TESE
513

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

"MODELOS NÃO LINEARES DE TURBINA E REGULADOR DE VELOCIDADE PARA SIMULAÇÃO DE GRANDES VARIAÇÕES DE CARGA EM UNIDADES GERADORAS SOB DIVERSAS CONDIÇÕES OPERATIVAS:-DESENVOLVIMENTO, AFERIÇÃO E DESEMPENHO PRÁTICO"

(Tese de Mestrado)

AUTOR : Marcelino Pereira de Almeida

ORIENTADOR : Prof. Hélio Mokarzel

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
B.M

Itajubá, 1987

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

"MODELOS NÃO LINEARES DE TURBINA E REGULADOR DE VELOCIDADE PARA SIMULAÇÃO DE GRANDES VARIAÇÕES DE CARGA EM UNIDADES GERADORAS SOB DIVERSAS CONDIÇÕES OPERATIVAS:-DESENVOLVIMENTO, AFERIÇÃO E DESEMPENHO PRÁTICO"

(Tese de Mestrado)

AUTOR : Marcelino Pereira de Almeida

ORIENTADOR : Prof. Hélio Mokarzel

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
BIM

Itajubá, 1987

PARA MINHA FAMÍLIA

Agradeço a todos aqueles que de uma forma ou outra colaboraram para a realização deste trabalho.

"MODELOS NÃO LINEARES DE TURBINA E REGULADOR DE VELOCIDADE PARA SIMULAÇÃO DE GRANDES VARIAÇÕES DE CARGA EM UNIDADES GERADORAS SOB DIVERSAS CONDIÇÕES OPERATIVAS: DESENVOLVIMENTO, AFERIÇÃO E DESEMPENHO PRÁTICO"

ÍNDICE GERAL

1- INTRODUÇÃO 05

2- OBJETIVO 06

3- DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS NÃO LINEARES 08

3.1- REGULADOR DE VELOCIDADE 08
3.1.1- Regulador Eletrônico 08
3.1.2- Sistema Copiador Eletro-hidráulico 14
3.1.3- Valores Base Adotados 20

3.2- TURBINA 21
3.2.1- Formulação Matemática 21
3.2.2- Determinação das Funções e dos Coeficientes Variáveis ... 26
3.2.3- Aferição do Modelo Não Linear 36
3.2.4- Valores Base Adotados 40

3.3- CONDUTO FORÇADO E GERADOR 41
3.3.1- Conduto Forçado 41
3.3.2- Gerador 45
3.3.3- Valores Base Adotados 47

4- MODELO NÃO LINEAR COMPLETO 48

4.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS 48

4.2- CÁLCULO DAS CONDIÇÕES INICIAIS 49

4.3- PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO 51
4.3.1- O Programa em CSMP III 51

4.3.2- Listagem do Programa em CSMP III 53
4.3.3- Detalhes da Simulação 60

5- DESEMPENHO DOS MODELOS NÃO LINEARES 62

5.1- COMPARAÇÃO COM OS ENSAIOS DE CAMPO 62

5.2- INFLUÊNCIA DA QUEDA BRUTA 78

6- APLICAÇÕES PRÁTICAS 81

6.1- ANÁLISE DE OCORRÊNCIAS E PESQUISA DE DEFEITOS 82

6.2- COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS EQUIPAMENTOS ENVOLVIDOS 84

7- CONCLUSÕES 93

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 96

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG.01- Modelo Não Linear do Regulador Eletrônico 13

FIG.02- Modelo Não Linear do Sistema Copiador 16

FIG.03- Curvas V(Y2) e D(Y2) 18

FIG.04- Modelos Não Lineares: - Turbina, Gerador, Cond. Forçado .. 25

FIG.05- Curvas de Colina da Turbina 27

FIG.06- Família de Curvas My(Y,H_L) 29

FIG.07- Família de Curvas Qy(Y,H_L) 30

FIG.08- Família de Curvas M(Y, f) 33

FIG.09- Família de Curvas Q(Y, f) 34

FIG.10- Coeficientes Variáveis Preliminares 35

FIG.11- Coeficientes Variáveis Definitivos 39

FIG.12- Mud. Topológica na Repres. do Conduto Forçado 61

FIG.13- Comparação entre Simulação e Ensaios de Campo 64

FIG.14- Rejeição de Carga (172,4 para 0 MW - Simulação) 66

FIG.15- Rejeição de Carga (365,0 para 0 MW - Simulação) 67

FIG.16A- Rejeição de Carga (523,0 para 0 MW - Simulação) 68

FIG.16B- Rejeição de Carga (523,0 para 0 MW - Ensaio) 69

FIG.17- Rejeição de Carga (692,0 para 0 MW - Simulação) 70

FIG.18- Absorção Brusca de Carga (-12,5 a 83,2 MW - Simulação) 71

FIG.19A- Absorção Brusca de Carga (0,0 a 173,9 MW - Simulação) 72

FIG.19B- Absorção Brusca de Carga (0,0 a 173,9 MW - Ensaio) 73

FIG.20- Absorção Brusca de Carga (0,0 a 358,7 MW - Simulação) 74

FIG.21A- Degrau de Carga (572,0 a 633,0 MW - Simulação) 75

FIG.21B- Degrau de Carga (572,0 a 633,0 MW - Ensaio) 76

FIG.22- Degrau de Carga (636,0 a 579,7 MW - Simulação) 77

FIG.23- Potência Disponível em Função da Queda Bruta 79

FIG.24- Rejeição Parcial de Carga (QB = 114 e 124m - Simulação) .. 80

FIG.25- Rejeição 750 MW (Simulação) - FQHZ, GATE 86

FIG.26- Rejeição 750 MW (Simulação) - ACEL, INTG, PROP 87

FIG.27- Rejeição 750 MW (Simulação) - MINI, SERV 88

FIG.28- Rejeição 750 MW (Simulação) - TORQ, VAZ 89

FIG.29- Rejeição 750 MW (Simulação) - MH, MF, MY 90

FIG.30- Rejeição 750 MW (Simulação) - QH, QF, QY 91

FIG.31- Rejeição 750 MW (Simulação) - PCH, HEPC 92

RESUMO:

Este trabalho apresenta e descreve os processos para o desenvolvimento e aferição de modelos não lineares de turbina hidráulica e regulador de velocidade. Tais modelos são necessários para se conseguir uma boa precisão na simulação de grandes variações de carga em unidades geradoras sob diversas condições operativas. Os bons resultados obtidos são mostrados através da comparação entre a simulação e os ensaios de campo realizados. Uma das principais aplicações está no estudo do comportamento dinâmico de máquinas ligadas a um sistema de transmissão em corrente contínua.

ABSTRACT:

This paper presents and describes the process for developing and adjusting of hydraulic turbine and speed governor non-linear models. These models are required in order to get good precision on large load changes simulation in generating units under different operating conditions. The good results obtained are verified by comparison between simulation and filed tests performed. One of the main applications is in the dynamic behaviour studies of machines connected to HVDC systems.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ B.M

1- INTRODUÇÃO

Unidades geradoras ligadas a um sistema de transmissão em corrente contínua estão sujeitas a grandes variações instantâneas de carga (p. ex.: bloqueio de um bipolo), e conseqüentemente, sujeitas também a grandes variações de freqüência. Se além disso tais unidades geradoras estão constantemente submetidas a grandes variações na queda líquida disponível, a previsão do comportamento dinâmico das mesmas torna-se mais complicada, visto que existirão inúmeros pontos de operação com características diferentes. No Brasil, este é o caso de ITAIPU-50Hz, onde cada turbina pode fornecer até 800 MW.

Nesta situação, modelos matemáticos precisos do Regulador de Velocidade e Turbina se fazem necessários para a realização dos estudos de desempenho dos mesmos, bem como do comportamento dinâmico da unidade geradora como um todo. Esses estudos são feitos através da simulação em computador digital e abrangem tanto a fase de testes de comissionamento como principalmente, a fase de operação normal.

Tais aplicações requerem o uso de modelos matemáticos não lineares de Regulador e Turbina, onde o máximo de efeitos relevantes devem ser representados. Isso é necessário para que se possa simular com boa precisão os mais variados distúrbios de carga (rejeições parciais ou totais, absorções bruscas, degraus), para qualquer ponto de operação da unidade geradora.

2- OBJETIVO

Na literatura técnica sobre o assunto (ver bibliografia) encontram-se modelos lineares e não lineares. Entretanto, como quase sempre são desenvolvidos para estudos de sistemas elétricos (por exemplo: estudos de estabilidade), tais modelos não contêm todos os ingredientes necessários para o estudo detalhado do desempenho dinâmico de equipamentos como o Regulador de Velocidade e Turbina, nas condições de operação citadas no capítulo anterior. Além disso, os processos de desenvolvimento de tais modelos e de obtenção dos parâmetros e coeficientes normalmente não são descritos, e nem mesmo os procedimentos necessários para aferição do desempenho prático dos modelos em relação aos ensaios de campo.

O objetivo deste trabalho é o de, aplicando-se os conhecimentos teóricos existentes, e aproveitando resultados práticos disponíveis, desenvolver os modelos matemáticos não lineares de Regulador de Velocidade e Turbina que atendam os seguintes requisitos:

- que sejam adequados aos estudos detalhados do comportamento dinâmico das variáveis inerentes aos equipamentos envolvidos.
- que sejam confiáveis e precisos para a simulação de vários distúrbios, grandes ou pequenos, tais como rejeições totais ou parciais, absorções bruscas e degraus de carga. E isso considerando os diversos pontos de operação da unidade geradora.
- que, mesmo resultando em modelos complexos e sofisticados sejam de uso simples, para que se possa montar cada caso a ser simulado com facilidade.

Além disso, neste trabalho pretende-se também descrever os processos envolvidos no desenvolvimento dos modelos não lineares tais como:

- determinação de parâmetros e coeficientes variáveis.
- aferição de modelo em relação aos ensaios de campo.

Tais objetivos tem um caráter prático, pois visam também o atendimento das necessidades de estudos existentes em ITAIPU sobre o assunto. Isso ocorre principalmente na parte da Usina que gera energia na freqüência de 50Hz e que está ligada à um sistema de transmissão de corrente contínua. Em função disso e para o desenvolvimento prático deste trabalho, serão utilizados dados, documentos e resultados de ensaios de campo referentes aos equipamentos da Usina de ITAIPU. (Ver bibliografia específica).

3- DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS NÃO LINEARES

3.1- REGULADOR DE VELOCIDADE

É comum atualmente o uso de reguladores de velocidade do tipo P.I.D., ou seja, que apresentem simultâneamente características de funcionamento dos tipos proporcional, integral e derivativa. O regulador de ITAIPU, fabricado pela NEYRPIC (RAPID77) é desse tipo. Sua filosofia de funcionamento permite separá-lo em duas partes distintas, ou sejam, o regulador eletrônico e o sistema copiador hidráulico. Isso porque a realimentação de abertura para o regulador não é real (curso de servomotor) e sim proporcional ao sinal de saída do próprio regulador eletrônico. O sistema hidráulico copia esta posição, daí o nome de sistema copiador. E é aqui onde está presente a realimentação real correspondente ao curso dos servomotores.

A seguir será mostrado o desenvolvimento dos modelos referentes a cada uma dessas duas partes.

3.1.1- REGULADOR ELETRÔNICO

O modelo não linear do regulador eletrônico (FIG.01) foi desenvolvido a partir das funções de transferência do modelo linear fornecido pelo fabricante. As não linearidades foram introduzidas mediante cálculo de circuitos e medições efetuadas no campo. Nesse caso, como se trata de circuitos eletrônicos com comportamento bem definido, tanto o cálculo quanto as medições são simples.

Em seguida são listadas as não linearidades introduzidas (mostradas na FIG.01), bem como os comentários sobre os procedimentos adotados na determinação de cada uma delas.

a- **Limitador de Potência Elétrica (LP = 1,065 pu)**

Tem a função de limitar a máxima potência a ser fornecida pela turbina em 800 MW, pois para valores superiores a este não existe garantia por parte do fabricante. Isso corresponde a 788 MW no gerador se considerarmos para o mesmo um rendimento de 98,5%.

Conforme pode ser visto na FIG.01, o valor ajustado de LP é comparado com o sinal de potência elétrica gerada (Pe). Uma vez atingido o limite, a saída desse somador apresentará um valor nulo, que jogado no seletor de mínimo subseqüente impede qualquer ação do regulador de velocidade, em função da queda de freqüência, no sentido de aumentar a ordem de abertura das palhetas, o que resultaria num aumento da potência elétrica gerada.

b- **Limitadores de Abertura (LA = 1,0 pu) e de Cavitação (LC = 0,92 pu)**

Durante a partida da unidade geradora o LA vai automaticamente a 100% de abertura, ou seja, permitirá até a abertura plena do distribuidor (592 mm). Isso corresponderá a um curso de 727 mm do servomotor. Esse dispositivo pode ser acionado manualmente pelo operador em casos de necessidade operativa, para a limitação da abertura do distribuidor em um valor intermediário.

Entretanto, em condições normais de operação (LA = 1,0 pu), quem faz a limitação efetiva é o limitador de cavitação (LC) que como o próprio nome já diz, visa impedir que a turbina trabalhe em regiões críticas sob o aspecto de cavitação, correspondentes a aberturas do distribuidor maiores que 92% (550 mm). É um dispositivo interno do regulador eletrônico ao qual os operadores não tem acesso.

Tanto LC quanto LA são mostrados na FIG.01, bem como o

seletor de mínimo associados aos mesmos, que escolhe sempre o que for menor.

c- Polarização de Partida (PP = 0,22 pu)

Quando a unidade geradora está em vazio, mas não sincronizada ao sistema, os limitadores LA e LC são desligados automaticamente pelo relé mostrado na FIG.01.

Entretanto, nessa situação é necessário que algum dispositivo faça essa limitação, no sentido de garantir que não haja abertura indevida do distribuidor. Essa é a função da polarização de partida (PP) que nada mais é que um limitador que entra em serviço quando LA e LP não estão operando.

O valor de PP (0,22 pu) é calculado (e testado em campo), em função da mínima queda bruta operacional verificada. Procura-se então ajustá-lo num valor tal que seja apenas um pouco maior que a abertura necessária nessa condição para que a máquina fique girando em vazio.

O limitador que estiver predominando entre LA, LC e PP, é quem limitará a ação do regulador eletrônico, impedindo-a de comandar um aumento da abertura das palhetas através do sistema copiador hidráulico. O sinal de comando resultante será Y1. (ver FIG.01)

d- Comutador de Ganho Integral (Função Não Linear)

Este comutador tem a função de alterar o ganho do integrador (mostrado na FIG.01) quando o sinal de entrada ultrapassar determinado valor, com o objetivo de aumentar o efeito integral e assim proporcionar transitoriamente, uma resposta mais rápida do regulador para grandes variações de freqüência.

Tal comutador está ajustado de forma a multiplicar o ganho

do integrador por três quando o sinal de entrada ultrapassar ±1,59 pu. Retornando dentro dessa faixa, o ganho volta automaticamente ao valor original.

e- Limites do Integrador

A saída do circuito integrador poderia ultrapassar a faixa de ±1,0 pu. Entretanto, só interessa que ele trabalhe entre os limites correspondentes ao curso do servomotor, visto que o integrador é o elemento principal do "posicionador" (regulador eletrônico), cuja saída será copiada pelo sistema hidráulico. A abertura do servomotor vai de 0 à 1,0 pu (0 à 727 m). Porém, o limite superior será definido pelo limite que estiver em operação. Assim sendo, teremos os seguintes limites para o integrador:

- LI1 : limite inferior = 0,0 pu
- LS1 : limite superior = predominantemente entre LA, LC e PP.

Como pode ser visto na FIG.01, no limite superior ainda existe um acréscimo de 0,05 pu. Tal valor foi detectado em medições efetuadas no campo e corresponde a tensão de polarização de um diodo existente no circuito.

f- Filtro Equivalente

No circuito eletrônico de medição de freqüência existem alguns filtros que apresentam constantes de tempo muito pequenas. Em função disso optou-se por representar um filtro equivalente como mostrado na FIG.01. A constante de tempo resultante foi $T_f = 0,1$ s.

Os parâmetros principais (Bt, Td, Tn) que basicamente definem o comportamento dinâmico do regulador, são determinados e otimizados por simulação. Para a confirmação prática são feitos ensaios de degrau de carga, registrando-se

os sinais correspondentes a freqüência e a abertura do distribuidor, cuja análise permite avaliar o desempenho dinâmico do equipamento. Em ITAIPU temos:

- Bt - Estatismo transitório (Bt = 40%)
- Td - Constante de tempo de integração (Td = 8,0 s)
- Tn - Constante de tempo acelerométrica (Tn = 1,0 s)
- NTV- Dosagem do filtro acelerômetro (NTV = 10,0)
- Bp - Estatismo permanente (Bp = 2%)

Como já foi mencionado, este é um regulador do tipo P.I.D., cujas ações agora podem ser identificadas (ver FIG.01), onde:

- O estatismo transitório funciona como um ganho proporcional (1/Bt).
- O integrador faz obviamente a ação integral.
- O acelerômetro, associado ao filtro acelerométrico realiza a ação derivativa.

Ressalta-se ainda que o regulador pode funcionar com realimentação de abertura (sinal eletrônico equivalente a posição do servomotor) ou com realimentação da potência elétrica gerada.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BAM

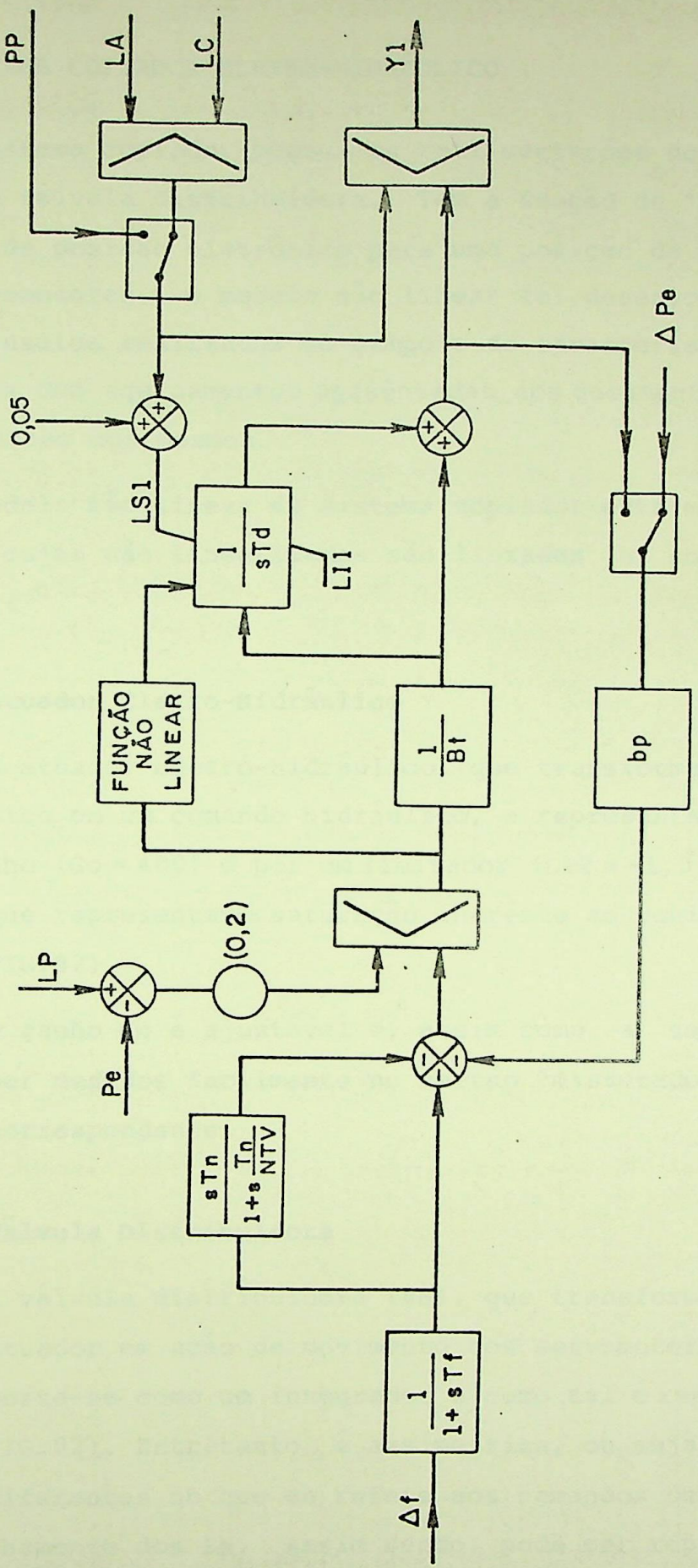


FIG.01 - MODELO NÃO LINEAR DO REGULADOR ELETRÔNICO

3.1.2- SISTEMA COPIADOR ELETRO-HIDRÁULICO

O sistema copiador possui as realimentações de abertura real e da válvula distribuidora. Tem a função de "copiar" o sinal de posição eletrônico para uma posição de abertura dos servomotores. O modelo não linear foi desenvolvido a partir de ensaios realizados no campo e de características construtivas dos equipamentos aprsentadas nos documentos técnicos referentes aos mesmos.

O modelo não linear do sistema copiador está mostrado na FIG. 02, cujas não linearidades são listadas e comentadas a seguir:

a- Atuador Eletro-Hidráulico

O atuador eletro-hidráulico, que transforma o sinal eletrônico em um comando hidráulico, é representado por um ganho (Go = 400) e por um limitador (LI2 = -1,0 pu; LS2 = 1,0 pu) que representam a saturação inerente ao equipamento. (ver FIG.02).

O ganho Go é ajustável e, assim como a saturação podem ser medidos facilmente no cartão "misturador" eletrônico correspondente.

b- Válvula Distribuidora

A válvula distribuidora (VB), que transforma o comando do atuador em ação de movimento dos servomotores (SM), comporta-se como um integrador e como tal é representada.(Ver FIG.02). Entretanto é assimétrica, ou seja, tem cursos diferentes no que se refere aos comandos de abertura e fechamento dos SM. Assim sendo, pode ser representada por um integrador limitado (LI3 = -7,625 pu; LS3 = 1,125 pu). O curso assimétrico é uma característica de projeto.

A constante de tempo da válvula distribuidora (Tv = 0,07 s)

é determinada através de ensaio, onde injeta-se um degrau de comando no cartão eletrônico, que seja suficiente para saturar o atuador, e registra-se o deslocamento da VD através de um oscilógrafo. Com o registro determina-se então o tempo necessário para o deslocamento total da válvula.

c- Saturação do Variômetro de Realimentação da VD

Existe um transdutor (variômetro) que transforma o deslocamento físico da VD em um sinal elétrico, usado para a realimentação. Entretanto, ele tem um curso diferente da válvula, saturando-se em $\pm$4,0 pu, correspondente aos limites LI4 e LS4. LS4 não será atingido, pois estará limitado por LS3. Isso pode ser verificado em ensaios como aquele descrito no ítem anterior.

Tal sinal produzido pelo variômetro passa por uma taxa de realimentação (AS = 0,005) que é ajustada eletronicamente. (Ver FIG.02).

d- Assimetria da VD

A válvula distribuidora, além de assimétrica, ainda tem um curso útil inferior menor que o total. Isso é definido na FIG.02, onde é representado pelo limitador em que LI5 = -4,125 e LS5 = 1,125 pu.

e- Faixa Morta da VD

Outra característica de VD é a faixa morta de resposta, ou seja, partindo-se da posição de equilíbrio existe uma região em que a válvula não responde. Isso serve como um "filtro" para pequenas oscilações. É uma característica de projeto sendo FMX = $\pm$0,125 pu. (Ver FIG.02).

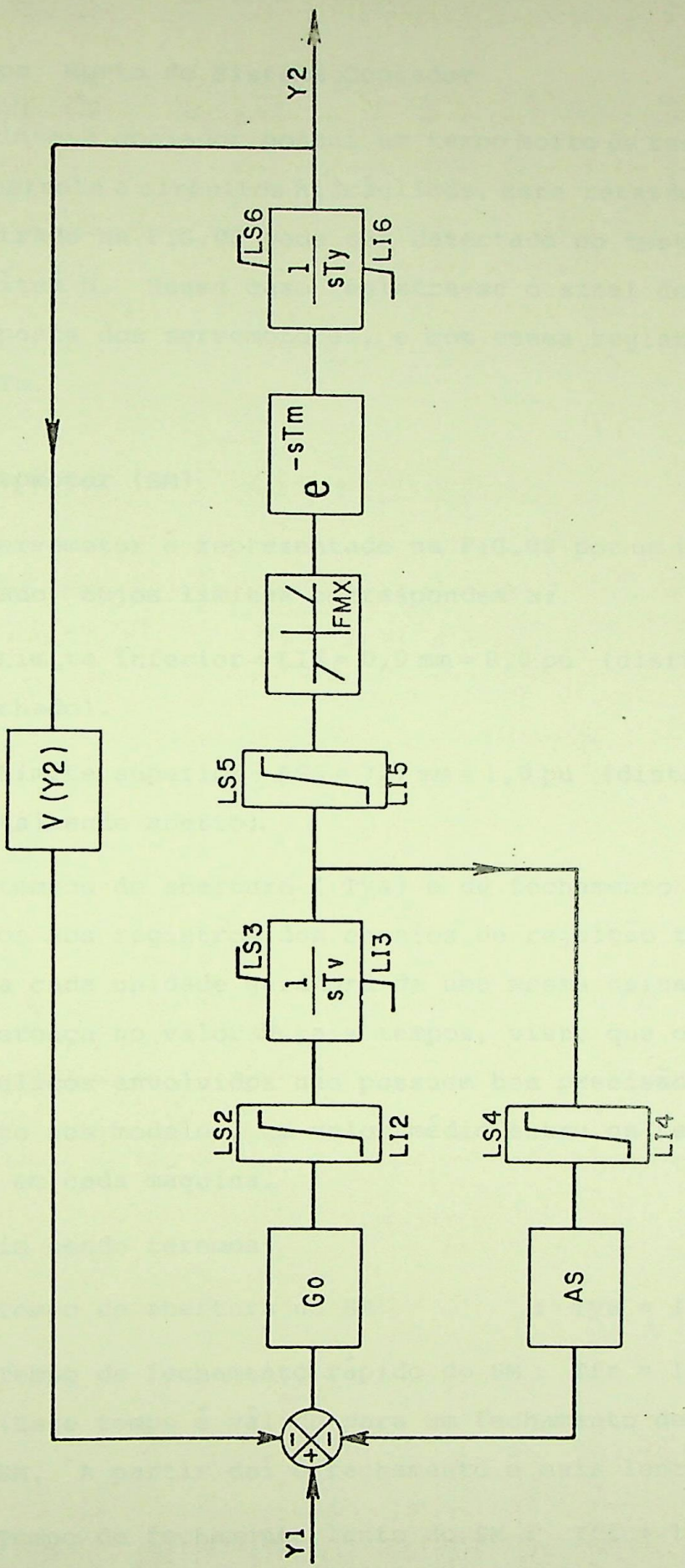


FIG.02 - MODELO NÃO LINEAR DO SISTEMA COPIADOR

f- Tempo Morto do Sistema Copiador

O sistema copiador possui um tempo morto de resposta, o que é inerente a circuitos hidráulicos. Este retardo (Tm = 0,06s) mostrado na FIG.02 pode ser detectado no teste mencionado no ítem b. Nesse caso registra-se o sinal de entrada e a resposta dos servomotores, e com esses registros calcula-se Tm.

g- Servomotor (SM)

O servomotor é representado na FIG.02 por um integrador limitado, cujos limites correspondem a:

- Limite inferior = LI6 = 0,0 mm = 0,0 pu (distribuidor fechado).
- Limite superior = LS6 = 727 mm = 1,0 pu (distribuidor totalmente aberto).

