

TESE

587

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

"APLICAÇÃO DE COMPENSADORES ESTÁTICOS  
COM SINAL ADICIONAL NO AMORTECIMENTO  
DAS OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS -  
UM CASO REAL"



MANOEL RICARDO DIAS DE AZEVEDO

ORIENTADORES:

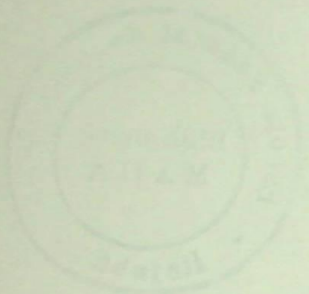
PROF. HELIO MOKARZEL

PROF. ALQUINDAR DE SOUZA PEDROSO

ITAJUBÁ - MG

1989

CLASSE 621.316.722:629.1.315(043,2)  
COTE. A994a  
TOMOS 587



WITCAGH BE COMPENSADRES ESTE LOS  
COM SINAF ADICIONAL AN ADICIONEL  
LAS CRUCIADOS ELECTROQUIMICAS  
DEL CASO REAL

Witcagh be compensadres este los

WITCAGH BE COMPENSADRES ESTE LOS  
COM SINAF ADICIONAL AN ADICIONEL  
LAS CRUCIADOS ELECTROQUIMICAS  
DEL CASO REAL

WITCAGH BE COMPENSADRES ESTE LOS

DEL CASO REAL

## R E S U M O

Este trabalho apresenta o desenvolvimento teórico e prático da aplicação de um compensador estático para prover ou aumentar o amortecimento das oscilações eletromecânicas, principalmente, quando se utiliza a injeção de um sinal adicional no regulador de tensão deste equipamento.

As deduções resultantes da análise de um modelo matemático linear, representativo de um sistema elétrico típico, composto por uma máquina ligada a um grande sistema elétrico (barra infinita) por uma linha de transmissão, com um compensador estático provido com um sinal adicional controlando a tensão de um ponto intermediário desta linha, foram comprovadas em um sistema elétrico multimáquina real, fazendo-se simulações digitais.

Assim, a comprovação da eficácia da utilização de um compensador estático com sinal adicional no amortecimento das oscilações eletromecânicas, amplia a faixa de utilização deste equipamento, na medida que possibilita a maximização dos sistemas de transmissão, e a conseqüente postergação de investimentos, o que em última análise representa apreciável economia.

## A B S T R A C T

This paper presents the theoretical and practical development of the application of a static VAR compensator in order to supply or to improve the damping of electrical mechanical oscillations, mainly when an additional signal is included in the automatic voltage regulation of this equipment.

The deductions resulting from the analysis of a linear mathematical model, representative of a typical electric system, composed by a machine connected to a strong power system (infinite bus) by a transmission line, with a static VAR compensator provided with an additional signal controlling the voltage of an intermediate point of this line, were confirmed in a real multi-machine system, using digital simulations.

Thus the confirmation of the capability in the use of a static compensator with an additional signal to damp the electrical mechanical oscillations, increases the range of utilization of this equipment, as it makes possible a better performance, of the transmission system, and as a consequent postponement of investments, that may lead to appreciable economy.

## C O N T E Ú D O

RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	ii
CONTEÚDO .....	iii
SIMBOLOGIA .....	iv

Pág.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	01
CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS SOBRE COMPENSADORES ESTÁTICOS .....	03
2.1 - <u>Tipos de Compensadores Estáticos</u> .....	03
2.2 - <u>Interação do Compensador Estático com o Sistema Elétrico</u> .....	06
2.3 - <u>Modelo de um Compensador Estático</u> .....	08
CAPÍTULO 3 - OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS .....	12
3.1 - <u>Conceituação do Fenômeno</u> .....	12
CAPÍTULO 4 - EFEITOS DO SUPORTE DE TENSÃO SOBRE A ESTABILIDADE .....	16
4.1 - <u>Sistemas de Transmissão com Suporte de Tensão</u> .....	16
4.2 - <u>Efeito do Suporte de Tensão na Estabilidade Estática e Transitória</u> .....	16
4.3 - <u>Efeito do Suporte de Tensão na Estabilidade Dinâmica</u> .....	22
CAPÍTULO 5 - SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DA USINA DE ITAIPU ...	26
5.1 - <u>Estudos de Fluxo de Potência</u> .....	27
5.2 - <u>Estudos de Estabilidade</u> .....	30
5.2.1 - <u>Estudo de estabilidade para a condição de carga leve</u> .....	33
5.2.2 - <u>Ajuste do sinal adicional</u> .....	35
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES .....	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39
ANEXO A	
ANEXO B	
ANEXO C	
ANEXO D	
ANEXO E	

## S I M B O L O G I A

## Caracteres

X            grandeza algébrica

$\dot{X}$             grandeza fasorial

## Operadores

j            unidade imaginária ( $j = \sqrt{-1}$ )

d            diferencial

$\Delta$            diferença finita

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O aproveitamento de potenciais hidroelétricos, geralmente, situados distantes dos centros consumidores, resultam na transmissão de grandes blocos de potência a longas distâncias em Extra-Alta Tensão (EAT) ou Ultra-Alta Tensão (UAT). Este fato aliado com a forte tendência do crescimento da porcentagem de cargas, caracterizadas por potência constante naqueles centros consumidores, implicam no aparecimento de oscilações eletromecânicas com pouco ou nenhum amortecimento, após a ocorrência de grandes distúrbios no sistema de transmissão.

Dentre as soluções utilizadas pelo engenheiro de planejamento de sistemas elétricos para contornar este problema, figura a de se projetar esquemas de transmissão associados com equipamentos de suporte de tensão. Esta idéia consiste em se pesquisar algum ou alguns pontos, dentro do sistema elétrico e instalar equipamentos que promovam a regulação de tensão deste.

Podemos citar, como prática atual o emprego dos compensadores estáticos, que consistem da associação ou não de reatores controlados por tiristores com capacitores chaveados por tiristores, acompanhados com reguladores rápidos de tensão. Este equipamento convenientemente instalado no sistema elétrico, irá reagir às variações de tensão ocorridas, atuando no sentido de corrigi-las. O grande efeito prático decorrente deste controle efetivo da tensão ao longo do sistema elétrico, traduz-se, geralmente, por oscilações eletromecânicas de amplitudes mais reduzidas, ou seja, acompanhadas de maior amortecimento.

A aplicação de um sinal adicional no regulador de tensão do compensador estático, conceitualmente, é semelhante à utilização do sinal adicional junto ao regulador de tensão dos geradores síncronos. A sua utilização poderá trazer vantagens adicionais, no que diz respeito a se aumentar o efeito de amortecimento das oscilações eletromecânicas. Esta comprovação tornará a utilização dos compensadores estáticos ainda mais atrativa, não só pelo aspecto técnico, bem como pelo aspecto econômico, visto a sua grande diversidade de utilização nos sistemas elétricos.

A utilização de sinal adicional em compensadores estáti

cos, vem sendo apresentada, conceitualmente, em trabalhos técnicos, desde meados da década de 70 (artigo 6). Entretanto, mais recentemente, alguns trabalhos (artigos 1, 2 e 3), apresentaram formulações matemáticas que visavam demonstrar sua eficácia, no amortecimento das oscilações eletromecânicas.

Sob o ponto de vista prático os trabalhos (artigos 4 e 5), apresentaram resultados da aplicação desta técnica, via simulação digital, utilizando sistemas elétricos típicos de pequeno porte.

O principal objetivo deste trabalho foi aprimorar a formulação até aqui apresentada, utilizando-se um sistema elétrico típico (máquina ligada a uma barra infinita, com compensação em um ponto intermediário), bem como a partir das conclusões obtidas, aplicá-las a um sistema elétrico real de grande porte.

Este trabalho foi organizado em 6 capítulos, reservando-se ao quinto uma aplicação prática, ou seja, através de simulações digitais, procurou-se demonstrar os conceitos desenvolvidos nos Capítulos 3 e 4. A aplicação prática envolve o sistema elétrico das regiões Sudeste e Sul do Brasil, principalmente os sistemas de transmissão da usina de Itaipu, em corrente contínua e corrente alternada.

As simulações dinâmicas apresentadas utilizaram o Programa PSS/EB - POWER SYSTEM SIMULATOR, implementado em FURNAS-CENTRAIS ELÉTRICAS S/A. A subrotina representativa do compensador estático, foi desenvolvida pelo autor, de acordo com a função de transferência apresentada no Capítulo 2. Para a subrotina representativa do sinal adicional, utilizou-se o modelo STAB1, cujo diagrama de blocos é mostrado no apêndice C do anexo A; enquanto para a medição da variação da frequência da barra, utilizou-se o modelo BUSFRQ, ambos fazendo parte da biblioteca de modelos do Programa PSS/EB.

## CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS SOBRE COMPENSADORES ESTÁTICOS

### 2.1 - Tipos de Compensadores Estáticos

Dentre os tipos básicos de compensadores estáticos com uso mais frequente, atualmente, em Sistemas de Potência de Extra-Alta Tensão (EAT), pode-se citar três:

- Compensadores estáticos compostos por reatores controlados por tiristores, com ou sem capacitores fixos, conforme ilustrado na figura 1-a.
- Compensadores estáticos compostos por capacitores chaveados por tiristores, conforme ilustrado na figura 1-b.
- Compensadores estáticos compostos pela combinação dos dois tipos acima, ou seja, pela união num só equipamento de reatores controlados por tiristores e capacitores chaveados por tiristores, conforme ilustrado na figura 1-c.

Cabe observar que os tipos de compensadores estáticos ilustrados nas figuras 1-a e 1-c possibilitam um controle contínuo da tensão, enquanto o da figura 1-b um controle discreto da mesma; sendo neste caso, aproximado de um controle contínuo pela utilização de um maior número de unidades capacitivas em paralelo.

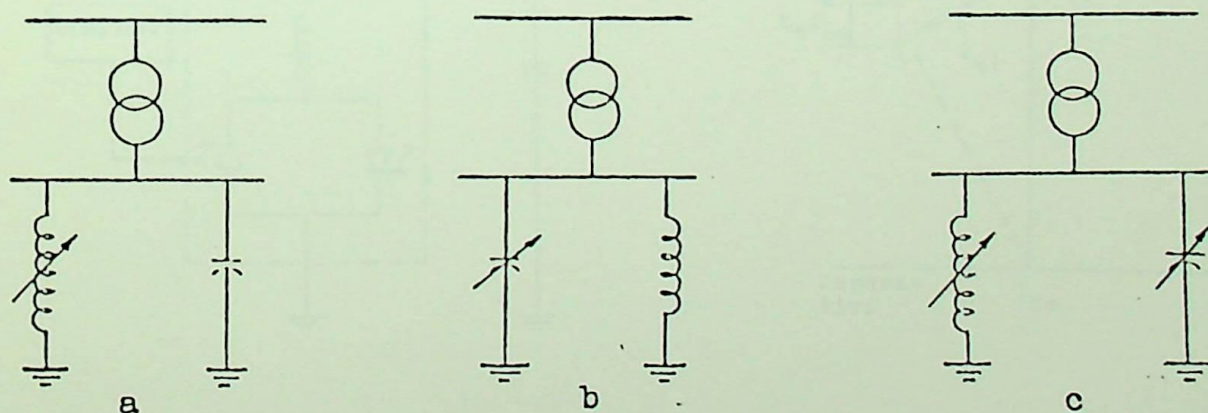


Figura 1 - Configuração idealizada

a-indutância variável;b-capacitância variável;c-ambas variáveis

Os compensadores estáticos são geralmente ligados ao terminal de baixa tensão de um transformador próprio. Entretanto, a tensão a ser controlada pelo mesmo, poderá ser a tensão do terminal de baixa, ou a tensão do terminal de alta do transformador, conforme ilustrado nas figuras 2-a e 2-c, respectivamente, bem como a tensão de uma barra remota.

