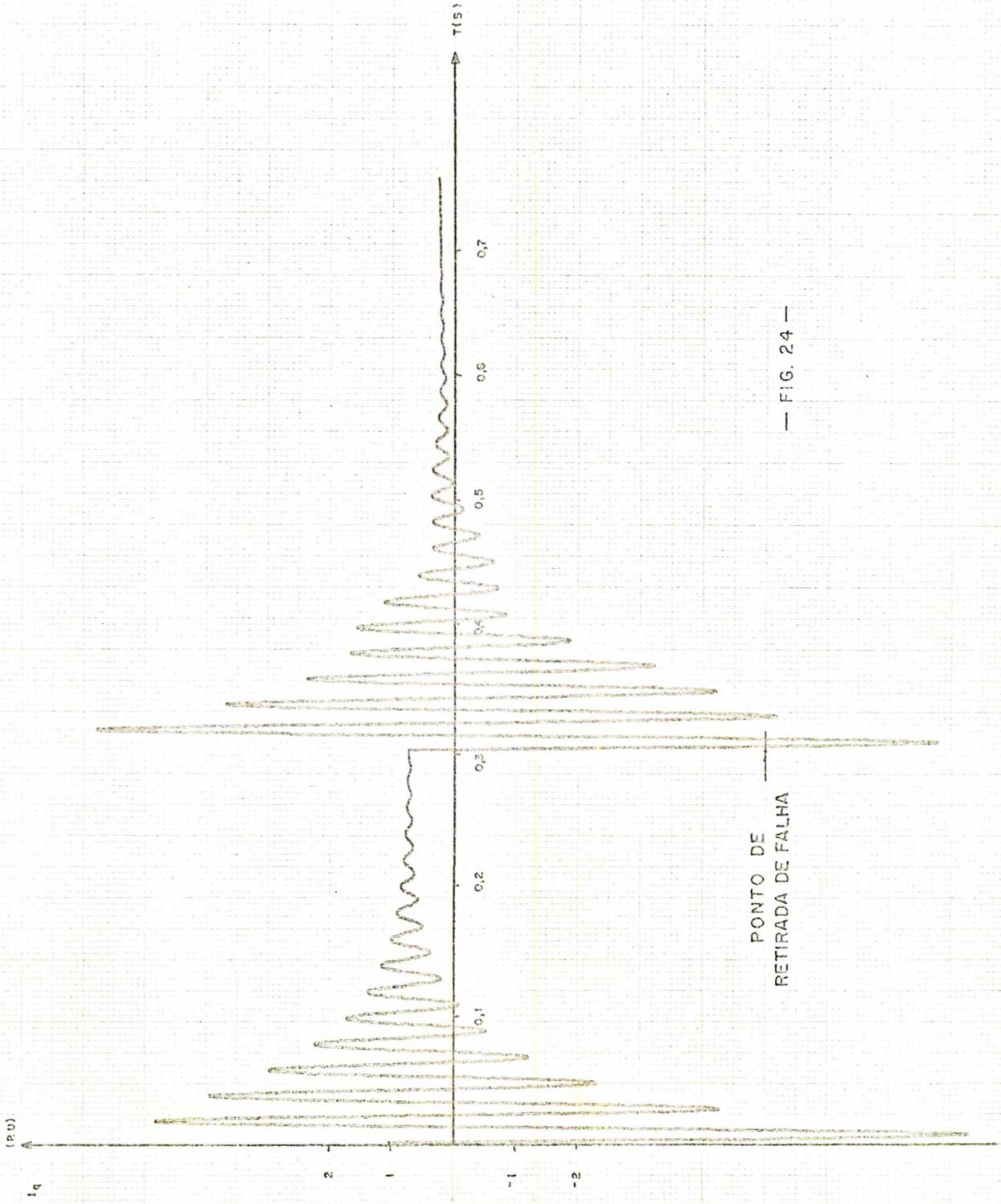
— FIG.22 —

250
200
150
100
50
0



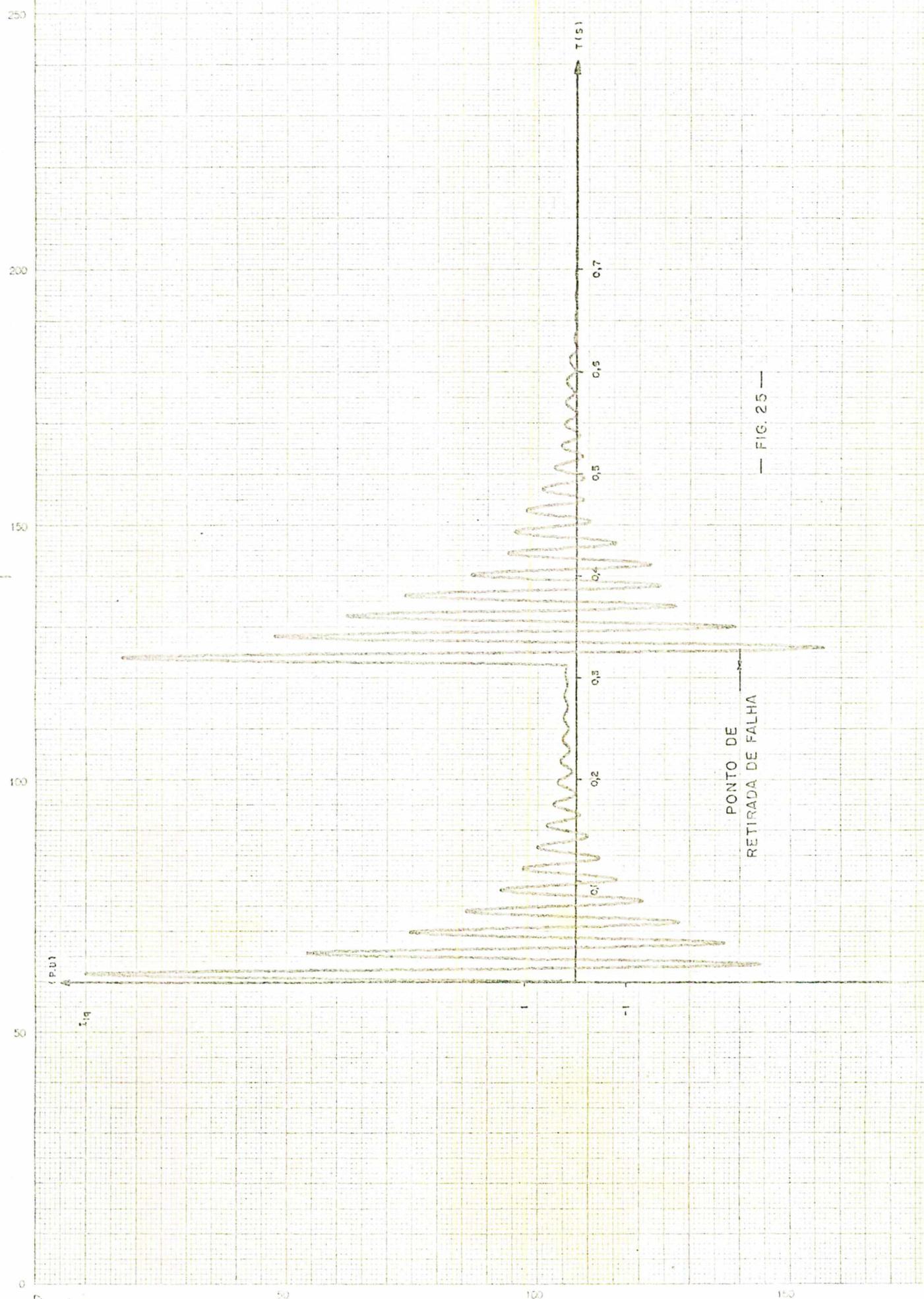
PONTO DE
RETIRADA DE FALHA

FIG. 23

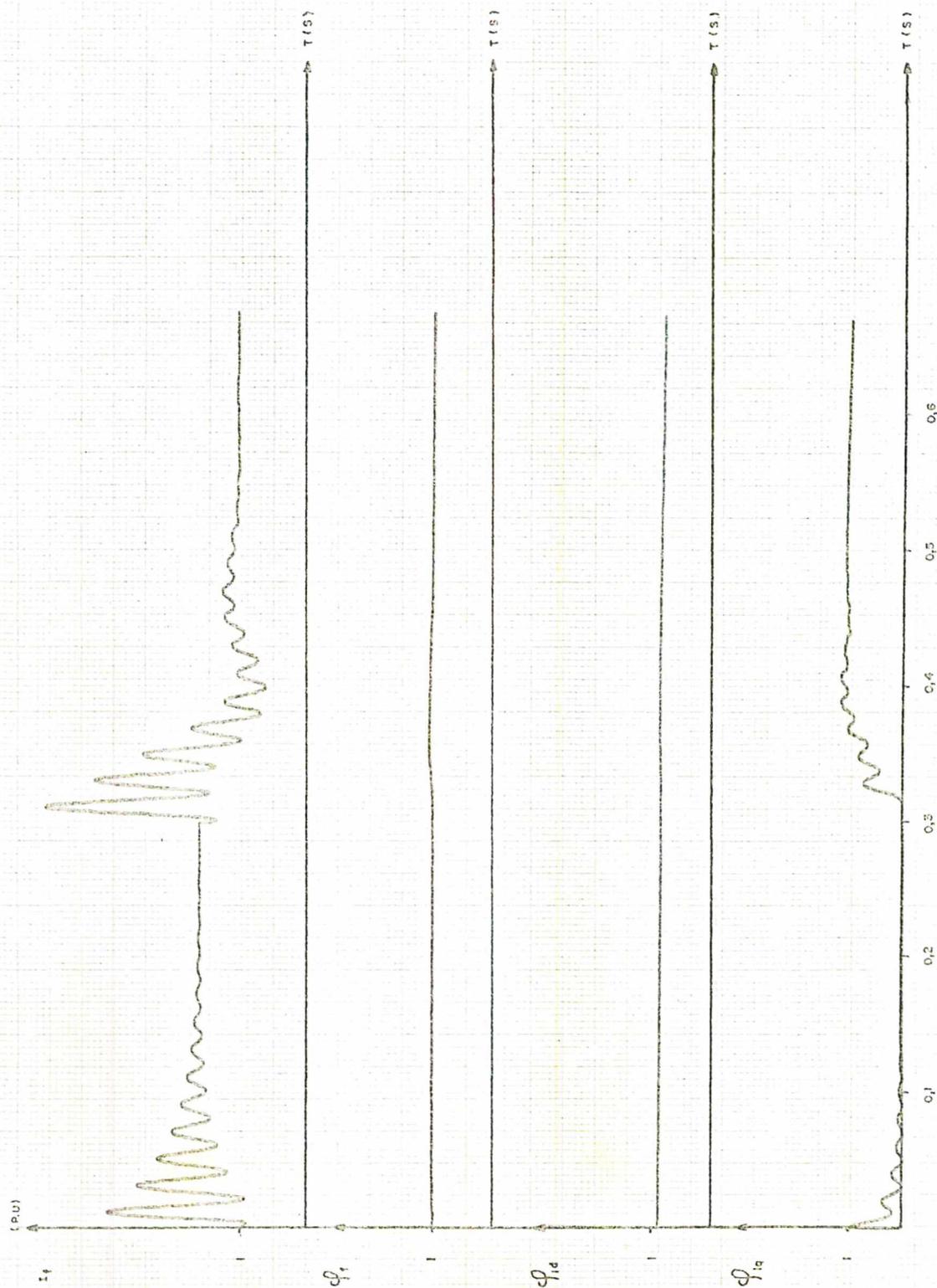


— FIG. 24 —

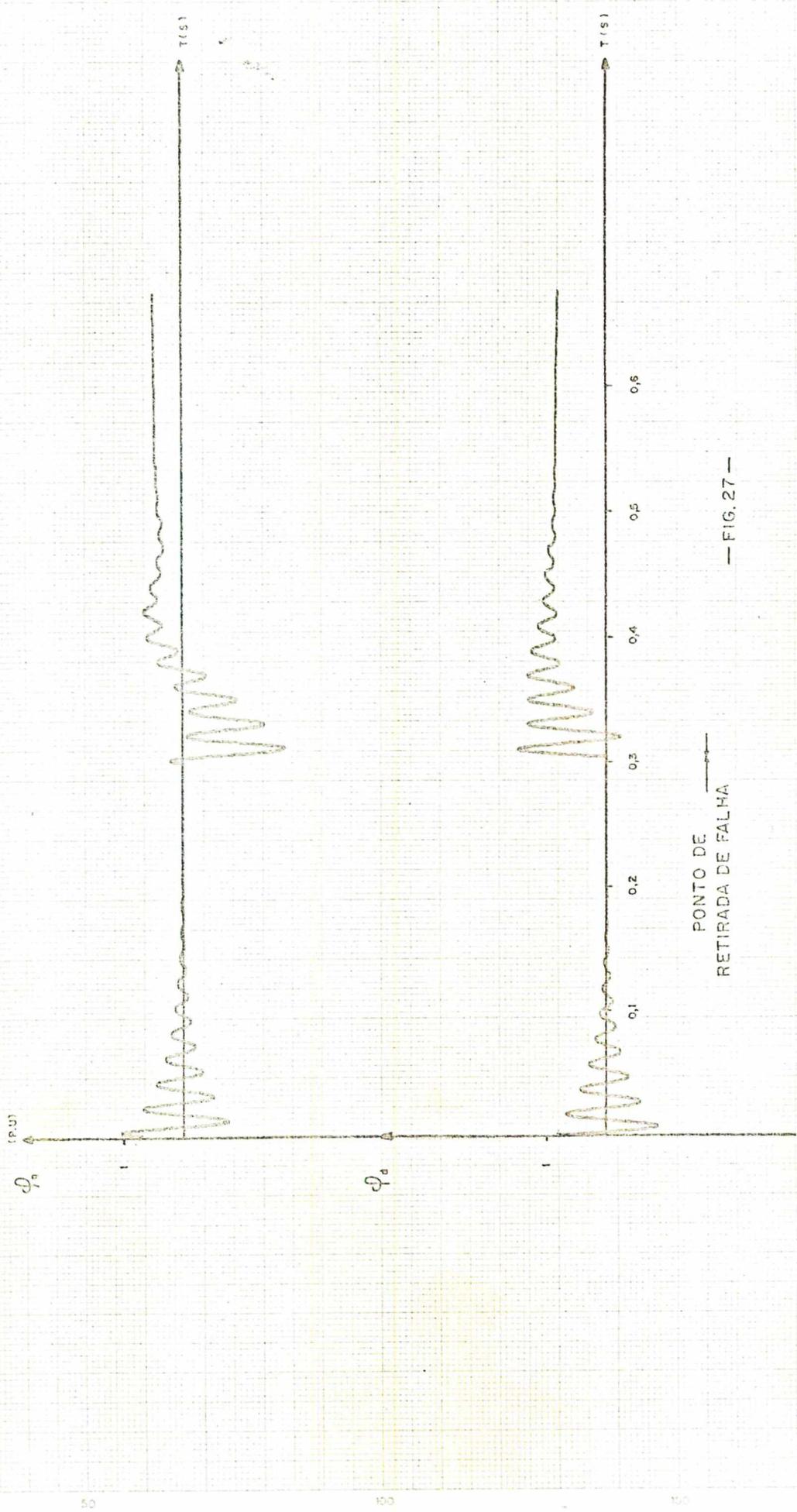
PONTO DE
RETIRADA DE FALHA



— FIG. 25 —

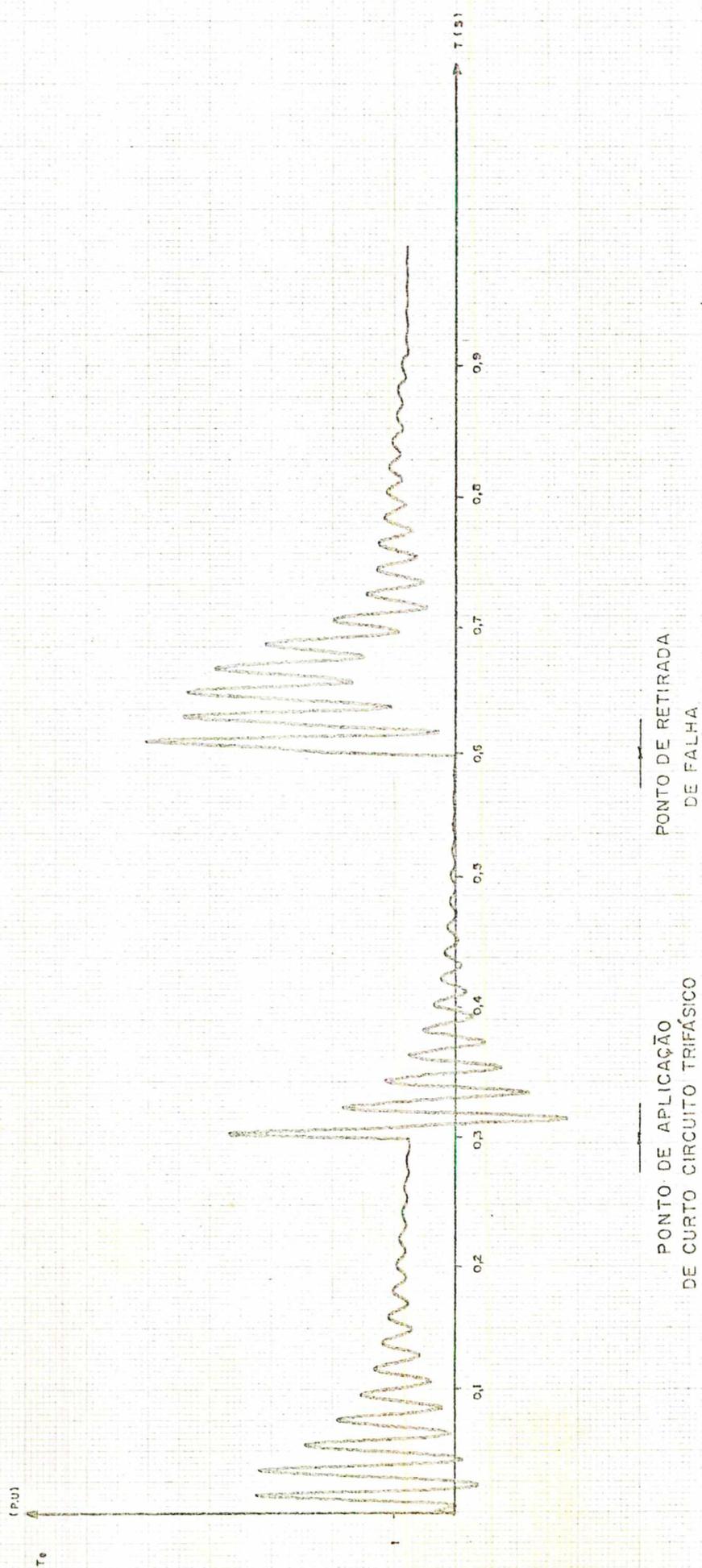