Os tempos de abertura (Tya) e de fechamento (Tf) são obtidos nos registros dos ensaios de rejeição total de carga. Para cada unidade geradora de uma mesma usina pode haver diferença no valor de tais tempos, visto que os ajustes hidráulicos envolvidos não possuem boa precisão. Usa-se portanto nos modelos, um valor médio entre os tempos detectados em cada máquina.

Assim sendo teremos:

- Tempo de abertura do SM : Tya = 15,4 s.
- Tempo de fechamento rápido do SM : Tfr = 10,3 s.
  (Esse tempo é válido para um fechamento de 100 à 17% do SM. A partir daí o fechamento é mais lento).
- Tempo de fechamento lento do SM : Tfℓ = 17,85 s.
  (Tempo válido para fechamento de 17 à 0% do SM).

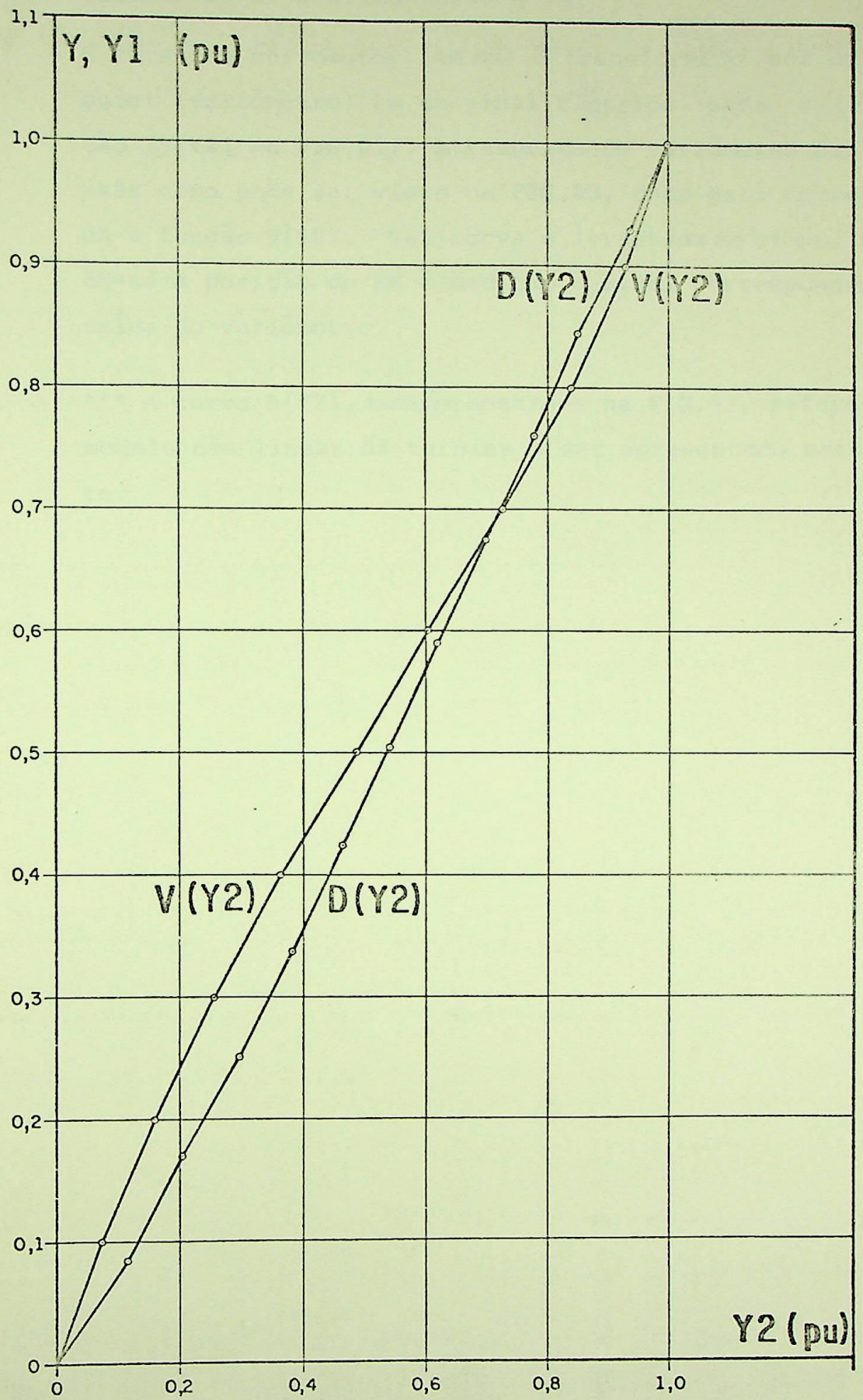


FIG.03 - CURVAS V(Y2) E D(Y2)

h- Variômetro de Realimentação do SM

O curso do servomotor (em mm) é transformado por um transdutor (variômetro) em um sinal elétrico para realimentação (V(Y2) na FIG.02). A resposta do variômetro não é linear como pode ser visto na FIG.03, onde está representada a função V(Y2). Tal curva é levantada no campo, variando-se a posição do SM e medindo o sinal correspondente na saída do variômetro.

*** A curva D(Y2), também mostrada na FIG.03, refere-se ao modelo não linear da turbina a ser apresentado mais adiante.

3.1.3- VALORES BASE ADOTADOS

Para a conversão pu dos parâmetros do Regulador de Velocidade (itens 3.2.1 e 3.2.2) foram adotados os seguintes valores base:

1 pu para os sinais eletrônicos	=	10 V
1 pu de freqüência	=	50 Hz
1 pu de potência elétrica	=	740 MW
1 pu de abertura do servomotor	=	727 mm
1 pu de deslocamento da válvula distribuidora	=	4 mm

3.2- TURBINA

O modelo não linear a ser desenvolvido neste trabalho aplica-se às turbinas hidráulicas do tipo FRANCIS. As turbinas de ITAIpu são desse tipo, geram até 800 MW e foram fabricadas pela VOITH.

3.2.1- FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

As variáveis de interesse principais para a moldelagem da Turbina são o torque mecânico (M) e a vazão (Q), que podem ser representadas pelas seguintes equações:

$$M = F(Y, Hi, f) \quad (01)$$

$$Q = F(Y, Hi, f) \quad (02)$$

onde: Y = abertura do distribuidor
Hi = queda líquida disponível
f = freqüência (ou velocidade)

A queda líquida total equivalente (Hi) em regime dinâmico depende da queda líquida em regime permanente (H_L) e da variação de pressão no conduto forçado (h), ou seja:

$$Hi = F(H_L, h) \quad (03)$$

Assim sendo, reescrevendo-se as equações (01) e (02):

$$M = F(Y, H_L, h, f) \quad (04)$$

$$Q = F(Y, H_L, h, f) \quad (05)$$

Aplicando-se a derivada parcial nas equações (04) e (05) tem-se:

$$dM = \frac{\partial M}{\partial Y} dY + \frac{\partial M}{\partial H_L} dH_L + \frac{\partial M}{\partial h} dh + \frac{\partial M}{\partial f} df \quad (06)$$

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial Y} dY + \frac{\partial Q}{\partial H_L} dH_L + \frac{\partial Q}{\partial h} dh + \frac{\partial Q}{\partial f} df \quad (07)$$

Considerando as variações infinitesimais como pequenas variações, obtem-se:

$$\Delta M = \frac{\partial M}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial M}{\partial H_L} \Delta H_L + \frac{\partial M}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial M}{\partial f} \Delta f \qquad (08)$$

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial Q}{\partial H_L} \Delta H_L + \frac{\partial Q}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f \qquad (09)$$

Pode-se adicionar a cada membro das equações (08) e (09) o valor inicial das variáveis principais, ou sejam:

- Torque mecânico inicial (Mo)
- Vazão inicial (Qo)

$$Mo + \Delta M = (Mo + \frac{\partial M}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial M}{\partial H_L} \Delta H_L) + \frac{\partial M}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial M}{\partial f} \Delta f \qquad (10)$$

$$Qo + \Delta Q = (Qo + \frac{\partial Q}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial Q}{\partial H_L} \Delta H_L) + \frac{\partial Q}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f$$

O valor inicial do torque mecânico (Mo) somado à variação do mesmo (ΔM) corresponde ao valor integral daquela variável principal (M), ou seja:

$$Mo + \Delta M = M \qquad (12)$$

O termo entre parênteses na equação (10), para que não fique restrito à pequenas variações de Y e H_L pode ser representado por uma função não linear que cubra toda a região de operação da turbina, ou seja:

$$Mo + \frac{\partial M}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial M}{\partial H} \Delta H_L = My\ (Y, H_L) \qquad (13)$$

Com um raciocínio análogo para a equação (10) da vazão, obtém-se:

$$Qo + \Delta Q = Q \qquad (14)$$

$$Qo + \frac{\partial Q}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial Q}{\partial H_L} \Delta H_L = Qy\ (Y, H_L) \qquad (15)$$

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MACÁ
BAM

Substituindo-se as equações (12), (13), (14) e (15) nas equações (10) e (11), tem-se que:

$$M = My\ (Y, H_L) + \frac{\partial M}{\partial h}\ \Delta h + \frac{\partial M}{\partial f}\ \Delta f \qquad (16)$$

$$Q = Qy\ (Y, H_L) + \frac{\partial Q}{\partial h}\ \Delta h + \frac{\partial Q}{\partial f}\ \Delta f$$

Entretanto, as equações (16) e (17) ainda contêm parcelas lineares, inadequadas para simulação de grandes distúrbios. Em função disso, é necessário que se obtenha coeficientes variáveis que possam representar os efeitos correspondentes para qualquer ponto de operação de turbina. Com essa finalidade serão obtidas as seguintes curvas em função da abertura do distribruidor (Y):

- $\frac{\Delta M}{\Delta h}\ (Y)$ para $\frac{\partial M}{\partial h}$
- $\frac{\Delta M}{\Delta f}\ (Y)$ para $\frac{\partial M}{\partial f}$
- $\frac{\Delta Q}{\Delta h}\ (Y)$ para $\frac{\partial Q}{\partial h}$
- $\frac{\Delta Q}{\Delta f}\ (Y)$ para $\frac{\partial Q}{\partial f}$

Com isso finalmente obtêm-se as equações não linerares completas para a representação da turbina em qualquer ponto de operação, ou sejam:

$$M = My\ (Y, H_L) + \frac{\Delta M}{\Delta h}\ (Y)\ .\ \Delta h + \frac{\Delta M}{\Delta f}\ (Y)\ .\ \Delta f \qquad (18)$$

$$Q = Qy\ (Y, H_L) + \frac{\Delta Q}{\Delta h}\ (Y)\ .\ \Delta h + \frac{\Delta Q}{\Delta f}\ (Y)\ .\ \Delta f \qquad (19)$$

Onde cada parcela pode ser assim descrita:

- M — Torque mecânico total fornecido pela turbina.
- My (Y, H_L) — Torque mecânico fornecido pela turbina em função da abertura do distribuidor e da queda líquida disponível.

- $\frac{\Delta M}{\Delta h}(Y) \cdot \Delta h$ - Parcela adicional de torque mecânico gerado pela variação da pressão na caixa espiral.

- $\frac{\Delta M}{\Delta f}(Y) \cdot \Delta f$ - Parcela de torque mecânico decorrente da variação da velocidade da turbina. É o termo responsável pelo amortecimento (damping) da turbina em relação à variação da freqüência.

- Q - Vazão total que passa através da turbina.

- $Qy\ (Y, H_L)$ - Vazão que passa pela turbina em função da abertura do distribuidor e da queda líquida disponível.

- $\frac{\Delta Q}{\Delta h}(Y) \cdot \Delta h$ - Parcela adicional de vazão decorrente da variação de pressão na caixa espiral.

- $\frac{\Delta Q}{\Delta f}(Y) \cdot \Delta f$ - Parcela de vazão provocada pela variação da velocidade da turbina.

Como se pode notar, todas as curvas e coeficientes das equações não lineares da turbina são função da abertura (Y) do distribuidor. O distribuidor que é movimentado pelos servomotores não mantem uma relação linear com os mesmos, em termos de deslocamento. Portanto, para converter-se a abertura dos SM em Y, usa-se a curva D (Y2) mostrada na FIG.03. Esta curva pode ser obtida durante o ensaio mencionado no ítem 3.1.2-h.

O modelo não linear da turbina correspondente às equações (18) e (19) é mostrado na FIG.04. Os demais componentes do modelo completo para simulação mostrados nessa figura, serão desenvolvidos nos itens posteriores deste trabalho.

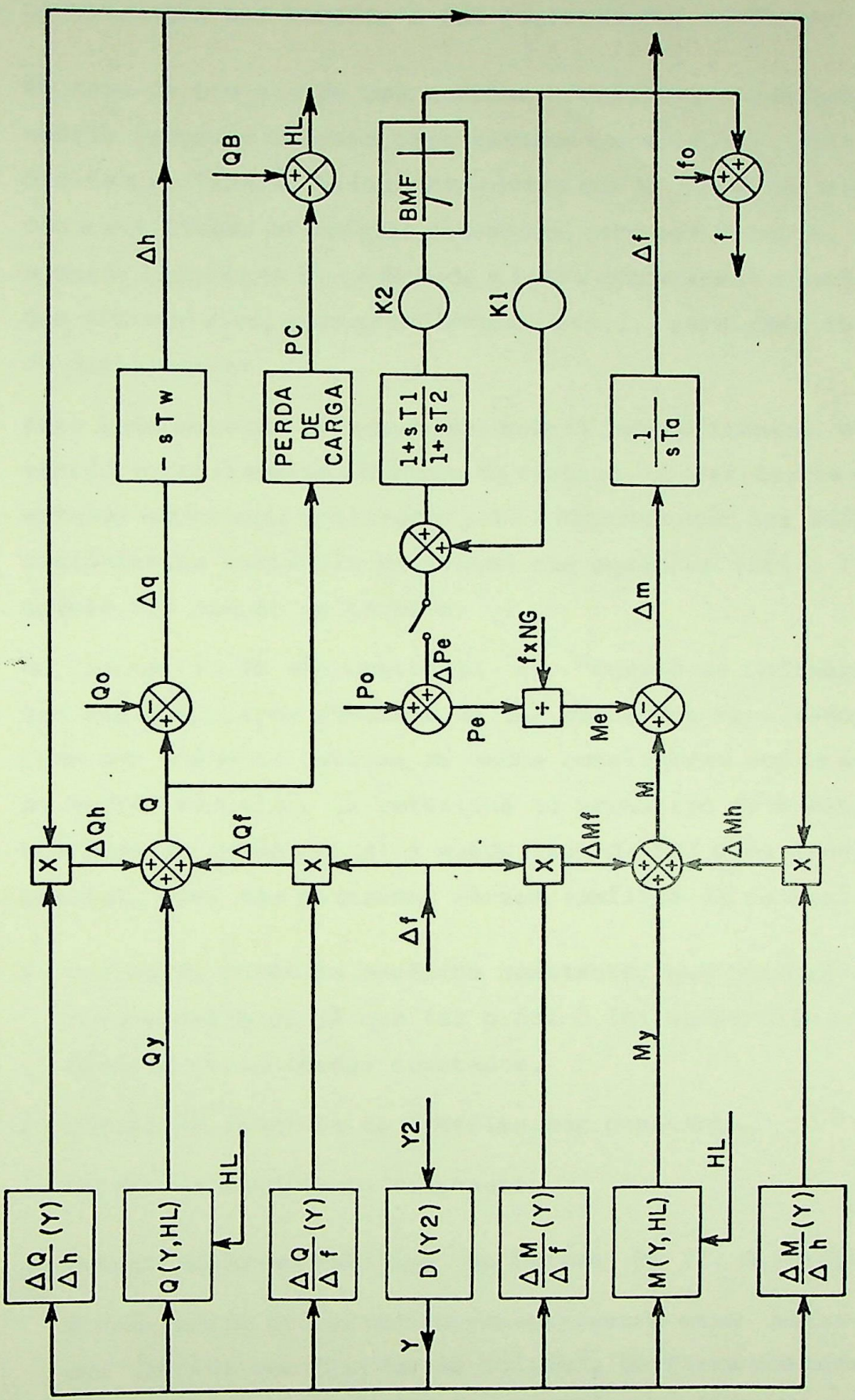


FIG.04 - MODELOS NÃO LINEARES: TURBINA, GERADOR, CONDUTO FORÇADO

3.2.2- DETERMINAÇÃO DAS FUNÇÕES E DOS COEFICIENTES VARIÁVEIS

Na fase de projeto de uma turbina hidráulica é construído um modelo reduzido da mesma para estudos e avaliações. Isso possibilita a realização de inúmeros testes que só são mesmo possíveis com a utilização de modelos reduzidos, como por exemplo, variar a queda líquida ao longo de toda a faixa operacional e medir o torque desenvolvido, vazão,rendimento, etc..., para cada abertura do distribuidor.

Isso tudo gera uma grande quantidade de conhecimentos e dados sobre o comportamento dinâmico da turbina. Os resultados de tais ensaios serão aqui utilizados para a determinação das funções e coeficientes variáveis presentes nas equações (18) e (19) do modelo não linear da turbina.

Na figura FIG.05 são mostradas as "Curvas de Colinas" que são uma compilação adequada de uma parte dos resultados, gerada por inúmeras tabelas de dados construídas com os ensaios de modelo reduzido, já referidos ao protótipo de turbina. São gráficos de vazão (m^3/s) x queda líquida (m) para freqüência nominal, onde são mostradas várias famílias de curvas:

- Curvas de potência mecânica constante, que equivalem ao torque mecânico já que tal gráfico foi construído para freqüência (velocidade) constante.
- Curvas de abertura do distribuidor constante.
- Curvas de rendimento constante.

a- Determinação das Famílias de Curvas $My\ (Y, H_L)$ e $Qy\ (Y, H_L)$

É necessário processar convenientemente essa massa de dados contida nas "Curvas de Colina", de forma que possa ser utilizada nas equações (18) e (19). Para isso faz-se vários "cortes" no gráfico da FIG.05, como por exemplo, para cada 5 metros de intervalo de queda líquida.

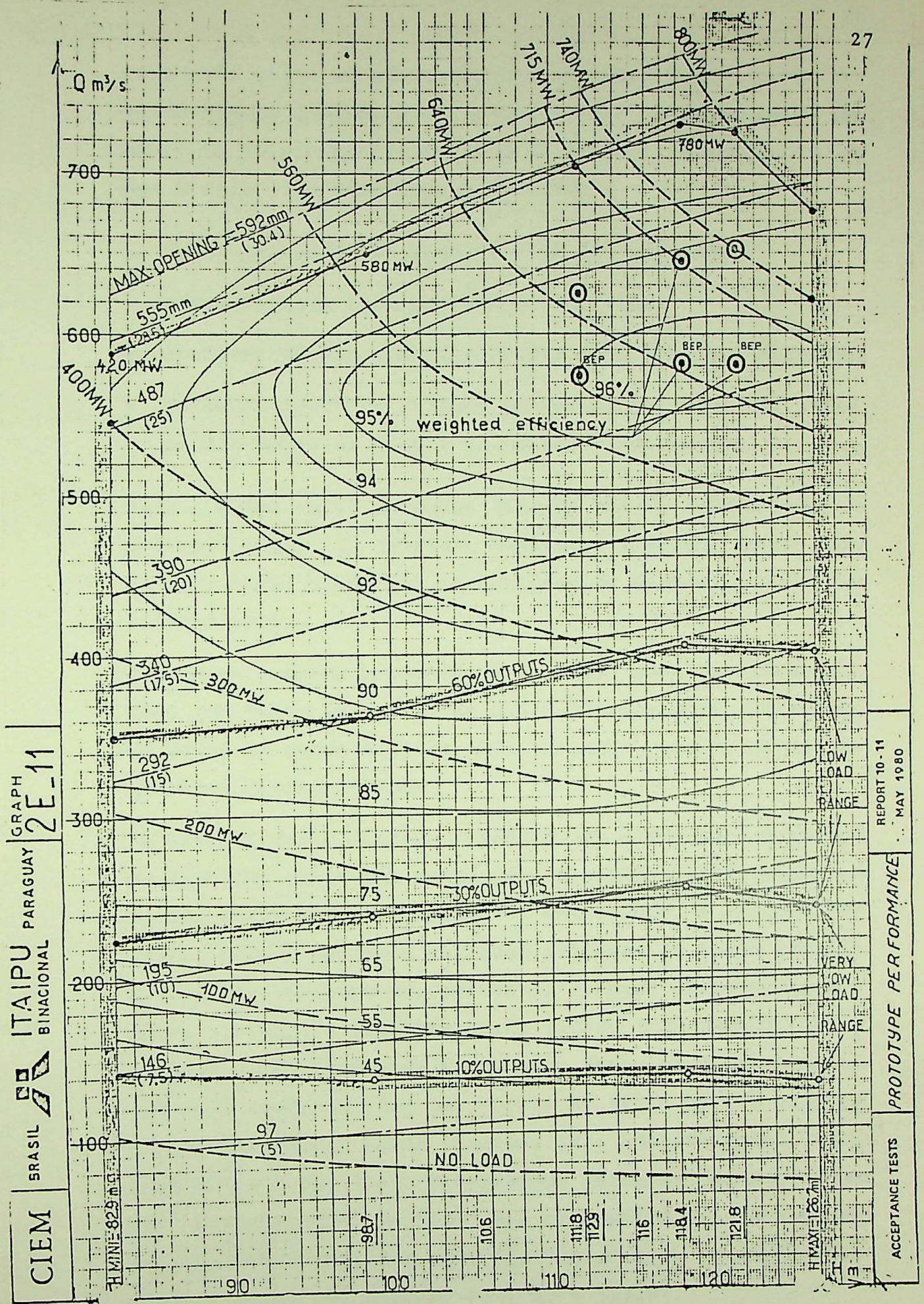


FIG.05 - CURVAS DE COLINA DA TURBINA

Para cada valor de queda líquida (p. ex.: 90 m - queda líquida mínima considerada), procura-se a primeira curva de abertura constante (97 mm) do distribuidor. Nesse ponto temos o valor das seguintes grandezas:

- Vazão que pode ser lida no eixo das ordenadas.
- Queda líquida lida no eixo da abcissas.
- Abertura do distribuidor (curva de abertura constante).
- Potência mecânica (torque mecânico) que pode ser interpolada entre as curvas de potência constante.

Para o mesmo valor de queda líquida (90 m), procura-se a próxima curva de abertura constante (146 mm). Nesse ponto calcula-se novamente um conjunto de grandezas como as citadas acima.

Repete-se o mesmo processo de cálculo para as intersecções com todas as curvas de abertura constante, para o mesmo valor de queda líquida (90 m no caso), até a curva de abertura máxima (592 mm).

Ao término desse processo teremos uma curva para o torque mecânico My (Y) e uma curva para a vazão Qy (Y), ambas para uma queda líquida constante. Entretanto é necessário cobrir toda a faixa de variação provável da queda líquida disponível. Escolhe-se, portanto, valores intermediários entre a mínima e a máxima queda (125 m, por exemplo) e para cada valor repete-se o processo descrito anteriormente. Com isso serão obtidas as curvas My (Y) e Qy (Y) para cada uma das várias queda líquidas (H_L) consideradas. Aglomerando-se todas essas informações teremos as duas famílias de curvas, My (Y, H_L) e Qy (Y, H_L) necessárias para a representação em modelo das equações (18) e (19). Tais curvas são mostradas nas figuras FIG. 06 e FIG.07.

Mostrar eqs. a estas famílias de curvas ?

ver Fig. 17.