A curva ilustrada na figura 2-b relaciona a corrente reativa resultante  $I_{ce}$  com a tensão do terminal de baixa tensão  $V_{bt}$  do transformador. Esta curva foi traçada supondo-se que o compensador estático tenha sido projetado para controlar a tensão  $V_{bt}$  dentro da faixa dada por  $e_1$  mais  $e_2$ ; desta forma a regulação da tensão do terminal de alta  $V_{at}$  será maior que a faixa  $e_1$  mais  $e_2$ , em virtude da queda da tensão no transformador dada por  $X_t I_{ce}$ , onde  $X_t$  é a reatância do transformador. No entanto, supondo-se que o compensador estático tenha sido projetado para controlar a tensão do terminal de alta  $V_{at}$ , dentro da faixa  $e_1$  mais  $e_2$ , conforme ilustrado na figura 2-d, a curva representativa da tensão do terminal de baixa, poderá ter uma inclinação positiva ou negativa, dependendo da reatância  $X_t$  do transformador.

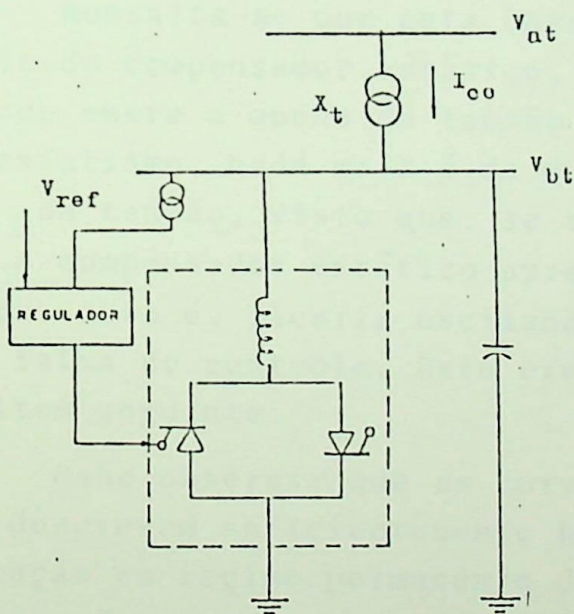


Figura 2-a - Diagrama esquemático de um compensador estático com controle de tensão na barra de baixa tensão

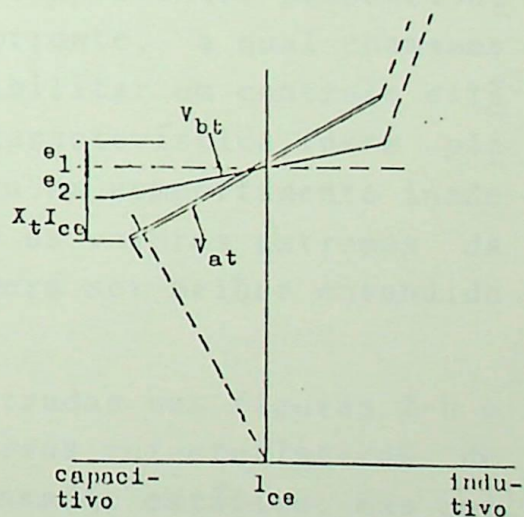


Figura 2-b - Característica de estado permanente.

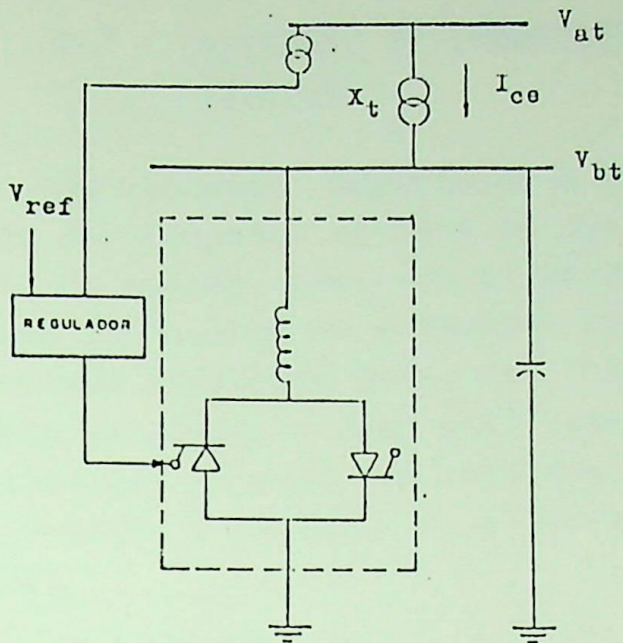


Figura 2-c - Diagrama esquemático de um compensador estático com controle de tensão na barra de alta tensão.

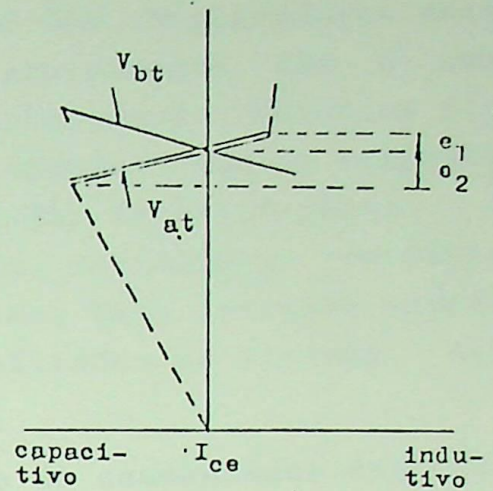


Figura 2-d - Característica de estado permanente.

Ressalta-se que esta característica apresentada pelo controle do compensador estático, ou seja, apresentar proporcionalidade entre a queda de tensão e a corrente, a qual chamamos de estatismo, nada mais é do que possibilitar um controle estável da tensão, visto que, se aquela característica fosse plana, o compensador estático apresentaria um comportamento inadequado, isto é, ficaria oscilando entre os valores extremos da sua faixa de controle. Este efeito poderá ser melhor entendido no item seguinte.

Cabe observar que as curvas ilustradas nas figuras 2-b e 2-d descrevem suficientemente bem as curvas características de operação em regime permanente do compensador estático, mas omitem os efeitos dos controles protetores superpostos. Por exemplo, podemos citar os equipamentos de proteção dos compensadores estáticos contra sobretensões e sobrecorrentes de regime permanente, bem como as proteções para assegurar a estabilidade do controle de disparos dos tiristores. Dessa forma aquelas curvas se alterariam significativamente para tensões e correntes próximas dos referidos limites.

## 2.2 - Interação do Compensador Estático com o Sistema Elétrico

Um conceito importante a respeito dos compensadores estáticos diz respeito ao fato de que este equipamento não é uma fonte de tensão, como são os geradores síncronos. Máquinas síncronas são fontes ou elementos ativos, enquanto que os compensadores são elementos passivos. O compensador estático varia a tensão da barra, a qual está controlando, variando a corrente reativa que circula pelo sistema elétrico. Esta corrente deverá ser fornecida por outros geradores localizados no sistema elétrico.

A interação do controle de tensão do compensador estático com o sistema elétrico, poderá ser entendido utilizando-se o modelo simplificado ilustrado na figura 2-e, onde o sistema elétrico é representado por uma fonte de tensão constante  $E$ , em série com uma reatância equivalente do sistema elétrico  $X_{eq}$ , vista da barra em que está localizado o compensador estático.

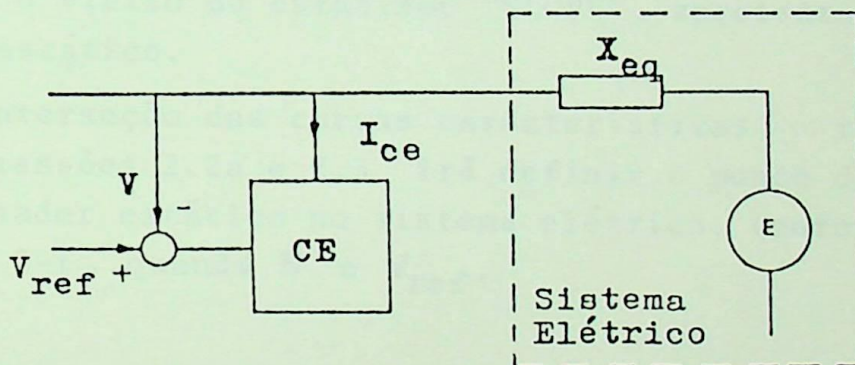


Figura 2-e - Modelo simplificado mostrando a interação de um Sistema Elétrico com o compensador estático.

A modificação da corrente reativa resultante  $I_{ce}$ , através do sistema elétrico, causará uma mudança na tensão da barra onde está localizado o compensador estático. Esta mudança na tensão será em parte devido à atuação do controle do compensador estático, bem como a reação das cargas e de outros equipamentos que compõem o sistema elétrico à variação de tensão. A corrente  $I_{ce}$  poderá variar entre o valor máximo capacitivo  $I_{cmáx}$  e o valor máximo indutivo  $I_{lmáx}$ , conforme ilustrado na figura 2-f.

A equação que representa a variação da tensão devido à passagem da corrente  $I_{ce}$  pela reatância equivalente  $X_{eq}$ , representativa do sistema elétrico, é dada pela equação 2.2.

$$\dot{V} = \dot{E} - jX_{eq} \dot{I}_{ce} \quad (2.2)$$

No caso do compensador estático operando como indutor ou capacitor, a expressão fasorial anterior, pode ser apresentada sob a forma de uma expressão algébrica, como segue:

$$V = E - X_{eq} I_{ce} \quad (2.2a)$$

o que implica numa característica de regulação, como a indicada na figura 2-f. Enquanto a equação que representa o controle de tensão feita pelo compensador estático é dada pela expressão algébrica 2.3.

$$V = V_{ref} + SL I_{ce} \quad (2.3)$$

onde  $SL$  é o efeito do estatismo "SLOPE", apresentado pelo compensador estático.

A interseção das curvas características representadas pelas expressões 2.2a e 2.3 irá definir o ponto de operação do compensador estático no sistema elétrico, conforme mostrado na figura 2-f, quando  $E = V_{ref}$ .

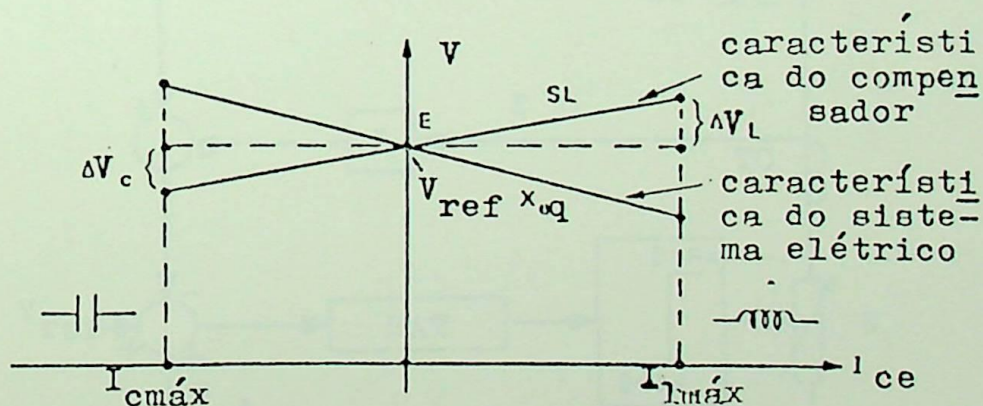


Figura 2-f - Curvas características de operação do Sistema Elétrico e de um compensador estático.