PONTO DE RETIRADA DE FALHA — FIG. 26 —



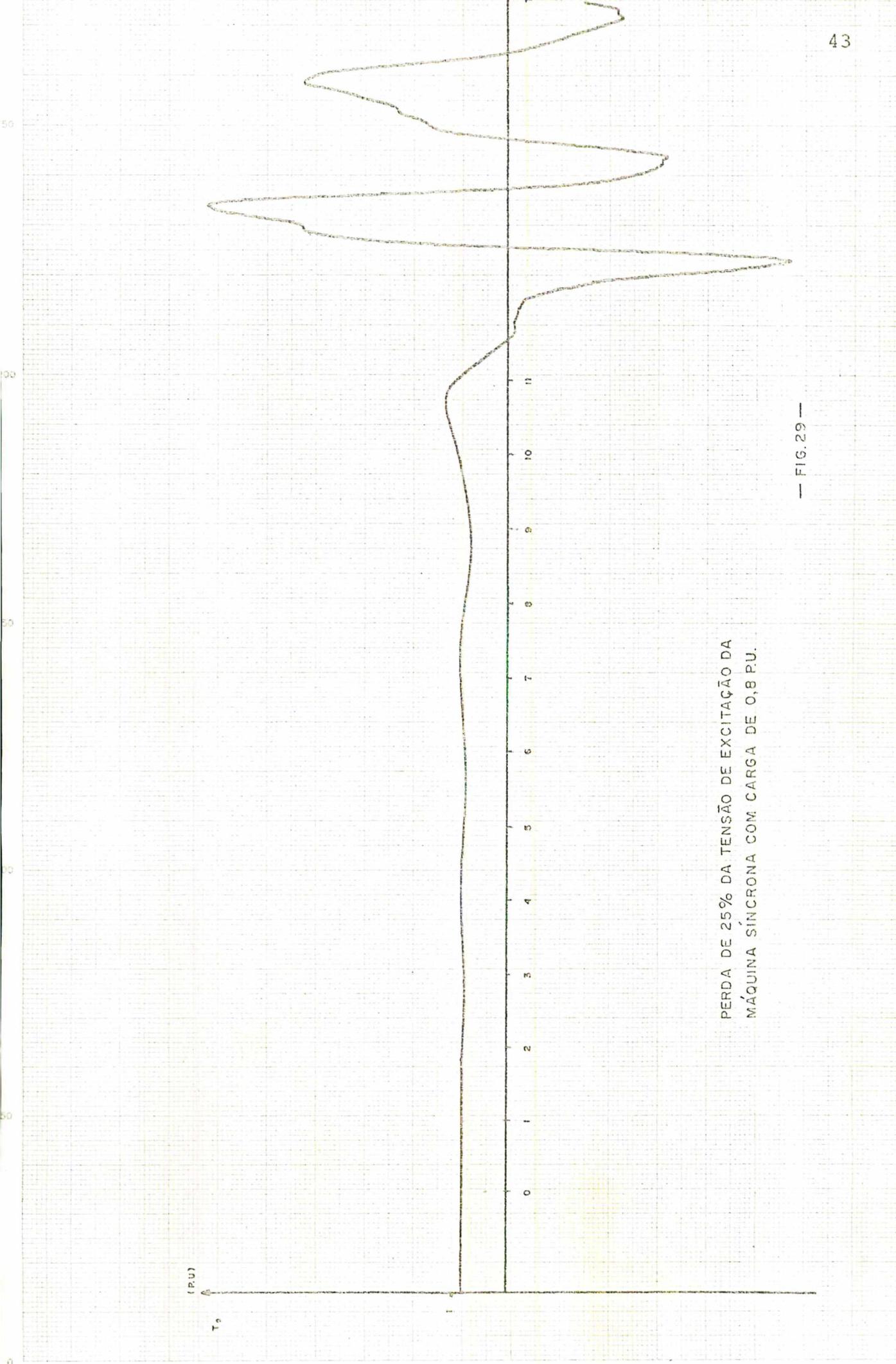
PUNTO DE RETIRADA DE FALHA — FIG. 27 —





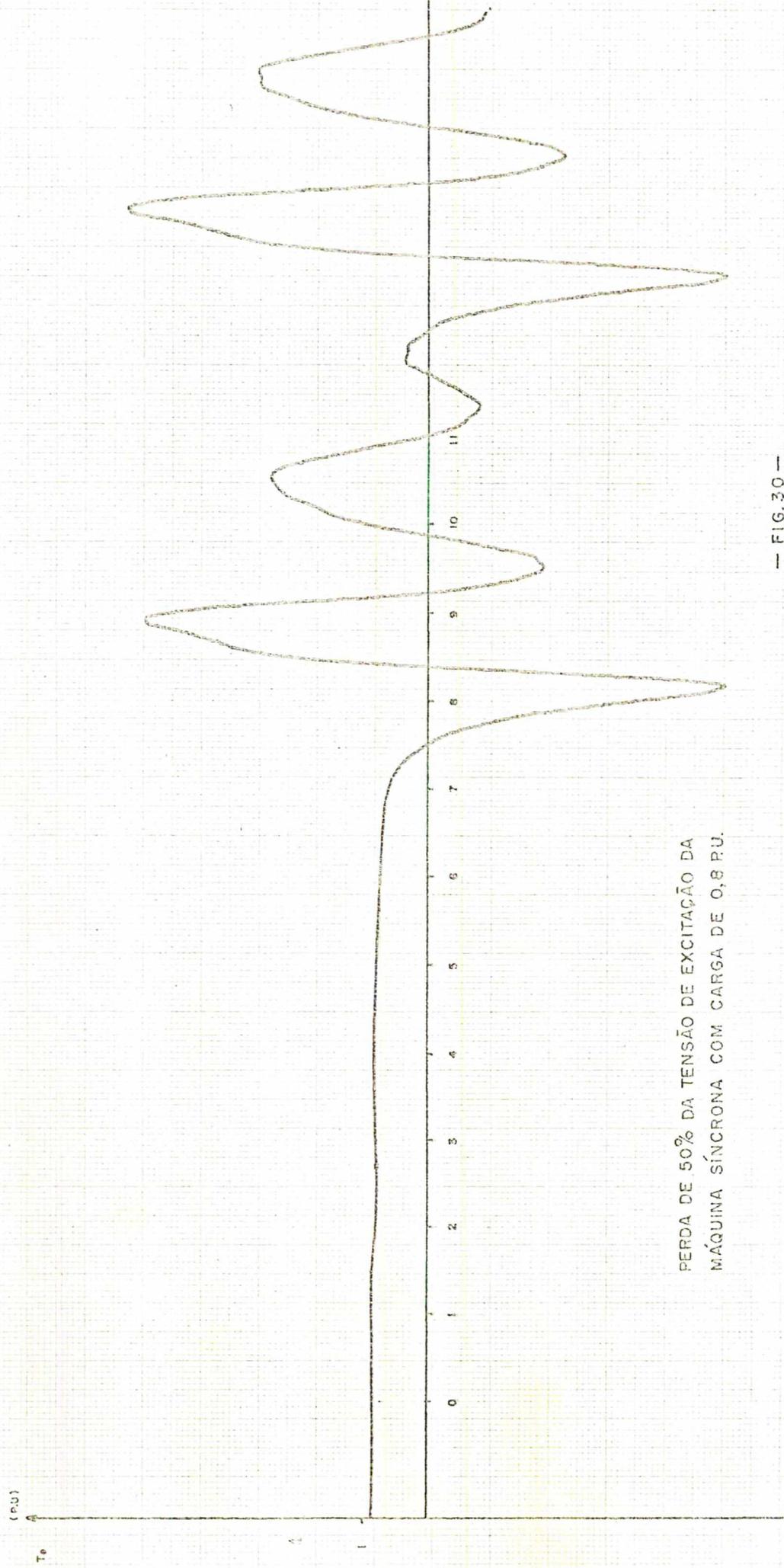
— FIG. 28 —

Curvas de teste de perda de excitação, para
a máquina funcionando com carga de 0,8 P.U.



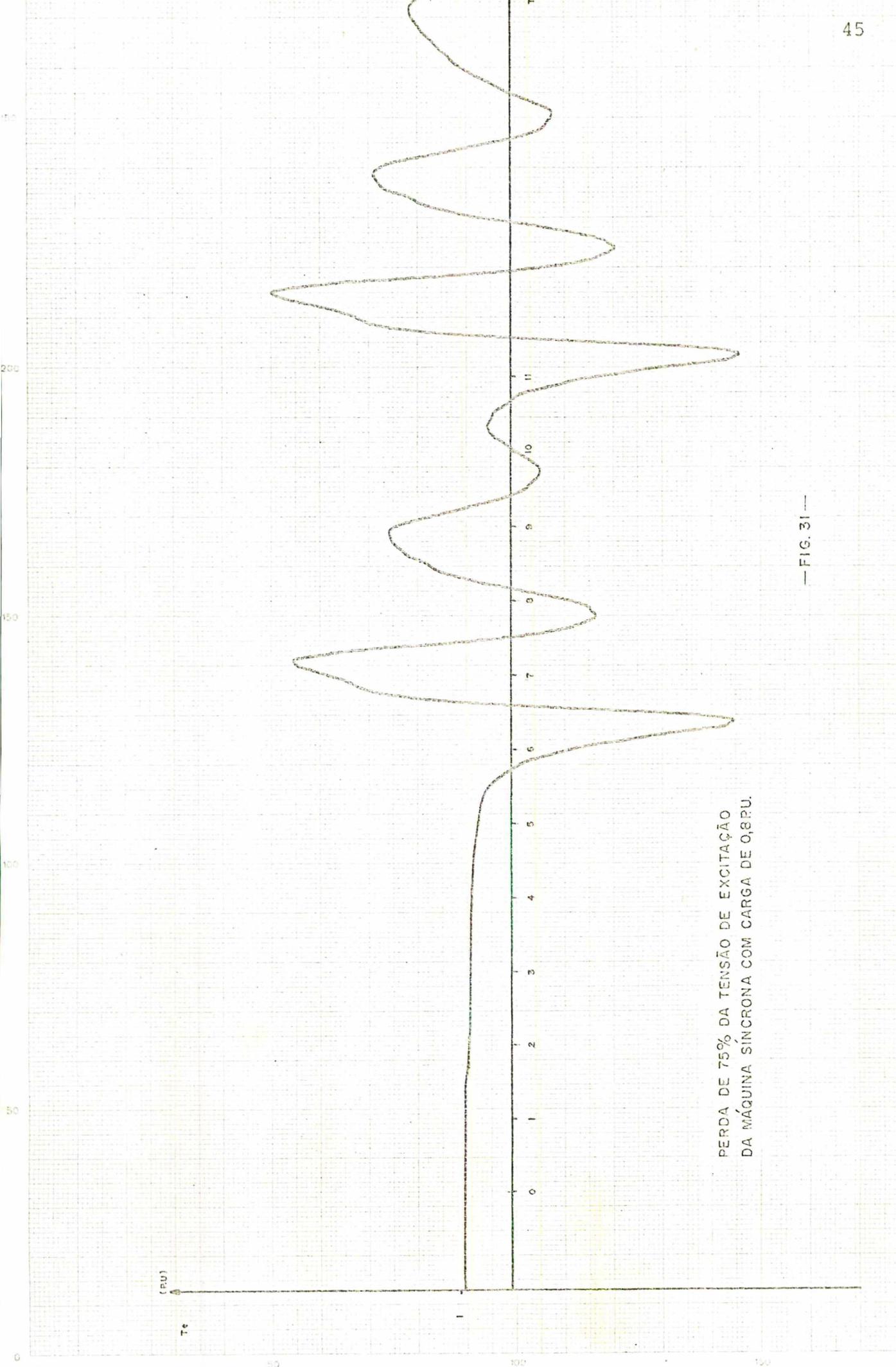
PERDA DE 25% DA TENSÃO DE EXCITAÇÃO DA