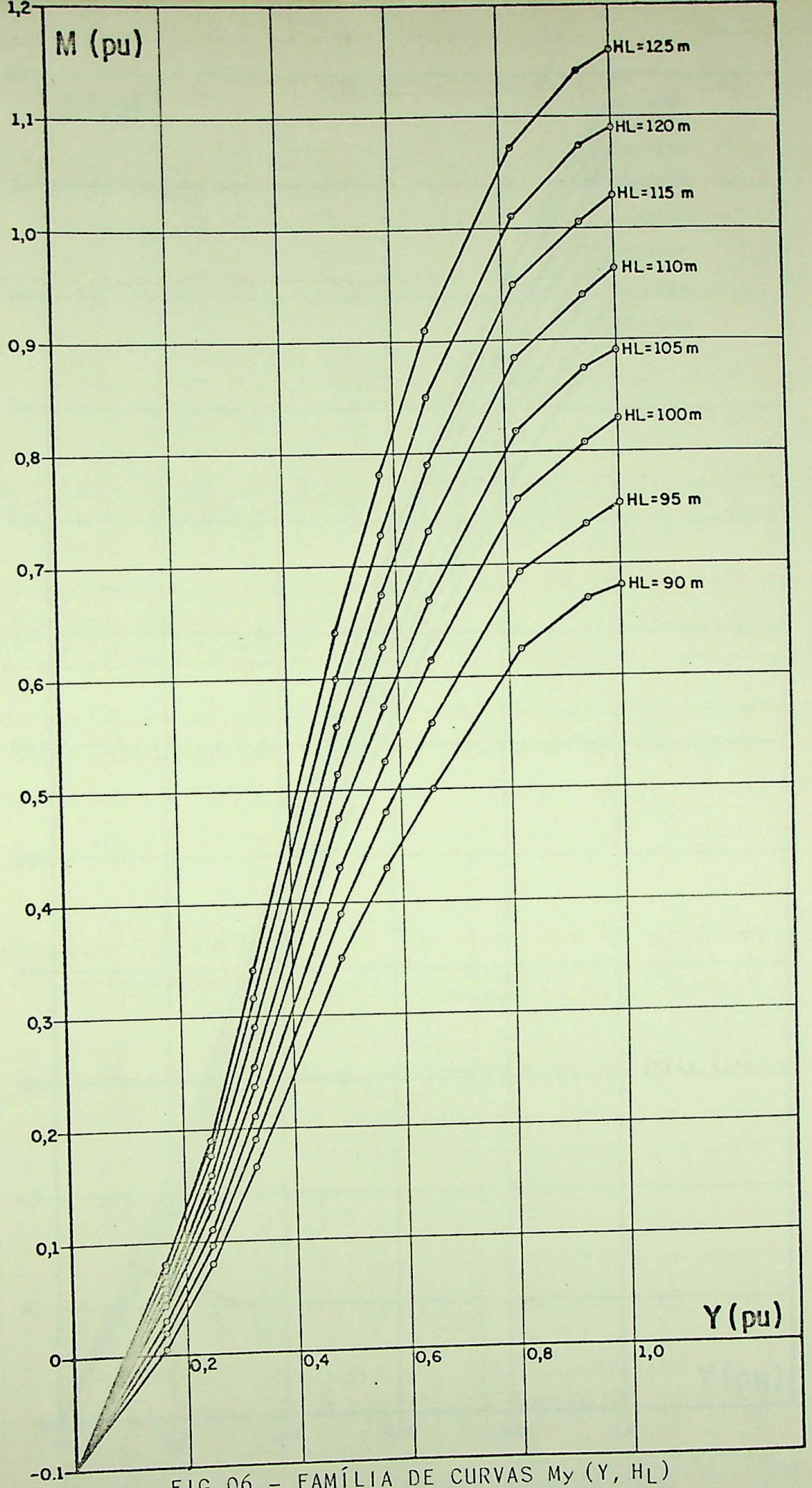


FIG.06 - FAMÍLIA DE CURVAS M_y (Y, H_L)

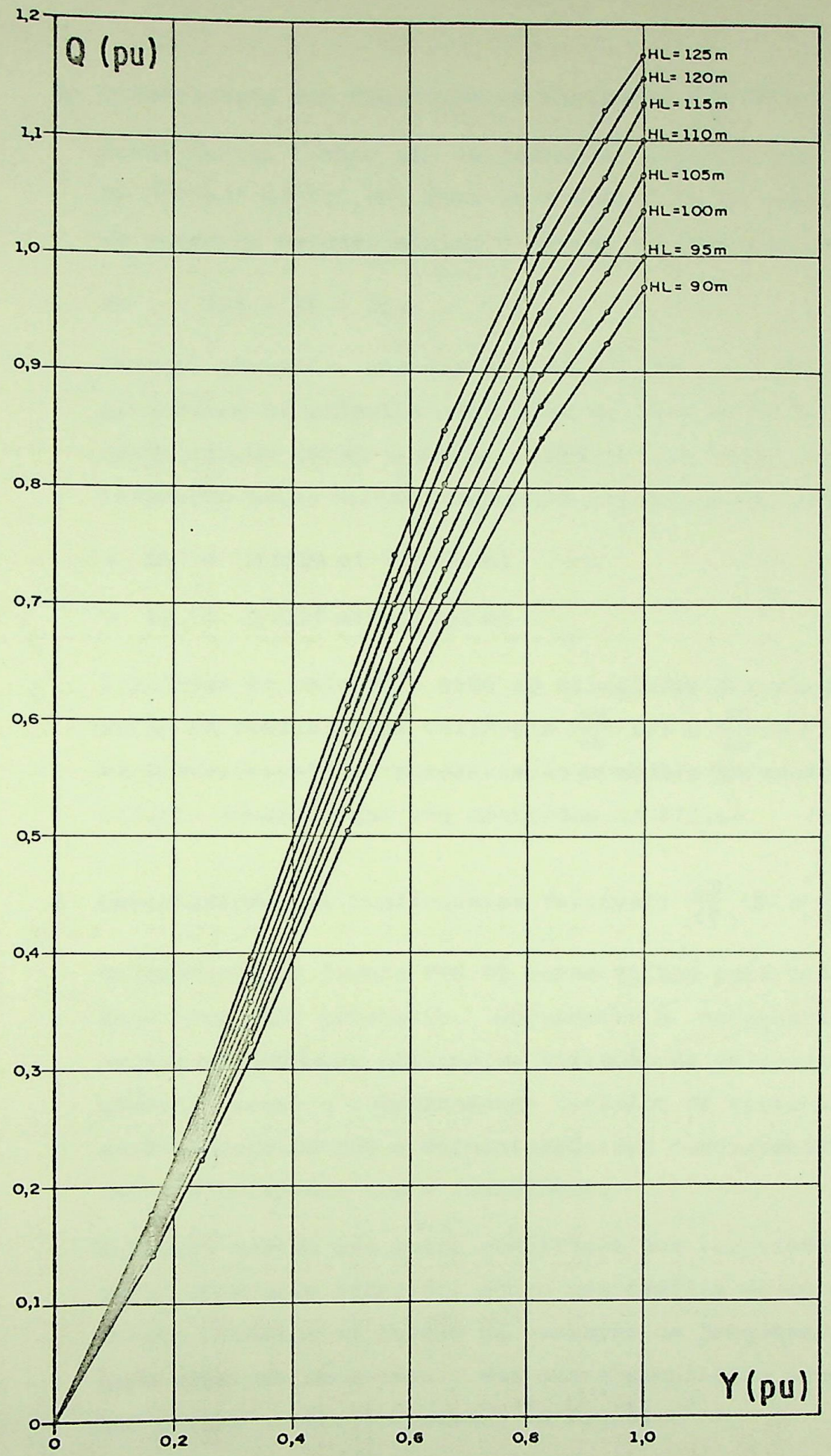


FIG.07 - FAMÍLIA DE CURVAS Q_y (Y, H_L)

b- Determinação dos Coeficientes Variáveis $\frac{\Delta M}{\Delta h}(Y)$ e $\frac{\Delta Q}{\Delta h}(Y)$

Essas curvas também são determinadas a partir das "Curvas de Colina" da FIG.05. Toma-se o intervalo de queda líquida entre os valores mínimo e máximo considerados, ou seja:

$\Delta h = 125 - 90 = 35\ m$

Tem-se, portanto, uma variação constante para Δh. Pode-se aproveitar os cálculos efetuados no item anterior para as queda mínima (90 m) e máxima (125 m). Para cada ponto de intersecção com as curvas de abertura (Y) constantes calcula-se:

- $\Delta M = M(125\ m) - M(90\ m)$
- $\Delta Q = Q(125\ m) - Q(90\ m)$

Dividindo-se cada ΔM e cada ΔQ calculados por Δh, obtem-se então os coeficientes variáveis $\frac{\Delta M}{\Delta h}(Y)$ e $\frac{\Delta Q}{\Delta h}(Y)$ também necessários para a representação em modelo das equações (18) e (19). Essas curvas são mostradas na FIG.10.

c- Determinação dos Coeficientes Variáveis $\frac{\Delta M}{\Delta f}(Y)$ e $\frac{\Delta Q}{\Delta f}(Y)$

Os gráficos da figura FIG.05 foram feitos para uma velocidade (nominal) constante. Obviamente é necessário representar-se também os efeitos da variação da velocidade (freqüência) sobre o comportamento dinâmico da turbina. Isso será conseguido com a determinação dos coeficientes variáveis relacionados com a freqüência.

A FIG.08 mostra uma outra compilação dos resultados dos ensaios de modelo reduzido, agora uma família de curvas de torque mecânico em função da variação de freqüência, para cada abertura constante. Uma outra compilação semelhante, mas para a vazão, é mostrada na FIG.09.

O processo de obtenção dos coeficientes variáveis neste caso, é semelhante àquele descrito no item anterior (3.2.2-b).

Em vez de Δh, calculamos agora Δf, dentro da faixa considerada.

- $\Delta f = f_{máx} - f_{mín}$
- $\Delta f_M = 1{,}15 - 0{,}925 = 1{,}225$ pu
- $\Delta f_Q = 1{,}2 - 0{,}8 = 0{,}4$ pu

Para as freqüências mínima e máxima em cada caso, e para cada intersecção com as curvas de abertura (Y) constante, calcula-se:

- $\Delta M = M\ (1{,}15\ pu) - M\ (0{,}925\ pu)$
- $\Delta Q = Q\ (1{,}2\ pu) - Q\ (0{,}8\ pu)$

Dividindo-se cada ΔM e cada ΔQ calculados pelos Δf e Δf correspondentes, obtem-se os coeficientes variáveis $\frac{\Delta M}{\Delta f}(Y)$ e $\frac{\Delta Q}{\Delta f}(Y)$, necessários para completar a representação em modelo das equações (18) e (19). Essas curvas também são mostradas na FIG.10.

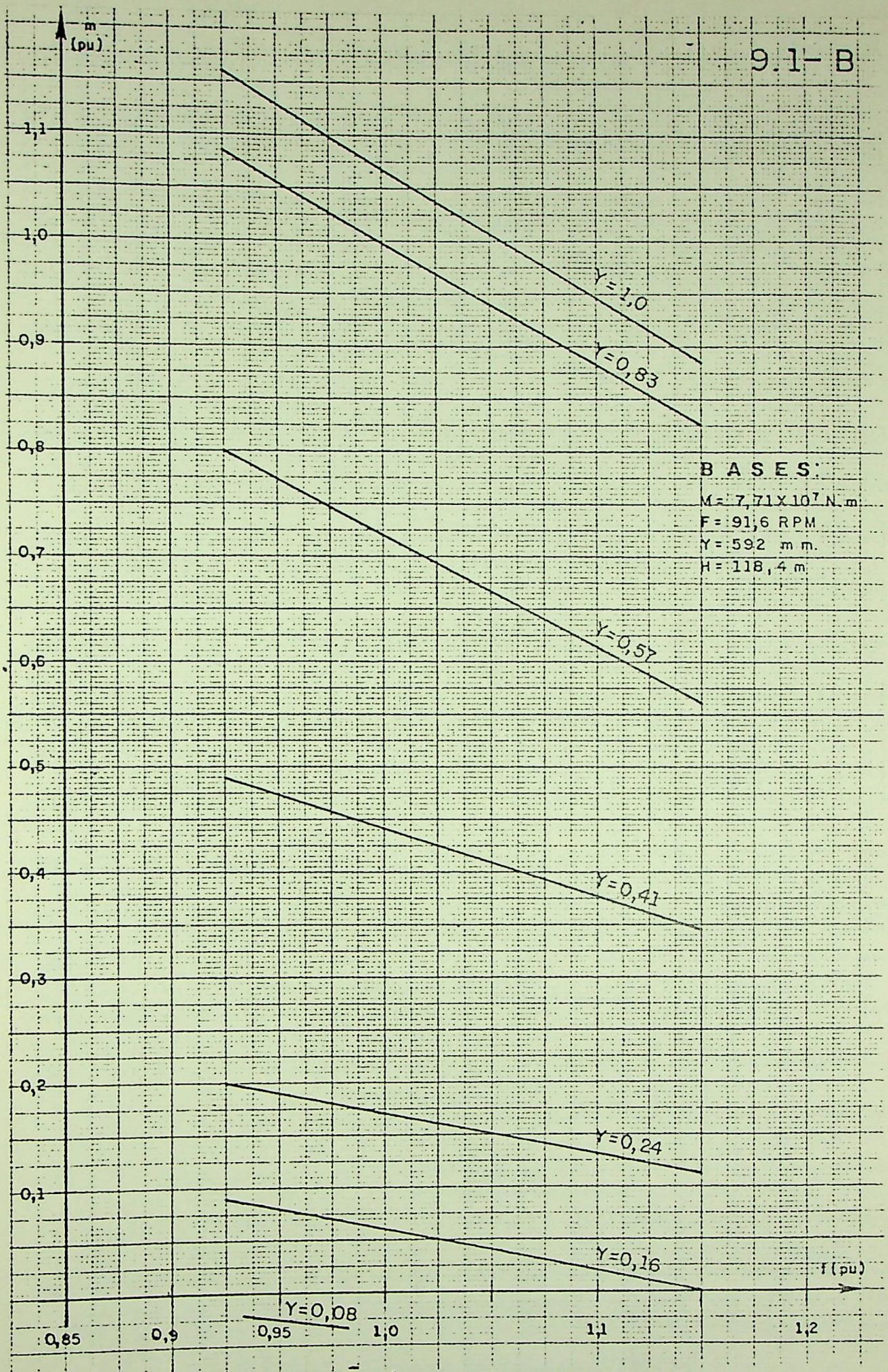


FIG.08 - FAMÍLIA DE CURVAS M (Y, f)

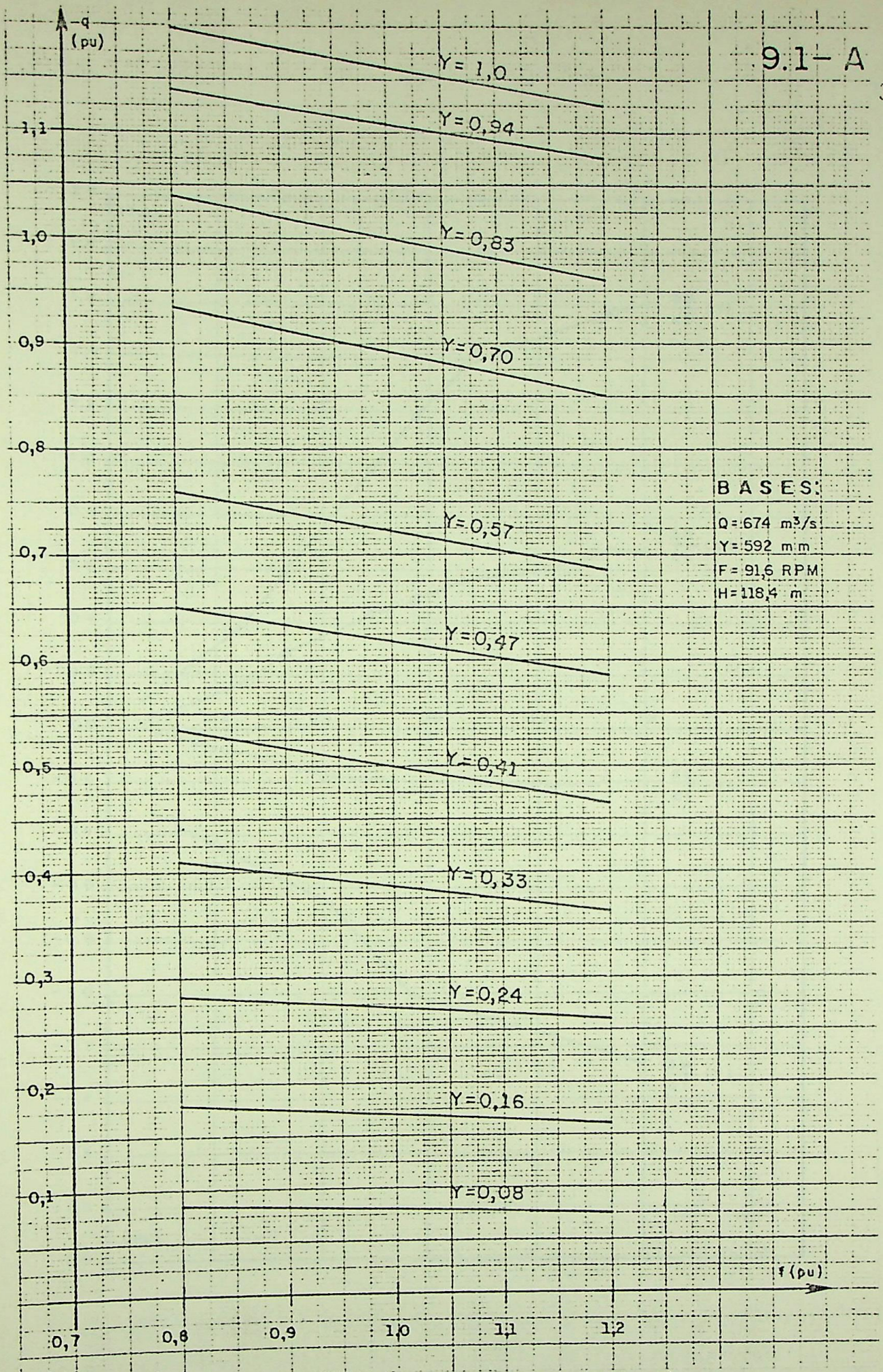


FIG.09 - FAMÍLIA DE CURVAS Q (Y, f)

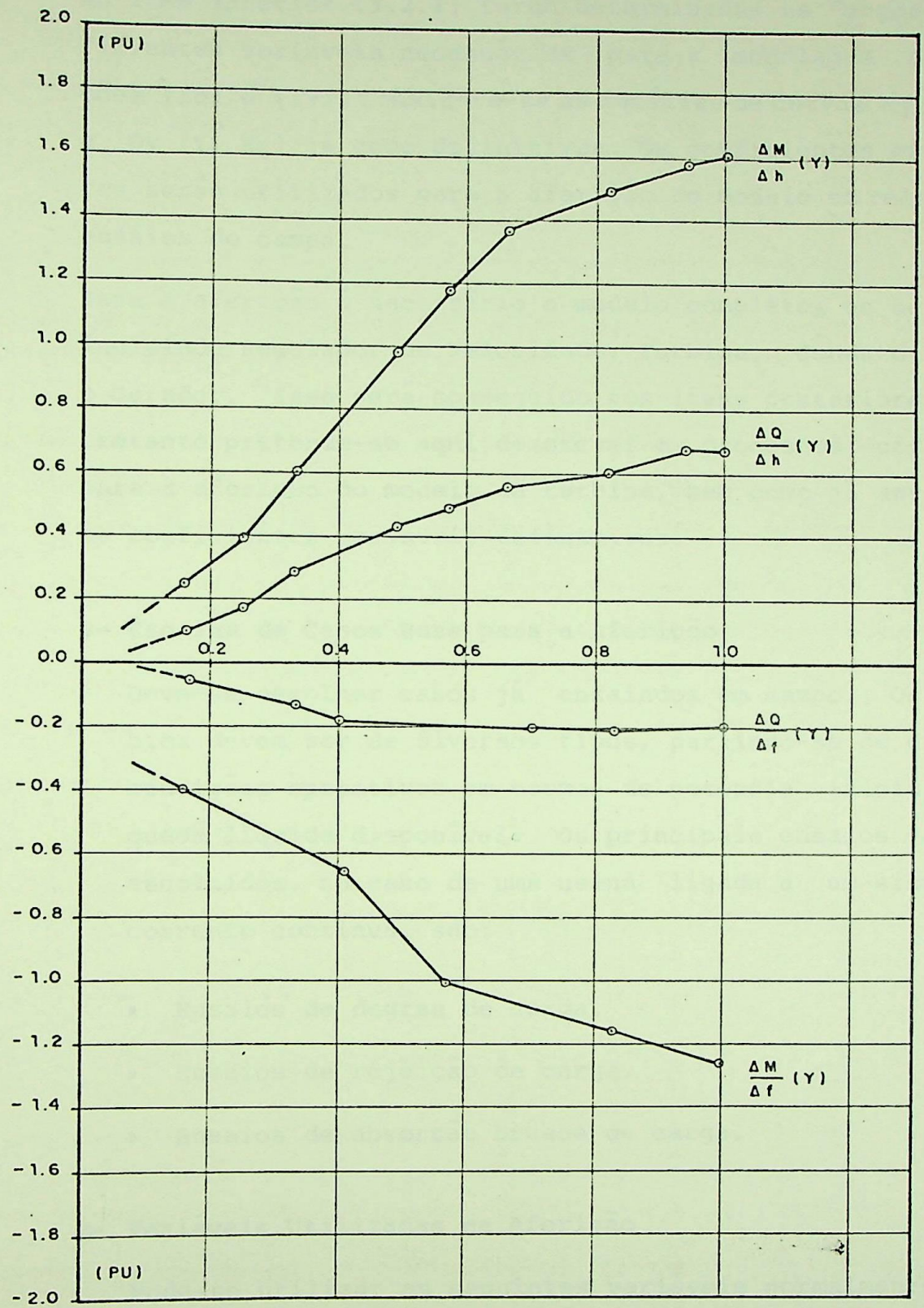


FIG.10 - COEFICIENTES VARIÁVEIS PRELIMINARES

3.2.3- AFERIÇÃO DO MODELO NÃO LINEAR

No item anterior (3.2.2) foram determinadas as funções e coeficientes variáveis necessários para a modelagem das equações (18) e (19). Considera-se as famílias de curvas My (Y, H_L) e Qy (Y, H_L) já como definitivas. Os coeficientes preliminares serão utilizados para a aferição do modelo em relação aos ensaios de campo.

Para a aferição é necessário o modelo completo, ou seja, inincluindo Regulador de Velocidade, Turbina, Conduto Forçado e Gerador. Isso será conseguido nos itens posteriores. Entretanto pretende-se aqui descrever os processos utilizados para a aferição do modelo da turbina, bem como já apresentar os coeficientes variáveis definitivos.

a- Escolha de Casos Base para a Aferição

Deve-se escolher casos já ensaiados em campo. Os distúrbios devem ser de diversos tipos, partindo-se de diversas condições operativas em termos de potência inicial e de queda líquida disponível. Os principais ensaios a serem escolhidos, no caso de uma usina ligada a um sistema de corrente contínua, são:

- Ensaios de degrau de carga.
- Ensaios de rejeição de carga.
- Ensaios de absorção brusca de carga.

b- Variáveis Utilizadas na Aferição

Pode-se utilizar as seguintes variáveis normalmente registradas durante os ensaios:

- Freqüência.
- Sobrepressão na caixa espiral.

- Abertura do distribuidor.

c- Coeficientes Predominantes

Verifica-se durante as simulações que determinados coeficientes têm maiores efeitos sobre determinadas variáveis, ou seja:

- $\frac{\Delta M}{\Delta f}$ (Y) - Coeficiente que mais influencia no comportamento da freqüência.
- $\frac{\Delta Q}{\Delta h}$ (Y) - Coeficiente que mais influencia no comportamento da sobrepressão na caixa espiral.

d- Aferição do Modelo

Uma vez definidos os diversos casos base (item "a") a serem utilizados, e usando os coeficientes preliminares já definidos, simula-se todos os casos base e compara-se as variáveis de aferição (item "b") com os resultados correspondentes aos ensaios de campo.

Atua-se então sobre os coeficientes predominantes (item "c"), modificando os pontos da curva nas regiões que se fizerem necessárias para aproximar o comportamento da variável simulada com o respectivo registro de campo. É um processo iterativo (necessita de várias tentativas) cuja facilidade aumenta à medida que se vai adquirindo experiência no assunto.

Uma vez conseguida uma boa aproximação dos resultados da simulação em relação aos ensaios de campo, atua-se de modo semelhante sobre os coeficientes não predominantes ($\frac{\Delta M}{\Delta h}$ (Y) e $\frac{\Delta Q}{\Delta f}$ (Y)) para a efetuação de um ajuste fino.

O trabalho de aferição estará pronto quando a precisão

pré-estipulada para os resultados da simulação de todos os casos escolhidos tiver sido alcançada.

Ao término de todo o processo de aferição descrito, teremos novos coeficientes variáveis. São novas curvas agora já devidamente ajustadas em relação aos ensaios de campo. E como para tal, partiu-se de premissas diversas em termos de distúrbios e de condições operativas, os coeficientes obtidos proporcionarão confiabilidade ao modelo em qualquer condição.

Os coeficientes variáveis definitivos são mostrados na FIG.11.