### 2.3 - Modelo de um Compensador Estático

Para os estudos de estabilidade, o compensador estático foi modelado, supondo-se uma injeção de corrente, variável, na barra cuja tensão está sendo controlada. Esta corrente é o produto de uma admitância paralela variável no tempo, com a tensão da barra controlada, conforme figura 2-h. Nestes estudos o sistema elétrico é representado pelos seus parâmetros de sequência positiva, visto que a rede elétrica é considerada equilibrada e as variações de frequência são consideradas pequenas.

A figura 2-g apresenta o diagrama de blocos funcional de um compensador estático, cujo circuito de controle da tensão é representado pelos seus principais componentes:

- TP e TC são os responsáveis pela medição da tensão e corrente, respectivamente, onde a realimentação dada por XI é a responsável pelo efeito do estatismo "SLOPE", apresentada na equação 2.3 e mostrada na curva característica do compensador estático, figura 2-f;
- RAT é o regulador automático de tensão, cuja finalidade é medir um sinal de erro de tensão, amplificá-lo e convertê-lo em um sinal de ângulo de disparo para os tiristores; e
- B é a admitância efetiva do compensador estático.

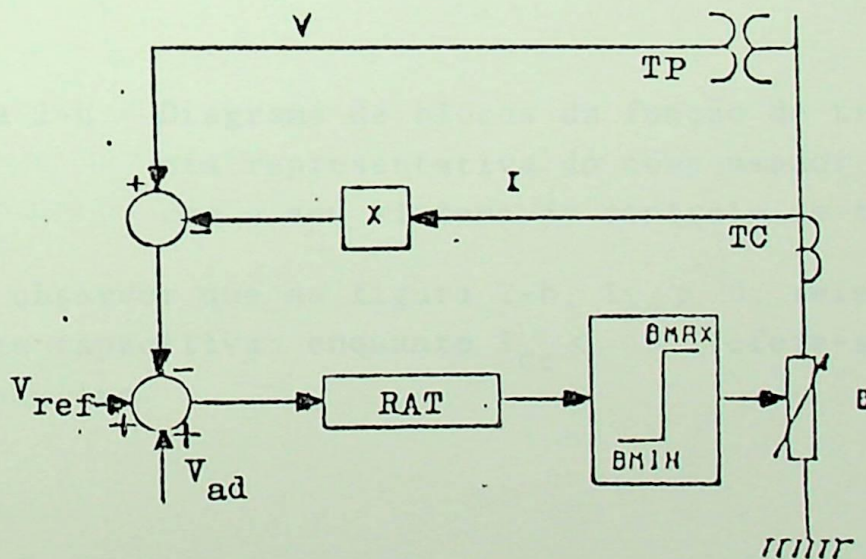


Figura 2-g - Diagrama funcional de um compensador estático com o seu sistema de medição e controle de tensão.

O regulador automático de tensão de um compensador estático pode ser ajustado para fornecer a resposta para as flutuações normais de tensão do sistema elétrico, e ainda responder em poucos ciclos a grandes perturbações, que requeiram uma correção extremamente rápida. O diagrama funcional do compensador estático foi representado nos estudos por um diagrama de blocos, cuja função de transferência é mostrada na figura 2-h, onde:

- $K$  é o ganho do amplificador do regulador automático de tensão;
- $T$  é uma constante de tempo básica, escolhida para delimitar a amplitude de faixa; e
- $T_1$  e  $T_2$  são constantes de tempo usadas para determinar o desempenho transitório do regulador automático de tensão.

A constante de tempo  $T$  é em geral bastante pequena, da ordem de 30 a 150 ms; enquanto as constantes  $T_1$  e  $T_2$  podem variar na faixa de 50 a 1000 ms.

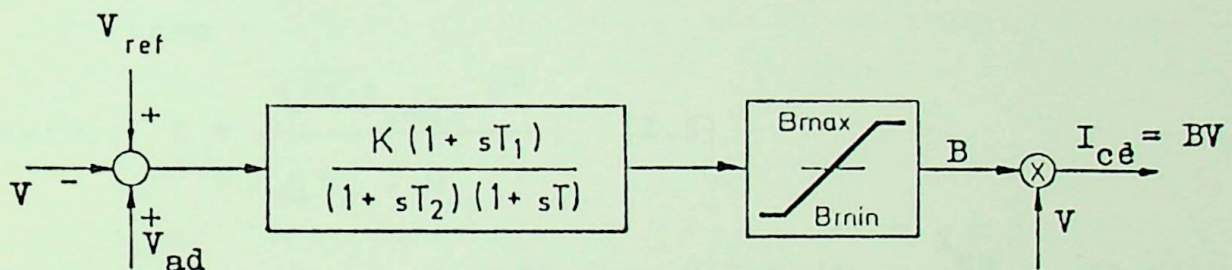


Figura 2-h - Diagrama de blocos da função de transferência representativa do compensador estático com o seu sistema de controle de tensão.

Cabe observar que na figura 2-h,  $I_{ce} > 0$ , refere-se a uma corrente capacitiva; enquanto  $I_{ce} < 0$ , refere-se a uma corrente indutiva.

O valor para o ganho K deve ser compatível com a faixa de sejadade de controle da tensão, conforme figura 2-f e com a capacidade de curto-circuito do sistema medida na barra, onde está instalado o compensador estático da seguinte forma:

- o ganho K pode ser obtido a partir da definição de ESTATISMO (SL) da característica de regime permanente do compensador estático, conforme pode ser visto na figura 2-f e, resultando na seguinte relação:

$$K \cong \frac{1}{SL} = \frac{I_{cm\acute{a}x}}{\Delta V_C} = \frac{I_{lm\acute{a}x}}{\Delta V_L} \quad (2.4)$$

em pu temos:

$$K = \frac{\frac{I_{cm\acute{a}x}}{I_{base}}}{\frac{\Delta V_C}{V_{base}}} ; \text{ onde } I_{base} = \frac{Q_{ce}}{\sqrt{3} V_{base}} \text{ e } V_{base} = V$$

$$\text{ent\~{a}o: } K = \frac{\sqrt{3} I_{cm\acute{a}x} V^2}{\Delta V_C \cdot Q_{ce}} \quad (2.5)$$

$$\text{Para } X_{ce} \gg X_{eq}, \text{ verifica-se } V \cong E \left(1 - \frac{X_{eq}}{X_{ce}}\right) \quad (2.6)$$

Substituindo a equação 2.6 na equação 2.5 e admitindo-se que a máxima variação de tensão na barra, onde está instalado o compensador estático, ocorrerá quando for mínima a potência de curto-circuito nesta barra, tem-se:

$$K \text{ (pu)} \leq \frac{(1 - B_{m\acute{a}x} X_{eq})^2}{X_{eq}} \quad (2.7)$$

O ganho e a fase do compensador estático para uma determinada frequência de oscilação ( $S = j\omega$ ) do sistema é dada pela equação 2.8, que foi obtida resolvendo-se a função de transferência apresentada no diagrama de blocos da figura 2-h e apresentada a seguir:

$$CE(S) = \frac{K(1 + ST_1)}{(1 + ST)(1 + ST_2) + K(1 + ST_1)} ; \text{ resolvendo, vem:}$$

$$CE(S) = \frac{K(1 + ST_1)}{S^2(T \cdot T_2) + S(T + T_2 + KT_1) + (1 + K)} \quad (2.8)$$

Para o estudo mostrado no Capítulo 5, os valores adotados para os parâmetros do modelo do compensador estático, serão:

$$- NCC = 4000 \text{ MVA e } B_{\text{máx}} = 3 \text{ pu}$$

onde NCC é a potência de curto-circuito mínimo na barra do compensador estático; dessa forma, teremos:

$$X_{\text{eq}} = 0,025 \text{ pu; portanto, } K \leq 34,2 \text{ (obtido pela eq. 2.7)}$$

Enquanto os valores de  $T_1$  e  $T_2$ , foram escolhidos de forma a centralizar a frequência de 6 rad/s, assim, tem-se para o ajuste regulador de tensão do compensador estático, os seguintes valores:

$$K = 30$$

$$T = 0,05 \text{ s}$$

$$T_1 = 0,125 \text{ s}$$

$$T_2 = 0,250 \text{ s}$$

## CAPÍTULO 3 - OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS

3.1 - Conceituação do Fenômeno

Define-se por oscilações eletromecânicas os modos naturais de oscilação do sistema elétrico, associados com a inércia das massas em rotação, formada pelo conjunto rotor do gerador mais a turbina, considerado nesse trabalho como um conjunto inelástico, e ao coeficiente de potência sincronizante. Cabe observar que os modos de oscilação oriundos do controle da turbina não são definidos como modos eletromecânicos e, sim como modos mecânicos, somente. A faixa de valores coberta pelas oscilações eletromecânicas, situa-se entre 0,2 e 2,0 Hertz.

Para compreender-se a definição acima, considerar-se-á o sistema elétrico típico, composto por uma máquina ligada a uma barra infinita, conforme ilustrado na figura 3.1.

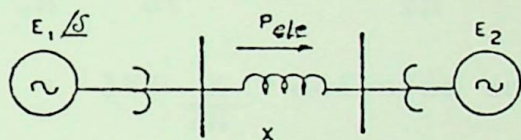


Figura 3.1 - Sistema elétrico composto por uma máquina ligada a uma barra infinita.

A equação de oscilação do rotor da máquina é dada pela equação 3.1.

$$2 H \frac{d\omega}{dt} = P_{mec} - P_{ele} - P_D \quad (3.1)$$

onde:

$H$  é a constante de inércia do conjunto rotor do gerador mais turbina;

$\omega$  é a velocidade angular elétrica;

$P_{mec}$  é a potência mecânica entregue pela turbina;

$P_{ele}$  é a potência elétrica fornecida pelo gerador;

$P_D$  é a parcela da potência elétrica correspondente à variação da carga com a frequência.

Considerando-se pequenos desvios, podemos linearizar a equação 3.1 em torno de um ponto de operação, que resulta na equação 3.2.

$$2 H \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = \Delta P_{mec} - \Delta P_{ele} - \Delta P_d \quad (3.2)$$

onde as parcelas do 2º membro são:

$$\Delta P_{mec} = 0$$

$$\Delta P_{ele} = E^2/X \cos \Delta \delta = K \Delta \delta = \Delta P_k$$

K é definido como coeficiente de potência sincronizante

$$\Delta P_d = D \Delta \omega$$

D é definido como coeficiente de amortecimento

Substituindo e rearrumando vem:

$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{D}{2H} \frac{d \Delta \delta}{dt} + 377 \frac{K}{2H} \Delta \delta = 0 \quad (3.3)$$

Fazendo  $\omega_n^2 = 377 \frac{K}{2H}$  definida como a frequência natural de oscilação do sistema não amortecido. Cabe ressaltar que o valor 377 é necessário para que a frequência possa ser expressa em radianos/segundo.

$2 \xi \omega_n = \frac{D}{2H}$  definido como a razão de amortecimento, sendo  $\xi < 1$ .

Resolvendo a equação 3.3, identificaremos um modo de oscilação dado por:

$$S_{1,2} = -\xi \omega_n \pm j (\sqrt{1 - \xi^2}) \omega_n$$

O comportamento do sistema no tempo em termos de desvios do ângulo  $\Delta \delta$  é dado pela equação 3.4.

$$\Delta \delta = A e^{-\xi \omega_n t} \text{ sen } (\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t + \varphi) \quad (3.4)$$

Verificamos, portanto, a existência de uma frequência própria de oscilação do gerador em relação a barra infinita, dada por  $\omega_n$ , que está associada à inércia do conjunto rotor do gerador mais turbina e ao coeficiente de potência sincronizante  $K$ , conforme definido anteriormente.