MÁQUINA SÍNCRONA COM CARGA DE 0,8 P.U.

— FIG. 29 —



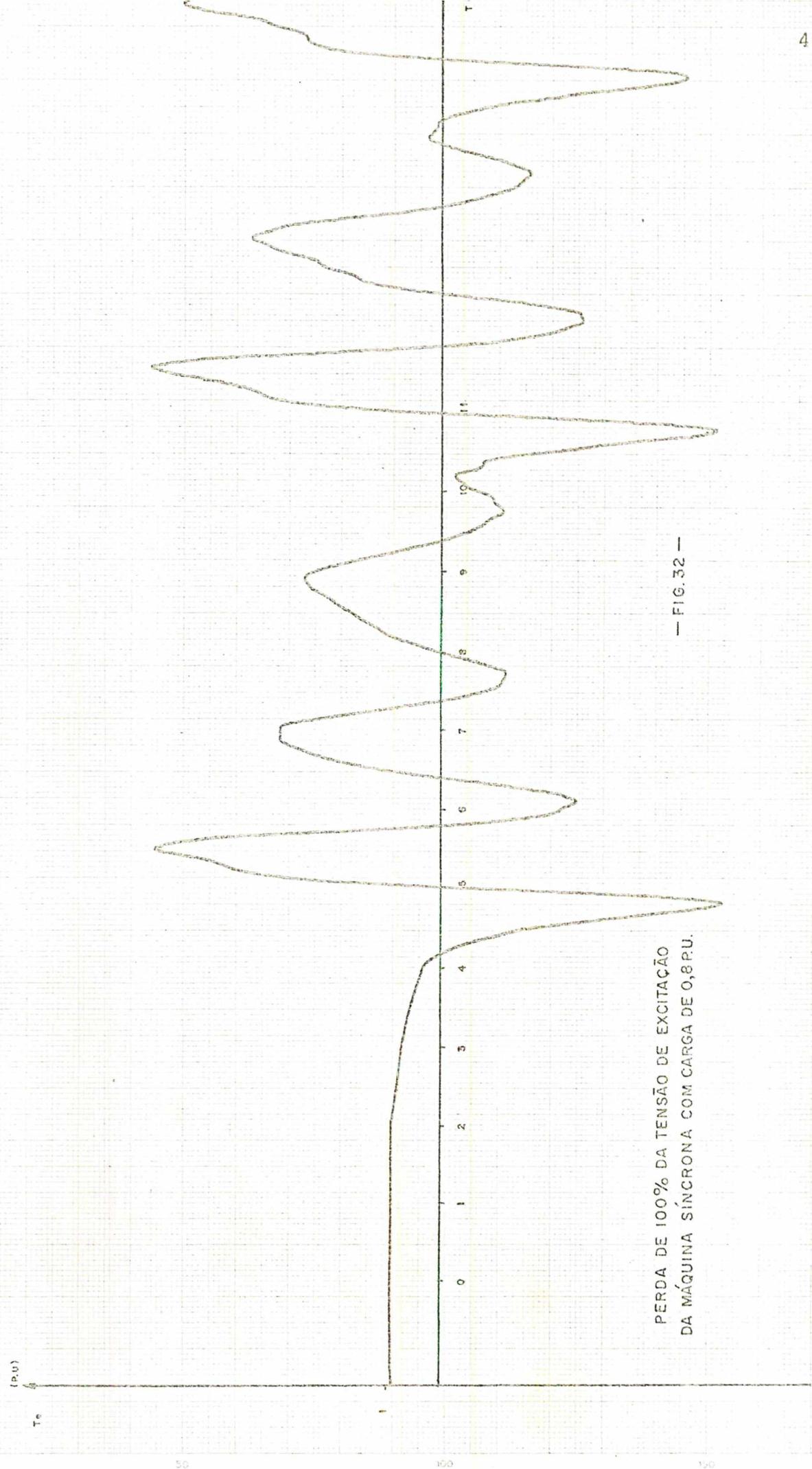
PERDA DE 50% DA TENSÃO DE EXCITAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA COM CARGA DE 0,8 P.U.

— FIG. 30 —



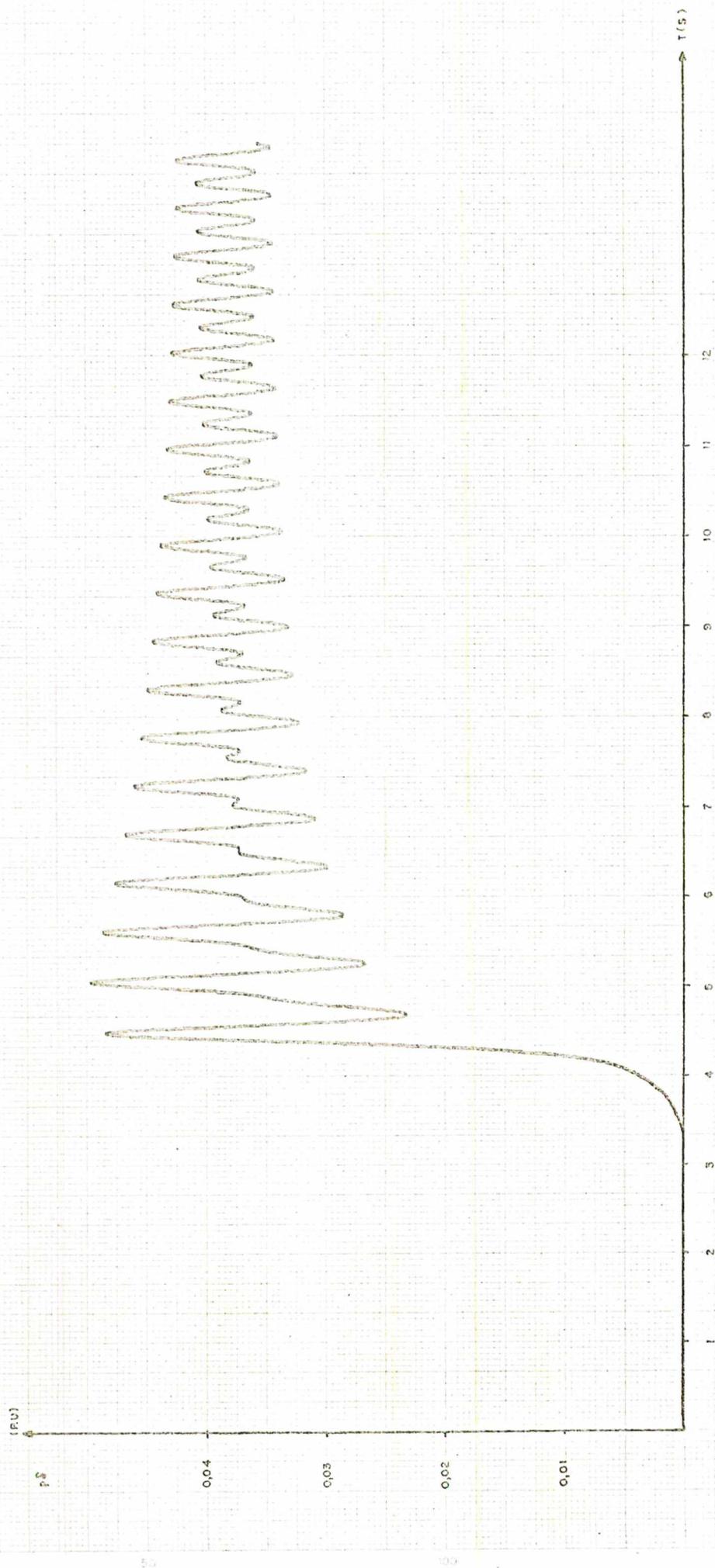
PERDA DE 75% DA TENSÃO DE EXCITAÇÃO
DA MÁQUINA SÍNCRONA COM CARGA DE 0,8PU.