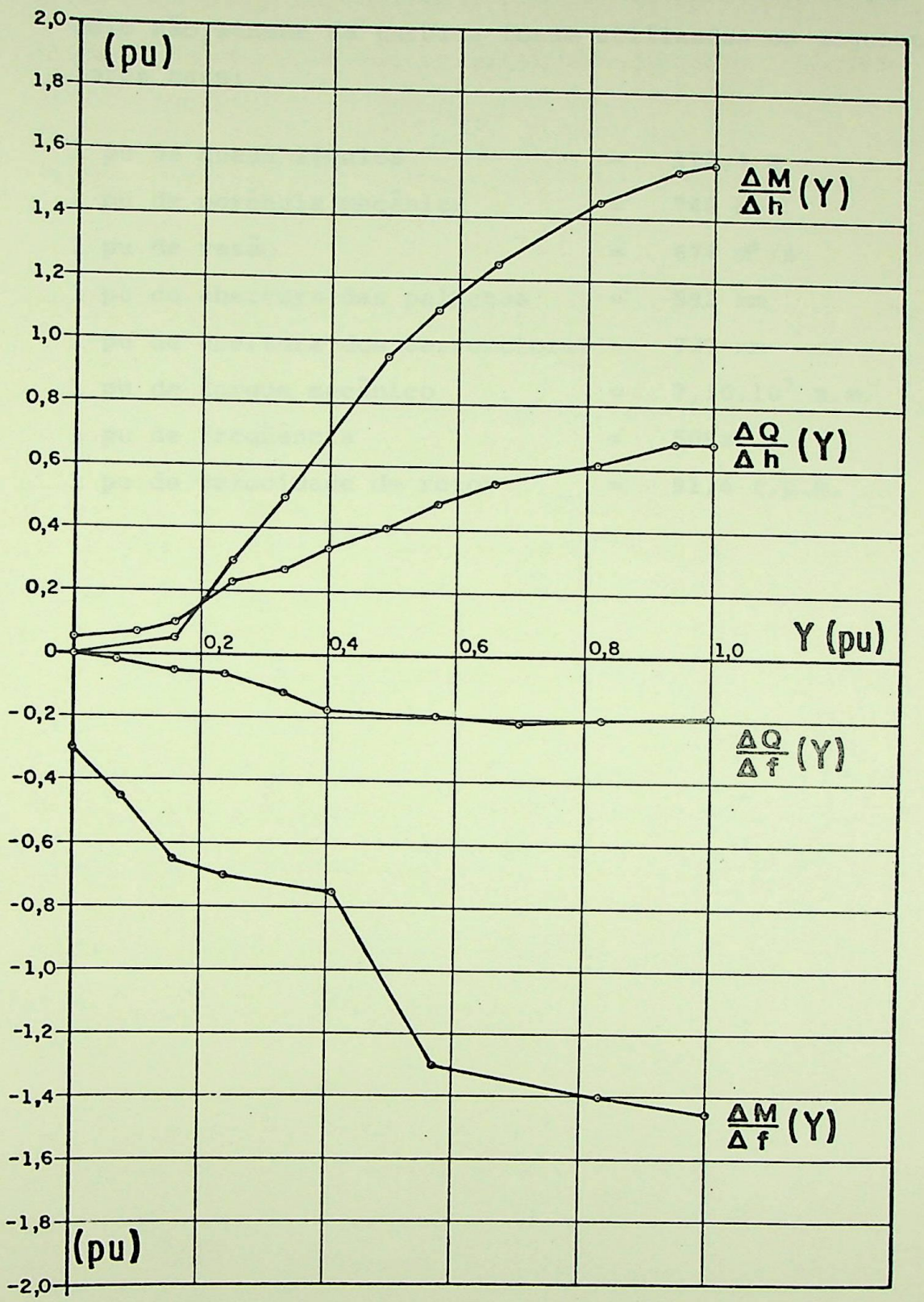


FIG.11 - COEFICIENTES VARIÁVEIS DEFINITIVOS

3.2.4- VALORES BASE ADOTADOS

Para a conversão pu dos dados referentes a elaboração do modelo não linear da turbina foram utilizados os seguintes valores base:

1 pu de queda líquida	=	118,4 m
1 pu de potência mecânica	=	740 MW
1 pu de vazão	=	674 m^3/s
1 pu de abertura das palhetas	=	592 mm
1 pu de abertura dos servomotores	=	727 mm
1 pu de torque mecânico	=	$7{,}10.10^7$ n.m
1 pu de freqüência	=	50Hz
1 pu de velocidade do rotor	=	91,6 r.p.m.

3.3- CONDUTO FORÇADO E GERADOR

3.3.1- CONDUTO FORÇADO

Condutos forçados curtos podem ser representados satisfatoriamente pela aproximação usual de 1ª ordem, como é o caso de ITAIPU. Sendo assim tem-se:

$$\frac{\Delta h}{\Delta Q} = s \cdot Tw \qquad (20)$$

onde:

- Δh = Variação da pressão no conduto forçado.
- ΔQ = Variação da vazão no conduto forçado.
- Tw = Tempo de inércia da água.
- s = Operador de Laplace.

O cálculo de Tw normalmente é feito utilizando-se o comprimento equivalente do conduto forçado. Entretanto para o cálculo da pressão em pontos de interesse (p. ex.: na caixa espiral), é necessário um cálculo detalhado de Tw para cada sessão que compõe o conduto forçado total equivalente, ou seja:

$$Tw = Tw(CF) + Tw(CE) + Tw(TS) \qquad (21)$$

onde:

- CF = Conduto forçado.
- CE = Caixa espiral.
- TS = Tubo de sucção.

a- Cálculo de Tw (CF)

$$Tw(CF) = \frac{Q \cdot L(CF)}{g \cdot H_L \cdot A(CF)} \qquad (22)$$

onde:

- Q = Vazão nominal = 674 m^3/s
- $L\,(CF)$ = Comprimento do conduto forçado = 142,2 m
- H_L = Queda líquida nominal = 118,4 m
- $A\,(CE)$ = Área da secção do conduto = $\pi . D^2\,(CF)/4$
- $D\,(CF)$ = Diâmetro interno do conduto forçado = 10,5 m
- g = Aceleração da gravidade = 10 m/s^2

Logo: $Tw\,(CF) = 0,935$ s

b- Cálculo de Tw (CE)

$$Tw\,(CE) = \frac{L\,(CE) \,.\, V\,(CE)}{g \,.\, H_L} \qquad (23)$$

Tem-se ainda que:

$$L\,(CE) \,.\, V\,(CE) = (V\,(CE) + 1,2) \,.\, \frac{Q}{D\,(CE)} \qquad (24)$$

$$V\,(CE) = \frac{Q}{A\,(CE)} \qquad (25)$$

Substituindo-se (24) e (25) em (23), vem:

$$Tw\,(CE) = \frac{\left(\frac{Q}{A\,(CE)} + 1,2\right) \frac{Q}{D\,(CE)}}{g \,.\, H_L} \qquad (26)$$

onde:

- $A\,(CE)$ = Área da seção média da caixa espiral = $\pi . D^2\,(CE)/4$
- $D\,(CE)$ = Diâmetro médio da caixa espiral = 9,64 m

Logo: $Tw\,(CE) = 0,616$ s

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

c- Cálculo de Tw (TS)

$$Tw\,(TS) = \frac{L\,(TS)\,.\,V\,(TS)}{g\,.\,H_L} \qquad (27)$$

Tem-se também que:

$$L\,(TS)\,.\,V\,(TS) = 3{,}3\,.\,\frac{Q}{D\,(TS)}$$

Substituindo-se (28) em (27) vem:

$$Tw\,(TS) = \frac{3{,}3\,\dfrac{Q}{D\,(TC)}}{g\,.\,H_L} \qquad (28)$$

onde:

- D (TS) = Diâmetro médio do tubo de sucção = 8,6 m

logo : Tw (TS) = 0,218 s

Usando-se novamente a equação (21) para o cálculo de Tw total:

Tw = 0,935 + 0,616 + 0,218

Tw = 1,769 s

Outro fator a ser considerado para a confecção do modelo não linear é a "perda de carga" no conduto forçado. Todo o equacionamento matemático é desenvolvido utilizando-se queda líquida (H_L). Entretanto, no campo só se tem valores disponíveis de queda bruta, além do que, durante grandes distúrbios, devido a grandes variações da vazão, a queda líquida varia sensivelmente.

Portanto é necessário incluir no modelo um cálculo automático permanente da "perda de carga" (PC) no conduto forçado, de modo a sempre se ter o valor real da queda líquida.

Conseqüentemente ficará também disponível a variável queda bruta (QB).

Para o cáluclo de PC é utilizada a seguinte expressão:

$$PC = 3,55 \times 10^{-6} . Q^2 \qquad (30)$$

ou em pu:

$$PC = 0,0136 . Q^2 \qquad (31)$$

logo:

$$H = QB - PC \qquad (32)$$

A represetnação do Conduto Forçado bem como o bloco correspondente ao cálculo da "perda de carga" são mostrados na FIG.04.

3.3.2- GERADOR

O Gerador foi representado pelas seguintes equações, em pu:

$$\Delta f = \frac{\Delta M}{s \cdot Ta} \quad (33)$$

$$\Delta m = M - Me \quad (34)$$

$$Me = Pe/f \quad (35)$$

onde:

- Δm = Torque acelerante.
- M = Torque mecânico (turbina).
- Me = Torque elétrico (carga).
- Pe = Potência elétrica (carga).
- f = Freqüência (velocidade) da unidade.
- Ta = Tempo de aceleração da unidade geradora.

sendo que:

$$Ta = \frac{n^2 \cdot GD^2}{365000 \cdot P} \quad (36)$$

Para as Unidades Geradoras de ITAIPU-50Hz, tem-se:

- n = Velocidade nominal de rotação da unidade = 90,9 r.p.m.
- GD^2 = Momento de Inércia do Gerador + Turbina = 332000 ton.m^2
- P = Potência nominal da unidade = 740 MW

logo: $Ta = 10,16$ s

A representação do gerador também é mostrada na FIG.04. Foi considerado para o mesmo um rendimento (N_G) de 98,5%.

Na FIG.04 também é representado o amortecimento artificial introduzido no controle do Elo de Corrente Contínua (STAB-50). Os dados referentes ao STAB-50 são os seguintes:

K1 = 32 MW/Hz

K2 = 2667 MW/Hz

BMF = -0,2 Hz (banda morta de freqüência)

T1 = 1,0 s

T2 = 5,0 s

Entretanto, durante a execução dos ensaios de campo mencionados neste trabalho tal equipamento permaneceu desligado.

3.3.3- VALORES BASE ADOTADOS

Os valores base utilizados no capítulo 3.3. são os mesmos relacionados no item 3.2.4.

A medida de pressão na caixa espiral (CE) é feita na cota 87,26 m. Considerando-se um nível de montante de 219,6 m, temos que:

1 pu de altura de queda para a (CE) = 219,6 - 87,26 = 132,34 m

4- MODELO NÃO LINEAR COMPLETO

4.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os modelos matemáticos aqui desenvolvidos para o Regulador de Velocidade (FIG.01 e FIG.02) e para a Turbina + Conduto Forçado + Gerador (FIG.04) resultaram em modelos altamente não lineares. Entretanto, usando-se uma linguagem adequada para simulação, todos os blocos e funções podem ser facilmente representados em computador. Quando se quer precisão para estudos de desempenho dinâmico dos equipamentos envolvidos é importante que se represente o máximo de efeitos possíveis, para que se possa verificar com clareza o comportamento das diversas variáveis de interesse.

Isso leva à criação de muitas variáveis, cujo cálculo das condições iniciais correspondentes é complexo, visto que mudam a cada caso simulado. O cálculo manual para usc como dados de entrada seria muito trabalhoso, requerendo portanto, uma automatização do processo. Isso será mostrado no próximo item (4.2.).

O programa de computador utilizado neste trabalho foi feito em CSMP III (Continuous System Modeling Program III) da IBM, cuja listagem e alguns outros detalhes de simulação serão mostrados no item (4.3).

Ressalta-se ainda que os resultados dos ensaios de modelo reduzido da turbina é uma grande fonte de informações úteis para a modelagem detalhada da mesma, pois muitos ensaios só são mesmo viáveis em modelo reduzido, tal como aqueles citados no item 3.2.2.

4.2- CÁLCULO DAS CONDIÇÕES INICIAIS

Com o objetivo de simplificar o uso do programa para simulação, incluiu-se no mesmo as instruções para o cálculo automático das condições iniciais. Com isso, para se simular qualquer distúrbio é suficiente fornecer os seguintes dados:

- Tipo do distúrbio
- Potência elétrica inicial e final
- Níveis de montante e jusante (queda bruta)

As condições iniciais referem-se aos dispositivos representados por integradores. São eles:

- Integrador do Regulador Eletrônico (FIG.01)
- Válvula Distribuidora (FIG.02)
- Servomotor (FIG.02)
- Gerador (FIG.04)

Em regime permanente (condição de pré-distúrbio) a válvula distribuidora está sempre em posição de equilíbrio, ou seja, um deslocamento nulo. Sua condição inicial, portanto, será considerada igual a zero.

No gerador ocorre fenômeno semelhante, pois na condição pré-distúrbio a freqüência está aproximadamente em seu valor nominal, 50 ou 60Hz. Considera-se então a condição inicial do integrador correspondente igual a 1,0 pu (ou igual a zero caso se trabalhe com variações).

Restam portanto, o integrador do regulador eletrônico e aquele que representa o servomotor. São apenas dois, mas estão relacionados entre si através de família de curvas, daí a dificuldade do cálculo manual. O processo de cálculo automático é descrito a seguir:

a- Utilizando-se os dados de entrada "níveis de montante e de jusante" o programa calcula a queda líquida inicial (H_{LO}). Com esse valor e com o outro dado de entrada "potência elétrica inicial" (Mo), o programa entra na família de curvas My (Y, H_L) inversa (Y (My, H_L)) e calcula a abertura inicial (Yo) do distribuidor.

b- Para o cálculo da queda líquida (item "a") é necessário o cálculo "perda de carga inicial" (PCo), que depende da "vazão inicial" (Qo), cujo cálculo por sua vez depende também da "queda líquida inicial".

Como se pode notar, todas as variáveis envolvidas (Qo, Mo, H_{LO}, Yo) são interdependentes, formando um "loop algébrico", necessitando portanto, de um cálculo iterativo. Entretanto, o CSMP III tem recursos próprios para solucionar estes problemas.

c- Além disso, ainda é necessário calcular o valor inicial do integrador eletrônico (Y1o). Calcula-se antes o valor inicial da abertura do servomotor (Y2o). Para isso o programa entra na curva D (Y2o) inversa (Y2 (Yo)), fornecendo então Y2o. Com Y2o entra na curva V (Y2) e calcula Y1o.

Com isso, as condições iniciais necessárias estarão automaticamente disponíveis para a simulação.

4.3- PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO

4.3.1- PROGRAMA EM CSMP III

O programa de computador foi feito utilizando-se o CSMP III, já mencionado anteriormente, e que é adequado a esse tipo de simulação. A seguir serão mostrados alguns exemplos de "declarações" CSMPIII utilizadas no programa:

CSMP III	EXPRESSÃO MATEMÁTICA	
Y = INTGRL (IC, X)	$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{s}$	(integrador)
Y = REALPL (IC, T, X)	$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{1 + sT}$	
Y = LEDLAG (T1, T2, X)	$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1 + sT1}{1 + sT2}$	
Y = DELAY (N, T, X)	$\frac{Y(s)}{X(s)} = e^{-sT}$	(tempo morto)
Y = AFGEN (FUNCT, X)	$Y = f(X)$	
Y = TWOVAR (FUNCT, X, Z)	$Y = f(X, Z)$	

O manual do CSMP III (ver referências) traz informações completas sobre todas as demais "declarações" disponíveis.

O programa aqui desenvolvido é dividido basicamente em duas partes principais:

a- Parte Inicial (INITIAL)

Nessa parte estão os valores dos parâmetros utilizados e é onde se faz os cálculos iniciais do programa, tais como aqueles mencionados no item 4.2.a, b, c.

b- Parte Dinâmica (DYNAMIC)

É a parte principal do programa onde estão representadas to

dos os modelos não lineares desenvolvidos (Regulador de Velocidade, Turbina, Conduto Forçado, Gerador), bem como a interligação entre eles.

Nesta parte do programa estão também representadas as famílias de curvas $My(Y, H_L)$, $Qy(Y, H_L)$, bem como suas funções inversas. Estão aí também as demais curvas: D(Y2) e sua inversa V(Y2). Além disso estão representadas todas as curvas dos coeficientes variáveis definitivos: $\frac{\Delta M}{\Delta f}(Y)$, $\frac{\Delta M}{\Delta h}(Y)$, $\frac{\Delta Q}{\Delta f}(Y)$ e $\frac{\Delta Q}{\Delta h}(Y)$.

Nesta parte também são definidos:

- Método de Integração (no caso foi escolhido o RKSFX: Runge-Kutta de 4ª ordem usando intervalo de integração fixo).
- Intervalo de integração (Δt = 0,01 segundos).
- Tempo de simulação (ts = 50,0 segundos).
- Variáveis de saída, intervalo de impressão.

No item seguinte será mostrada a listagem do programa em CSMP III.

4.3.2- LISTAGEM DO PROGRAMA EM CSMP III

a- Título e MACRO

```
$$SCONTINUOUS SYSTEM MODELING PROGRAM  III   V1M3   TRANSLATOR OUTPUT$$$
*-------------------------------------------------------------------
LABEL       MOD. NAO LINEARES DE  REG. VELOCIDADE E TURBINA          MPA
LABEL       REJEICAO DE CARGA EM ITAIPU (   692.0 MW   )   -  DISJ. MOD.
*------MACRO INTEG1-----------------------------------------------
MACRO A=INTEG1(CI,AUX,P1,P2)
PROCEDURE AUX1=LIM(A,AUX,P1,P2)
AUX1=AUX
IF(A.LE.P1)AUX1=AMAX1(0.0,AUX)
IF(A.GE.P2)AUX1=AMIN1(0.0,AUX)
ENDPROCEDURE
B=INTGRL(CI,AUX1)
A=LIMIT(P1,P2,B)
ENDMACRO
```

b- Parâmetros

```
*----------------------------
INITIAL
PARAMETER K1=2.16,K2=180.2,T1=1.0,T2=5.0,BMF=.008
PARAMETER LA=.92,PP=.22,LP=1.24,P=740.,Q=674.,H=118.4,F=50.,S=727.
PARAMETER DISJ=0.0,RMP=0.0,STB=0.0,NG=0.985,NM=219.6,NJ=93.2,CE=37.24
PARAMETER MWS=100.,MW0=692.,MWF=0.0
PARAMETER TD=8.0,TN=1.0,BT=0.4,BP=0.02,A=10.0,FC=.1588,GTD=3.0
PARAMETER G0=400.,AS=80.,TV=.07,TW1=1.55,TW2=0.22,TW=1.77
PARAMETER TF1=10.3,TF2=17.8,TYA=15.4,TA=10.16
*----------------------------
```

c- Cálculos Iniciais

```
HB=(NM-NJ)/H
HBE=(NM-CE)/H
MO=MNO/(P*NG)
CF=MNF/P
ASX=4.0/(AS*10.)
*-----------------------------
STX=STY-0.5
STY=AND(STB,DISJ)
RPX=0.5-RMP
DJX=0.5-DISJ
BPX=INSW(DJX,BP,0.0)
PPX=INSW(DJX,LA,PP)
LIX=PPX+.05
*-----------------------------
HOX=IMPL(1.0,0.0001,HOZ)
YOP=TWOVAR(YFM,MO,HOX)
YO=AFGEN(HLP,YOP)
YO1=AFGEN(ABPE,YO)
OO=TWOVAR(OFY,YOP,HOX)
PCX=0.0136*(OO**2.)
HOZ=HB-PCX
```

d- Regulador Eletrônico

```
*-----------------------------
DYNAMIC
DFREQX=REALPL(0.0,.1,DFREQ)
ACEL=A*(DFREQX-AUXX)
AUXX=INTGRL(0.0,ACEL/TN)
SOMX=-DFREQX-ACEL
SOMY=SOMX-BPX*PTPA
SOM1=AMIN1(SOMY,PLIM)
PLIM=(LP-LOAD*P/788.)/5.0
INTX=SOM1/(BT*TOX)
INTG=INTEG1(YO1,INTX,0.0,LIX)
SOM2=INTG+SOM1/BT
MINI=AMIN1(PPX,SOM2)
```

e- Sistema Copiador Hidráulico

```
SOM3=MINI-GATX-ASX*VALR
SACT=LIMIT(-1.0,1.0,SOM3*GO)
VALV=INTEG1(0.0,SACT/TV,-7.625,1.125)
VALU=LIMIT(-4.125,1.125,VALV)
VALR=LIMIT(-4.0,1.0,VALV)
FXMT=DEADSP(-0.125,0.125,VALU)
RETD=DELAY(6,0.06,FXMT)
SERV=INTEG1(YO,RETD/TYY,0.0,1.0)
GATX=AFGEN(ABRE,SERV)
```

f- Turbina e Conduto Forçado

```
*-------------------------
GATE=AFGEN(PLH,SERV)
QY=TWOVAR(QFY,GATE,HL)
DQDF=AFGEN(DQFY,GATE)
QF=DQDF*DFREQ
Q1=QY+QF
DQX=Q1-DQZ
DH=DQX/DQH
DQZ=INTGRL(QO,DH/TW)
DQH=AFGEN(DQHY,GATE)
MY=TWOVAR(MFY,GATE,HL)
DMDF=AFGEN(DMFY,GATE)
MF=DMDF*DFREQ
M1=MY+MF
MH=-DMH*DH
DMH=AFGEN(DMHY,GATE)
TORQ=M1+MH
```

g- Gerador

```
PTPA=LOAD-MO*NG
TAC=TORQ-TLOAD
DFREQ=INTGRL(0.0,TAC/TA)
FREQ=1.0+DFREQ
TLOAD=LOAD/(FREQ*NG)
```

h- Perda de Carga

```
*----------------------------
VAZ=Q1-DQX
PCH=.0136*VZX**2.
VZX=DELAY(3,.03,VAZ)
HL=HB-PCH
HLQ=HL-DH
HLQC=HLQ/HB
HLE=HBE-PCH-DH*TW1/TW
HEPC=HLE/HBE
```

i- Tomada de Carga em Rampa

```
*----------------------------
LOAD1=INSW(RPX,RP,CF)
LOAD=LOAD1-DP
RP1=MWS*RAMP(0.0)/P
RP2=MO*NG+RP1
RP=LIMIT(MO*NG,CF,RP2)
RPMW=RP*P
```

j- Amortecimento Artificial do Elo CC (STAB-50)

```
*----------------------------
DFX=DFREQ+BMF
FMX=INSW(DFX,DFX,0.0)
FMY=K2*FMX
DTX=LEDLAG(T1,T2,FMY)
DPX=K1*DFREQ
DP1=DPX+DTX
DP=INSW(STX,0.0,DP1)
```

k- Constantes e Ganhos Variáveis

```
*----------------------------
ZX1=SERV-0.17
TYF=INSW(ZX1,TF2,TF1)
TYY=INSW(VALV,4.*TYF,TYA)
MDF=ABS(SOM1)
MDX=MDF-FC
TDX=INSW(MDX,TD,TD/GTD)
SMMT=SERV*S
FQHX=FREQ*F
FQHZ=(1.0+DFREQX)*F
```

Sugno gnkr eff.