Quando o efeito de amortecimento está presente nas oscilações eletromecânicas, a frequência de oscilação é ligeiramente menor que  $\omega_n$  e é dada por:

$\omega_d = \sqrt{1 - \xi^2} \omega_n$ , definida como frequência natural do sistema amortecida.

A equação de oscilação para pequenos desvios, equação 3.3 pode ser traduzida para um diagrama de blocos, conforme ilustração da figura 3.2.

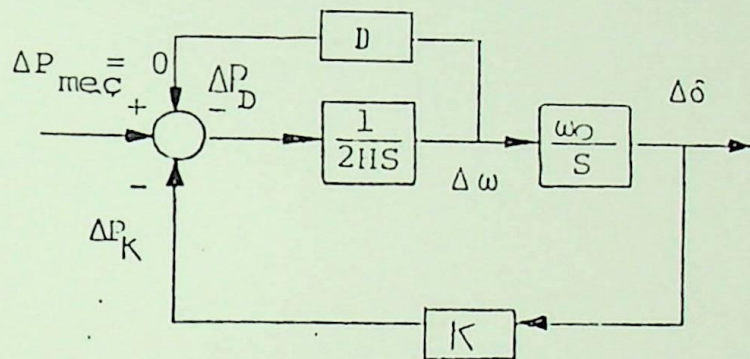


Figura 3.2 - Diagrama de blocos para um Sistema Elétrico composto de máquina - barra infinita.

Imaginando o sistema máquina-barra infinita apresentando um regime oscilatório sustentado de frequência  $\omega_n$ ; isto é,

$$\Delta \omega = A \cos \omega_n t$$

teríamos para os desvios angulares

$$\Delta \delta = -B \sin \omega_n t$$

Estas duas grandezas alternativas podem ser representadas por fasores, conforme figura 3.3.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\omega} &= A \angle 90^\circ \\ \Delta \dot{\delta} &= B \angle 0^\circ \end{aligned}$$

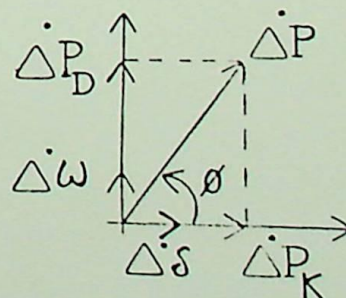


Figura 3.3 - Diagrama fasorial.

Pode-se concluir, então, que uma parcela de potência elétrica oscilatória ( $\Delta \dot{P}_k$ ), em fase com as variações angulares tem efeito sincronizante; enquanto que oscilações de potência elétrica em fase com a velocidade ( $\Delta \dot{P}_D$ ) tem efeito de amortecimento das oscilações angulares.

Como veremos adiante, no caso de um sistema máquina-barra infinita com controle de tensão num ponto intermediário da linha, poderá ocorrer uma parcela  $\Delta \dot{P}$  com um ângulo de fase  $\phi$ ; neste caso, é possível associar a esta parcela efeitos de sincronização e amortecimento, positivos e negativos, dependendo do ângulo de fase  $\phi$ .

## CAPÍTULO 4 - EFEITOS DO SUPORTE DE TENSÃO SOBRE A ESTABILIDADE

4.1 - Sistemas de Transmissão com Suporte de Tensão

A idéia de sistemas de transmissão com suporte de tensão é antiga. Nestes sistemas, usualmente para o transporte de potência a grandes distâncias, aparecem subestações intermediárias, entre os extremos gerador e receptor, como pontos de injeção de potência reativa. O controle da tensão ao longo de uma linha de transmissão via compensadores síncronos, como era então considerado na literatura técnica, concorria para aumentar o carregamento e os limites de estabilidade.

A compensação estática modernamente, com suas características de velocidade de resposta e versatilidade, vem tornar viável a idéia antiga de suporte dinâmico de potência reativa, além de ampliar a sua utilização em sistemas de transmissão em geral.

Será examinado neste capítulo os benefícios que um suporte de tensão tipo estático, pode trazer para a estabilidade do sistema elétrico.

4.2 - Efeito do Suporte de Tensão na Estabilidade Estática e Transitória.

Considere-se o caso de um sistema elétrico composto por uma máquina, ligada a uma barra infinita por um sistema de transmissão e a aplicação de suporte de tensão em um ponto intermediário do sistema, como indicado na figura 4.1.

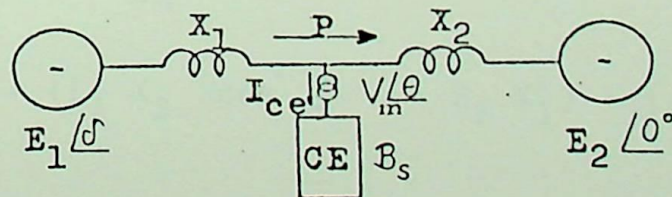


Figura 4.1 - Sistema elétrico composto por uma máquina ligada a uma barra infinita com compensador estático num ponto intermediário.

A potência elétrica  $P$  na interligação pode ser calculada pelas seguintes equações:

$$P = \frac{E_1 V_m}{X_1} \operatorname{sen} (\delta - \theta) \quad (4.1)$$

$$P = \frac{V_m E_2}{X_2} \operatorname{sen} \theta \quad (4.2)$$

$$P = \frac{E_1 E_2}{X_{eq}} \operatorname{sen} \delta \quad (4.3)$$

A reatância equivalente ( $X_{eq}$ ) da interligação entre a máquina e a barra infinita, pode ser obtida através de uma formaçaõ triângulo-estrela, resultando em:

$$X_{eq} = (X_1 + X_2) - X_1 X_2 B_s \quad (4.4)$$

vê-se, assim, que para uma dada localização da injeção de potência reativa, a reatância de interligação varia com o valor do suporte de reativos  $B_s$ . Deste modo, qualquer variação de  $B_s$  no sentido de regular a tensão  $V_m$ , vai se refletir numa variação de  $X_{eq}$ , e esta por sua vez, numa modificação da potência ativa transmitida  $P$ , ou seja, uma cadeia de causa e efeito:

$$V_m \text{ -----} \rightarrow B_s \text{ -----} \rightarrow X_{eq} \text{ -----} \rightarrow P$$

A corrente  $\dot{I}_s$  absorvida pela admitância  $B_s$ , vem dada pela equação 4.5.

$$\dot{I}_s = j \frac{B_s}{X_{eq}} (\dot{E}_1 X_2 + \dot{E}_2 X_1) \quad (4.5)$$

e o fasor tensão na barra  $M$  pode ser calculado como segue:

$$\dot{V}_m = \frac{\dot{I}_s}{j B_s} = \frac{1}{X_{eq}} (\dot{E}_1 X_2 + \dot{E}_2 X_1) \quad (4.6)$$

$$\dot{V}_m = \frac{1}{X_{eq}} (E_1 X_2 \cos \delta + E_2 X_1) + j (E_1 X_2 \operatorname{sen} \delta) \quad (4.7)$$

A equação 4.7 permite concluir que a tensão na barra intermediária é uma função da defasagem angular  $\delta$  entre as tensões das fontes, e da reatância de interligação  $X_{eq}$ , para dadas tensões das fontes:

$$\dot{V}_m = f(\delta, X_{eq}) \quad E_1 \quad E_2$$

assim sendo, os distúrbios eletromecânicos, traduzidos por variações na defasagem angular ( $\Delta \delta$ ), vão influir no valor da tensão. Pode-se dizer que estes distúrbios são OBSERVÁVEIS na tensão  $V_m$ .

$$\Delta \delta \text{ -----} \rightarrow \Delta V_m$$

A dependência natural da tensão  $V_m$  em relação a  $\delta$  e a  $X_{eq}$  no sistema, quando em presença de um processo de regulação desta mesma tensão, pela variação de  $B_s$ , dá origem a uma cadeia de ações, conforme segue:

$$\Delta \delta \text{ -----} \rightarrow \Delta V_m \text{ -----} \rightarrow \Delta B_s \text{ -----} \rightarrow \Delta X_{eq} \text{ -----} \rightarrow \Delta P$$

Concluindo, esta análise qualitativa, pode-se dizer, então, que o controle da tensão  $V_m$  vem originar uma parcela extra de potência sincronizante entre as fontes do sistema em questão.

O coeficiente de potência sincronizante pode ser obtido conforme desenvolvimento apresentado no apêndice A do anexo A e que resulta em:

$$K = \frac{E_1 E_2}{X_{eqo}} \cos \delta_o + \left( \frac{P_o}{V_{mo}} \right)^2 \frac{X_1 X_2}{X_{eqo}} \quad (4.8)$$

onde:

$X_{eqo}$  - é a reatância equivalente inicial;

$\delta_o$  - é o ângulo inicial;

$P_o$  - é a potência elétrica inicial;

$V_{mo}$  - é a tensão inicial do ponto intermediário.

Pela análise da equação 4.8, identifica-se a primeira parcela como coeficiente de potência sincronizante, existente na ausência do controle de tensão ( $X_{eq} = \text{constante}$ ), enquanto a segunda parcela, como devida ao controle de tensão na interligação. Verifica-se assim, de modo quantitativo, que o controle de tensão na interligação, através de um suporte dinâmico de tensão vem influir na estabilidade do sistema elétrico.

As análises qualitativas e quantitativas feitas anteriormente, podem ser visualizadas, também, através das curvas potência ângulo mostradas nas figuras 4.2 e 4.3, correspondentes às situações pré-falta e pós-falta, considerando-se ou não o controle ideal de tensão no ponto intermediário do sistema de transmissão.

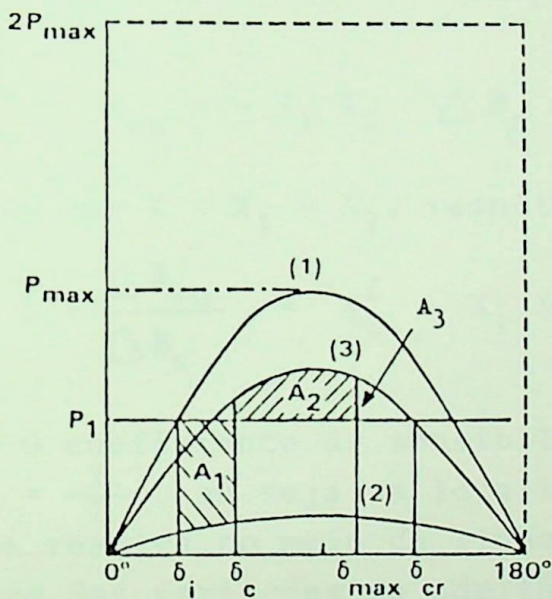


Figura 4.2 - Curvas potência ângulo sem controle intermediário de tensão.

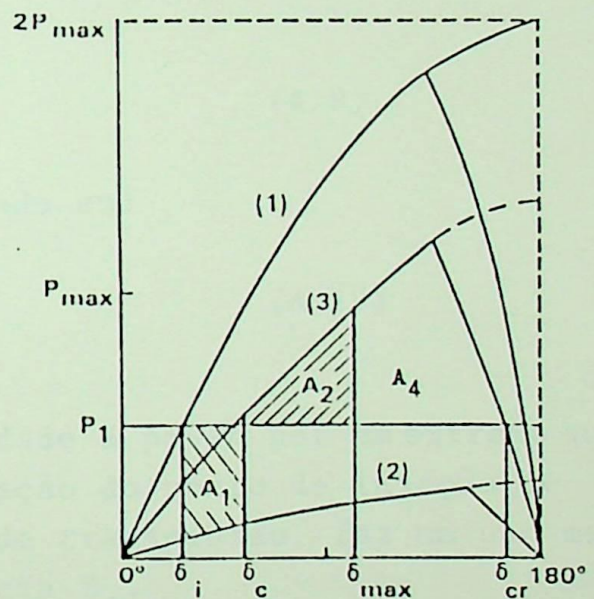


Figura 4.3 - Curvas potência ângulo com controle intermediário de tensão.