— FIG. 31 —

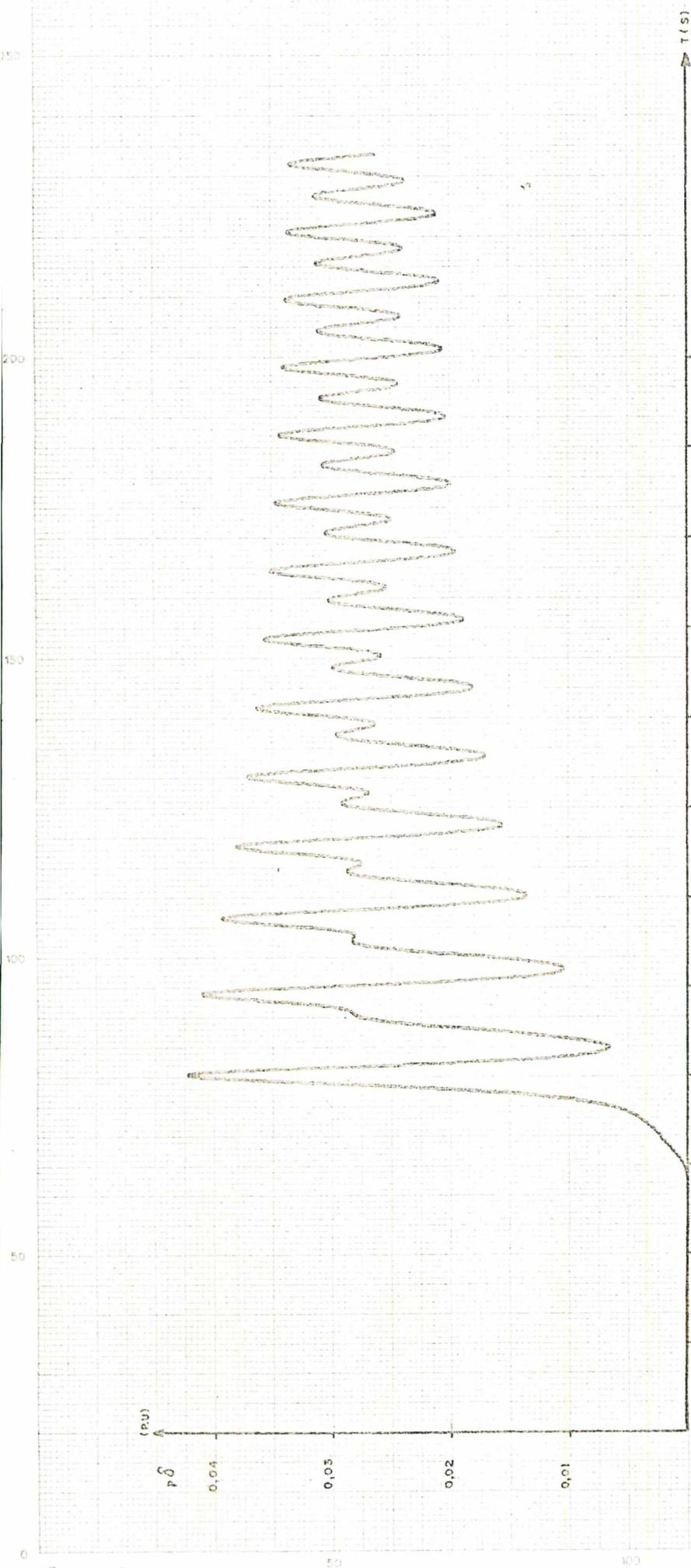


PERDA DE 100% DA TENSÃO DE EXCITAÇÃO
DA MÁQUINA SÍNCRONA COM CARGA DE 0,8 P.U.

— FIG. 32 —

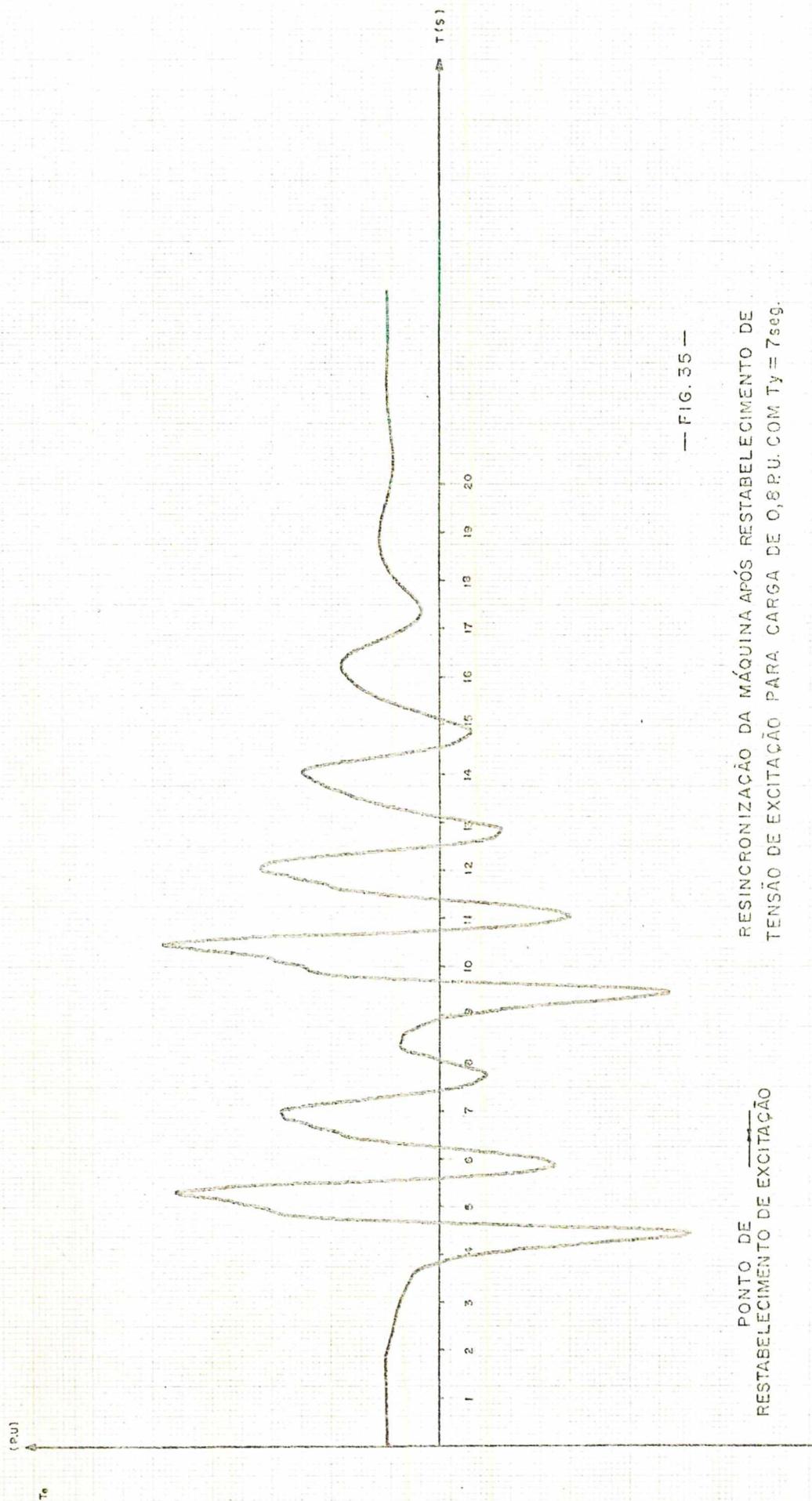


— FIG. 33 —
 CARACTERÍSTICA DO ESCORREGAMENTO APÓS PERDA
 DE EXCITAÇÃO PARA UMA CARGA DE 0,9 P.U.



— FIG. 34 —
 CARACTERÍSTICA DO ESCORREGAMENTO APÓS PERDA DE
 EXCITAÇÃO PARA UMA CARGA DE 0,8 P.U.

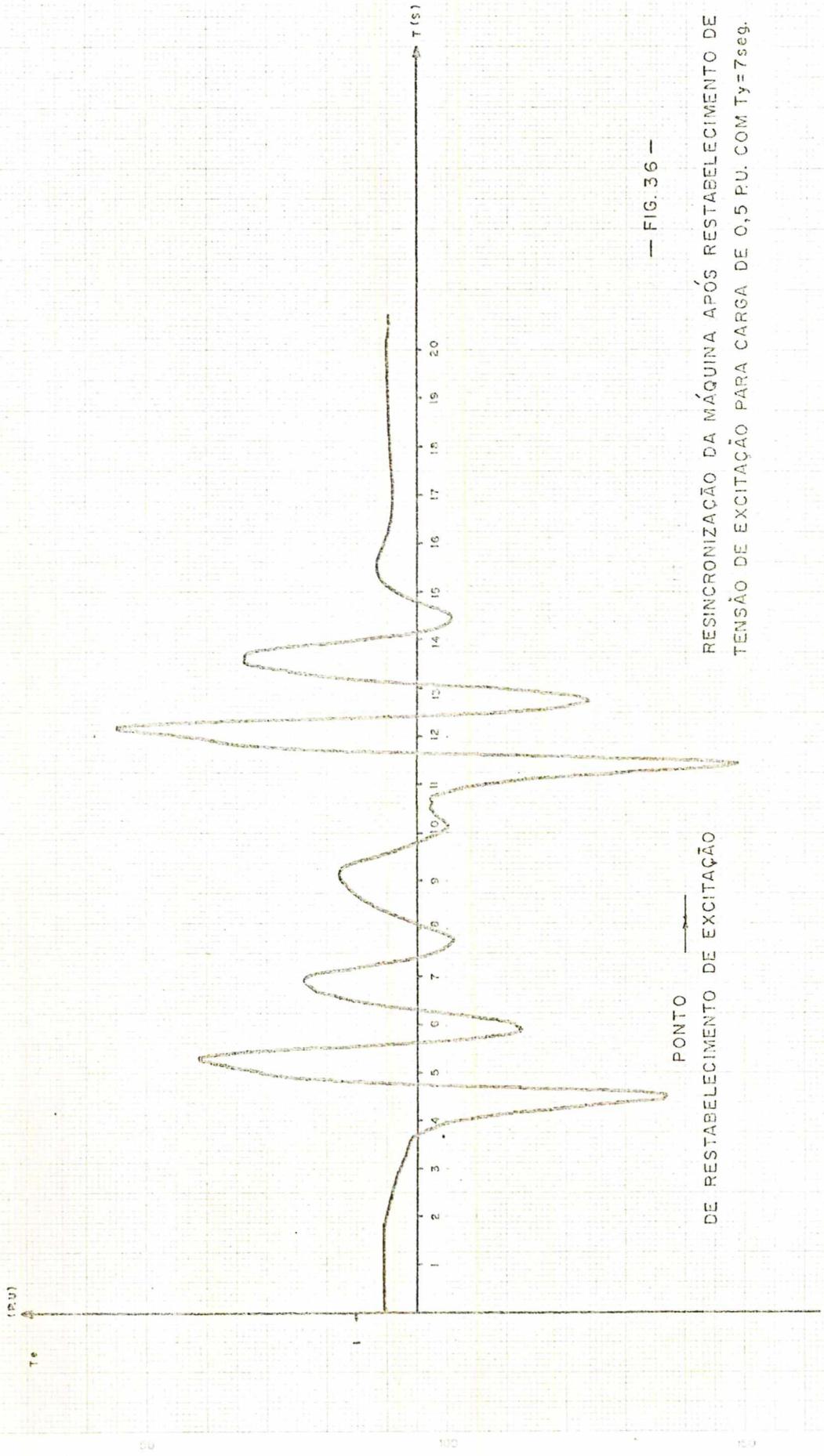
Curvas de resincronização após restabelecimento da tensão de excitação.