1- Família de Curvas Qy (Y, H_L)

```
*----------------------------
FUNCT QFY,0.760=0.,0.,.164,.142,.247,.223,.329,.310,.493,.504,...
.574,.5979,.659,.6840,.823,.8427,.937,.9243,1.00,.9718
FUNCT QFY,0.802=0.,0.,.164,.147,.247,.231,.329,.322,.493,.522,...
.574,.6187,.659,.7077,.823,.8709,.937,.9540,1.00,1.003
FUNCT QFY,0.845=0.,0.,.164,.153,.247,.239,.329,.334,.493,.540,...
.574,.6380,.659,.7315,.823,.8976,.937,.9837,1.00,1.036
FUNCT QFY,0.887=0.,0.,.164,.157,.247,.246,.329,.346,.493,.558,...
.574,.6588,.659,.7552,.823,.9243,.937,1.012,1.00,1.068
FUNCT QFY,0.929=0.,0.,.164,.162,.247,.254,.329,.358,.493,.577,...
.574,.6795,.659,.7789,.823,.9510,.937,1.042,1.00,1.101
FUNCT QFY,0.971=0.,0.,.164,.166,.247,.261,.329,.371,.493,.594,...
.574,.7003,.659,.8042,.823,.9777,.937,1.070,1.00,1.129
FUNCT QFY,1.013=0.,0.,.164,.172,.247,.269,.329,.383,.493,.613,...
.574,.7211,.659,.8279,.823,1.002,.937,1.099,1.00,1.153
FUNCT QFY,1.056=0.,0.,.164,.175,.247,.276,.329,.395,.493,.631,...
.574,.7418,.659,.8502,.823,1.024,.937,1.125,1.00,1.172
```

m- Família de Curvas My (Y, H_L)

```
*----------------------------
FUNCT MFY,0.760=0.,-.1,.164,.007,.247,.078,.329,.164,.493,.352,...
.574,.4319,.659,.5025,.823,.6254,.937,.6685,1.00,.6326
FUNCT MFY,0.802=0.,-.1,.164,.021,.247,.097,.329,.188,.493,.392,...
.574,.4796,.659,.5592,.823,.6938,.937,.7395,1.00,.7543
FUNCT MFY,0.845=0.,-.1,.164,.032,.247,.113,.329,.212,.493,.433,...
.574,.5247,.659,.6139,.823,.7575,.937,.8074,1.00,.8306
FUNCT MFY,0.887=0.,-.1,.164,.041,.247,.129,.329,.237,.493,.474,...
.574,.5749,.659,.6718,.823,.8212,.937,.8736,1.00,.8922
FUNCT MFY,0.929=0.,-.1,.164,.049,.247,.146,.329,.262,.493,.516,...
.574,.6266,.659,.7299,.823,.8848,.937,.9419,1.00,.9654
FUNCT MFY,0.971=0.,-.1,.164,.062,.247,.161,.329,.290,.493,.558,...
.574,.6762,.659,.7910,.823,.9482,.937,1.007,1.00,1.029
FUNCT MFY,1.013=0.,-.1,.164,.072,.247,.177,.329,.316,.493,.602,...
.574,.7280,.659,.8516,.823,1.010,.937,1.074,1.00,1.091
FUNCT MFY,1.056=0.,-.1,.164,.080,.247,.192,.329,.341,.493,.642,...
.574,.7825,.659,.9099,.823,1.073,.937,1.138,1.00,1.159
```

n- Família de Curvas Y (M_Y, H_L)

```
*----------------------------
FUNCT YFM,0.760=-.1,.0,.007,.164,.078,.247,.164,.329,.352,.493,...
.4319,.574,.5025,.659,.6254,.823,.6685,.937,.6826,1.00
FUNCT YFM,0.802=-.1,.0,.021,.164,.097,.247,.183,.329,.392,.493,...
.4796,.574,.5592,.659,.6938,.823,.7395,.937,.7543,1.00
FUNCT YFM,0.845=-.1,.0,.032,.164,.113,.247,.212,.329,.433,.493,...
.5247,.574,.6139,.659,.7575,.823,.8074,.937,.8306,1.00
FUNCT YFM,0.887=-.1,.0,.041,.164,.129,.247,.237,.329,.474,.493,...
.5749,.574,.6718,.659,.8212,.823,.8736,.937,.8922,1.00
FUNCT YFM,0.929=-.1,.0,.049,.164,.146,.247,.262,.329,.516,.493,...
.6266,.574,.7299,.659,.8848,.823,.9419,.937,.9654,1.00
FUNCT YFM,0.971=-.1,.0,.062,.164,.161,.247,.290,.329,.558,.493,...
.6762,.574,.7910,.659,.9482,.823,1.007,.937,1.029,1.00
FUNCT YFM,1.013=-.1,.0,.072,.164,.177,.247,.316,.329,.602,.493,...
.7230,.574,.8516,.659,1.010,.823,1.074,.937,1.091,1.00
FUNCT YFM,1.056=-.1,.0,.080,.164,.192,.247,.341,.329,.642,.493,...
.7825,.574,.9099,.659,1.073,.823,1.138,.937,1.159,1.00
```

o- Coeficientes Variáveis

```
*----------------------------
FUNCT DQFY=0.,0.,.08,-.025,.16,-.05,.24,-.06,.33,-.125,.41,-.175,...
.57,-.185,.7,-.21,.83,-.2,1.0,-.185
FUNCT DMFY=0.,-.3,.08,-.45,.16,-.65,.24,-.7,.41,-.75,...
.57,-1.3,.83,-1.4,1.0,-1.45
FUNCT DQHY=0.,.05,.1,.07,.164,.1,.247,.225,.329,.27,.4,.34,...
.493,.4,.574,.48,.659,.55,.823,.61,.937,.68,1.00,.68
FUNCT DMHY=0.,0.,.164,.05,.247,.3,.329,.5,.493,.95,.574,1.1,...
.659,1.25,.823,1.45,.937,1.55,1.0,1.58
```

p- Outras Funções

```
*----------------------------
FUNCT ABRE=0.,0.,.076,.1,.157,.2,.256,.3,.365,.4,.435,.5,...
.608,.6,.725,.7,.839,.8,.928,.9,1.,1.
FUNCT PLH=0.,0.,.1169,.0845,.2063,.1689,.2999,.2534,.3851,.3378,...
.4649,.4223,.5433,.5067,.6190,.5912,.7015,.6757,.7772,.7601,...
.8528,.8446,.9395,.9291,1.0,1.0
FUNCT HLP=0.,0.,.0845,.1169,.1689,.2063,.2534,.2999,.3378,.3851,...
.4223,.4649,.5067,.5433,.5912,.6190,.6757,.7015,.7601,.7772,...
.8446,.8528,.9291,.9395,1.0,1.0
```

q- Saída

```
*----------------------------
METHOD RKSFX
TIMER DELT=0.01,OUTDEL=1.0,FINTIM=50.0
OUTPUT FQHZ(34.,66.),SERV(-.1,1.5)
OUTPUT FQHZ,GATE,SERV,HEPC,VAZ

END
OUTPUT VARIABLE SEQUENCE
HBE     CF      ASX     STY     STX     RPX     DJX     BPX     PPX     LIX
MO      HB      ZZ1000  YOP     YO      Y01     QO      PCX     HOZ     HOX
ZZ1003  DFREQX  ACEL    ZZ1006  AUXX    INTG    SOMX    RP1     RP2     RP
LOAD1   DPX     DFX     FMX     FMY     ZZ1025  DTX     DP1     DP      LOAD
PTPA    SOMY    PLIM    SOM1    MDF     MDX     TDX     INTX    ZZ1007  ZZ1008
VALV    SOM2    MINI    SERV    GATX    VALR    SOM3    SACT    ZZ1010  ZZ1012
ZZ1013  VALU    FXMT    RETD    ZX1     TYF     TYY     ZZ1016  ZZ1017  ZZ1018
GATE    PCH     HL      QY      DQDF    QF      Q1      DQX     VAZ     VZX
DQH     DH      ZZ1021  DQZ     MY      DMDF    MF      M1      DMH     MH
TORQ    FREQ    TLOAD   TAC     ZZ1024  DFREQ   ZZ1026  HLQ     HLQC    HLF
HEPC    RPMW    SMMT    FQHX    FQHZ
```

4.3.3- DETALHES DE SIMULAÇÃO

O CSMP III possui uma declaração que representa o derivador (Y = DERIV (IC, X)). Entretanto, na simulação de grandes distúrbios esta função pode provocar problemas numéricos, o que ocorreu durante a elaboração deste trabalho. Portanto, fêz-se necessário converter determinados blocos dos modelos matemáticos em blocos equivalentes que não contivessem derivadores, utilizando-se a álgebra de blocos convencional.

Um exemplo disso é a representação do conduto forçado mostrado na FIG.04. A mudança topológica efetuada para se "eliminar" o derivador está mostrada na FIG.12. Por um processo semelhante, o bloco acelerométrico (FIG.01) também foi convertido em outro bloco equivalente sem derivador.

Na ocorrência de grandes distúrbios os blocos representados por integradores atingem seus limites físicos. Faz-se necessário portanto, representar esses efeitos na simulação. Para isso o CSMP III permite a criação de novos blocos "dedicados" que executam a função desejada pelo usuário. Neste caso criou se um "integrador limitado" (INTEG 1), identificado no início da listagem do programa como "MACRO INTEG 1".

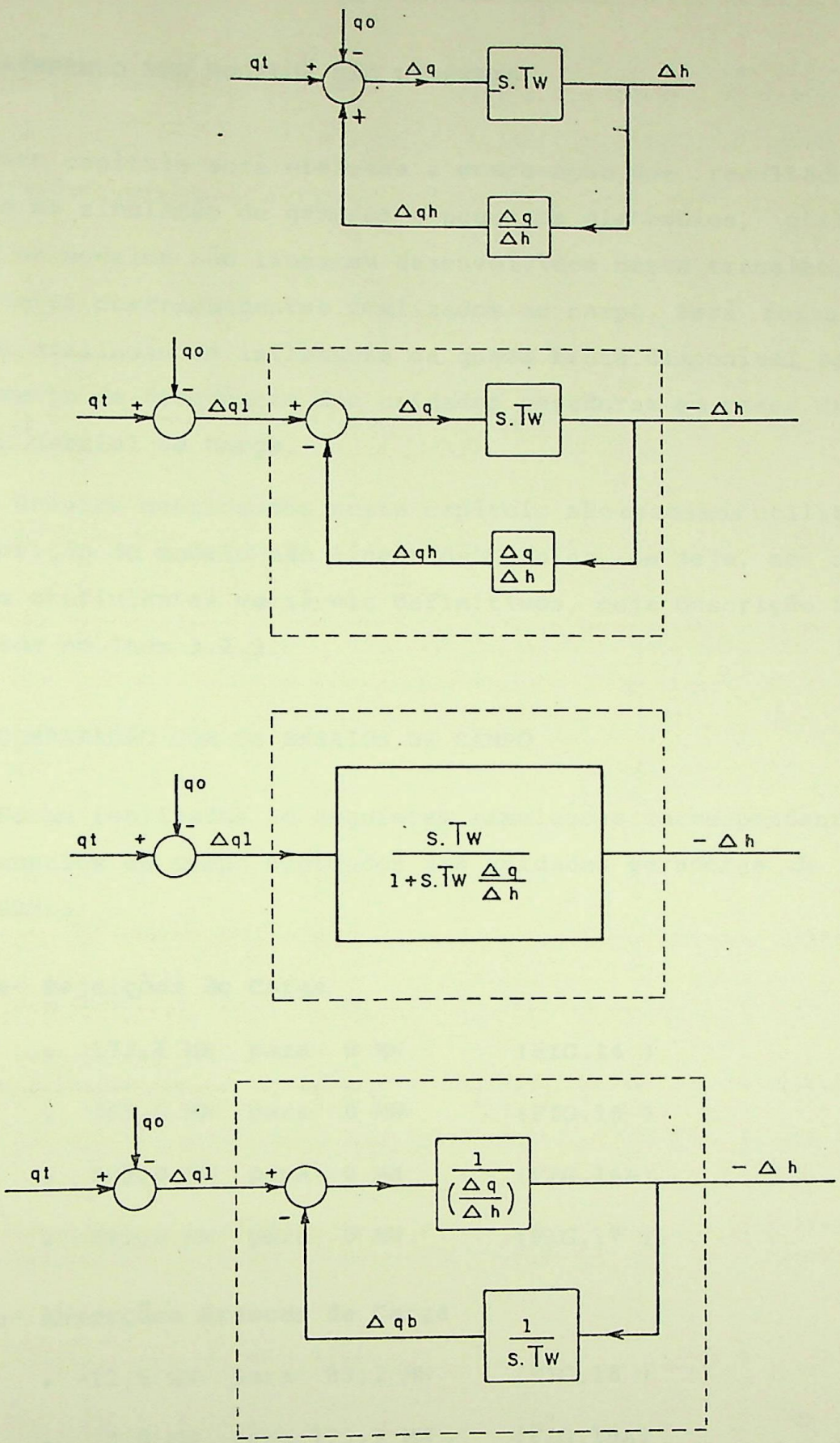


FIG.12 - MUD. TOPOLÓGICA NA REPRES. DO CONDUTO FORÇADO

5- DESEMPENHO DOS MODELOS NÃO LINEARES

Neste capítulo será efetuada a comparação dos resultados obtidos na simulação de grandes e pequenos distúrbios, utilizando-se os modelos não lineares desenvolvidos neste trabalho, com os ensaios correspondentes realizados no campo. Será feita também uma avaliação da influência da queda bruta disponível no comportamento da freqüência das unidades geradoras em casos de rejeição parcial de carga.

Os ensaios mencionados neste capítulo são os mesmos utilizados na aferição do modelo não linear da Turbina, ou seja, na obtenção dos cceficientes variáveis definitivos, cuja descrição foi efetuada no item 3.2.3.

5.1- COMPARAÇÃO COM OS ENSAIOS DE CAMPO

Foram realizadas as seguintes simulações correspondentes aos ensaios de campo efetuados nas unidades geradoras de ITAIPU-50Hz:

a- Rejeições de Carga

- 172,4 MW para 0 MW (FIG.14)
- 365,0 MW para 0 MW (FIG.15)
- 523,0 MW para 0 MW (FIG.16A)
- 692,0 MW para 0 MW (FIG.17)

b- Absorções Bruscas de Carga

- -12,5 MW para 83,2 MW (FIG.18)
- 0,0 MW para 173,9 MW (FIG.19A)
- 0,0 MW para 358,7 MW (FIG.20)

c- Degraus de Carga

- 572 MW para 633,0 MW (FIG.21A)
- 636 MW para 579,7 MW (FIG.22)

Todos os casos também foram rodados com um intervalo de impressão de 0,1 s, para a obtenção da máxima ou mínima freqüência. A comparação entre os resultados obtidos na simulação e os ensaios de campo são mostrados na tabela da FIG. 13, onde:

$$\text{DIFERENÇA PERCENTUAL} = \frac{\text{Freq.(SIM.)-Freq.(CAMPO)}}{50\text{Hz}} \cdot 100\ (\%)$$

$$\text{DIFERENÇA } \Delta Hz/\Delta Hz(MAX) = \frac{\text{Freq.(SIM.)-Freq.(CAMPO)}}{\text{Freq.(CAMPO)} - 50\text{Hz}} \quad (Hz/Hz)$$

Pode-se observar pela tabela, o bom desempenho dos modelos não lineares de Regulador de Velocidade e Turbina, visto que em todos os 9 casos comparados, a diferença com relação aos ensaios de campo foi muito pequena. São os seguintes os valores médios absolutos:

DIFERENÇA PERCENTUAL = 0,2 (%)

DIFERENÇA $\Delta Hz/\Delta Hz(MAX)$ = 0,03(Hz/Hz)

Para a comparação do comportamento dinâmico entre a simulação e os ensaios, são mostrados os registros obtidos no campo, sendo um de cada tipo de distúrbio de carga, onde:

- Rejeição de Carga = 523,0 MW para 0,0 MW (FIG.16B)
- Absorção Brusca de Carga = 0,0 MW para 173,9 MW (FIG.19B)
- Degrau de Carga = 572,0 MW para 633,0 MW (FIG.21B)

Pela comparação nota-se que, apesar de estarem em escalas diferentes, existe boa semelhança entre a simulação e os ensaios de campo, tanto no comportamento dinâmico da freqüência

TIPO	CASO (MW)	FREQUÊNCIA MIN/MAX. (Hz)		DIFERENÇA EM (Hz)	DIFERENÇA PERCENTUAL (%)	DIFERENÇA ΔHz/ΔHz MAX. (Hz/Hz)
		CAMPO	SIMULAÇÃO			
REJEIÇÕES	Ⓐ 172,4	51,50	51,437	-0,063	-0,126	-0,042
	Ⓑ 365,0	54,72	54,675	-0,045	-0,090	-0,010
	Ⓒ 523,0	58,62	58,756	+0,136	+0,272	+0,016
	Ⓓ 692,0	65,34	65,479	+0,139	+0,278	+0,009
ABSORÇÕES BRUSCAS	Ⓔ DE -12,5 A 83,2	46,49	48,401	-0,089	-0,178	+0,059
	Ⓕ DE 0,0 A 173,9	47,34	47,214	-0,126	-0,252	+0,047
	Ⓖ DE 0,0 A 357,8	40,51	40,734	+0,224	+0,448	-0,026
DEGRAUS	Ⓗ DE 572,0 A 633,0	48,65	48,681	+0,031	+0,062	-0,023
	Ⓘ DE 633,0 A 579,7	51,26	51,213	-0,047	-0,094	-0,037

FIG.13 - COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÃO E ENSAIOS DE CAMPO

(FQHZ), quanto da abertura do servomotor (SERV).

Os modelos não lineares também foram aferidos em relação ao comportamento da sobrepressão na caixa espiral (CE). Os melhores casos para a comparação são os de rejeição total de carga, pois são aqueles onde ocorrem as maiores variações de pressão no conduto forçado. Foram utilizados portanto, os mesmos casos mencionados no item 5.1-a. A tabela comparativa é mostrada a seguir:

REJEIÇÃO DE CARGA	PRESSÃO NA (CE)		DIF. EM METROS	DIF. PERCENTUAL
	CAMPO	SIMULAÇÃO		
172,4 MW	155,8 m	156,43 m	0,63 m	0,40 %
365,0 MW	158,8 m	158,49 m	-0,31 m	-0,20 %
523,0 MW	163,8 m	162,12 m	-1,68 m	-1,03 %
692,0 MW	164,8 m	162,91 m	-1,89 m	-1,15 %

onde:

$$\text{DIFERENÇA PERCENTUAL} = \frac{\text{Pressão(SIM.)} - \text{Pressão(CAMPO)}}{\text{Pressão (Campo)}} \times 100(\%)$$

Como se pode notar, aqui também os resultados obtidos na comparção com os ensaios de campo foram bons, visto que a maior diferença obtida foi de -1,15% e que a diferença média absoluta foi de 0,695%. Deve se ressaltar que as próprias medições efetuadas no campo nunca são exatas, contendo um certo grau de imprecisão.

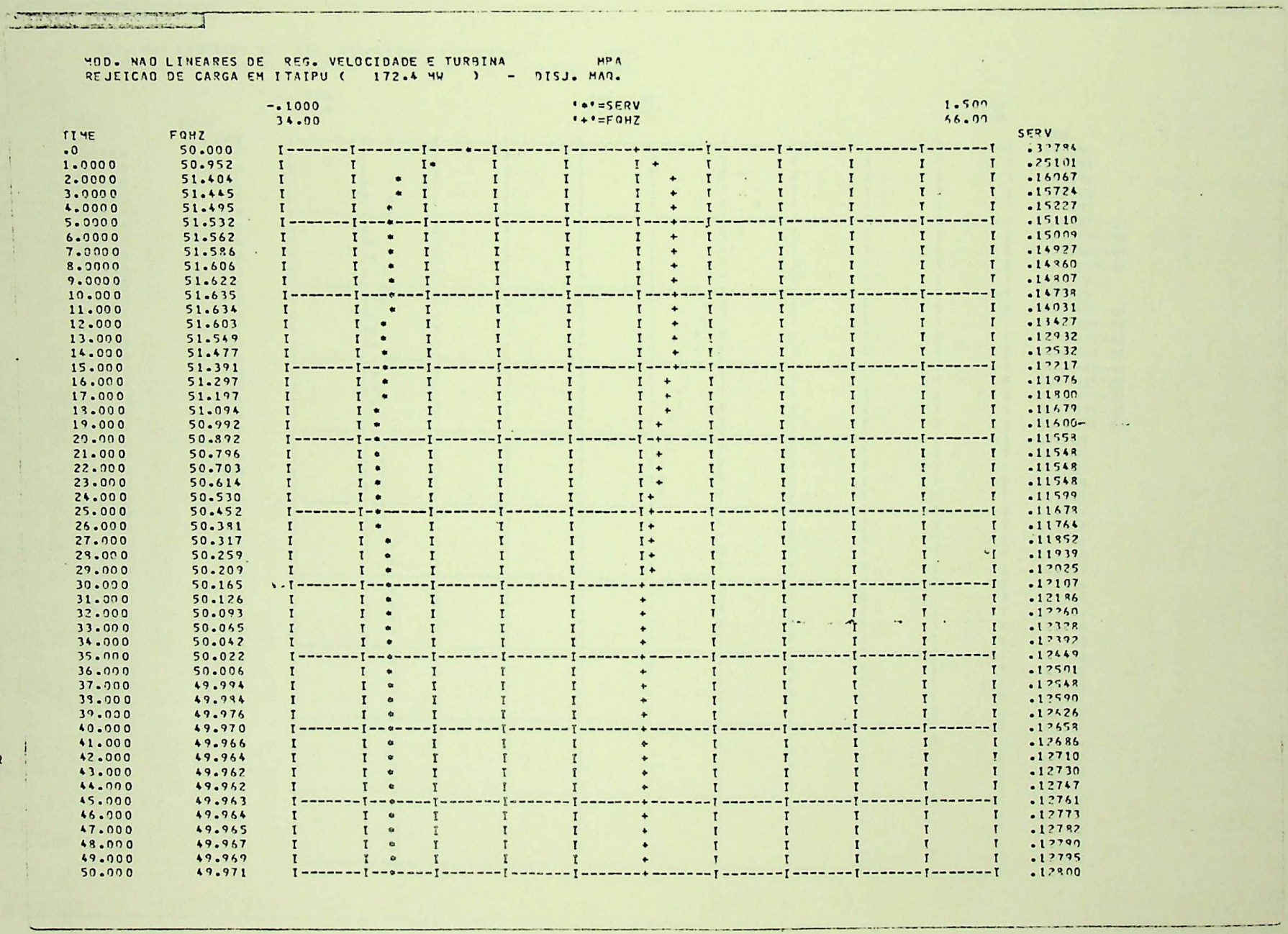


FIG. 14 - REJEIÇÃO DE CARGA (172,4 P/ 0 MW - SIMULAÇÃO)

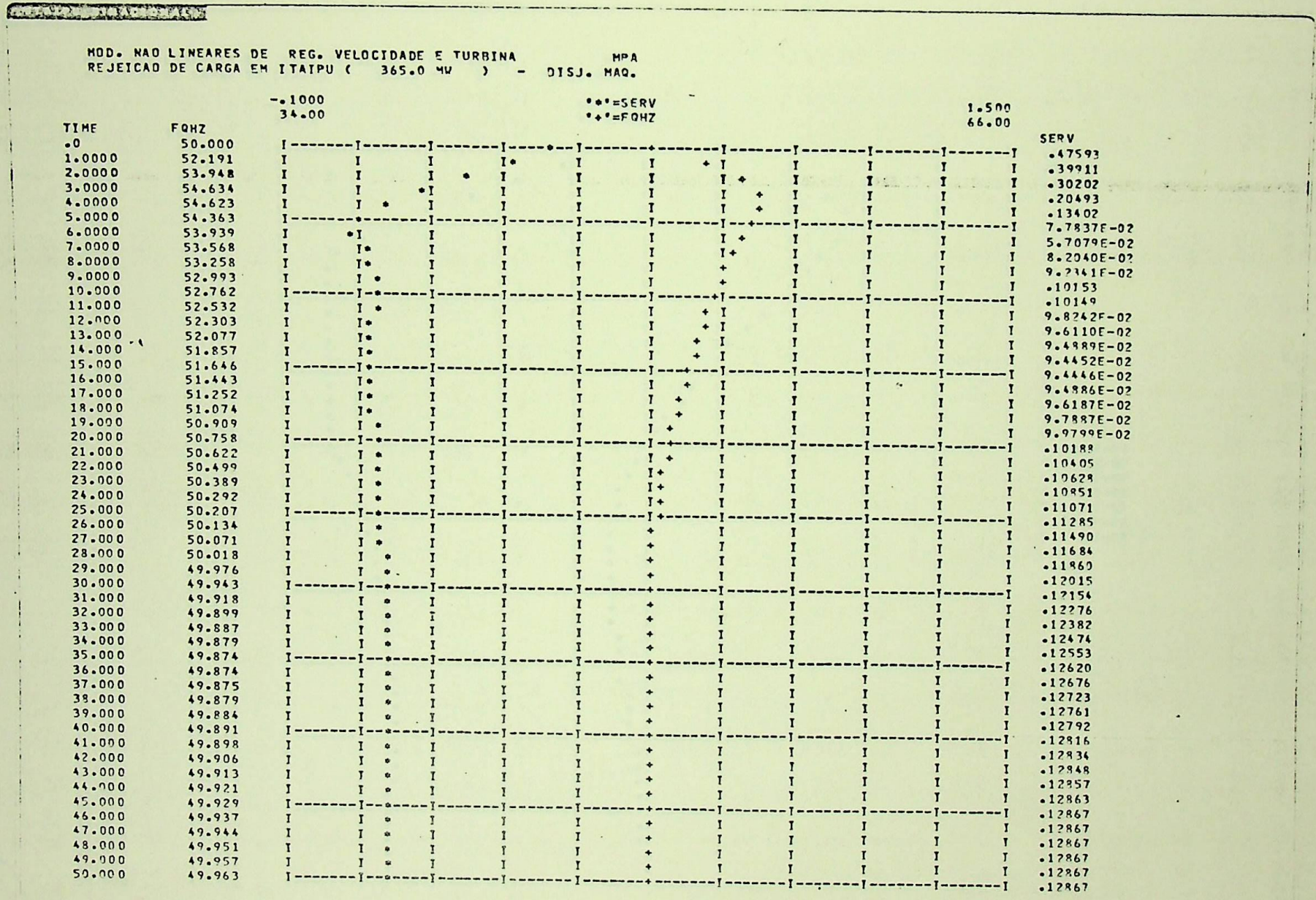


FIG. 15 – REJEIÇÃO DE CARGA (365,0 P/ 0 MW) – SIMULAÇÃO)

MOD. NAO LINEARES DE REG. VELOCIDADE E TURBINA HºA
REJEICAO DE CARGA EM ITAIPU (523.0 MW) - DISJ. MAQ.