Curva 1 - pré-falta

Curva 2 - durante a falta

Curva 3 - pós-falta

Verifica-se pela análise daquelas figuras que o sistema terá um aumento da sua capacidade de transmissão, para uma mesma potência transmitida, representada pelo aumento da área abaixo da curva 3, ou seja, a área  $A_2$  mais a área  $A_4$  da figura 4.3, será maior que a área  $A_2$  mais a área  $A_3$  da figura 4.2. Em outras palavras, o efeito do controle da tensão em um ponto intermediário sobre a estabilidade do sistema é benéfico e será maior, quanto maior for a velocidade de resposta do controle do compensador estático; o que essencialmente dependerá do ajuste do seu regulador de tensão.

Até o presente momento falou-se sobre a importância da aplicação de suporte de tensão em ponto intermediário do sistema elétrico, sem a sua demonstração, o que será feito a seguir. Da equação 4.4, pode-se calcular a sensibilidade da reatância equivalente  $X_{eq}$ , decorrente de variações na admitância  $B_s$ . Vem assim, que:

$$X_{eq} = - X_1 X_2 \Delta B_s \quad (4.9)$$

Sabe-se que  $X = X_1 + X_2$ , resultando em:

$$S = \frac{\Delta X_{eq}}{\Delta B_s} = X_1^2 - X_1 X \quad (4.10)$$

O coeficiente de sensibilidade  $S$  passa por um extremo quando  $X_1 = \frac{X}{2}$ , ou seja, a localização do ponto de injeção de potência reativa no meio da linha de transmissão, faz um uso mais efetivo das variações da admitância  $B_s$ .

Considere-se agora a situação particular definida pelas relações de igualdade, a seguir:

$$E_1 = E_2 = V_m = E \quad , \quad X_1 = X_2 = \frac{X}{2} \quad e \quad \Theta = \frac{\delta}{2}$$

Da equação 4.1 resulta para a potência ativa transmitida a equação 4.11.

$$P = 2 \frac{E^2}{X} \operatorname{sen} \frac{\delta}{2} = 2 P_{\max} \operatorname{sen} \frac{\delta}{2} \quad (4.11)$$

Vê-se assim que o valor máximo da potência ativa  $P$  nestas condições é duas vezes maior do que o correspondente à situação sem controle de tensão no meio da linha de transmissão, e se verifica para um ângulo de fase  $\delta$  de valor igual a  $180^\circ$ , conforme mostrado na figura 4.3.

Convém notar que o comportamento apresentado pela curva 1 na figura 4.3 admite implicitamente que haja um suporte de potência reativa extremamente elevado. O valor a ser instalado pode ser obtido a partir da utilização das equações 4.3 e 4.4, conforme mostrado a seguir:

onde,

$$X_{eq} = X - \frac{X^2}{4X_{ce}}; \quad X_{ce} = \frac{V_m^2}{Q_{ce}} \quad \text{e} \quad V_m = E_1 = E_2 = E$$

resultando em:

$$\frac{P}{P_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{1 - \frac{Q_{ce}}{4P_{m\acute{a}x}}} \quad \text{sen} \quad (4.12)$$

Pela análise da equação 4.12, verifica-se que para se ter um controle ilimitado (tensão constante) da tensão, os valores de potência do compensador estático serão extremamente antieconômicos, ou seja,  $Q_{ce} = 4P_{m\acute{a}x}$  (onde  $P_{m\acute{a}x}$  é o valor máximo de potência transmitida). Entretanto, se este suporte for limitado às necessidades reais impostas pelo sistema de transmissão, onde se admite que haja variação de tensão dentro de valores especificados, tem-se uma modificação na curva potência-ângulo, conforme mostrado pela curva 1 da figura 4.3, onde a operação do sistema elétrico com ângulos superiores a  $120^\circ$ , implicará em menores transmissões de potência.

#### 4.3 - Efeito do Suporte de Tensão na Estabilidade Dinâmica

De acordo com o mostrado nos itens anteriores, verifica-se a conveniência de dotar o compensador estático com um sistema de controle mais sofisticado, onde o valor da tensão de referência ( $V_{ref}$ ) é alterado para mais, quando a máquina está acelerando e para menos, quando a máquina está desacelerando; e dessa forma, aumentar o amortecimento das oscilações eletromecânicas.

Para se fazer a modulação da tensão de referência, pode-se adotar um sinal proporcional aos desvios de velocidade da máquina, ou seja, basta fazer com que as variações de velocidade angular ( $\Delta \omega$ ), venham originar variações da admitância ( $\Delta B_s$ ) do compensador estático. Tal procedimento tem por efeito uma modulação da parcela adicional do coeficiente de potência sincronizante, mostrado na equação 4.8.

Designando por CE (S) a função de transferência do compensador estático mostrado no capítulo 2, tem-se:

$$B_s = CE (S) \mathcal{E} \quad (4.13)$$

onde  $\mathcal{E}$  é o erro introduzido no regulador de tensão do compensador estático dado por:

$$\mathcal{E} = (V_{ref} + V_{ad}) - V_m \quad (4.14)$$

sendo:

$V_{ref}$  - a tensão de referência;

$V_m$  - a tensão do ponto intermediário;

$V_{ad}$  - o sinal adicional para modular a tensão de referência.

Substituindo a equação 4.14 na equação 4.13 e linearizando, obtem-se a equação 4.15.

$$\Delta B_s = CE (S) (\Delta V_{ad} - \Delta V_m) \quad (4.15)$$

Para o sistema máquina-barra infinita, pode-se entretanto, desenvolver-se um modelo matemático linear que leve em consideração a dinâmica do controle. Linearizando-se as equações 4.3, 4.7 e 4.4, respectivamente, obtêm-se as seguintes equações:

$$\Delta P = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta X_{eq} \quad (4.16)$$

$$\Delta V_m = K_3 \Delta \delta + K_4 \Delta X_{eq} \quad (4.17)$$

$$\Delta X_{eq} = K_5 \Delta B_s \quad (4.18)$$

Os coeficientes  $K$ 's são definidos, conforme demonstrado no apêndice B do anexo A e apresentados a seguir:

$$K_1 = \frac{dP}{d\delta} > 0; \quad K_2 = \frac{dP}{dX_{eq}} < 0$$

$$K_3 = \frac{dV_m}{d\delta} < 0; \quad K_4 = \frac{dV_m}{dX_{eq}} < 0$$

$$K_5 = \frac{dX_{eq}}{dB_s} < 0$$

De acordo com as equações 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18, pode-se montar o diagrama de blocos mostrado na figura 4.4, a seguir:

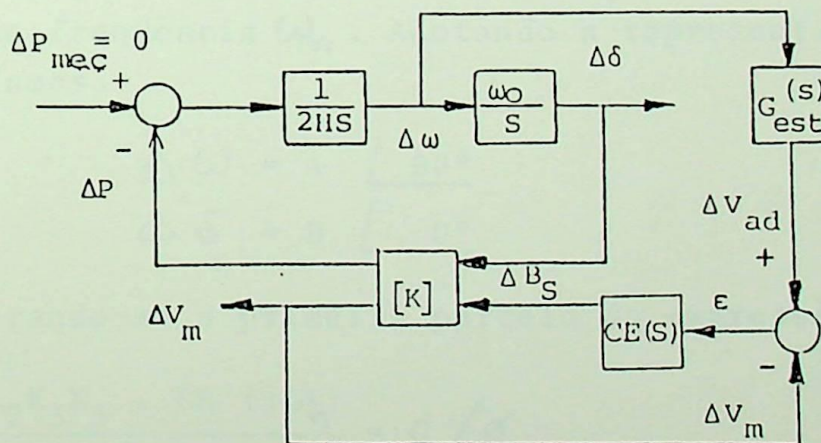


Figura 4.4 - Diagrama de blocos para um Sistema Elétrico composto de máquina-barra infinita, com um compensador estático com sinal adicional.

onde :

$H$  - é a constante de inércia da máquina;

$\omega_0$  - é a velocidade angular para 60 Hz, 377 rad/s;

$CE(S)$  - é a função de transferência representativa do compensador estático, conforme capítulo 2;

$[K]$  - é a matriz de coeficientes;

$G_{est}$  - é a função de transferência representativa do sinal adicional, conforme apêndice C do anexo A.

Resolvendo as equações 4.16, 4.17 e 4.18, obtem-se:

$$\Delta P = \left( K_1 - \frac{K_2 K_3 K_5 CE(S)}{1 + K_4 K_5 CE(S)} \right) \Delta \delta + \left( \frac{K_2 K_5 CE(S)}{1 + K_4 K_5 CE(S)} \right) \Delta V_{ad} \quad (4.19)$$

De acordo com o apêndice B do anexo A, pode-se afirmar que os termos do 2º membro da equação 4.19 são positivos e, adotando-se aqui o mesmo procedimento apresentado no item 3.1, pode-se chegar a concluir que o controle de tensão num ponto intermediário da linha de transmissão, introduz efeito de sincronização e de amortecimento nas oscilações eletromecânicas. Para tanto, basta imaginar um regime de oscilações eletromecânicas sustentadas de frequência  $\omega_n$ . Adotando a representação fasorial, escreveríamos:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\omega} &= A \angle 90^\circ \\ \Delta \dot{\delta} &= B \angle 0^\circ \end{aligned}$$

Considerando-se a primeira parcela de expressão (4.19), teríamos:

$$\left( K_1 - \frac{K_2 K_3 K_5 \cdot CE(j\omega_n)}{1 + K_4 K_5 \cdot CE(j\omega_n)} \right) = C \angle \phi$$

conforme apresentado na figura 3.3 do capítulo 3.

Vê-se assim, que o efeito de sincronização introduzido pelo controle de tensão na linha vem dado por:

$$\operatorname{Re} \left( K_1 - \frac{K_2 K_3 K_5 \cdot CE(j\omega_n)}{1 + K_4 K_5 \cdot CE(j\omega_n)} \right) = C \cos \varnothing$$

O efeito sobre o amortecimento das oscilações eletromecânicas a frequência  $\omega_n$  pode ser então calculado por:

$$\operatorname{Im} \left( K_1 - \frac{K_2 K_3 K_5 \cdot CE(j\omega_n)}{1 + K_4 K_5 \cdot CE(j\omega_n)} \right) = C \operatorname{sen} \varnothing$$

Entretanto como será visto no Capítulo 5, o controle intermediário de tensão tem efeito bem maior sobre a sincronização do que sobre o amortecimento, sendo que neste último, poderá apresentar efeito negativo, ou seja, oscilações eletromecânicas crescentes com o tempo. Dessa forma, é de suma importância para a estabilidade do sistema o efeito de amortecimento introduzido pela segunda parcela da expressão (4.19); obtida pela injeção de um sinal no regulador de tensão do compensador estático, derivado da variação de velocidade ( $\Delta\omega$ ), conforme figura 4.4.

## CAPÍTULO 5 - SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DA USINA DE ITAIPU

Com a total integração da usina de Itaipu ao sistema interligado Sudeste/Sul do Brasil, este terá um acréscimo de 12.600 MW na sua potência instalada. A transmissão desta potência, será feita via dois grandes sistemas de transmissão, com aproximadamente 900 km de extensão, mostrados na figura 5.1 do anexo A e descritos a seguir:

- Um em corrente contínua, responsável pela transmissão de 50% da potência, gerada em 50 Hz e composto de 2 bipolos de  $\pm$  600 kV, ligando a subestação de Foz do Iguaçu, no estado do Paraná, à subestação de Ibiúna no estado de São Paulo.
- O outro em corrente alternada, responsável pela transmissão dos 50% restantes, gerada em 60 Hz e composto por 3 circuitos de 750kV, ligando a subestação de Foz do Iguaçu à subestação de Tijuco Preto no estado de São Paulo, passando pelas subestações de Ivaiporã, responsável pela interligação com o sistema da região Sul, e Itaberá; a 1a. no estado do Paraná e a 2a. no estado de São Paulo, respectivamente.