— FIG. 35 —

RESINCRONIZAÇÃO DA MÁQUINA APÓS RESTABELECIMENTO DE
TENSÃO DE EXCITAÇÃO PARA CARGA DE 0,8 P.U. COM $T_y = 7 \text{ seg.}$

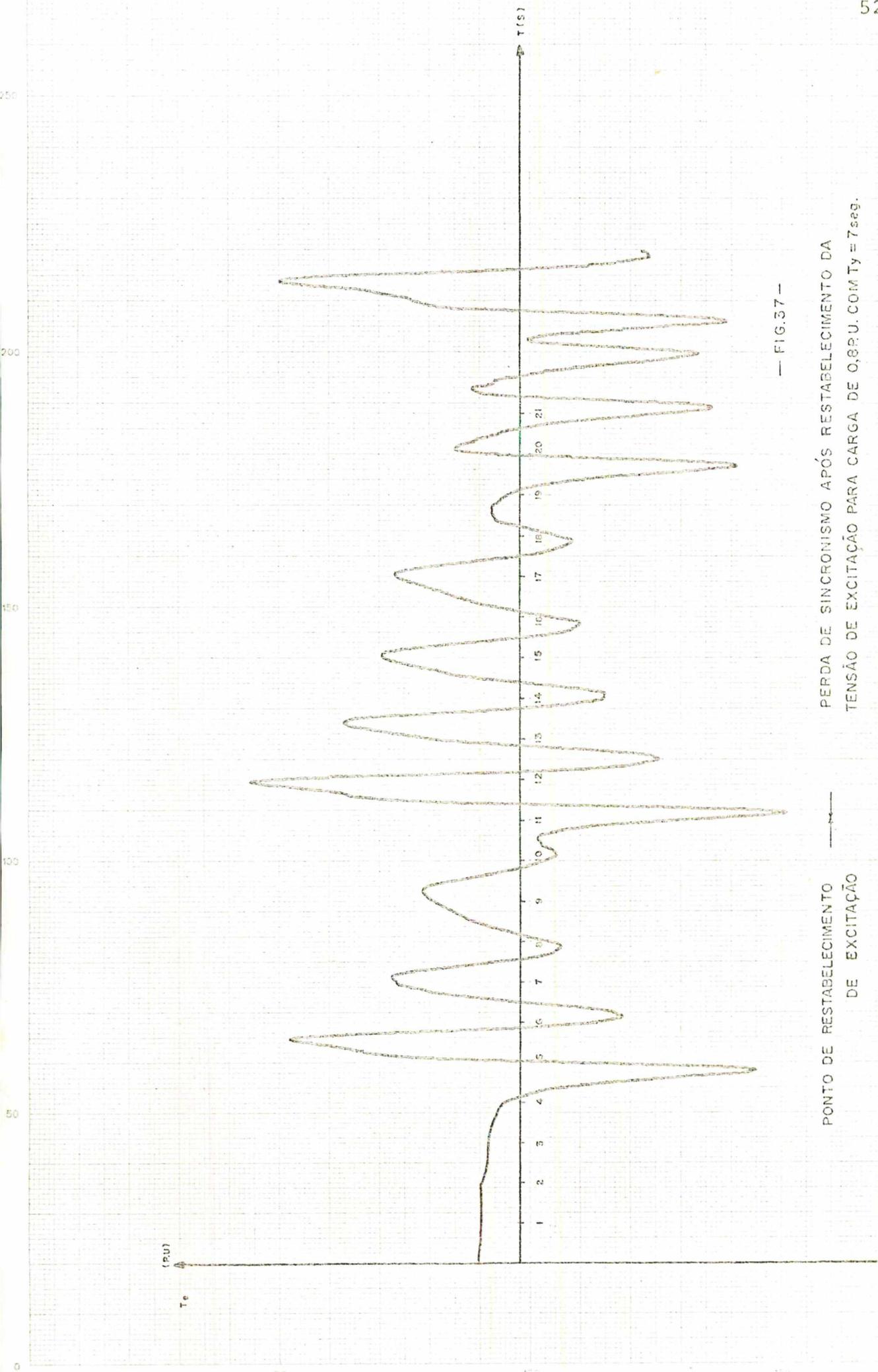
PONTO DE RESTABELECIMENTO DE EXCITAÇÃO



— FIG. 36 —

RESINCRONIZAÇÃO DA MÁQUINA APÓS RESTABELECIMENTO DE TENSÃO DE EXCITAÇÃO PARA CARGA DE 0,5 P.U. COM $T_y = 7 \text{ seg.}$

PONTO DE RESTABELECIMENTO DE EXCITAÇÃO



— FIG.37 —

PERDA DE SINCRONISMO APÓS RESTABELECIMENTO DA
TENSÃO DE EXCITAÇÃO PARA CARGA DE 0,8 P.U. COM $T_y = 7$ seg.

PONTO DE RESTABELECIMENTO
DE EXCITAÇÃO

CAPÍTULO 4

4 - DISCUSSÃO

4.1 - DISCUSSÃO DO MODELO

O teste de falha trifásica foi feito com e sem reguladores. Isto porque se está interessado qualitativamente nas variações de correntes, fluxos e torque eletromagnético.

Esta falha foi simulada também para a máquina operando com os reguladores, devido ao fato de normalmente os sistemas reais, serem equipados com estes mecanismos.

Verificou-se no teste de curto circuito da máquina funcionando a vazio, sem enrolamentos amortecedores e sem reguladores, o que segue:

1. A corrente de excitação possui duas componentes, uma periódica de constante de tempo T_a e outra aperiódica de constante de tempo T'_d .

Para os dados da máquina simulada, estas constantes valem:

$$T_{do} = \frac{X_f}{R_f \omega_s} = \frac{1,6}{0,0048 \cdot 377} = 0,884 \text{ s}$$

$$X'_d = X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f} = 1,6 - \frac{1,457^2}{1,6} = 0,275$$

$$T'_{do} = T_{do} \frac{X'_d}{X_d} = 0,884 \frac{0,275}{1,6} = 0,151 \text{ s}$$

$$T_a = \frac{2 X_d X'_d}{\omega_s R_a (X'_d + X_d)} = 0,308 \text{ s}$$

Esta constante pode ser calculada também analiticamente, a partir da curva traçada na figura 18a, como segue:

$$1,7 - \frac{1}{\tau} 0,2 = 0,5$$

$$e^{-0,2/\tau} = 0,2941$$

$$- \frac{0,2}{\tau} \ln e = \ln 0,2941$$

$$- \frac{0,2}{\tau} = -1,3$$

$$\tau = 0,15 \text{ s}$$

2. É prática aceita que numa máquina sem excitação no eixo de quadratura, a corrente I_q da armadura, é desprezada por ser muito pequena, conforme mostra a figura 18c.

Essa corrente existe devido à resistência da armadura na expressão (ver APÊNDICE IV),

$$E'_d = E_d - R I_d - X'_q I_q$$

3. Considerando que $E'_d = 0$, por não existir excitação no eixo de quadratura.

Considerando que $E_d = 0$, pois a máquina está funcionando em curto circuito.

Considerando que, a resistência R da armadura é normalmente muito pequena, então:

A corrente do estator é considerada como sendo apenas I_d . Esta corrente também possui as componentes, periódica e aperiódica, como mostra-se na figura 18b.

4. É também prática aceita, que o torque eletromagnético desenvolvido durante o curto circuito tem o valor médio nulo, conforme mostra a figura 18d.

Quando se simulou a máquina com enrolamentos amortecedores, alimentando uma carga de 0,8 P.U., verifica-se o que segue:

1. Devido a reação da armadura, os fluxos

de eixo direto e quadratura, tendem a zero durante o curto circuito, vide figura 21b e 21c.

2. O fluxo provocado pelo enrolamento amortecedor de eixo direto, se mantém praticamente constante. Isto é devido ao facto que o fluxo provocado pelo enrolamento de campo se mantém praticamente constante, vide figura 21a e figura 21d.
3. Observa-se a reacção dos enrolamentos amortecedores, uma vez que I_d e I_{1d} , I_q e I_{1q} são semelhantes e de sentido contrário.
4. Por ser o torque eletromagnético nulo, não existe torque resistente na máquina o que provoca um aumento do escorregamento e ângulo de carga.

Para a máquina operando com os reguladores verificou-se o que segue:

1. É possível fazer a máquina funcionar em regime transitório num tempo maior com regulador de tensão.
Isto torna maior a possibilidade da máquina voltar ao sincronismo após cessar a falha que provocou esta perda.
2. Na ocorrência de falha trifásica a volta ao regime se processa mais rapidamente quando a máquina funcionava com reguladores.
3. As oscilações do rotor na volta ao sincronismo, desaparecem muito mais rapidamente.
4. As oscilações de volta à operação normal de regime, aumentaram nos primeiros ciclos.

4.2 - DISCUSSÃO DOS MÉTODOS

Sabe-se que toda simulação feita em computador analógico, com raras exceções, pode ser convertida para computador digital, ainda que economicamente, nem sempre isto seja conveniente, considerando-se o tempo gasto para obter resultados, KRAUSE e THOMAS^[13] (1974).

Por exemplo, na simulação de máquina síncrona em computador digital, como as constantes de tempo eletromecânicas são da ordem de segundos, a solução de um único transitório envolve milhares de passos de tempo incremental e cálculo de funções trigonométricas em cada interação.

Segundo KRAUSE e THOMAS^[13] (1974), é extremamente difícil dizer com certeza, qual o tipo de simulação (analógica ou digital), é mais eficiente. Isto, devido as vantagens e desvantagens oferecidas por cada uma dos dois tipos de computadores.

Antes de ser desenvolvido o método de simulação por computadores, usava-se modelos em escala, facilitando a observação e avaliação do comportamento de um processo ou mesmo projeto.

Hoje, com o desenvolvimento de simulação na área de sistemas de potência, acredita-se que esta metodologia será válida por muito tempo ainda.

Através do método de simulação apresentado neste trabalho, é possível simular qualquer tipo de falha assimétrica, como por exemplo: curto circuito, desligamento, religamento; influência de parâmetros no comportamento da máquina, resincronização após falha simétrica e simular facilmente motores e condensadores síncronos.

Neste trabalho, o fato de simular a máquina em regime estático no computador digital (ver APÊNDICE V), possibilitou determinar as entradas para a simulação analógica.

A divisão da simulação em partes, foi importante para um bom conhecimento do comportamento de cada parte simulada, e uma perfeita visualização global do sistema.

O processo de gerar seno e cosseno do ângulo de carga, a partir da derivada deste ângulo é satisfatório, u

ma vez que na ocasião de simular curto circuito, o ângulo de carga cresce, ao passo que sua derivada permanece praticamente constante.

A maneira de representar esse ângulo usando o gerador de seno e cosseno próprio do computador seria válido se o objetivo deste trabalho fosse estudar a máquina apenas em regime estático permanente.

A forma compacta do sistema de equações representativas da máquina síncrona obtidas pelas transformações de BLONDEL, é útil para toda simulação, seja analógica ou digital, entretanto em algumas análises como estudo de operações assimétricas, em chaveamento mono polar de sistemas de transmissão não transpostos, ou na determinação de características de aceleração livre de motores síncronos, é preferível preservar as variáveis de fase reais (a, b, c).

O modelo impossibilita investigações no ângulo de carga, uma vez que ele não aparece na simulação.