-.1000 '*'=SERV 1.500
34.00 '+'=FQHZ 66.00

TIME	FQHZ	SERV
.0	50.000	.59962
1.0000	53.163	.52180
2.0000	56.218	.42471
3.0000	58.087	.32762
4.0000	58.736	.23053
5.0000	58.601	.14978
6.0000	58.208	9.2592E-02
7.0000	57.675	3.6411E-02
8.0000	57.011	.0
9.0000	56.322	.0
10.000	55.653	.0
11.000	55.003	.0
12.000	54.373	.0
13.000	53.760	.0
14.000	53.166	.0
15.000	52.589	.0
16.000	52.029	.0
17.000	51.485	.0
18.000	50.956	.0
19.000	50.444	.0
20.000	49.974	1.7555E-02
21.000	49.576	3.2405E-02
22.000	49.248	4.7027E-02
23.000	48.984	6.0203E-02
24.000	48.778	7.2336E-02
25.000	48.625	8.3650E-02
26.000	48.520	9.3911E-02
27.000	48.458	.10293
28.000	48.431	.11078
29.000	48.434	.11752
30.000	48.465	.12294
31.000	48.520	.12727
32.000	48.593	.13069
33.000	48.679	.13331
34.000	48.772	.13528
35.000	48.870	.13669
36.000	48.970	.13764
37.000	49.068	.13820
38.000	49.164	.13844
39.000	49.256	.13846
40.000	49.344	.13846
41.000	49.427	.13846
42.000	49.506	.13814
43.000	49.578	.13744
44.000	49.644	.13671
45.000	49.703	.13595
46.000	49.755	.13520
47.000	49.801	.13446
48.000	49.841	.13374
49.000	49.876	.13306
50.000	49.906	.13242

FIG. 16A – REJEIÇÃO DE CARGA (523,0 P/ 0 MW – SIMULAÇÃO)

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
BIM

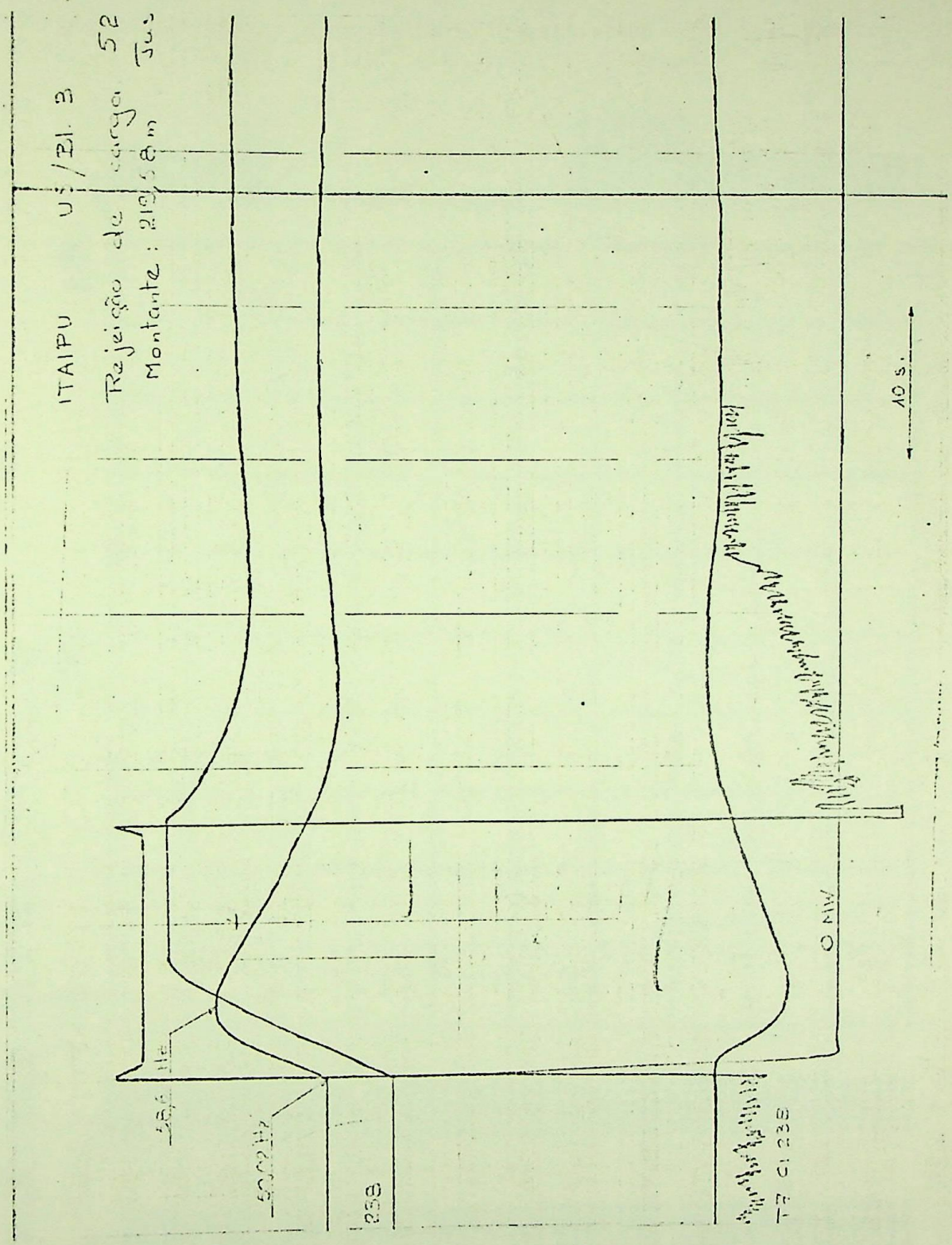


FIG.16B – REJEIÇÃO DE CARGA (523,0 P/ 0 MW– ENSAIO)

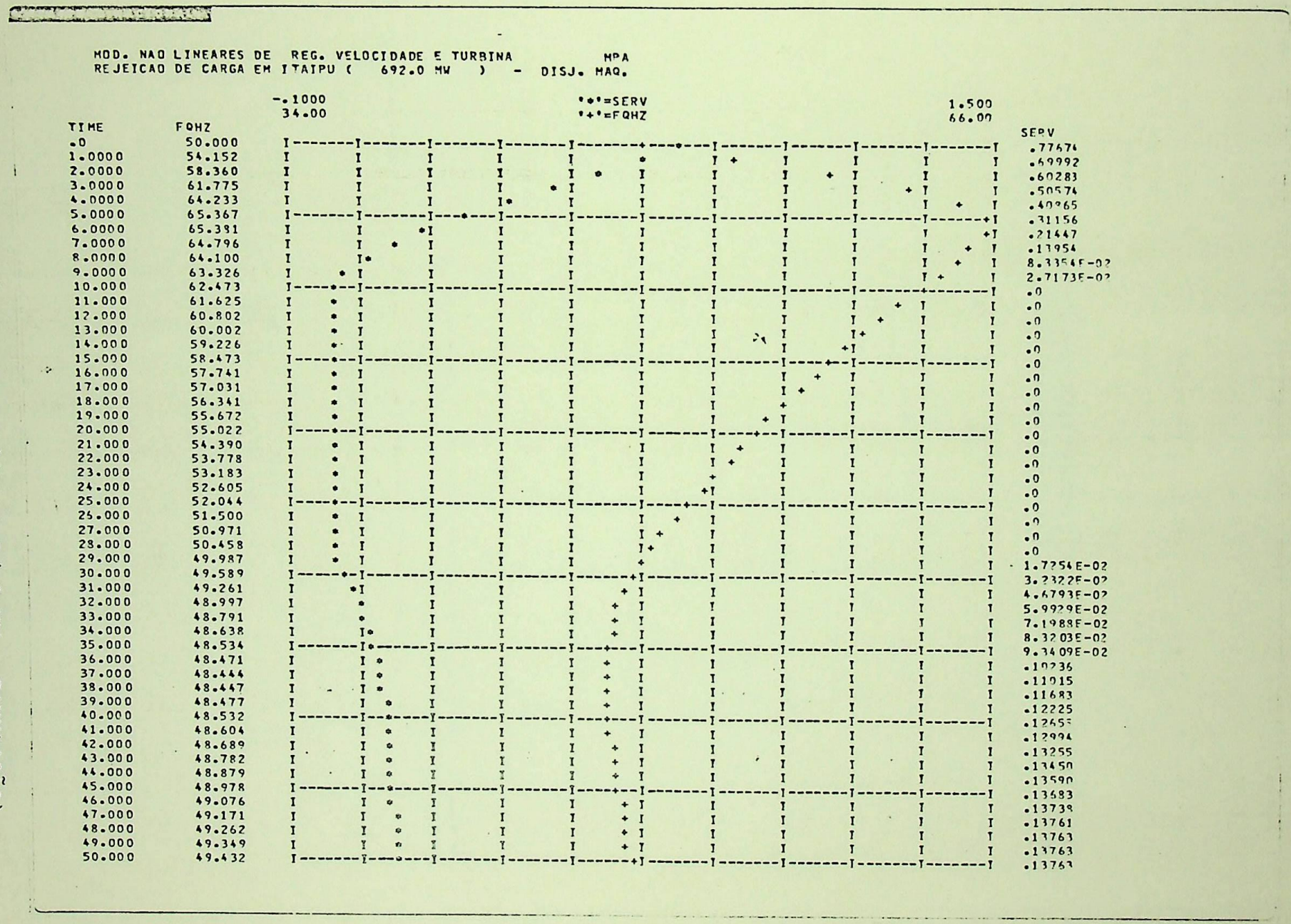


FIG.17 - REJEIÇÃO DE CARGA (692,0 P/ 0 MW - SIMULAÇÃO)

MOD. NAO LINEARES DE REG. VELOCIDADE E TURBINA MPA
ABSORCAO BRUSCA DE CARGA EM ITAIPU (-12.5 MW A 83.2 MW)

-.1000 '*'=SERV 1.500
27.50 '+'=FQHZ 52.50

TIME	FQHZ		SERV
.0	50.000		.13497
1.0000	49.485		.17570
2.0000	49.084		.19444
3.0000	48.791		.21181
4.0000	48.592		.22617
5.0000	48.471		.23794
6.0000	48.412		.24742
7.0000	48.403		.25495
8.0000	48.432		.26120
9.0000	48.491		.26590
10.000	48.571		.26928
11.000	48.664		.27161
12.000	48.765		.27311
13.000	48.868		.27397
14.000	48.970		.27434
15.000	49.068		.27438
16.000	49.162		.27438
17.000	49.251		.27438
18.000	49.335		.27397
19.000	49.412		.27303
20.000	49.480		.27218
21.000	49.541		.27134
22.000	49.593		.27055
23.000	49.639		.26982
24.000	49.679		.26914
25.000	49.713		.26852
26.000	49.742		.26797
27.000	49.766		.26747
28.000	49.787		.26703
29.000	49.804		.26664
30.000	49.818		.26631
31.000	49.830		.26601
32.000	49.840		.26576
33.000	49.847		.26555
34.000	49.854		.26536
35.000	49.859		.26521
36.000	49.863		.26508
37.000	49.866		.26497
38.000	49.868		.26488
39.000	49.870		.26481
40.000	49.871		.26475
41.000	49.872		.26470
42.000	49.873		.26466
43.000	49.873		.26463
44.000	49.873		.26460
45.000	49.873		.26459
46.000	49.873		.26457
47.000	49.873		.26456
48.000	49.873		.26455
49.000	49.873		.26455
50.000	49.873		.26454

FIG.18 - ABSORÇÃO BRUSCA (-12,5 À 83,2 MW - SIMULAÇÃO)

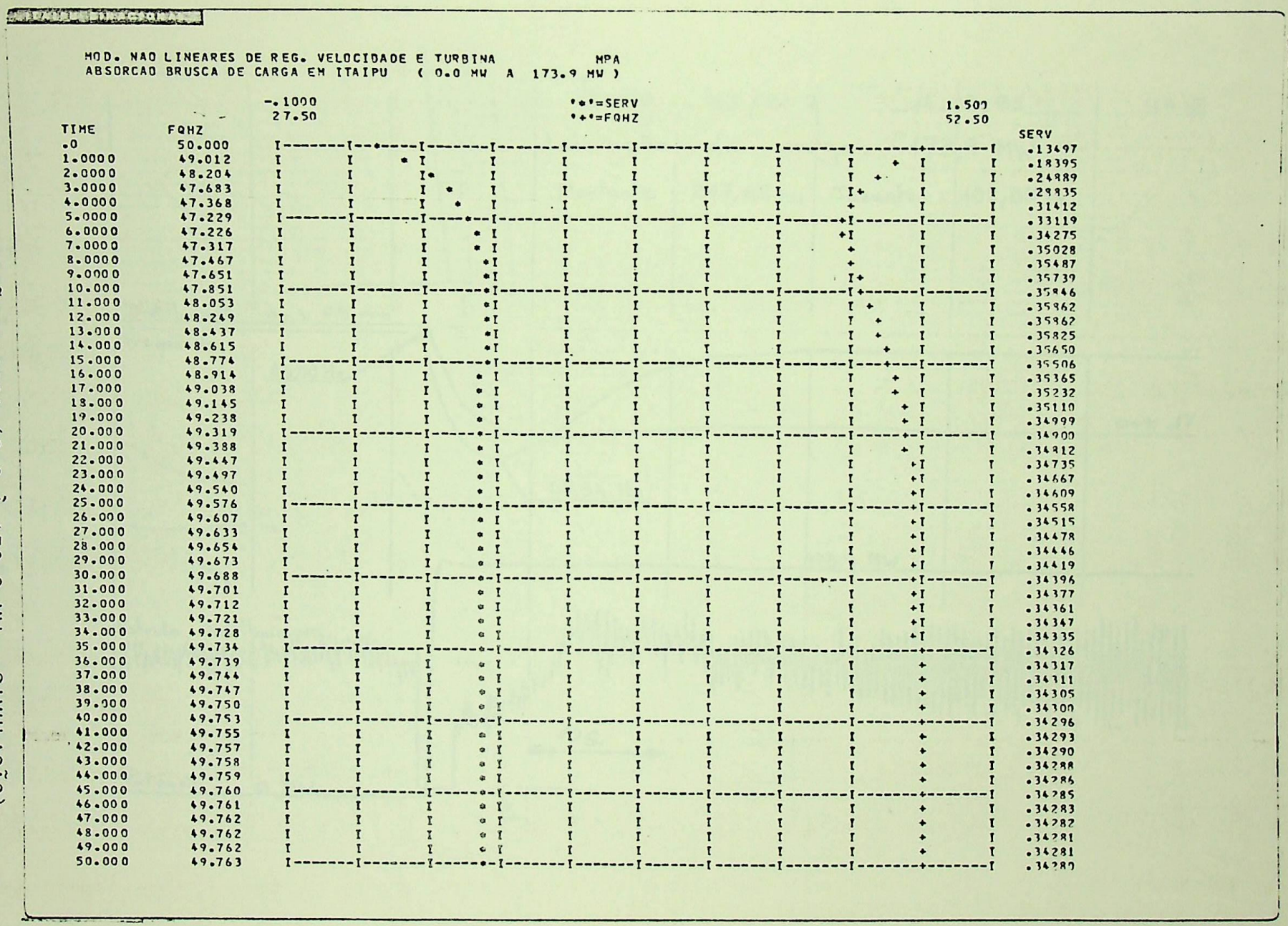


FIG.19A - ABSORÇÃO BRUSCA (0,0 À 173,9 MW - SIMULAÇÃO)

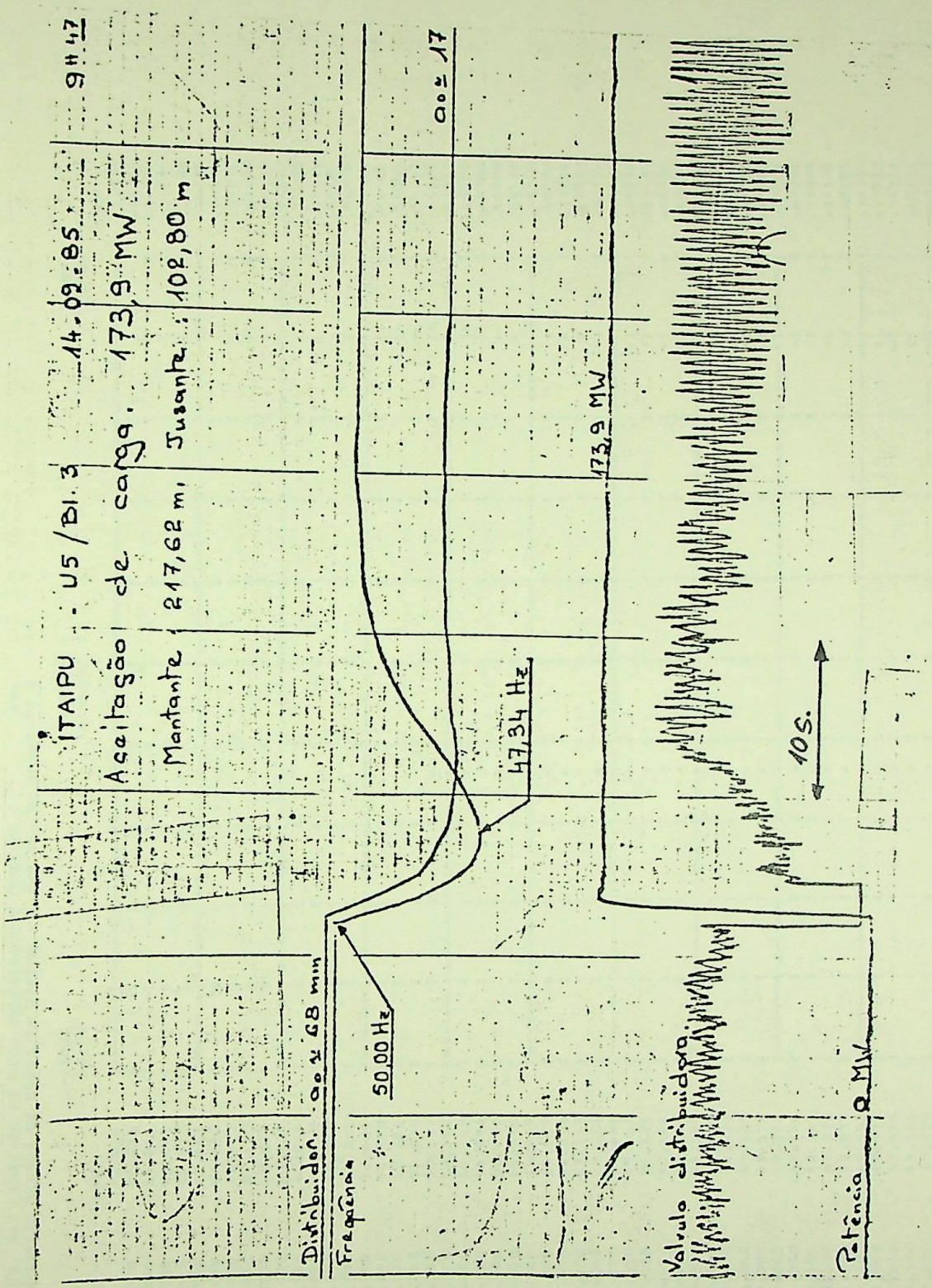


FIG.19B - ABSORÇÃO BRUSCA (0,0 À 173,0 - ENSAIO)

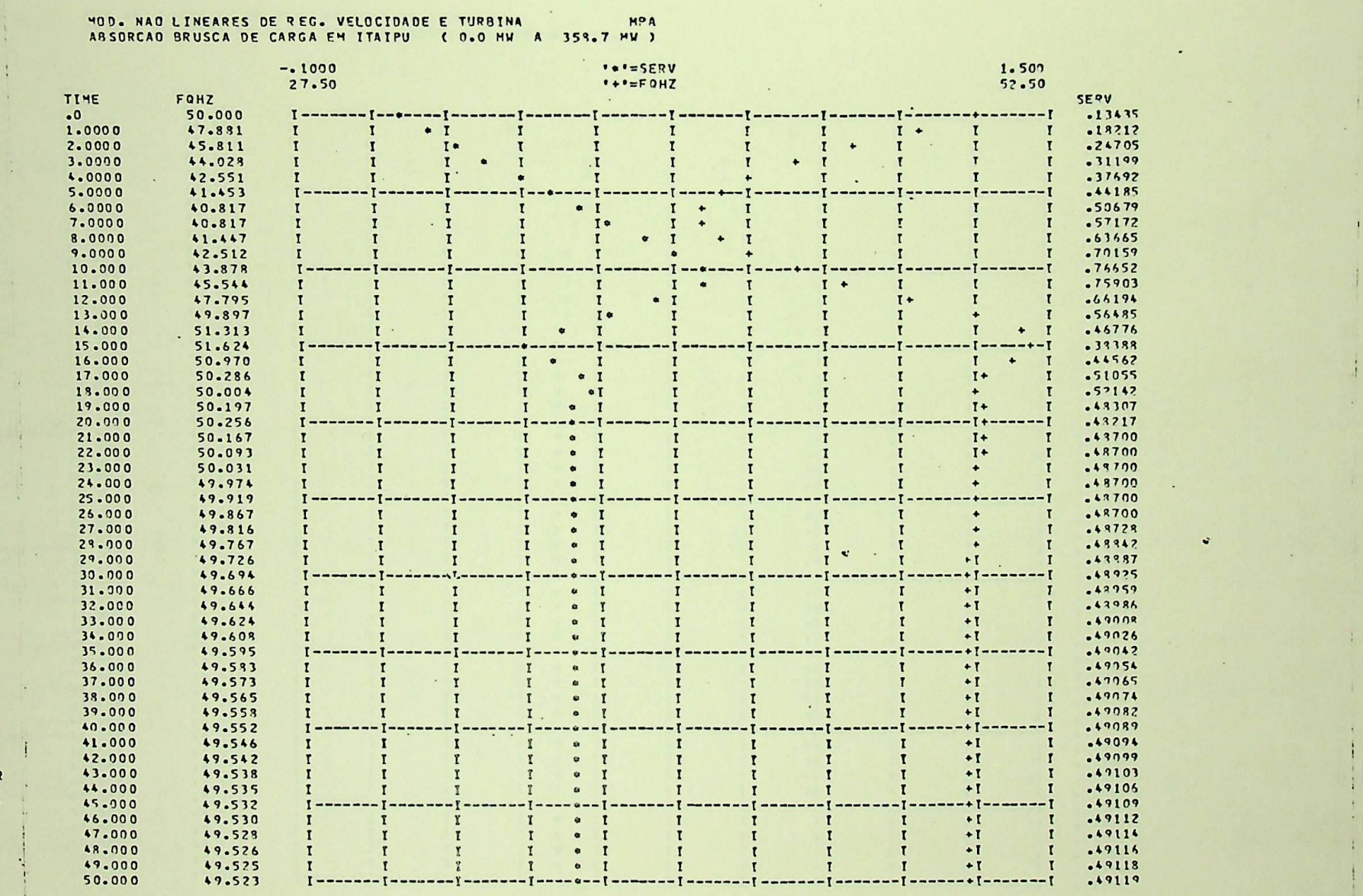


FIG. 20 - ABSORÇÃO BRUSCA (0,0 À 358,7 MW - SIMULAÇÃO)

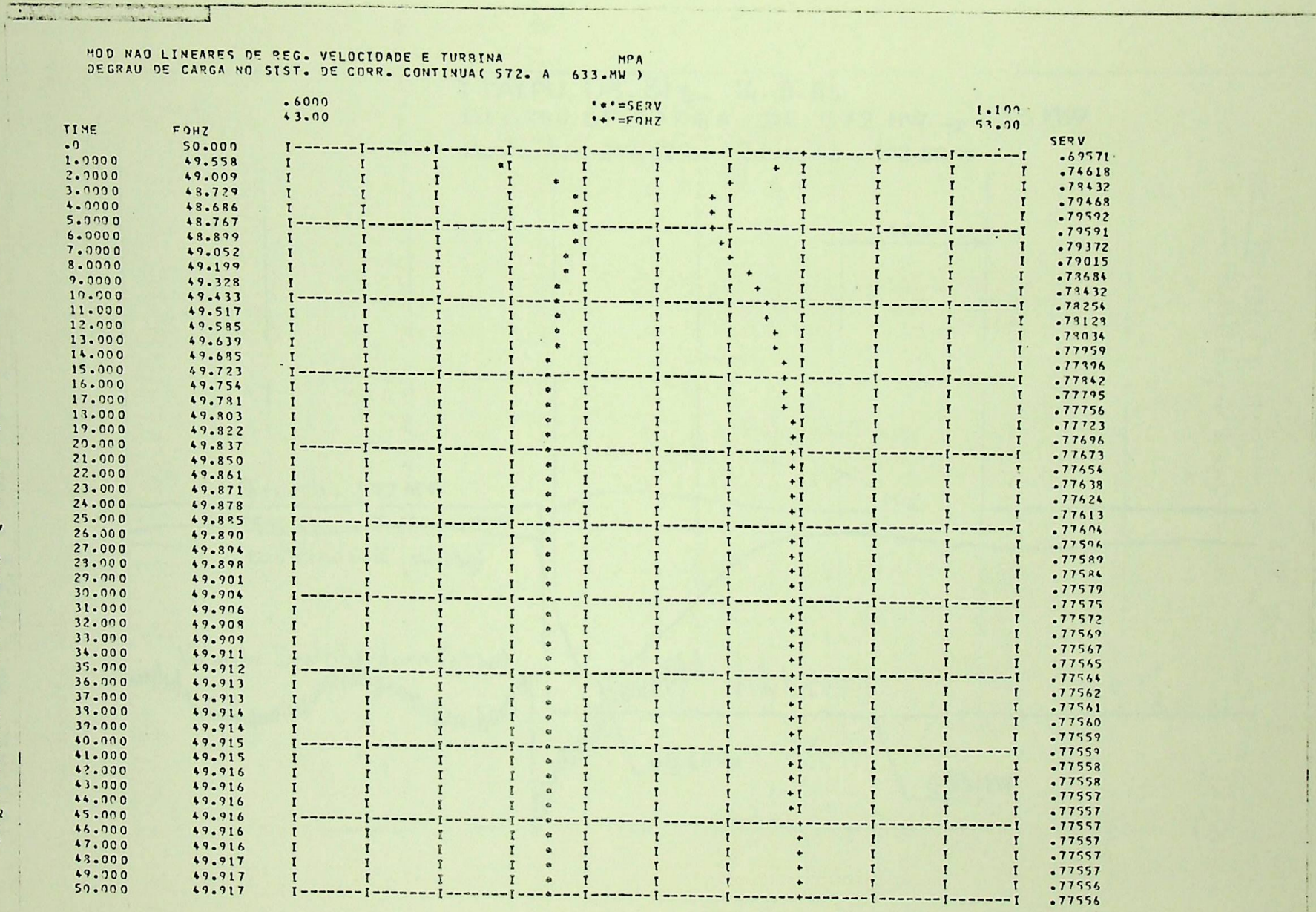


FIG.21A - DEGRAU DE CARGA (572,0 À 633,0 MW - SIMULAÇÃO)