Para o estabelecimento dos critérios de dimensionamento do sistema de transmissão da usina de Itaipu, foram conduzidos estudos energéticos, e com base nesses estudos, ficou estabelecido que ambos os sistemas deverão ser capazes de transmitir integralmente toda a potência gerada naquela usina para a região Sudeste.

Com relação ao sistema de transmissão em corrente alternada, cabe destacar a sua duplicidade funcional; uma vez que, ele simultaneamente, estabelece um caminho de escoamento para a potência gerada na usina de Itaipu, setor de 60Hz; bem como, uma forte interligação elétrica entre os sistemas das regiões Sudeste e Sul. O papel desta interligação, entre aquelas duas regiões, reveste-se de primordial importância; visto que, existe uma significativa diversidade hidrológica entre as bacias hidrográficas daquelas regiões. Dessa forma a disponibilidade de uma forte interligação elétrica, permite uma otimização energética global entre aqueles sistemas.

A usina de Itaipu caracteriza-se por apresentar um alto

fator de carga, em torno de 62%; o que significa uma potência firme de aproximadamente 7700MW, equivalente a 11 máquinas de 700 MW permanentemente despachadas, o que confere a esta usina uma alta participação no despacho de geração daquelas regiões, podendo no período de 1991 (ano da entrada em operação da última máquina) até o ano 2000 (ano horizonte do estudo), variar de 30% durante condição de carga pesada a 50% durante condição de carga leve. Este fato conjugado à expansão dos sistemas de geração e transmissão no Brasil naquele período, caracteriza um modelo fortemente hidroelétrico, onde grandes blocos de carga localizadas em áreas industrializadas, são ligadas às fontes geradoras por longas linhas de transmissão, o que possibilitará o aparecimento de sérios problemas de estabilidade transitória e principalmente dinâmica.

### 5.1 - Estudos de Fluxo de Potência

Estudos de fluxo de potência foram realizados para definir a máxima capacidade de transmissão do sistema de 750 kV, quando este tiver atingido o seu estágio final; e mostraram que:

- Valores de potência acima de 6.200 MW, chegando ao terminal de Tijuco Preto, via sistema de 750 kV, exigirá ampliações na transformação desta subestação, no sistema de transmissão receptor que o interliga com o sistema de transmissão da região Sudeste e elevadíssima instalação de suporte de tensão, para suportar situações de emergência, principalmente a perda de uma das linhas de transmissão Itaberã-Tijuco Preto de 750 kV. Sob o ponto de vista técnico e econômico, estas ampliações terão que ser a médio e longo prazo, comparadas a outras alternativas de transmissão. Cabe ressaltar que o valor de 6.200 MW, chegando ao terminal de Tijuco Preto, possibilitará atender no período de 1991 a 2000 a todas as possibilidades de transmissão de potência previstas para a região Sudeste, da potência gerada na usina de Itaipu 60 Hz; bem como, pesados intercâmbios de potência da região Sul para a região Sudeste, estando nesse caso reduzida a potência gerada no setor de 60 Hz, conforme demonstrado nas duas situações abaixo:

1a. situação: - Pleno despacho na usina de Itaipu, setor de 60 Hz e transmitidos integralmente para a região Sudeste. Para se atingir o valor de 6.200 MW, chegando ao terminal de Tijuco Preto, além da potência gerada na usina, poderá ser transmitido da região Sul para a região Sudeste, via sistema de 750 kV, pequenos excedentes de potência, da ordem de 250MW, conforme ilustrado na figura 5.2 do anexo A.

2a. situação: - Baixo despacho na usina de Itaipu, setor de 60 Hz. Para essa condição de despacho poder-se-á aproveitar o sistema de 750 kV, para transmitir grandes blocos de potência entre as regiões Sul e Sudeste, principalmente do Sul para o Sudeste, via subestação de Ivaiporã, da ordem de 3.000 MW, conforme ilustrado na figura 5.3 do anexo A.

Para viabilizar a transmissão dos 6.200 MW que chegam ao terminal de Tijuco Preto, bem como a sua injeção no sistema elétrico da região Sudeste, serão necessários os seguintes equipamentos:

- Compensação série, totalizando 9.945 MVAR, assim distribuídos:
  - . Linha de transmissão Foz do Iguaçu-Ivaiporã, grau de compensação igual a 40%, totalizando 3.051 MVAR;
  - . Linha de transmissão Ivaiporã-Itaberã, grau de compensação igual a 50%, totalizando 3.168 MVAR e;
  - . Linha de transmissão Itaberã-Tijuco Preto, grau de compensação igual a 50%, totalizando 3.726 MVAR.
- Transformação na subestação Tijuco Preto, totalizando 7.800 MVA, composta por 3 autotransformadores de 1.500 MVA, 750/345 kV e 2 autotransformadores de 1.650 MVA, 750/500 kV.

A definição da compensação capacitiva paralela para dar o suporte de tensão, foi obtida através de detalhados estudos de fluxo de potência, que demonstraram a necessidade de prover-se 1.800 MVAR (9 x 200 MVAR) de bancos de capacitores para garantir o desempenho do sistema, durante situação normal de operação e, aproximadamente, 700 MVAR de suporte de tensão variável, para atender as situações de emergência, principalmente a perda de uma das linhas de transmissão Itaberã-Tijuco Preto 750 kV. O suprimento desta parte variável deverá ser realizada por um compensador síncrono de 300 MVA, que encontra-se em operação desde

1982, enquanto o fornecimento dos 400 MVAR restantes deverá ser feito por um compensador estático.

A decisão pela adoção de um compensador estático, ao invés de um segundo compensador síncrono, deveu-se ao melhor desempenho deste, sob o ponto de vista técnico; bem como, por apresentar um custo inferior comparativamente ao compensador síncrono de igual potência.

A conclusão sobre a localização do compensador estático foi obtida, tendo-se em vista que a emergência mais severa para o sistema é a perda de uma das linhas de transmissão Itaberá-Tijuco Preto 750 kV. Foram estudadas algumas alternativas, envolvendendo somente as subestações de Itaberá e Tijuco Preto, tanto em regime permanente (caso base e emergências), quanto em regime dinâmico a frequência fundamental. Em regime permanente não foram detetadas diferenças em uma ou outra subestação; entretanto, em regime dinâmico a localização do compensador estático na subestação Tijuco Preto, demonstrou ser mais efetivo para a estabilidade do sistema interligado do que a sua localização na subestação Itaberá.

O melhor desempenho do sistema, foi verificado quando se tem o compensador estático localizado na subestação de Tijuco Preto, devido principalmente ao fato de ser esta subestação um ponto intermediário, para o sistema interligado Sudeste/Sul, onde se tem acentuadas excursões de tensão. Além de ser a subestação terminal do sistema de 750 kV, ela mantém ligações com a subestação de Ibiúna (estação inversora do sistema de corrente contínua), via uma rede de 345 kV e com o sistema de 500 kV, através da subestação de Cachoeira Paulista, que supre as áreas Rio de Janeiro e Espírito Santo, conforme ilustrado na figura 5.1a do anexo A.

Numa análise mais detalhada dos casos simulados, verificase também que: a subestação de Tijuco Preto, apresenta para as emergências mais críticas, falta de suporte de tensão, traduzido por acentuadas variações da mesma; verificando-se em determinados casos, colápsos de tensão com acentuada rapidez, quando comparadas com outras subestações do sistema de 750 kV, conforme pode ser vista na figura 5.4-B do anexo B. Esta falta de suporte de tensão, deve-se ao fato da subestação de Tijuco Preto es

tar afastada dos pontos de mais forte controle de tensão, ou seja, usinas geradoras.

Sob o ponto de vista econômico a instalação do compensador estático na subestação de Tijuco Preto foi a alternativa mais promissora, pelo fato de poder-se aproveitar a tensão de 20 kV, disponível em um dos enrolamentos terciário da transformação 750/345/20 kV, 1500/1500/500 MVA, o que eliminou a necessidade de instalação de um transformador próprio para o compensador estático, conforme seria necessário na subestação Itaberã. Ficou evidente também pelos estudos que estando o compensador estático instalado na tensão de 20 kV o seu melhor desempenho, ocorre quando a tensão controlada por ele é a de 750 kV, comparada com as outras disponíveis na subestação de Tijuco Preto, ou seja, 20 kV, 345 kV e 500 kV.

## 5.2 - Estudos de Estabilidade

Foram feitos estudos de estabilidade, visando estabelecer ajustes mais apurados para os controles envolvidos. Estes contemplaram os anos de 1991 (entrada em operação da última máquina na usina de Itaipu), 1995 (ano intermediário) e 2000 (ano horizonte) para condições de carga pesada e carga leve. A análise dos resultados demonstraram uma certa semelhança nos problemas apresentados, ou seja, o desempenho do sistema em carga pesada ou carga leve para aqueles três anos se equivalem; entretanto, verifica-se uma melhora no desempenho do sistema para os anos mais remotos. Esta melhora no desempenho, deve-se principalmente, aos seguintes fatores:

- Diminuição da participação da geração da usina de Itaipu na geração global do sistema interligado, traduzido pelo fato de que impactos no sistema de transmissão desta usina tem repercussão atenuada sobre o resto do sistema.
- Reforços no sistema de transmissão, traduzido pela entrada de linhas de transmissão, transformadores e suporte de tensão.
- Entrada em operação de novas unidades geradoras na usina nuclear de Angra dos Reis (Angra II e Angra III).

Este último fator é de suma importância, visto que, devido às características do sistema da região Sudeste, onde predominam subsistemas com grandes blocos de carga, localizados em regiões metropolitanas, com baixa geração local, serem supridos por grandes usinas localizadas a grandes distâncias; o que exige a construção de longas linhas de transmissão. Sistemas com estas características, geralmente apresentam problemas de estabilidade dinâmica quando submetidos a grandes impactos (p. ex. curtos-circuitos, rejeição de grandes blocos de carga e perda de geração). Estes problemas são o aparecimento de oscilações eletromecânicas com baixo amortecimento, chegando-se em algumas oportunidades verificar-se amortecimento negativo, ou seja, oscilações eletromecânicas crescentes, conforme pode ser visto nas figuras 5.4-A a 5.4-E e 5.5-A a 5.5-F, anexos B e C, respectivamente.

Entretanto, no período após a entrada em operação da última máquina na usina de Itaipu (1991) e a entrada das novas unidades geradoras na usina nuclear de Angra dos Reis (Angra II em 1994 e Angra III em 1997), deverão ser encontradas soluções para se evitar os problemas relacionados com o baixo amortecimento das oscilações eletromecânicas, devido a grandes impactos no sistema elétrico. A verificação de baixos amortecimentos nas oscilações eletromecânicas e em alguns casos amortecimento negativo dá-se, principalmente, para determinadas condições de carga (carga leve) e determinados despachos de geração (maior participação da geração da usina de Itaipu na geração global do sistema elétrico).

Dentre as alternativas estudadas a utilização de compensação estática demonstrou ser a mais promissora para a solução destes problemas. De acordo portanto, com os conceitos desenvolvidos no Capítulo 4.