O fato do modelo não permitir estudar falhas assimétricas, deve-se à não inclusão no sistema de variáveis de fase zero.

As restrições feitas no modelo simulado (despreza-se as perdas no ferro e saturação, e considera-se a onda de fluxo distribuídas senoidalmente no espaço), não invalidam o processo, entretanto idealizam o modelo o que não ocorre nas máquinas reais.

O potenciômetro usado na geração de base de tempo foi regulado para o valor de 0,0115 para traçar as curvas de testes de curto circuito e 0,04 para testes de perda de excitação, a fim do processo ser mais rápido.

Por não se conhecer a priori os valores máximos das grandezas do sistema, foi usado o método de tentativas para se obter as equações escalonadas.

Esse problema de escalonamento, reduz-se na boa consideração de máximo para cada variável do sistema, o que geralmente acarreta problema em simulação analógica, principalmente não se tendo noção da ordem de grandeza dessas variáveis, ou não se conhecendo o comportamento físico do sistema.

4.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O método de simulação mostrou-se eficiente e, comparado com os dados referidos na literatura, permitiu uma análise altamente útil do sistema.

As análises da literatura referenciada sobre o assunto deste trabalho, são restritas aos efeitos eletromagnéticos de regime transitório de máquinas síncronas. A simulação empregada, possibilitou melhor observação dos efeitos eletromecânicos.

A ausência de diferenças significativas nos resultados deste trabalho e os da literatura referida, como no tempo de perda de sincronismo devido ao funcionamento da máquina sem excitação e no teste de curto circuito, validam os métodos e o modelo matemático empregado.

A análise das figuras 16a e 16b, mostram que existe evidentemente uma correlação no tempo de sincronismo, quando o gerador funciona com e sem enrolamentos amortecedores.

As figuras 17a e 17b, traçadas quando se simulou apenas a equação do balanço de energia, mostram que este método de simulação é perfeitamente adequado e válido, considerando-se que o objetivo neste caso é verificar o comportamento desta equação e tirar conclusões das influências da primeira e segunda derivada do ângulo do rotor.

As curvas de curto circuito trifásico para a máquina funcionando sem enrolamentos amortecedores e reguladores, figura 18, a estabilidade transitória ocorre em cerca de 0,5 s.

Nota-se que a corrente de excitação (I_f), figura 18a, é idêntica à determinada analiticamente por KIMBARK^[14] em 1956.

Nas curvas traçadas quando a máquina funcionava com enrolamentos amortecedores, sem reguladores e alimentando uma carga de 0,8 P.U., nota-se perfeitamente as oscilações eletromecânicas do rotor, figuras 19, 20 e 21.

A análise das figuras relativas à perda percentual da tensão de excitação, demonstra que o tempo de des-sincronização é proporcional à percentagem de tensão perdida.

O fato de se observar sempre o torque ele-

tromagnético, é justificável, uma vez que na simulação empregada, a derivada do ângulo de carga e o próprio ângulo de carga são funções diretas do torque. Observar seu comportamento, é observar estas duas outras variáveis.

No desenvolvimento deste trabalho, o objetivo principal foi estabelecer princípios teóricos de máquina síncrona em simulação analógica e aplicá-los experimentalmente ao modelo simulado. Com isso, demonstra-se a validade de implantação de um sistema computacional analógico, aplicado ao estudo de máquinas, adaptado às condições atuais da UFSC.

Por estas razões, são válidas as aproximações efetuadas, considerando-se que todos os resultados obtidos concordam com a de autores clássicos. Estes determinaram analiticamente alguns dos resultados obtidos neste trabalho.

Baseando-se nos resultados, verifica-se a validade e importância deste tipo de estudo, uma vez que permite a comprovação da teoria de máquinas e um perfeito conhecimento da mesma, antes de ser construída. Sendo este o objetivo qualquer modificação na condição de funcionamento é facilmente exequível.

Da teoria de máquina, segundo VENIKOV ^[10] (1964) é sabido que se a carga de um gerador varia lentamente, o controle de excitação feito manualmente é satisfatório.

Considerando-se que isto é irreal nos sistemas de potência, onde a tensão e a carga variam consideravelmente, simulou-se os reguladores e os resultados obtidos concordam com a teoria, KIMBARK ^[14] (1956).

O fato de ter sido feito teste de perda total de tensão de excitação (fato que nos sistemas reais é difícil acontecer), é justificável, uma vez que poderia ocorrer falha no próprio circuito de excitação, nesse caso, mesmo que existisse regulador no sistema, este se tornaria inoperante. A solução seria desligar a máquina e reparar o defeito no circuito.

As figuras 33 e 34, mostram que a taxa de variação de escorregamento para uma dada carga, depende da inércia do rotor.

Um gerador que está conectado a um sistema infinito, quando perde a tensão de excitação, passa a funcio

nar como um gerador de indução.^[8] Neste trabalho, também verificou-se isto, embora que depois de certo tempo começou a diminuir a potência gerada.

As oscilações eletromecânicas existem, mesmo quando cessam as oscilações eletromagnéticas.

A máquina leva cerca de 0,3 segundos para sincronizar, quando alimenta uma carga de 0,8 P.U. (fig. 28).

O método de simulação empregado, de maneira geral, é importante quando se deseja fazer investigações no comportamento transitório da máquina síncrona.

CAPÍTULO 5

5 - CONCLUSÕES

Consoante aos objetivos propostos no início deste trabalho e estudando um gerador síncrono de 200 MW, conclui-se que:

1 - Pelos testes de curto circuito trifásico nos terminais da máquina, verifica-se o método de simulação uma vez que os resultados obtidos, concordaram perfeitamente com os de autores clássicos, como KIMBARK^[14] (1956) e VENIKOV^[10] (1964)

2 - Observa-se, comparando os resultados obtidos para a máquina funcionando com e sem reguladores, que a resincronização é mais rápida quando esses dispositivos são introduzidos no modelo, e as oscilações do rotor desaparecem mais rapidamente.

3 - Através das curvas de perda de excitação, verifica-se os tempos de perda de sincronismo e observa-se que a máquina tem um atraso para sentir essa perda que depende da percentagem de tensão de excitação perdida.

4 - A resincronização após restabelecimento da tensão de excitação, ocorre mais ou menos rapidamente, dependendo da carga que está alimentando, do tempo que passou trabalhando assincronamente e da constante de inércia do conjunto.

APÊNDICE I

SISTEMA POR UNIDADE (P.U.)

O sistema por unidade (P.U.) adotado no trabalho foi o seguinte:

Bases Comuns ao Rotor e Estator

$$\omega_b = \omega_s = 2 \pi f_n \quad (\text{rad/seg}) \quad (\text{I.1})$$

$$t_b = 1/\omega_b = 1/2\pi f_n \quad (\text{seg})$$

Bases para o Estator

$$I_b = 2 I_n \quad (\text{KA})$$

$$E_b = 2 E_n \quad (\text{KV de fase})$$

$$\phi_b = E_b/\omega_s$$

$$P_b = \frac{3}{2} E_b I_b \quad (\text{I.2})$$

$$Z_b = E_b/I_b$$

$$L_b = Z_b/\omega_s$$

$$T_b = P_b/\omega_s$$

Bases para o Rotor

- a. Admitindo-se iguais em módulo os fluxos gerados para o entreferro pelas correntes básicas do rotor e estator.
- b. Admitindo-se que são iguais as potências básicas do rotor e estator.

Se na equação de fluxo de eixo direto do sistema Nº 1 admite-se $I_d = I_{1d} = I_{2d} = \dots = I_{nd} = 0$, tem-se:

$$\phi_d = M_{ad} I_{br} \quad (I.3)$$

Se na equação de fluxo de campo do sistema Nº 1, admite-se: $I_f = I_{1d} = I_{2d} = \dots = I_{nd} = 0$, tem-se:

$$\phi_f = \frac{3}{2} M_{ad} I_b \quad (I.4)$$

Das equações (I.3), (I.4), (a), conclui-se

$$I_{br} = \frac{3}{2} I_b \quad (I.5)$$

Definindo-se

$$P_{br} = E_{br} I_{br} \quad (I.6)$$

Das equações (I.2), (I.6), (b), conclui-se

$$E_b = E_{br}$$

Semelhantemente a definição de impedância base do rotor para o estator, tem-se:

$$Z_{br} = \frac{E_{br}}{I_{br}} = \frac{E_b}{3/2 I_b} = \frac{2}{3} Z_b$$

As bases de fluxos e indutâncias bases do rotor, são:

$$\phi_{br} = \frac{Z_{br}}{\omega_s} = \frac{2}{3} \frac{Z_b}{\omega_b} = \frac{2}{3} L_b$$

$$\phi_{br} = \frac{E_{br}}{\omega_s} = \frac{E_b}{\omega_b} = b$$

Lembrando que o escorregamento é definido por:

$$s = \frac{\omega - \omega_s}{\omega_s}$$

Onde

$$\omega = \omega_s (1 + s) \quad (\text{I.7})$$

Dividindo-se a expressão (I.7) pela pulsação base, dada por (I.1), tem-se:

$$\omega = (1 + s)$$

APÊNDICE II

OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES EM P.U.

Do sistema de base do APÊNDICE I, converter o sistema de equações representativo da máquina para a representação P.U., basta dividir cada equação pela respectiva base.

Mostra-se a seguir alguns exemplos da maneira de realizar isto.

EQUAÇÃO I

$$E_d = -p \phi_d - \omega \phi_q - R I_d$$

$$E_d = \frac{d \phi_d}{dt \omega_s \phi_b} - \frac{\omega \phi_q}{\omega_b \phi_b} - \frac{R I_d}{Z_b I_b}$$

$$E_{*d} = -P_{*} \phi_{*d} - (1 + s) \phi_{*q} - R_{*} I_{*d}$$

onde $\omega_{*} = (1 + s)$

$$P_{*} = \frac{d}{dt} \frac{1}{\omega_s}$$

EQUAÇÃO II

$$E_f = p \phi_f + R_f I_f$$

$$\frac{E_f}{E_{br}} = \frac{d\phi_f}{dt \omega_b \phi_{br}} - \frac{R_f I_f}{Z_{br} I_{br}}$$

$$E_{*f} = P_{*} \phi_{*f} + R_{*f} I_{*f}$$

EQUAÇÃO III

$$\phi_d = - \frac{L_d I_d}{Z_b I_b} + \frac{M_{ad} I_f}{Z_b \frac{2}{3} I_{br}} + \frac{\sum_{k=1}^n M_{ad} I_{kd}}{Z_b \frac{2}{3} I_{br}}$$

$$\omega_b$$

$$\dot{\phi}_d = -X_{*d} I_{*d} + X_{*ad} I_{*f} + X_{*ad} I_{*kd}$$

EQUAÇÃO IV

Dada a equação do balanço de energia, para se obter esta equação em P.U., basta dividi-la pelo torque base.

$$J \frac{d^2 \delta}{dt^2} + K_c \frac{d\delta}{dt} = T_m = T_e$$

$$(J \frac{d^2 \delta}{dt^2}) / (P_b / \omega_s) \cdot (\omega_s^2 / \omega_s^2) + (K_c \frac{d\delta}{dt}) / (P_b / \omega_s) = (T_m / P_b) \omega_s +$$

$$+ \frac{3}{2} \frac{(\phi_d I_q - \phi_q I_d)}{\frac{3}{2} \frac{E_b I_b}{\omega_s}}$$

$$\frac{J \omega_s^2}{P_b} \frac{d^2 \delta}{dt^2 \omega_s} + \frac{K_c \omega_s}{P_b} \frac{d\delta}{dt} = \frac{T_m}{P_b} + \frac{(\phi_d I_q - \phi_q I_d)}{\frac{E_b I_b}{\omega_s}}$$

Lembrando que:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s$$

$$\frac{d\delta}{dt} = s \cdot \omega_s$$

$$\frac{d\delta}{dt} \frac{1}{\omega_s} = s$$

$$p\delta = s$$

$$\frac{J \omega_s^2}{P_b} = T_{*Y}$$

$$\frac{K_C \omega_s}{P_b} = K_{*C}$$

A equação do balanço de energia em P.U. é:

$$T_{*m} = T_{*Y} \omega_s p\delta - \phi_{*d} I_{*q} + \phi_{*q} I_{*d} + K_{*C} p\delta$$

Nota-se que pelo sistema por unidade utilizado, as equações representativas do sistema, são idênticas as equações primitivas.