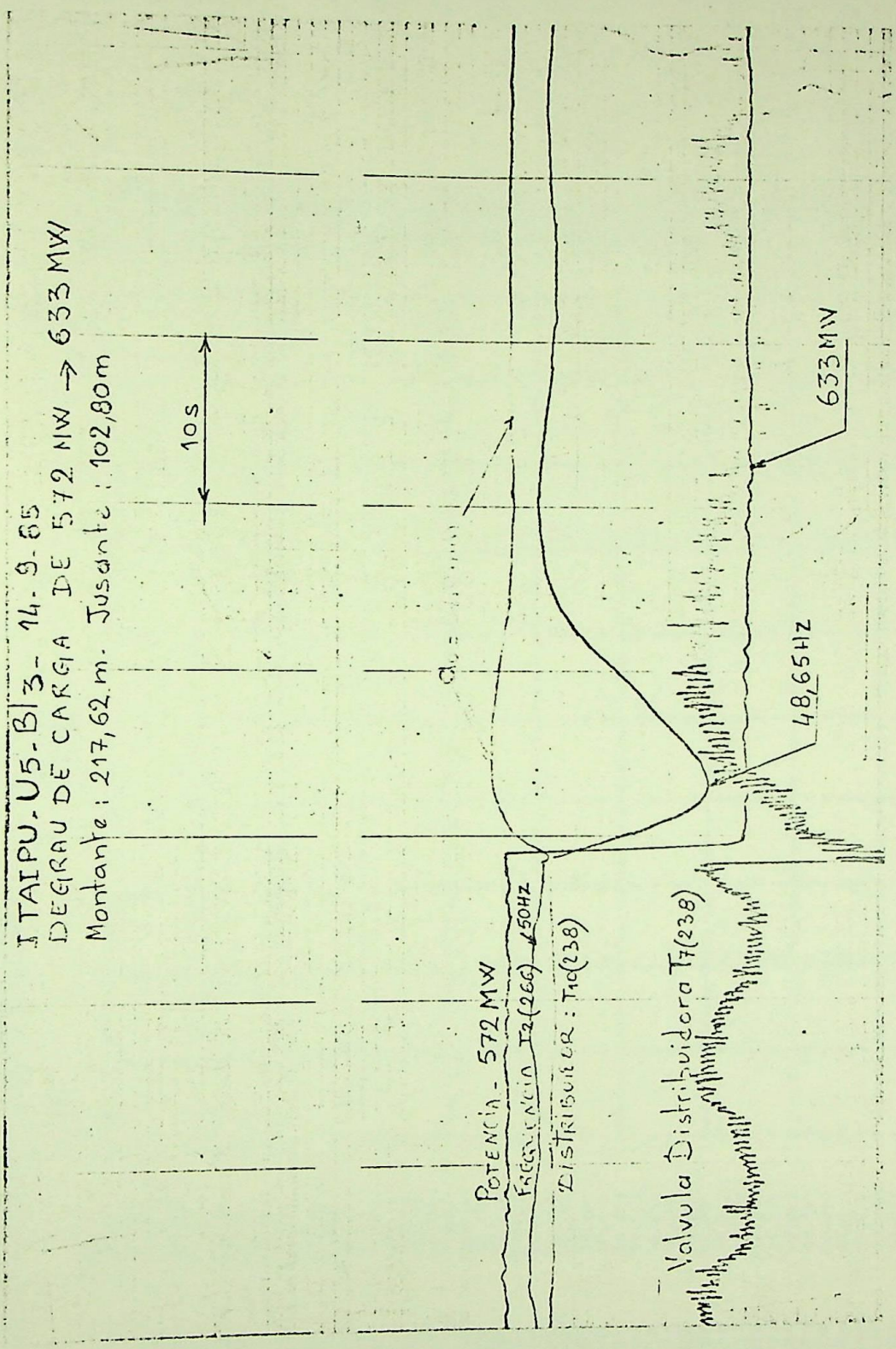


FIG.21B - DEGRAU DE CARGA (572,0 À 633,0 MW - ENSAIO)

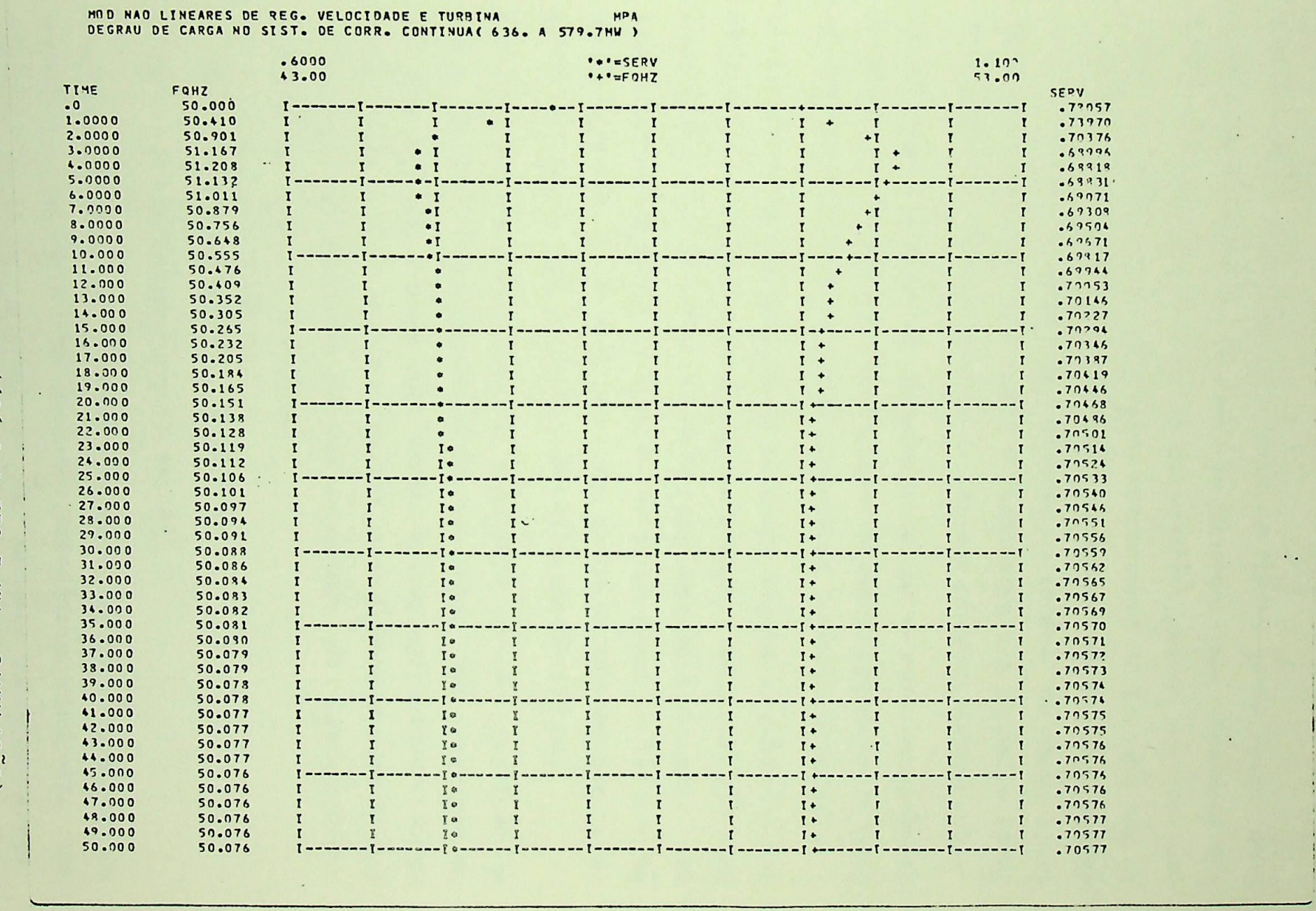


FIG.22 - DEGRAU DE CARGA (636,0 A 579,7 MW - SIMULAÇÃO)

5.2- INFLUÊNCIA DA QUEDA BRUTA

A queda bruta disponível na Usina de ITAIPU varia muito, basicamente pela variação do nível de jusante, que não pode ser controlado totalmente. Pelas características de projeto prevê-se uma queda líquida mínima operacional de 82,9 m e uma máxima de 126,7 m. O comportamento dinâmico da turbina mudará sensivelmente em função das grandes variações na queda líquida operacional, que alterando o rendimento e a potência fornecida, afetam o comportamento da unidade geradora como um todo.

Assim sendo, um mesmo distúrbio em termos do valor de potência envolvida, mas ocorrendo em condições de queda líquida muito diferentes, provocará variações de freqüência bastante diversas.

A FIG.23 ilustra a influência da queda líquida na potência fornecida pelas Unidades Geradoras de ITAIPU. MW4 significa a máxima potência disponível (ação do limitador de cavitação) em função da queda bruta existente. Para uma queda de 122 m a máquina fornece 778 MW e já para uma queda de 90 m forneceria apenas 471 MW, o que sifinifica uma diferença de 307 MW.

A FIG.24 mostra o resultado da simulação de uma rejeição de carga parcial (700 MW para 200 MW), ou seja, uma rejeição de 500 MW, considerando-se duas quedas brutas operacionais diferentes (124 m (RUN1) e 114 m (RUN2)), cuja diferença é de apenas 10 metros. Os resultados obtidos em termos de sobrefreqüência máxima foram os seguintes:

- QB = 114 m → Freq(máx) = 64,058 Hz
- QB = 124 m → Freq(máx) = 60,861 Hz

Nota-se portanto, que o mesmo distúrbio nas duas condições de queda produzem resultados bastante diversos apresentando uma diferença de ~3,2 Hz nos valores de máxima sobrefreqüência. Sendo assim, a variação na queda bruta operacional é um fator que não pode ser desconsiderado.

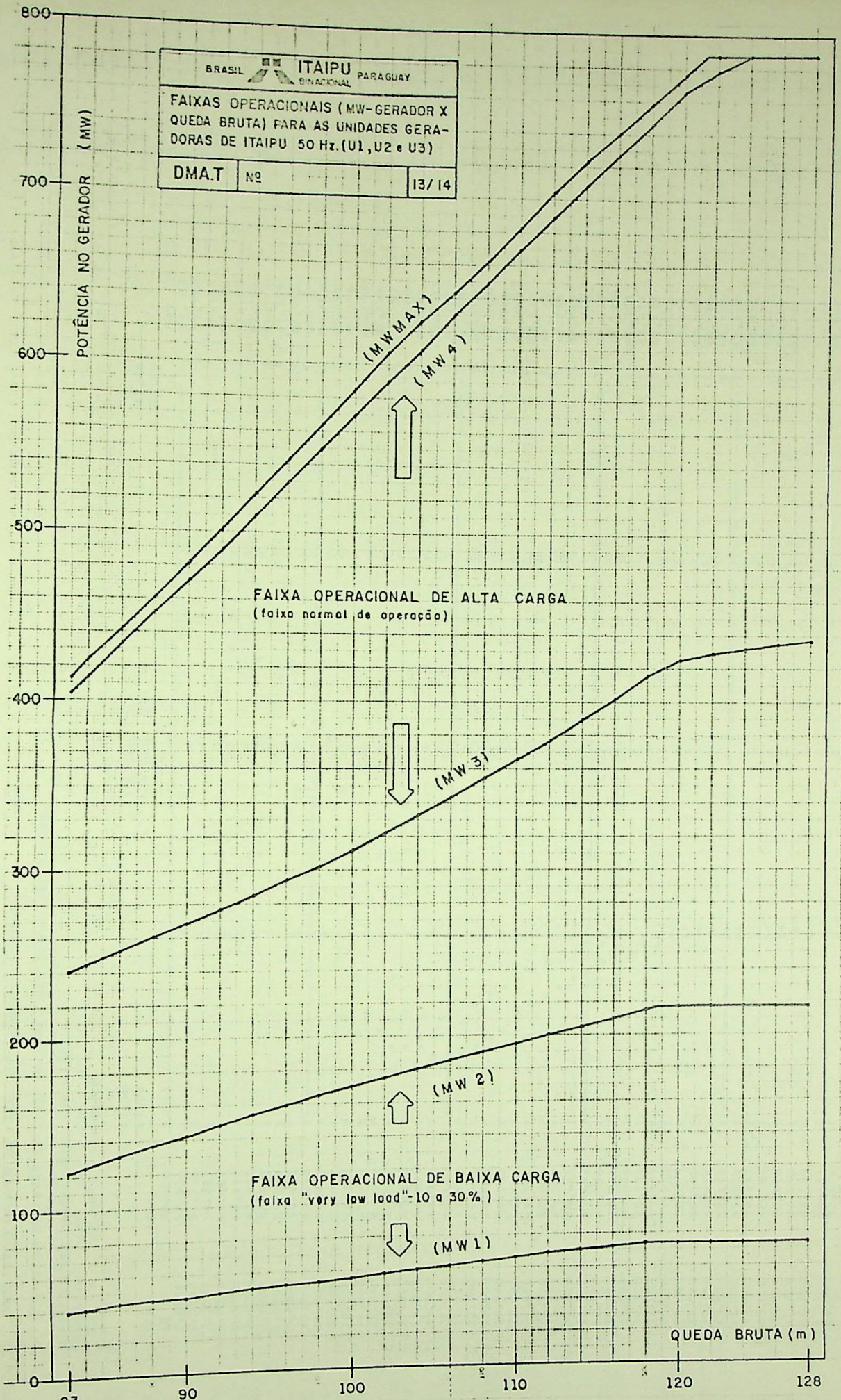


FIG. 23 - POTÊNCIA DISPONÍVEL EM FUNÇÃO DA QUEDA BRUTA

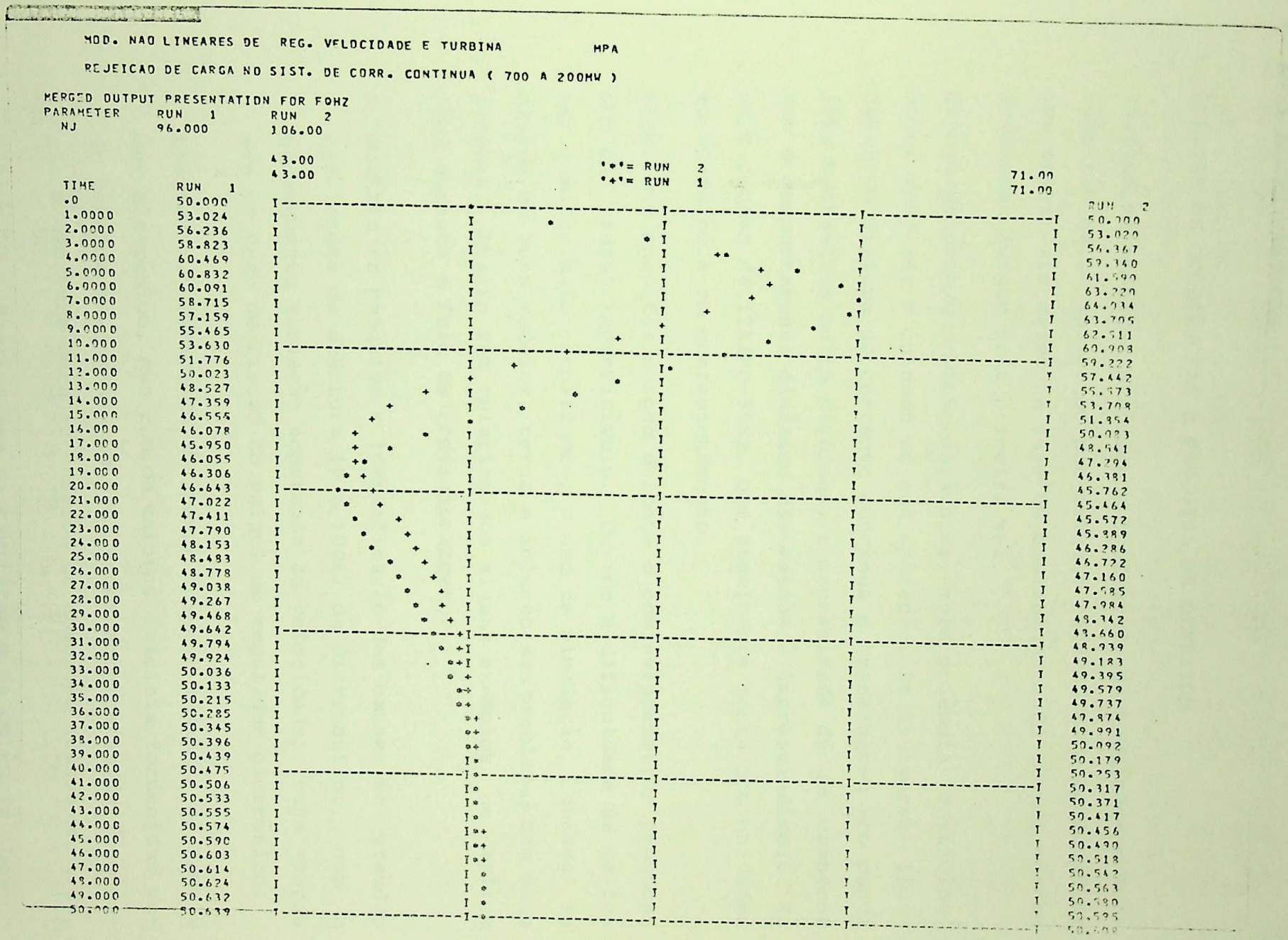


FIG. 24 – REJEIÇÃO PARCIAL DE CARGA (QB = 114 e 124 m – SIMULAÇÃO)

6- APLICAÇÕES PRÁTICAS

6.1- ANÁLISE DE OCORRÊNCIAS E PESQUISA DE DEFEITOS

Modelos matemáticos precisos e confiáveis de Regulador e Turbina têm muita aplicação nos estudos referentes a operação de uma usina, até mesmo na fase de comissionamento quando muitos problemas surgem pela primeira vez.

Quanto maiores as unidades geradoras, mais potência envolvida, maior deve ser o cuidado em sua operação. Se estiverem ligadas a um sistema de corrente contínua e trabalharem sob condições operativas muito diversas, a necessidade de se conhecer bem o comportamento dinâmico das mesmas é imprescindível. Esse é o caso de ITAIPU-50Hz, que atualmente conta com unidades em operação e em comissionamento.

Problemas inéditos surgem durante o comissionamento, provocados por causas imprevisíveis. Devido a dificuldade de se fazer ensaios mais complicados, o uso da simulação, quando se dispõe de bons modelos, torna a solução dos problemas bem mais simples. Abaixo são relacionados alguns exemplos de aplicações durante a fase de comissionamento.

- Auxílio na pesquisa e identificação das causas de grandes oscilações de abertura (0 à 100%) do distribuidor, com a conseqüente variação acentuada da velocidade, cuja causa era um erro de fiação no painel do regulador eletrônico.

- Ajustes do comutador de ganho integral situado no Regulador Eletrônico, que com os valores iniciais fornecidos pelo fabricante, provocavam oscilações acentuadas de freqüência e abertura durante ensaios de absorção brusca de carga.

- Efeitos dos limitadores de cavitação e de potência (bem como o ajuste do ganho associado ao último) no comportamento

das unidades geradoras quando da tomada de carga pelo Elo CC sem amortecimento artificial (STAB-50).

- Otimização de ajustes do Sistema Copiador Hidráulico, no sentido de se diminuir as oscilações de freqüência e de abertura do distribuidor em regime permanente, quando da operação de Unidades Geradoras ligadas ao Elo CC sem STAB-50.

- Obteção dos ajustes paramétricos para otimização do comportamento dinâmico do Regulador de Velocidade.

- Previsão de máxima sobrefreqüência e máxima sobrepressão no conduto forçado para a realização de ensaios de rejeição de carga, em função das condições operacionais existentes na ocasião.

Na fase de operação normal, a aplicação maior dos modelos é na análise das ocorrências em que se quer aprofundar no estudo do comportamento dinâmico do Regulador e da Turbina. Entretanto, dada a escassez de registradores permanentes na usina, tais modelos têm também grande utilidade na determinação dos valores atingidos pelas variáveis não disponíveis em registros adequados, para qualquer ocorrência. A seguir são apresentadas algumas aplicações:

- Estudos para determinação das causas da ocorrência de colapso de freqüência no Sistema de 50Hz, quando da operação com o Elo CC sem o STAB-50, cuja causa foi uma carga ∿1% superior a máxima potência disponível no gerador de ITAIPU (ação do limitador de cavitação).

- Determinação de máxima sobrefreqüência e de taxa de crescimento para a efetuação dos ajustes das proteções envolvidas, bem como para avaliação prática do comportamento das mesmas.

- Utilização na definição de esquemas especiais para a otimização da operação do sistema interligado de 50Hz.

- Utilização na determinação de limites de transmissão de potência pelo Elo CC, em função dos limites impostos pelo sistema e das condições operativas em ITAIPU.

- Otimização do tempo de fechamento dos servomotores no sentido de se diminuir a sobrefreqüência decorrente de rejeições de carga, sem no entanto comprometer a sobrepressão no conduto forçado.

- Utilização em estudos de otimização do comportamento dinâmico dos controladores do Elo CC.

Os modelos não lineares de Regulador de Velocidade e Turbina desenvolvidos neste trabalho, face ao nível de detalhes presentes, a diversidade de variáveis disponíveis e a precisão obtida, podem também ser úteis em estudos teóricos e genéricos sobre o comportamento dinâmico dos equipamentos envolvidos (principalmente da Turbina), através da simulação digital em computador.

6.2- COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS EQUIPAMENTOS ENVOLVIDOS

Neste item será mostrada a simulação de uma rejeição total de carga, com a obtenção de gráficos que descrevem o comportamento de diversas variáveis disponíveis, ao longo do tempo.

CASO SIMULADO: - Rejeição de 750 MW para 0 MW.
- NM = 220 m; NJ = 100 m : QB = 120 m.

A seguir são listadas as variáveis escolhidas para a representação gráfica na simulação. Os valores estão em pu, com excessão da freqüência que já está em Hz.

- FIG.25: - FQHZ (freqüência)
  - GATE (abertura do distribuidor - Y)

- FIG.26: - ACEL (saída do acelerômetro)
  - INTG (saída do integrador)
  - PROP (ação proporcional)

- FIG.27: - MINI (saída do regulador eletrônico - Y1)
  - SERV (deslocamento do servomotor - Y2)

- FIG.28: - TORQ (torque mecânico)
  - VAZ (vazão)

- FIG.29: - MH (efeito da variação da pressão no torque mecânico)
  - MF (efeito de variação da freqüência no torque mecânico)
  - MY (torque mecânico função de Y e H_L)

- FIG.30: - QH (efeito da variação da pressão na vazão)
  - QF (efeito da variação da freqüência na vazão)
  - QY (vazão em função de Y e H_L)

• FIG.31: - PCHC (perda de carga no conduto forçado)
- HEPC (pressão na caixa espiral)