APÊNDICE III

Para escalonar as equações representativas ao gerador adotou-se os valores máximos das variáveis do sistema iguais a dez unidades, e procedeu-se da seguinte maneira:

EQUAÇÃO I

$$p \phi_d = E_o \operatorname{sen} \delta + \phi_q + p\delta \phi_q + 0,0102 I_d$$

$$p \frac{\phi_d}{10} = \frac{1}{10} \operatorname{sen} \delta + 10 \left(\frac{\phi_q}{10} \right) + 10 \left(\frac{p\delta}{10} \right) 10 \left(\frac{\phi_q}{10} \right) + 0,0102 \cdot 10 \left(\frac{I_d}{10} \right)$$

$$p \frac{\phi_d}{10} = 0,1 \operatorname{sen} \delta + \left(\frac{\phi_q}{10} \right) + 10 p \left(\frac{\delta}{10} \right) \left(\frac{\phi_q}{10} \right) + 0,0102 \left(\frac{I_d}{10} \right)$$

$$p \phi_d = 0,1 \operatorname{sen} \delta + \phi_q + 10 p\delta \phi_q + 0,0102 I_d$$

EQUAÇÃO II

$$p \phi_q = E_o \cos \delta - \phi_d - p\delta \phi_d + 0,0102 I_q$$

$$p \frac{\phi_q}{10} = \frac{1}{10} \cos \delta - 10 \left(\frac{\phi_d}{10} \right) - 10 p \left(\frac{\delta}{10} \right) 10 \left(\frac{\phi_d}{10} \right) + 0,0102 \cdot 10 \left(\frac{I_q}{10} \right)$$

$$p \frac{\phi_q}{10} = 0,1 \cos \delta - \left(\frac{\phi_d}{10} \right) - 10 p \left(\frac{\delta}{10} \right) \left(\frac{\phi_d}{10} \right) + 0,0102 \left(\frac{I_q}{10} \right)$$

$$p \phi_q = 0,1 \cos \delta - \phi_d - 10 p\delta \phi_d + 0,0102 I_q$$

EQUAÇÃO III

$$p \phi_f = E_f - R_f I_f$$

$$p \phi_f = 0,0115 - 0,0085 I_f$$

$$p \frac{\phi_f}{10} = \frac{1}{10} 0,0115 - 0,0085 \cdot 10 \left(\frac{I_f}{10} \right)$$

$$p \phi_f = 0,0115 - 0,0085 I_f$$

EQUAÇÃO IV

$$p \phi_{1d} = -R_{1d} I_{1d}$$

$$p \phi_{1d} = -0,0015 I_{1d}$$

$$p \frac{\phi_{1d}}{10} = \frac{1}{10} - 0,0015 \cdot 10 \left(\frac{I_{1d}}{10} \right)$$

$$p \phi_{1d} = -0,0015 I_{1d}$$

EQUAÇÃO V

$$p \phi_{1q} = -R_{1q} I_{1q}$$

$$p \phi_{1q} = -0,029 I_{1q}$$

$$p \frac{\phi_{1q}}{10} = \frac{1}{10} - 0,029 \cdot 10 \left(\frac{I_{1q}}{10} \right)$$

$$p \phi_{1q} = -0,029 I_{1q}$$

EQUAÇÃO VI

$$I_d = -\frac{\phi_d}{X_d} + \frac{X_{ad}}{X_d} I_f + \frac{X_{ad}}{X_d} I_{1d}$$

$$I_d = -0,625 \phi_d + 0,9106 I_f + 0,9106 I_{1d}$$

$$\frac{I_d}{10} = \frac{1}{10} - 0,625 \cdot 10 \left(\frac{\phi_d}{10} \right) + 0,9106 \cdot 10 \left(\frac{I_f}{10} \right) + 0,9106 \cdot 10 \left(\frac{I_{1d}}{10} \right)$$

$$\frac{I_d}{10} = -0,625 \left(\frac{\phi_d}{10} \right) + 0,9106 \left(\frac{I_f}{10} \right) + 0,9106 \left(\frac{I_{1d}}{10} \right)$$

$$I_d = -0,625 \phi_d + 0,9106 I_f + 0,9106 I_{1d}$$

EQUAÇÃO VII

$$I_q = - \frac{\phi_q}{X_q} + \frac{X_{aq}}{X_q} I_{1q}$$

$$I_q = -0,6369 \phi_q + 0,9108 I_{1q}$$

$$\frac{I_q}{10} = \frac{1}{10} -0,6369 \cdot 10 \left(\frac{\phi_q}{10} \right) + 0,9108 \cdot 10 \left(\frac{I_{1q}}{10} \right)$$

$$\frac{I_q}{10} = -0,6369 \left(\frac{\phi_q}{10} \right) + 0,9108 \left(\frac{I_{1q}}{10} \right)$$

$$I_q = -6369 \phi_q + 0,9108 I_{1q}$$

EQUAÇÃO VIII

$$I_f = \frac{\phi_f}{X_f} + \frac{X_{ad}}{X_f} I_d - \frac{X_{ad}}{X_f} I_{1d}$$

$$I_f = 0,625 \phi_f + 0,9106 I_d - 0,9106 I_{1d}$$

$$\frac{I_f}{10} = \frac{1}{10} 0,625 \cdot 10 \left(\frac{\phi_f}{10} \right) + 0,9106 \cdot 10 \left(\frac{I_d}{10} \right) - 0,9106 \cdot 10 \left(\frac{I_{1d}}{10} \right)$$

$$\frac{I_f}{10} = 0,625 \left(\frac{\phi_f}{10} \right) + 0,9106 \left(\frac{I_d}{10} \right) - 0,9106 \left(\frac{I_{1d}}{10} \right)$$

$$I_f = 0,625 \phi_f + 0,9106 I_d - 0,9106 I_{1d}$$

EQUAÇÃO IX

$$I_{1d} = \frac{\phi_{1d}}{X_{1d}} + \frac{X_{ad}}{X_{1d}} I_d - \frac{X_{ad}}{X_{1d}} I_f$$

$$I_{1d} = 0,6623 \phi_{1d} + 0,9649 I_d + 0,9649 I_f$$

$$\frac{I_{ld}}{10} = \frac{1}{10} 0,6623 \cdot 10 \left(\frac{\phi_{ld}}{10} \right) + 0,9649 \cdot 10 \left(\frac{I_d}{10} \right) + 0,9649 \cdot 10 \left(\frac{I_f}{10} \right)$$

$$\frac{I_{ld}}{10} = 0,6623 \left(\frac{\phi_{ld}}{10} \right) + 0,9649 \left(\frac{I_d}{10} \right) + 0,9649 \left(\frac{I_f}{10} \right)$$

$$I_{ld} = 0,6623 \phi_{ld} + 0,9649 I_d + 0,9649 I_f$$

EQUAÇÃO X

$$I_{lq} = \frac{\phi_{lq}}{X_{lq}} + \frac{X_{2q}}{X_{lq}} I_q$$

$$I_{lq} = 0,6623 \phi_{lq} + 0,9470 I_q$$

$$\frac{I_{lq}}{10} = \frac{1}{10} 0,6623 \cdot 10 \left(\frac{\phi_{lq}}{10} \right) + 0,9470 \cdot 10 \left(\frac{I_q}{10} \right)$$

$$\frac{I_{lq}}{10} = 0,6623 \left(\frac{\phi_{lq}}{10} \right) + 0,9470 \left(\frac{I_q}{10} \right)$$

$$I_{lq} = 0,6623 \phi_{lq} + 0,9470 I_q$$

EQUAÇÃO XI

$$p\dot{\delta} = \frac{1}{T_y} T_m - \phi_d I_q + \phi_q I_d - K_c p\delta$$

$$p\dot{\delta} = \frac{1}{6} 0,6993 - \phi_d I_q + \phi_q I_d - 0,04 p\delta$$

$$p \frac{\dot{\delta}}{10} = 0,01165 - 10 \cdot 0,166 \left(\frac{\phi_d}{10} \right) \left(\frac{I_q}{10} \right) + 10 \cdot 0,166 \left(\frac{\phi_q}{10} \right) \left(\frac{I_d}{10} \right) - 0,0066 p \left(\frac{\delta}{10} \right)$$

$$p\dot{\delta} = 0,01165 - 10 \cdot 0,166 \phi_d I_q + 10 \cdot 0,166 \phi_q I_d - 0,0066 p\delta$$

Para as equações representativas ao regulador de tensão os valores máximos adotados foram:

$$E_{fd} = 250$$

$$V_{st} = 250$$

$$E_r = 25$$

EQUAÇÃO I

$$p \frac{E_{fd}}{250} = \frac{1}{250} 1,754 - 250 \left(\frac{E_{fd}}{250} \right) + 25 \left(\frac{E_r}{25} \right)$$

$$p \frac{E_{fd}}{250} = 1,754 - \left(\frac{E_{fd}}{250} \right) + 0,1 \left(\frac{E_r}{25} \right)$$

$$p E_{fd} = 1,754 (E_{fd} + 0,1 E_r)$$

EQUAÇÃO II

$$p \frac{V_{st}}{250} = \frac{1}{6 \cdot 250} - 250 \left(\frac{V_{st}}{250} \right) + 0,15 \cdot 250 \cdot p \left(\frac{E_{fd}}{250} \right)$$

$$p \frac{V_{st}}{250} = -0,166 \left(\frac{V_{st}}{250} \right) + 0,025 p \left(\frac{E_{fd}}{250} \right)$$

$$p V_{st} = -0,166 V_{st} + 0,025 p E_{fd}$$

EQUAÇÃO III

$$p \frac{E_r}{25} = \frac{1}{25} \cdot 10 - 25 \left(\frac{E_r}{25} \right) + 25 \epsilon$$

$$p \frac{E_r}{25} = 10 \epsilon - \left(\frac{E_r}{25} \right)$$

$$p E_r = 10 (\epsilon - E_r)$$

Para as equações do regulador de velocidade os valores máximos de todas as variáveis foram considerados iguais a dez unidades.

EQUAÇÃO I

$$p(\Delta x) = \frac{1}{K_r} - \Delta x - K_p \delta$$

$$-p\delta = 0,1 p(\Delta x) + \Delta x$$

$$-p \frac{\delta}{10} = \frac{1}{10} 0,1 \cdot 10 p\left(\frac{\Delta x}{10}\right) + 10\left(\frac{\Delta x}{10}\right)$$

$$-p \frac{\delta}{10} = 0,1 p\left(\frac{\Delta x}{10}\right) + \left(\frac{\Delta x}{10}\right)$$

$$-p\delta = 0,1 p \Delta x + \Delta x$$

EQUAÇÃO II

$$\Delta x = 2p(\Delta T_m) + \Delta T_m$$

$$\frac{\Delta x}{10} = \frac{1}{10} 2 \cdot 10 \cdot p\left(\frac{\Delta T_m}{10}\right) + 10\left(\frac{\Delta T_m}{10}\right)$$

$$\frac{\Delta x}{10} = 2 p(\Delta T_m) + \Delta T_m$$

$$p \Delta T_m = 0,5 \Delta x - 0,5 \Delta T_m$$

APÊNDICE IV

SOLUÇÃO DO SISTEMA EM REGIME

Das equações de fluxo de eixo direto e de campo, lembrando que em regime não circulam correntes nos enrolamentos amortecedores, tem-se:

$$\phi_d = -X_d I_d + X_{ad} I_f \quad (IV.1)$$

$$\phi_f = -X_{ad} I_d + X_f I_f \quad (IV.2)$$

De (IV.1), obtém-se

$$I_f = \frac{\phi_d + X_d I_d}{X_{ad}} \quad (IV.3)$$

Substituindo-se na equação (IV.3) a equação (IV.2), e colocando-se em forma conveniente, tem-se:

$$\phi_f = \frac{X_f}{X_{ad}} \phi_d - \left(X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f} \right) I_d \quad (IV.4)$$

Lembrando que numa máquina

$$\epsilon_q = X_{ad} I_f$$

$$\epsilon'_q = \phi_f \frac{X_{ad}}{X_f}$$

$$X'_d = X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f}$$

Substituindo as expressões acima, convenientemente em (IV.1) e (IV.4), obtêm-se:

$$\phi_d = \epsilon_q - X_d I_d \quad (IV.5)$$

$$\phi_d = \epsilon'_q - X'_d I_d$$

Da equação de tensão de eixo direto do sistema Nº 2 , em regime permanente:

$$s = 0$$

$$p \phi_q = 0$$

Tem-se

$$E_q = \phi_d - R_q I_q \quad (\text{IV.6})$$

Substituindo (IV.5) em (IV.6), obtém-se:

$$\epsilon_q = E_q + X_d I_d + R_q I_q \quad (\text{IV.7})$$

A equação de tensão de eixo de quadratura do sistema Nº 2 em regime, torna-se:

$$E_d = -\phi_q - R_d I_d$$

Lembrando que:

$$\phi_q = -X_q I_q$$

Então

$$E_d = X_q I_q - R_d I_d$$

Como $\epsilon_d = 0$, porque não existe excitação no eixo "q", a equação acima pode ser escrita como:

$$\epsilon_d = E_d - X_q I_q + R_d I_d = 0 \quad (\text{IV.8})$$

Relacionando-se os eixos "d" e "q", com os eixos real e imaginário, tem-se:

$$\dot{\epsilon}_q = j \epsilon_q \quad \dot{\epsilon}_d = -\epsilon_d$$

$$\dot{E}_q = j E_q \quad \dot{E}_d = -E_d$$

$$\dot{I}_q = j I_q \quad \dot{I}_d = -I_d$$

Aplicando as relações acima, as equações (IV.7) e (IV.8), tornam-se:

$$\dot{\epsilon}_d = \dot{E}_d - j X_q \dot{I}_q + R \dot{I}_d = 0 \quad (\text{IV.9})$$

$$\dot{\epsilon}_q = \dot{E}_q - j X_d \dot{I}_d - R \dot{I}_q \quad (\text{IV.10})$$

Como

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_d - \dot{\epsilon}_q = \dot{\epsilon}_q$$

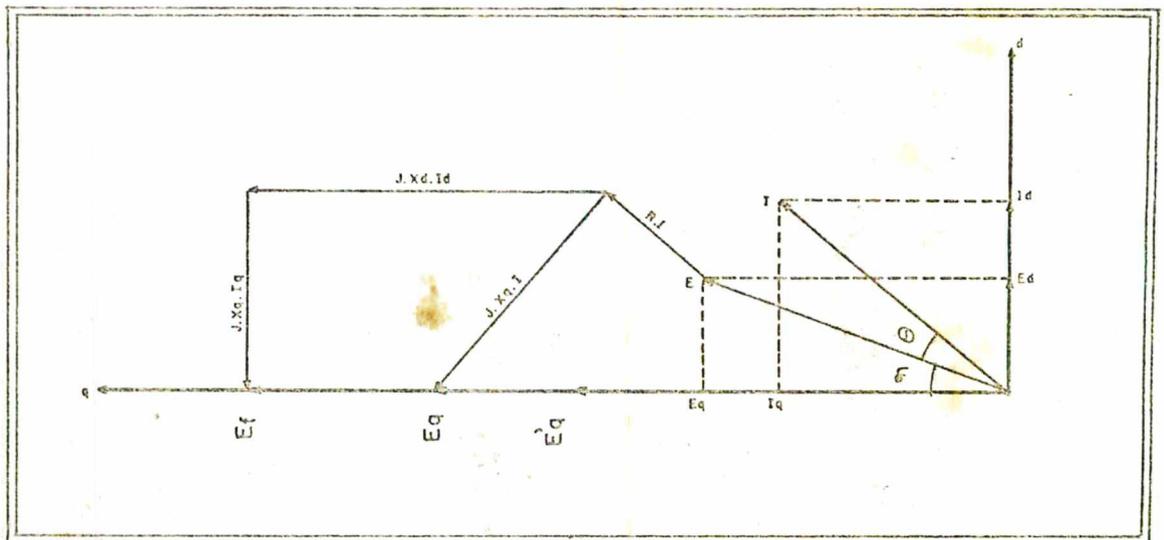
$$\dot{E} = \dot{E}_d + \dot{E}_q$$

$$\dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q$$

Somando as equações (IV.9) e (IV.10), tem-se:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_q = \dot{E} - R \dot{I} - j X_d \dot{I}_d - j X_q \dot{I}_q$$

Donde traça-se o diagrama fasorial abaixo



APÊNDICE V

PROGRAMA PARA CÁLCULO DA MÁQUINA EM REGIME

Para determinar as condições de regime do ângulo de carga, da tensão de excitação e do torque mecânico que são as entradas no modelo simulado, foi feito um programa em BASIC para o computador PDP 11/40, onde considera-se que a máquina alimenta uma carga de 0,8 P.U., e o ângulo entre a tensão e a corrente é de -30° .

```

LIST
1 PRINT "X0"/;INPUT X1;PRINT "X0"/;INPUT X2
2 PRINT "R"/;INPUT R;PRINT "RF"/;INPUT R3
3 PRINT "X00"/;INPUT X4;PRINT "RF"/;INPUT R1
4 PRINT " ANG"/;INPUT A
13 PRINT "U0"/;INPUT U0;PRINT "I0"/;INPUT I0
15 LET X5=X1-(X4^2)/X3
20 LET X6=X2
30 PRINT ;PRINT,
35 LET F=3.14159
40 LET P1=R+I0*SIN(A*P/180)+X2*I0*SIN((90+A)*P/180)
41 LET P2=(U0+R+I0*CO5(A*P/180)+X2*I0*CO5((90+A)*P/180))
43 LET D=(180/P)*ATAN(P1/P2)
45 LET U1=(-U0*SIN(D*P/180))
50 LET U2=U0*CO5(D*P/180)
55 LET I1=(-I0*SIN((D-A)*P/180))
60 LET I2=I0*CO5((D-A)*P/180)
65 LET E1=U2+R*I2-X1*I1
70 LET E3=U2+R*I2-X5*I1
75 LET E2=0
80 LET E4=0
85 LET F1=E1*(X3/X4-X4/X1)+X4/X1*(U2+R*I2)
90 LET I3=F1/X3-X4/X3*I4
95 LET U3=R1*I3
100 LET F2=E1+I1*X4*I3
105 LET F3=X2*I2
110 LET X1=F2*I2-F3*I1
115 PRINT "          VALORES DE REGIME"
120 PRINT "DELTA=";D;PRINT "U0=";U0;PRINT "U0=";U2
121 PRINT "I0=";I1;PRINT "I0=";I2;PRINT "E0=";E0;PRINT "E0=";E1
122 PRINT "E1D=";E4;PRINT "E1B=";E3;PRINT "F1F=";F1;PRINT "IF=";I3
123 PRINT "U1=";U3;PRINT "F1D=";F2;PRINT "F1Q=";F3
124 PRINT "NT=";N;PRINT "X1D=";X5;PRINT "X1Q=";X6
126 PRINT ;PRINT ;PRINT
130 GO TO 4
135 END

```

READY

```

RUN
X0?1.5
R?1.57
RF?.0102
X00?1.6
R1?1.457
R3?.0085
ANG?-30
U0?1.0
I0?.8

```

VALORES DE REGIME

DELTA= 33.5346
 UD=-.55244
 UR=.932553
 ID=-.716153
 IR=.356526
 ED= 0
 ER= 1.98365
 ELD= 0
 ELR= 1.03286
 FIF= 1.13423
 IF= 1.36185
 UF=.0115689
 FID=.837189
 FIR=.559747
 RI=.69935
 XLD=.273219
 XLR= 1.57

ANG7-30
 UB71.0
 187.7

VALORES DE REGIME

DELTA= 31.3624
 UD=-.520449
 UR=.933893
 ID=-.614389
 IR=.335488
 ED= 0
 ER= 1.8483
 ELD= 0
 ELR= 1.02517
 FIF= 1.12579
 IF= 1.26398
 UF=.0107362
 FID=.857315
 FIR=.526717
 RI=.611217
 XLD=.273219
 XLR= 1.57

BIBLIOGRAFIA

- 1 - PARK, R.H., "Two-Reaction Theory of Synchronous Machines", Trans. AIEE, 48: 716 a 730, 1929.
- 2 - CONCORDIA, C. e TEMOSHOK, M., "Resynchronising of a Turbo-Generator", Trans. AIEE, 66: 1512 a 1518, 1947.
- 3 - MARTINS, D.A., "Interface entre um Minicomputador PDP 11/40 e um Computador Analógico TE-RA-770", Tese de Mestrado, UFSC - Florianópolis, 1975.
- 4 - THOMAS, C.H. e KRAUSE, P.C., "Analogue Computer Representations of Synchronous Generators in Voltage-Regulation Studies", Trans. AIEE, 1178 a 1184, Dec/1956.
- 5 - SULIAREVSKI, I., "Transitórios elétricos em Sistemas de Potência", COPPE, Publicação Interna, Rio de Janeiro, 1968.
- 6 - FRITZGERALD, A.G. e KINGSLEY, C. Jr., "Electrical Machine" New York: McGraw-Hill, 1961.
- 7 - ALDRED, A.S. e DOYLE, A.P., "Electronic-Analogue-Computer of Synchronous-Machine Transient Stability", Trans. AIEE, 152 a 160, June 1956.
- 8 - HOGG, B.W. e ALDRED, A.S., "Resynchronising of a Turbo-Generator", Proc. IEE, 324 a 332, 1968.
- 9 - BORBA, D.A., "Simulação Digital de Máquina Síncrona", Tese de Mestrado, COPPE, Rio de Janeiro, 1971.
- 10 - VENIKOV, V.A., "Transient Phenomena in Electrical Power Systems", Pergamon Press, 1964.
- 11 - ALDRED, A.S., "Electronic Analogue Computer Simulation of Multi-Machine Power-Systems Network", Proc. IEE, 109 part. A 45: 195 a 202, 1962.
- 12 - IEEE COMMITTEE - "Computer Representation of Excitation Systems", Trans IEEE, Pas. 6 (87), 1460 a 1464, Jun 1968.
- 13 - KRAUSE, P.C. e THOMAS L.A., "Applications of Analog and Hybrid Computations in Electric Power Systems Analysis", IEEE, 62 Nº 7, 994 a 1005, July 1974.

- 14 - KIMBARK, E.W., "Power Systems Stability", New York, John Wiley e Sons, 1956.
- 15 - JAMES, V.N., "Synchronous Machine Analogue for Use with Network Analyser", Trans IEE, 1054 a 1059, Oct/ 1954.
- 16 - LANGSDORF, A.S., "Theory of Alternating Current Machines". New York, McGraw-Hill, 1955.
- 17 - CHESNOV, M.P., "Study of Out-of-step Conditions and Resynchronising Stability", 6, elektrichestvo, 1960.
- 18 - DE MELLO, F.P. e DOLBEC, A.C., "Analog Computer Studies of Systems overvoltages following Load Rejections", Trans. IEEE, vol. 82, 42 a 49, Apr. 1963.
- 19 - GORBUNOVA, L.M. e PORTNOI, M.G., "Analogue Computer for Power Systems Eletro-Mechanical Transient Studies" 5, elektrichestvo, 1965.
- 20 - EYMAN, E.D., "Analogue Computer Study of Song Fundamental Control Relations Involving Alternator and Diesel Engines", Int. J. Control, 7, N° 3, 201 a 221, 1968
- 21 - STAGG, G.H. e EL-ABIAD, A.H., "Computer Methods in Power Systems Analysis", New York, McGraw-Hill, 1968.
- 22 - Elgerd, O.I., "Electric Energy Systems Theory: An Introduction", New York, McGraw-Hill, 1971.
- 23 - HAUSNER, A., "Analog-Hybrid Computer Programming", New Jersey, Prentice Hall, 1971.
- 24 - HOGG, B.W. e WILLIAMS, D., "Simulation of an Asynchronized Synchronous Machine", Annales de L'Association Internationale pour le Calcul Analogique, N° 4, 1973.

DADOS PARA A MÁQUINA SIMULADA

$P = 200 \text{ MW}; \cos \phi = 0,85;$

$16.5 \text{ KV}; 60 \text{ Hz}; 2 \text{ polos}$

$T_y = 6 \text{ s}$

$f_n = 60 \text{ Hz}$

$X_d = 1,57$

$X_f = 1,6$

$X_{ad} = 1,457$

$R = 0,0102$

$X_{ld} = 1,51$

$X_{aq} = 1,43$

$R_{ld} = 0,0015$

$R_{lq} = 0,029$

$H = 3.00 \text{ s}$

Todos os dados onde a unidade não foi mencionada, considere-se P.U.