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ B.M

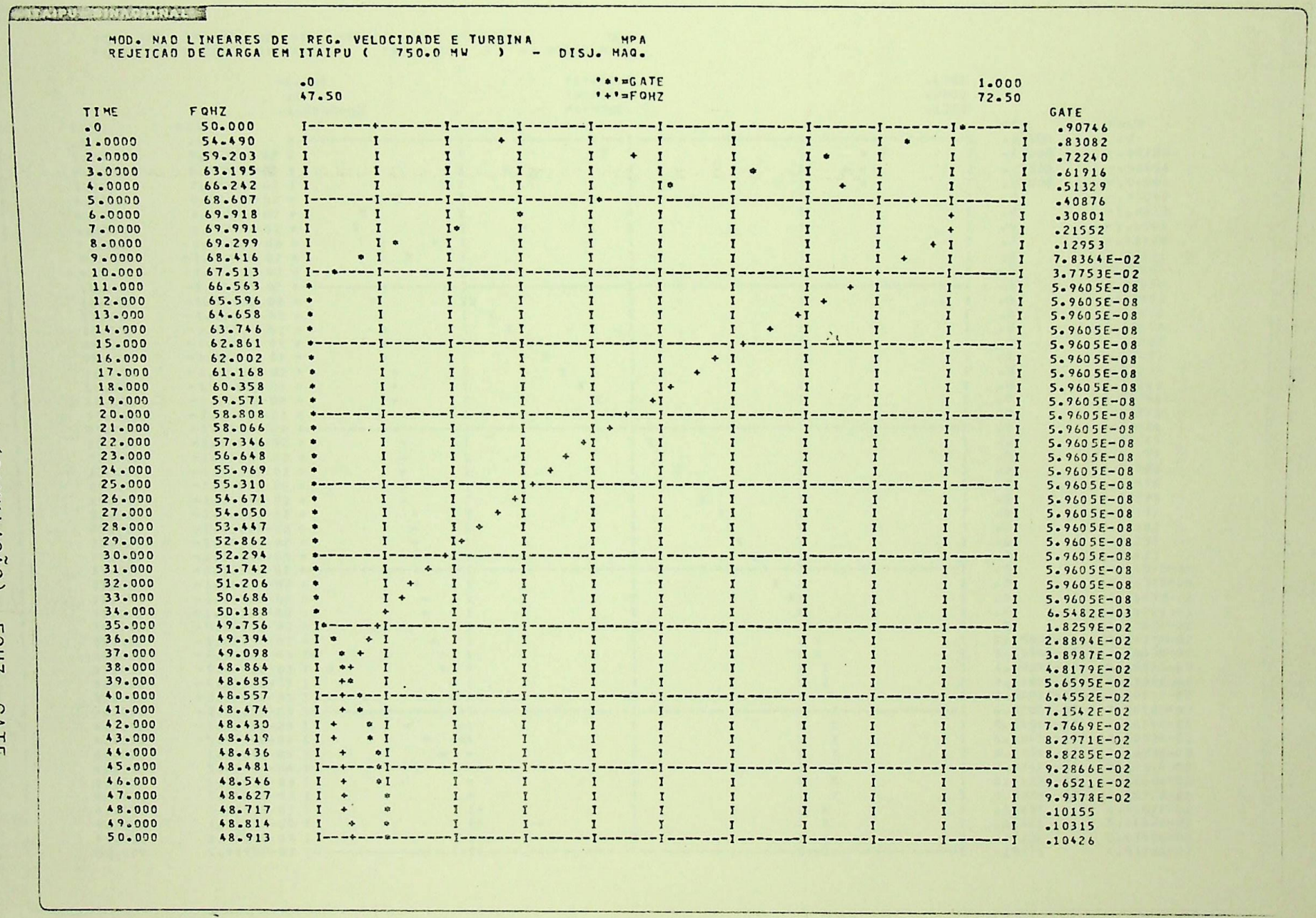


FIG.25 - REJEIÇÃO 750 MW (SIMULAÇÃO)- FQHZ, GATE

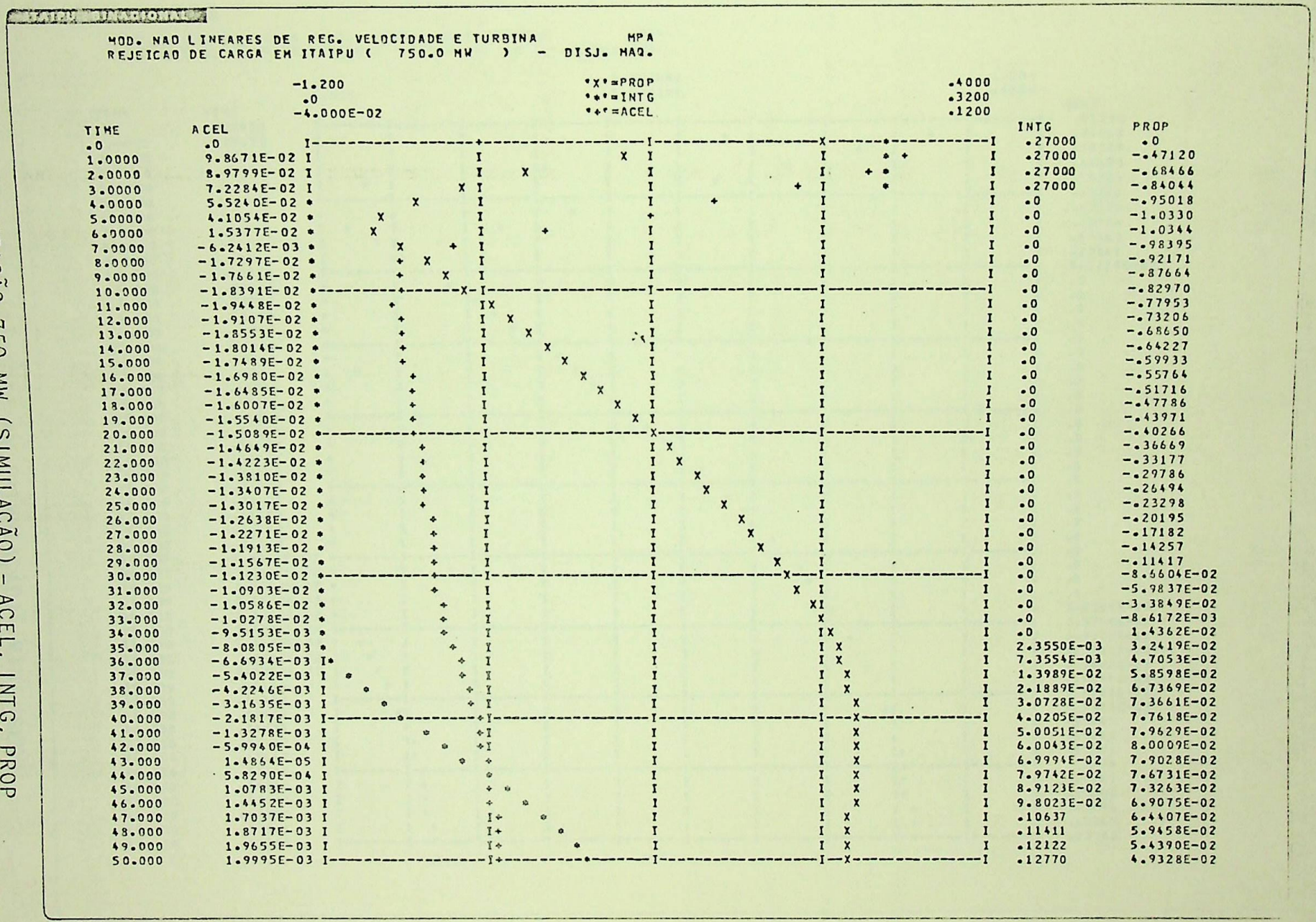


FIG. 26 - REJEIÇÃO 750 MW (SIMULAÇÃO) - ACEL, INTG, PROP

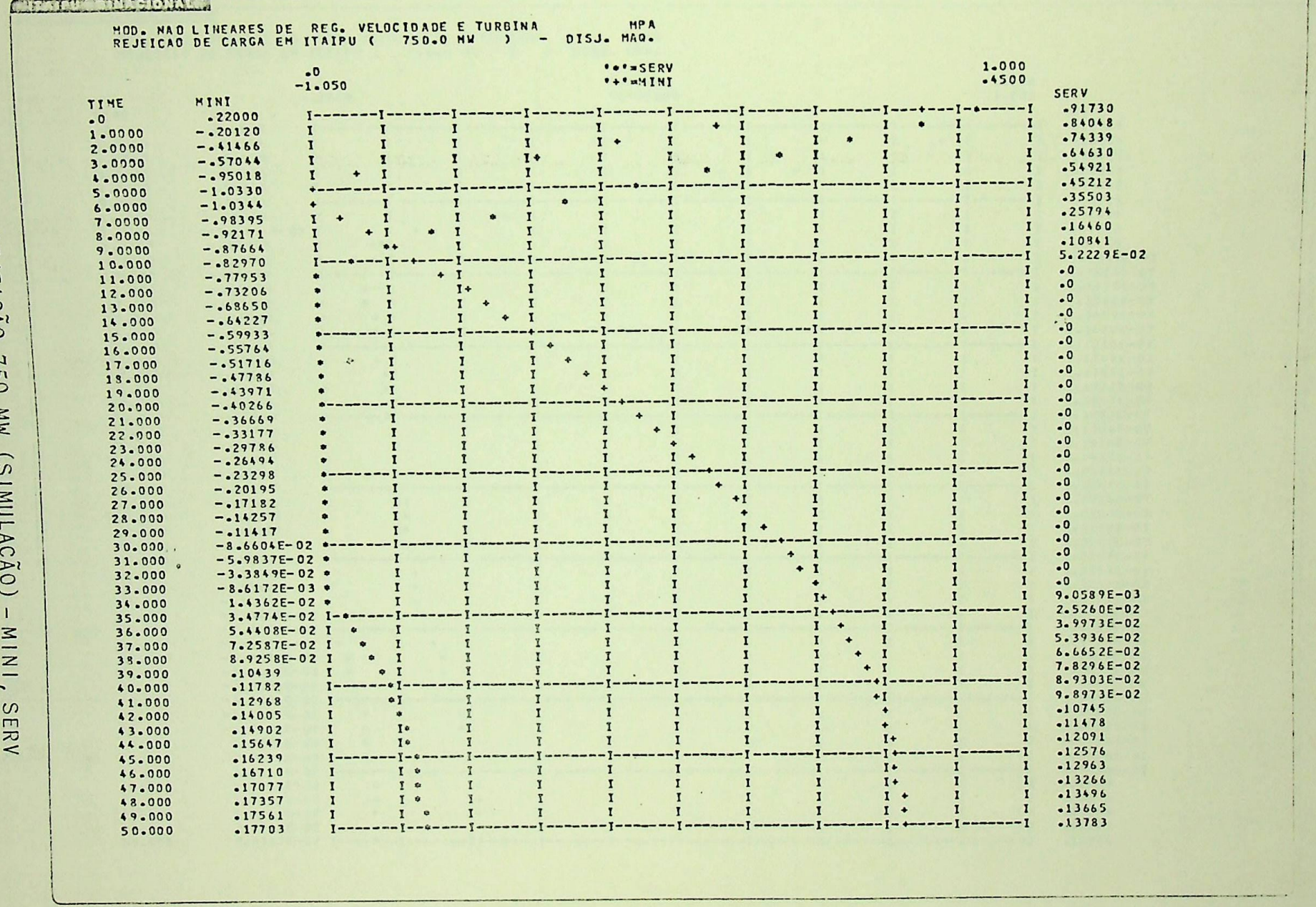


FIG. 27 - REJEIÇÃO 750 MW (SIMULAÇÃO) - MINI, SERV

ITAIPU BINACIONAL

MOD. NAO LINEARES DE REG. VELOCIDADE E TURBINA MPA
REJEICAO DE CARGA EM ITAIPU (750.0 MW) - DISJ. MAQ.

.0 *=VAZ 1.500
-.3000 +=TORQ 1.200

TIME	TORQ	VAZ
.0	1.0348	1.0640
1.0000	.99394	1.0395
2.0000	.88318	.95609
3.0000	.69326	.83832
4.0000	.54025	.69570
5.0000	.38311	.53039
6.0000	.10326	.37399
7.0000	-9.1834E-02	.24780
8.0000	-.17923	.13170
9.0000	-.17985	7.8039E-02
10.000	-.18879	3.9410E-02
11.000	-.19879	1.5575E-03
12.000	-.19301	1.3516E-07
13.000	-.18739	1.1629E-07
14.000	-.18194	1.1670E-07
15.000	-.17664	1.1710E-07
16.000	-.17150	1.1748E-07
17.000	-.16651	1.1785E-07
18.000	-.16167	1.1822E-07
19.000	-.15696	1.1857E-07
20.000	-.15239	1.1891E-07
21.000	-.14796	1.1924E-07
22.000	-.14365	1.1956E-07
23.000	-.13947	1.1987E-07
24.000	-.13541	1.2018E-07
25.000	-.13147	1.2047E-07
26.000	-.12765	1.2076E-07
27.000	-.12393	1.2103E-07
28.000	-.12033	1.2130E-07
29.000	-.11682	1.2157E-07
30.000	-.11343	1.2182E-07
31.000	-.11013	1.2207E-07
32.000	-.10692	1.2231E-07
33.000	-.10381	1.2254E-07
34.000	-9.4055E-02	5.7730E-03
35.000	-7.9059E-02	1.8050E-02
36.000	-6.5326E-02	2.9326E-02
37.000	-5.2378E-02	4.0078E-02
38.000	-4.0660E-02	4.9892E-02
39.000	-3.0079E-02	5.8877E-02
40.000	-2.0306E-02	6.7402E-02
41.000	-1.1899E-02	7.4929E-02
42.000	-4.7438E-03	8.1522E-02
43.000	1.2844E-03	8.7231E-02
44.000	7.0601E-03	9.2806E-02
45.000	1.1811E-02	9.7753E-02
46.000	1.5301E-02	.10169
47.000	1.7727E-02	.10476
48.000	1.9269E-02	.10708
49.000	2.0089E-02	.10877
50.000	2.0327E-02	.10994

FIG. 28 - REJEIÇÃO 750 MW (SIMULAÇÃO) - TORQ, VAZ

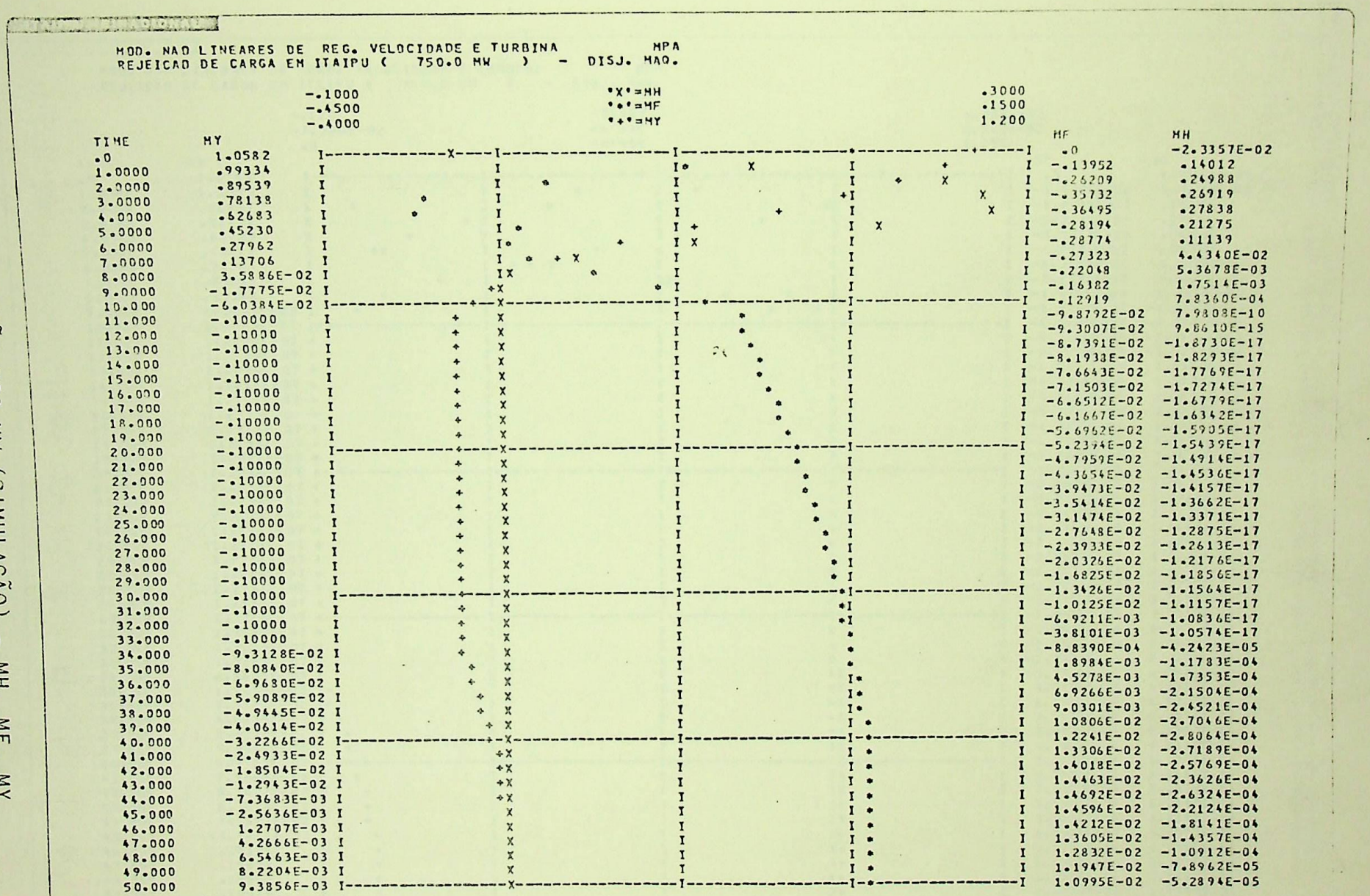


FIG.29 - REJEIÇÃO 750 MW (SIMULAÇÃO) - MH, MF, MY

MOD. NAO LINEARES DE REG. VELOCIDADE E TURBINA MPA
REJEICAO DE CARGA EM ITAIPU (750.0 MW) - DISJ. MAQ.

-.1200 *X*=QH 4.000E-02
-7.500E-02 ***=QF 2.500E-02
.0 *+*=QY 1.200

TIME	QY	QF	-QH
.0	1.0742	.0	1.0143E-02
1.0000	1.0003	-1.9920E-02	-5.9133E-02
2.0000	.88837	-4.0178E-02	-.10791
3.0000	.77298	-5.2681E-02	-.11802
4.0000	.63723	-5.9927E-02	-.11840
5.0000	.49362	-6.5526E-02	-.10230
6.0000	.35344	-4.3607E-02	-6.4151E-02
7.0000	.23214	-2.2722E-02	-3.8378E-02
8.0000	.13586	-1.5553E-02	-1.1396E-02
9.0000	8.2201E-02	-8.9764E-03	-4.8143E-03
10.000	3.9603E-02	-4.1107E-03	-3.9180E-03
11.000	1.2284E-07	-7.3606E-09	-1.5574E-03
12.000	1.2284E-07	-6.9296E-09	-1.9243E-08
13.000	1.2284E-07	-6.5111E-09	3.6550E-11
14.000	1.2284E-07	-6.1048E-09	3.5698E-11
15.000	1.2284E-07	-5.7104E-09	3.4674E-11
16.000	1.2284E-07	-5.3274E-09	3.3708E-11
17.000	1.2284E-07	-4.9555E-09	3.2742E-11
18.000	1.2284E-07	-4.5945E-09	3.1889E-11
19.000	1.2284E-07	-4.2440E-09	3.1036E-11
20.000	1.2284E-07	-3.9037E-09	3.0127E-11
21.000	1.2284E-07	-3.5733E-09	2.9104E-11
22.000	1.2284E-07	-3.2525E-09	2.8365E-11
23.000	1.2284E-07	-2.9410E-09	2.7626E-11
24.000	1.2284E-07	-2.6386E-09	2.6660E-11
25.000	1.2284E-07	-2.3450E-09	2.6091E-11
26.000	1.2284E-07	-2.0599E-09	2.5125E-11
27.000	1.2284E-07	-1.7831E-09	2.4613E-11
28.000	1.2284E-07	-1.5144E-09	2.3761E-11
29.000	1.2284E-07	-1.2535E-09	2.3135E-11
30.000	1.2284E-07	-1.0003E-09	2.2567E-11
31.000	1.2284E-07	-7.5439E-10	2.1771E-11
32.000	1.2284E-07	-5.1566E-10	2.1146E-11
33.000	1.2284E-07	-2.8387E-10	2.0634E-11
34.000	6.8691E-03	-5.7920E-06	1.0903E-03
35.000	1.9153E-02	3.2409E-05	1.1357E-03
36.000	3.0310E-02	1.1543E-04	1.0988E-03
37.000	4.0897E-02	2.2618E-04	1.0456E-03
38.000	5.0539E-02	3.4831E-04	9.9553E-04
39.000	5.9367E-02	4.7057E-04	9.6115E-04
40.000	6.7713E-02	5.8650E-04	8.9711E-04
41.000	7.5045E-02	6.8520E-04	8.0162E-04
42.000	8.1472E-02	7.6352E-04	7.1317E-04
43.000	8.7033E-02	8.1984E-04	6.2197E-04
44.000	9.2607E-02	8.6110E-04	6.6167E-04
45.000	9.7411E-02	8.7849E-04	5.3585E-04
46.000	.10125	8.7254E-04	4.2725E-04
47.000	.10424	8.4763E-04	3.3110E-04
48.000	.10652	8.0817E-04	2.4927E-04
49.000	.10819	7.5827E-04	1.7947E-04
50.000	.10936	7.0149E-04	1.1981E-04

FIG.30 - REJEIÇÃO 750 MW (SIMULAÇÃO) - QH, QF, QY

ITAIPU BINACIONAL

MOD. NAO LINEARES DE REG. VELOCIDADE E TURBINA MPA
REJEICAO DE CARGA EM ITAIPU (750.0 MW) - DISJ. MAQ.

.9600 *o*=HEPC 1.260
.0 *+*=PCH 1.500E-02

TIME	PCH	HEPC
.0	.0	.98803
1.0000	1.4742E-02	1.0620
2.0000	1.2515E-02	1.1359
3.0000	9.6459E-03	1.1696
4.0000	6.6729E-03	1.2142
5.0000	3.8987E-03	1.2277
6.0000	1.9454E-03	1.1921
7.0000	8.5995E-04	1.1680
8.0000	2.4453E-04	1.1060
9.0000	8.5514E-05	1.0572
10.000	2.2378E-05	1.0532
11.000	6.4986E-08	1.0243
12.000	2.7781E-16	1.0000
13.000	1.8390E-16	1.0000
14.000	1.8519E-16	1.0000
15.000	1.8644E-16	1.0000
16.000	1.8767E-16	1.0000
17.000	1.8886E-16	1.0000
18.000	1.9003E-16	1.0000
19.000	1.9116E-16	1.0000
20.000	1.9226E-16	1.0000
21.000	1.9334E-16	1.0000
22.000	1.9438E-16	1.0000
23.000	1.9540E-16	1.0000
24.000	1.9639E-16	1.0000
25.000	1.9735E-16	1.0000
26.000	1.9829E-16	1.0000
27.000	1.9921E-16	1.0000
28.000	2.0010E-16	1.0000
29.000	2.0096E-16	1.0000
30.000	2.0180E-16	1.0000
31.000	2.0262E-16	1.0000
32.000	2.0341E-16	1.0000
33.000	2.0419E-16	1.0000
34.000	4.0508E-07	.98340
35.000	4.2486E-06	.98346
36.000	1.1436E-05	.98460
37.000	2.1509E-05	.98585
38.000	3.3470E-05	.98693
39.000	4.6722E-05	.98771
40.000	6.1342E-05	.98881
41.000	7.5923E-05	.99019
42.000	8.9975E-05	.99142
43.000	1.0311E-04	.99261
44.000	1.1672E-04	.99226
45.000	1.2960E-04	.99378
46.000	1.4035E-04	.99506
47.000	1.4902E-04	.99616
48.000	1.5576E-04	.99711
49.000	1.6078E-04	.99789
50.000	1.6430E-04	.99855

FIG.31 - REJEIÇÃO 750 MW (SIMULAÇÃO) - PCH, HEPC

7- CONCLUSÕES

A comparação entre os resultados da simulação e dos ensaios de campo mostram que os modelos não lineares de Turbina e Regulador de Velocidade desenvolvidos neste trabalho, atenderam os objetivos previstos, uma vez que:

- Apresentaram bons resultados para os diversos distúrbios de carga simulados, nas diversas condições operativas, podendo assim serem amplamente utilizados.

- Permitem o estudo detalhado do comportamento dinâmico dos equipamentos envolvidos, dando acesso a um grande número de variáveis de interesse.

- Apesar de resultarem num programa extenso e sofisticado são de uso simples, devido a automação inserida no mesmo.

- Atendem ao objetivo prático das necessidades de estudos existentes em ITAIPU, já tendo sido utilizados com sucesso.

Tais modelos se aplicam aos estudos dos equipamentos envolvidos na fase de comissionamento das unidades geradoras, bem como principalmente, na fase de operação das mesmas, sendo muito úteis, por exemplo, para:

- Análise aprofundada de determinadas ocorrências.

- Pesquisa de defeitos nos equipamentos envolvidos, proporcionando maior agilidade ao processo e reduzindo o número de ensaios de campo.

- Otimização dos ajustes nos equipamentos de controle, reduzindo sensivelmente o número de ensaios necessários para tal objetivo.

- Previsão de comportamento dinâmico em dispositivos que estejam entrando em operação, bem como de valores máximos a serem atingidos pelas variáveis de interesse, antes da realização dos ensaios.

Convém ainda ressaltar alguns aspectos importantes na elaboração dos modelos não lineares:

- Os ensaios e cálculos necessários para a obtenção do modelo não linear do Regulador de Velocidade são relativamente simples.

- Os resultados dos ensaios de modelo reduzido constituem-se numa fonte de informação indispensável para a elaboração do modelo não linear de Turbina.

- As medições efetuadas no campo nem sempre possuem boa precisão, o que pode prejudicar a aferição e o desempenho dos modelos, sendo necessário portanto, que os dados e registros obtidos tenham a máxima precisão possível.

- Em usinas onde haja variação sensível de queda líquida disponível, esse efeito deve ser considerado na modelagem, visto que influi significativamente no comportamento da Turbina, e conseqüentemente, no Regulador de Velocidade também.

- A metodologia utilizada na elaboração deste trabalho pode ser aplicada a qualquer unidade geradora (com Turbina Francis) em que se tenha disponíveis os dados necessários.

Os modelos não lineares aqui desenvolvidos, tem sua aplicação principal nos estudos referentes à unidades geradoras ligadas a um sistema de transmissão em Corrente Contínua. Hoje no Brasil só existe ITAIPU, mas no futuro poderão existir outras, principalmente na Amazônia.

Finalmente cabe ainda dizer que tais modelos não pretendem ser perfeitos, deixando abertos caminhos para um aperfeiçoamento ainda maior, como por exemplo, a elaboração de uma rotina que faça automaticamente a aferição dos modelos em relação aos ensaios de campo.

8- BIBLIOGRAFIA

01- "Resultados dos ensaios de comisisonamento das Unidades 01, 02 e 03 de ITAIPU-50Hz".

02- "Documentação técnica e ensaios do Regulador de Velocidade de ITAIPU".

03- Documentação técnica e resultados dos Ensaios de Modelo Reduzido das Turbinas de ITAIPU".

04- "Frequency Control of Kettle Generating Station for the Nelson River HVDC Project" - D. A. Shearer; Nov 1970 - Meenting of Canadian Electrial Association.

05- "Desenvolvimento de Modelos Matemáticos Não Lineares para Reguladores de Velocidade e Turbinas de ITAIPU" - Marcelino Pereira de Almeida; NT/DMA.T/022 (RE-009).

06- "Dinâmica e Controle da Geração" - F. P. de Mello.

07- "Notas de aula da Cadeira de Dinâmica e Controle da Geração"- Prof. Hélio Mokarzel; CESE 86.

08- "Regulação de Turbinas Hidráulicas - Cálculo de Golpe de Ariete" - Fritz Falkemreck; 1º Seminário de Engenharia Hidromecânica, Março 1976.

09- "Desenvolvimento de um Modelo Não Linear para as Turbinas de ITAIPU" - Marcelino Pereira de Almeida e Valdir da Silva Queiroz; NT/DMA.T/007 (RE 002).

10- "Faixas Operacionais (MW - Gerador x Queda Bruta) para as Unidades Geradoras de ITAIPU-50Hz" - Marcelino Pereira de Almeida e Luiz Marcello C. Nogueira; NT/DMA.T/015 (RE-006).

11- "Continuos System Modeling Program III (CSMP III) Program Reference Manual" - IBM.

12- "Simulation of a Water Turbine on an Analogue Computer" - H. Schiott and J. Winther; Water Power, October 1985.

13- "Non-linear Simulation of Hydraulic Turbine Governor Systems" P. Blair and L. Wozniak - Water Power, September 1976.

14- "Hidraulic-Turbine Transfer Function for use in Governing Studies" - J.L. Woodward; PROC.IEE (London), Vol.115 - Março 1968.

15- "Detailed Hidrogovernor Representation foi System Stability Studies" - D.G. Ramey and J.W. Skooglund; IEEE Trans. PAS-89, nº 1 - Janeiro 1970.

16- "Dynamic Models foi Steam and Hydro Turbines in Power Systems Studies" - IEEE Committe Report; PAS NOV./DEC. 1973.

17- "Non linear Hydro Governing Model and Improved Calculation for Determining Temporary Droop" - J.M. Undrill and J.L. Woodward; IEEE Trans. PAS-86 - Abril 1967.

18- "Economic Control of Intoconnected Power Systems" - L. K. Kirchmayer.

19- "Control of Generation and Power Flow on Interconnected Systems" - Nathan Cohn.

20- "Máquinas Motrizes Hidráulicas" - A. D. Macyntre.

21- "Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares" - J.J. D'Azzo e C. H. Houpis.

22- "Operação de Sistemas de Potência com Controle Automático de Geração" - Xisto V. Filho.

23- "Optinum Adjustment of Governors in Hydro Generating Stations" - L.M. Hovey; The Engineering Journal, November 1960.

24- "Governing of Water Turbines" - G.J. Causon; Elec.& Mech. Engineering Transactions, Nov. 1959.

25- "Linear Mathematical Models of Hydraulic Turbines for Frequency Regulation Studies" - F. de Siervo and F. de Leva; L'Energia Elettrica nº 2, 1977.

26- "Governing Stability of a Hidroeletric Power Plant" - M. H. Chaudhry; Water Power, Abril 1970.

27- "Frequency Control Under Isolated Network Conditions" - T. Stein; Water Power, Setembro 1970.

MPA/ia

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
BIM