Os estudos apresentados a seguir, enfocam somente os resultados obtidos para o ano de 1991, no que diz respeito a estabilidade à frequência fundamental, para condições de carga leve; e os principais critérios adotados, foram:

- Carga ativa foi representada como 100% de corrente constante, enquanto a carga reativa como 100% de admitância constante;
- Foram simulados somente curtos-circuitos monofásicos, com

perda uma linha de transmissão, exceto aquelas conectadas à estação inversora de Ibiúna (circuitos duplos). Foram adotados como tempos de duração do defeito, 6 ciclos (100 ms) para linhas de 345 kV e 500 kV e de 4,5 (80 ms) para as linhas de 750 kV;

- Não foi considerado religamento automático das linhas de transmissão;
- Com relação à dinâmica do elo de corrente contínua foram feitas as seguintes considerações:
  - a) - A não consideração de falhas de comutação sucessivas, logo após a ocorrência de curto-circuito, isto é, não foi considerada potência nula no elo de corrente contínua durante a fase de curto-circuito. Esta consideração só foi feita para faltas em linhas de transmissão afastadas eletricamente da subestação de Ibiúna, ou seja, sem qualquer ligação a ela.
  - b) - Consideração de falhas de comutação sucessivas na estação inversora do elo de corrente contínua, logo após a ocorrência de curto-circuito, o que resulta em potência nula pelo menos durante 30 ms, exceto faltas nas linhas que saem da estação de Ibiúna, onde considera-se potência nula durante todo o tempo de falta. Esta consideração só foi feita para faltas nos barramentos próximos à estação de Ibiúna. Após a fase de potência nula pelo elo de corrente contínua, esta foi recuperada, segundo uma rampa de 2,25 pu/s, sendo o seu modo de operação dado por controle de corrente constante e o valor da ordem de corrente foi limitada ao valor pré-falta.
  - c) - Foi considerada a atuação da modulação de gama, logo após a abertura da linha faltosa.

Sob o ponto de vista de estabilidade, as emergências que acarretam maiores oscilações eletromecânicas, são aquelas que possam causar falhas de comutação sucessivas no terminal inversor do elo de corrente contínua, implicando em transmissão de potência nula pelo referido elo durante 30 ms, conforme mostrado na figura 5.4-E do anexo B. Dentre as emergências com grande possibilidade de apresentar falha de comutação sucessivas, após a ocorrência de falta e que apresentam grandes osci

lações eletromecânicas, então:

- Perda de um circuito simples ou duplo, Ibiúna-Interlagos de 345 kV, devido a curto-circuito monofásico, próximo à subestação de Ibiúna.
- Perda de uma linha de transmissão Itaberá-Tijuco Preto de 750 kV, devido a curto-circuito monofásico, próximo à subestação de Tijuco Preto.

Outras emergências com baixa possibilidade de causar falhas de comutação sucessivas, mas que causam grande impacto no sistema interligado Sudeste/Sul, principalmente durante condição de carga leve, são aquelas associadas aos circuitos de 500 kV que chegam à subestação de Cachoeira Paulista.

#### 5.2.1 - Estudo de estabilidade para a condição de carga leve.

Sob o ponto de vista de estabilidade, não foi possível operar a usina de Itaipu com pleno despacho, visto que para esta condição de carga, o percentual desta usina no despacho de geração global do sistema interligado Sudeste/Sul é de aproximadamente 50%; portanto, torna-se inadequado para situações de emergências que possam levar a ocorrência de falhas de comutação sucessivas no terminal inversor do elo de corrente, ou seja, a ocorrência de potência nula por aquele elo. A principal causa é a perda das máquinas de 60 Hz da usina de Itaipu por instabilidade transitória, devido a colapso de tensão no sistema receptor, da mesma forma que o ocorrido para a condição de carga pesada.

Para evitar-se a instabilidade transitória das máquinas de 60 Hz, o despacho de geração mais adequado para a usina de Itaipu é de aproximadamente 6.000 MW para o setor de 50 Hz e menor que 3.880 MW para o setor de 60 Hz.

Para um despacho de geração de 3.880 MW nas máquinas de 60 Hz de Itaipu, verifica-se que estas serão dinamicamente instáveis, conforme mostrado nas figuras 5.4-A a 5.4-E do Anexo B. Uma análise detalhada dessas figuras demonstra que a instabilidade é devido a um forte colapso de tensão no sistema receptor, notadamente na subestação de Tijuco Preto. Este colapso de tensão é função dos seguintes aspectos:

- Pela análise da figura 5.4-B, verifica-se que após a abertura da linha faltosa, em 0.08 s, o sistema Sudeste apresenta um forte caimento da tensão para aproximadamente 0.54 pu, em 0.48 s, forçando assim a atuação dos reguladores de tensão das máquinas, no sentido da máxima tensão aplicada no campo destas, conforme mostrado na figura 5.4-C. Isto possibilita a recuperação da tensão pelo sistema, nos instantes seguintes; entretanto, verifica-se um aumento excessivo da mesma, da ordem de 1.22 pu, em 1.08 s. Durante esta condição de tensão elevada, ocorrem simultaneamente, duas ações maléficas para a dinâmica do sistema, ou seja, uma delas é intrínseca ao mesmo, que é uma acentuada elevação da carga e a outra é provocada pela atuação do controle de tensão pelos reguladores de tensão, que atuam no sentido da mínima tensão aplicada no campo das máquinas, ver figura 5.4-C, instante 1.08 s e realimentados pela atuação dos sinais estabilizadores, visto que, as máquinas encontram-se desacelerando, devido a carga do sistema ser maior do que a geração, conforme mostrado na figura 5.4-A, instante 1.48 s.

Esta forte atuação dos reguladores de tensão no sentido de fornecer a mínima tensão de campo, não possibilitará ao sistema recuperar a tensão novamente, causando assim um colapso generalizado, com a conseqüente perda de sincronismo das máquinas de 60 Hz da usina de Itaipu, conforme mostrado na figura 5.4-A, instante 1.88 s.

Com a instalação do compensador estático na subestação de Tijuco Preto, controlando a tensão da barra de 765 kV, aquelas ações maléficas para a dinâmica do sistema, serão diminuídas pela atuação rápida do compensador estático, ou seja, após a abertura da linha faltosa, verifica-se um forte caimento da tensão no sistema interligado e, nesse momento, o compensador estático fornece o máximo suporte de tensão, conforme mostrado na figura 5.5-F do Anexo C, diminuindo assim, a atuação dos reguladores de tensão das máquinas, no sentido da máxima tensão aplicada ao campo destas e possibilitando uma recuperação de tensão, sem provocar nos instantes seguintes uma elevação excessiva da tensão, conforme pode ser visto na figura 5.5-B do Anexo C de aproximadamente 1.10 pu, em 1.08 s. Por outro lado, quando a tensão estiver alta o compensador estático atuará

rapidamente no sentido de abaixá-la, evitando assim uma forte atuação dos reguladores de tensão das máquinas, no sentido de aplicar a mínima tensão no campo, evitando dessa forma o colapso de tensão, verificado quando não se tem o compensador estático, comparando as figuras 5.5-B do Anexo C com a figura 5.4 B do Anexo B.

Embora o compensador estático tenha melhorado o desempenho do sistema elétrico na sua fase transitória, o que em última análise resultou num aumento da componente de torque sincronizante sobre as máquinas de 60 Hz da usina de Itaipu. Entretanto, o sistema apresenta-se dinamicamente instável com oscilações eletromecânicas crescentes, denotando a presença de torque de amortecimento negativo, conforme figuras 5.5-A a 5.5-F do Anexo C.

Para que o compensador estático possa contribuir mais efetivamente sobre a componente de torque de amortecimento, irá adotar-se os conceitos desenvolvidos no Capítulo 4.

#### 5.2.2 - Ajuste do sinal adicional

O sinal adicional terá a função básica de direcionar a atuação do compensador estático de forma a evitar-se aquelas ações de controle indevidas para a dinâmica do sistema, durante as oscilações de tensão, principalmente quando esta estiver elevada.

Tendo em vista que as máquinas de 60 Hz da usina de Itaipu são as que apresentam maiores oscilações eletromecânicas, é evidente que o bom desempenho dinâmico do sistema interligado, será conseguido se todo o esforço de amortecimento proporcionado pelo compensador estático, dotado com sinal adicional, for no sentido de amortecer as oscilações daquelas máquinas. Dessa forma a estratégia de ajuste do sinal adicional será feita, procurando-se modular as variações de velocidade angular daquelas máquinas, visto que isto poderá ser obtido na captação da frequência de qualquer barra da subestação de Tijuco Preto.

Pela análise da função de transferência do compensador estático, apresentada na figura 2-h do Capítulo 2, e de acordo

com a figura 5.5-A do Anexo C, onde a frequência de oscilação das máquinas de 60 Hz da usina de Itaipu é de aproximadamente 6 radianos por segundo, o ganho e a fase apresentada pelo compensador estático é de 0,96 e  $-1,6^\circ$  respectivamente, conforme cálculo feito com a equação 2.8 do Capítulo 2. A análise destes valores demonstra que o regulador de tensão do compensador estático contribui fortemente para aumentar a componente de torque sincronizante, de acordo com o demonstrado no Capítulo 4, enquanto a sua contribuição para a componente de torque de amortecimento é quase desprezível; visto que o torque elétrico fornecido pelo regulador de tensão do compensador estático está completamente em fase com o sinal de excitação, que neste caso, nada mais é do que a variação de tensão da barra que está sendo controlada.

O ajuste da função de transferência do sinal adicional deverá ter o compromisso de proporcionar o aumento da componente de torque de amortecimento, sem prejudicar a componente de torque sincronizante, tão útil nas primeiras oscilações eletromecânicas do sistema. A função de transferência para o sinal adicional é a apresentada no Apêndice C do Anexo A, e a obtenção de um primeiro ajuste para esta função, levará em consideração as equações indicadas no Apêndice C do Anexo A. Assim, pode-se afirmar que:

- O ajuste para o ganho e fase do sinal a ser adicionado no regulador de tensão do compensador estático, deverá provocar neste, um desempenho em fase com as oscilações dos rotores das máquinas de 60 Hz de Itaipu. Dessa forma, deve-se produzir um avanço de fase de aproximadamente 50 graus, no sinal a ser injetado no regulador de tensão do compensador estático, resultando nos parâmetros apresentados no Apêndice C do Anexo A. Entretanto, visando verificar o efeito do ganho e do avanço de fase, separadamente, sobre o amortecimento das oscilações eletromecânicas, reduziu-se o ganho calculado, à metade, ficando o ajuste em:

$$K = 8,36 \text{ (metade do ganho calculado no apêndice C, anexo A)}$$

$$T = 1,67$$

$$T_1 = T_3 = 0,26$$

$$T_2 = T_4 = 0,10 \text{ e}$$

$$\text{Lim} = \pm 0,10$$

A análise das figuras 5.6-A a 5.6-F do Anexo D, mostram que a inclusão do sinal adicional no regulador de tensão do compensador estático, possibilitou um aumento na componente de torque de amortecimento sobre as máquinas de 60 Hz da usina de Itaipu e, que o desempenho do sistema, passou de dinamicamente instável com oscilações eletromecânicas crescentes, conforme figuras 5.5-A a 5.5-F do Anexo C, para dinamicamente estável com fraco amortecimento.

Pode-se afirmar que o avanço de fase de  $50^\circ$  na saída do sinal a ser adicionado no regulador de tensão do compensador estático é suficiente. Para aumentar-se o amortecimento basta um aumento do ganho do sinal adicional, ficando o novo ajuste em:

$$K = 16,67 \text{ (valor calculado no apêndice C do anexo A)}$$

$$T = 1,67$$

$$T_1 = T_3 = 0,26$$

$$T_2 = T_4 = 0,10 \text{ e}$$

$$\text{Lim} = \pm 0,10$$

O desempenho do sistema para este ajuste é o mostrado nas figuras 5.7-A a 5.7-F do Anexo E, onde o objetivo pretendido foi conseguido, visto o bom amortecimento apresentado pelo sistema.

## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos via simulação digital e apresentados no capítulo 5, decorrente da aplicação dos conceitos desenvolvidos no capítulo 4, pode-se concluir:

- Com o simples controle de tensão em um ponto intermediário de um Sistema Elétrico, pode-se influir fortemente no coeficiente de potência sincronizante e no amortecimento das oscilações eletromecânicas para uma dada frequência dominante no sistema, após a ocorrência de um grande distúrbio neste, sendo esta influência dependente do desempenho do regulador de tensão do compensador estático naquela frequência.

- De modo análogo ao que se passa com o controle de tensão nas máquinas síncronas, a aplicação de um sinal de estabilização suplementar dá oportunidade para atuar-se significativamente no amortecimento positivo das oscilações eletromecânicas, conforme verificado quando se utiliza um sinal acional derivado dos desvios de velocidade angular ( $\Delta \omega$ ), e processado por um compensador  $G_{est}$  (S), projetado de modo a alinhar as variações de admitância do compensador estático ( $\Delta B_s$ ) com as variações de velocidade angular.

- Para situações especiais, conforme apresentada neste trabalho, onde se observam grandes oscilações angulares iniciais e amortecidas negativamente, que levam o sistema à perda de estabilidade, após a primeira oscilação, é importante maximizar o efeito de amortecimento, via sinal adicional. Um procedimento simplificado que se poderá adotar na prática é jogar-se com o ganho do regulador e ajustar o bloco atraso-avanço, no sentido de adiantar ligeiramente a variação de admitância do compensador estático ( $\Delta B_s$ ), em relação à variação da velocidade angular ( $\Delta \omega$ ).

- Com a utilização de um compensador estático com sinal adicional, obteve-se no estudo aqui apresentado, um aumento de aproximadamente 280 MW na capacidade de transmissão do Sistema de 750 kV da Usina de Itaipu.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## LIVROS

- 1 - ANDERSON, P. M. and Fouad, A. A. : "Power System Control and Stability", The Iowa State University Press, Ames, Iowa, U.S.A., Third printing, 1982.
- 2 - D'AZZO, John J., Houpis Constantine H.: "Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares", Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, RJ, 1978.

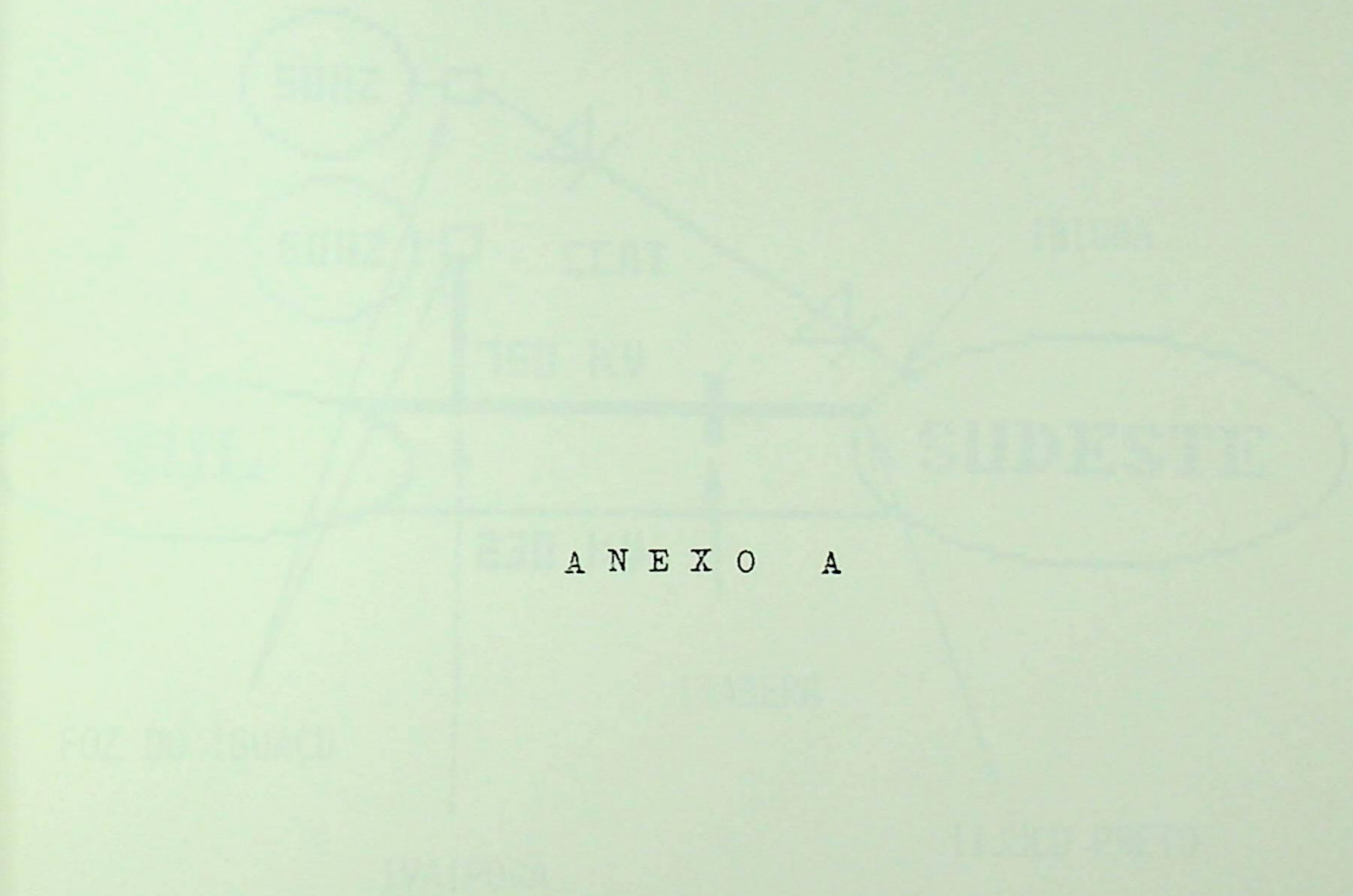
## APOSTILAS

- 1 - COGO, João Roberto e de Sá, Jocélio Souza: "Curso de Inverno (CESE/85) - Sistema de Compensação Estática", EFEI/FUPAI, 1985.
- 2 - PEDROSO, Prof. Alquindar de Souza: Notas de aulas do Curso de Pós-Graduação da COPPE.

## ARTIGOS

- 1 - A.E.HAMMAD, "Analysis of Power System Stability Enhancement by Static VAR Compensators", IEEE Trans., Vol. PWR-1 N° 4, Nov. 1986, pp. 222-227.
- 2 - A.E.HAMMAD, "Applications of Static VAR Compensators in Utility Power Systems", IEEE, Tutorial Course, Reactive Power, Basic, Problems and Solutions. Editor Gerald Sheble 87EH262/6 PWR.
- 3 - CIGRE Working Group 38-01, Task Force N° 2, "Report on Static VAR Compensators", CIGRE, Paris, 1986.
- 4 - D.E.MARTIN, "SVC Considerations For System Damping", IEEE, Tutorial Course, Reactive Power, Basic, Problems and Solutions. Editor Gerald Sheble 87EH262/6 PWR.

- 5 - E.V.LARSEN, "SVC Control Design Concepts For System Dynamic Performance", IEEE, Tutorial Course, Reactive Power, Basic, Problems and Solutions. Editor Gerald Sheble 87EH262/6 PWR.
- 6 - H.E.SHCWEICKARDT, G.ROMEGIALLI and K.REICHERT, "Closed Loopé Control of Static VAr Sources (SVS) on EHV Transmission Lines", IEEE Pes Winter Meeting, New York, NY, January 14, 1978.



A N E X O A

FIGURA 9.2 - SISTEMA DE TRANSMISSÃO DA REGIÃO DE FORTALEZA

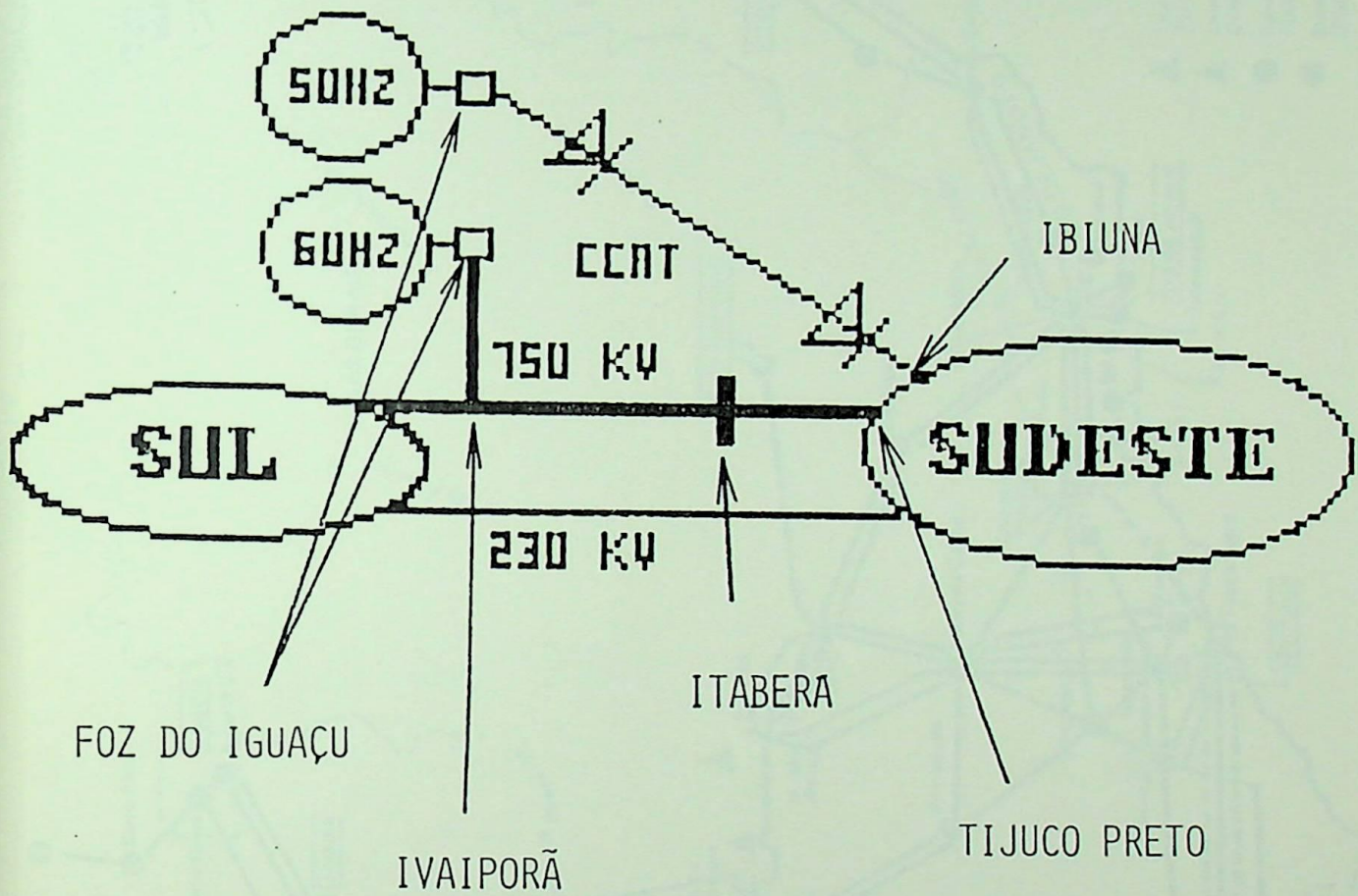


FIGURA 5.1 - SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DA USINA DE ITAIPU

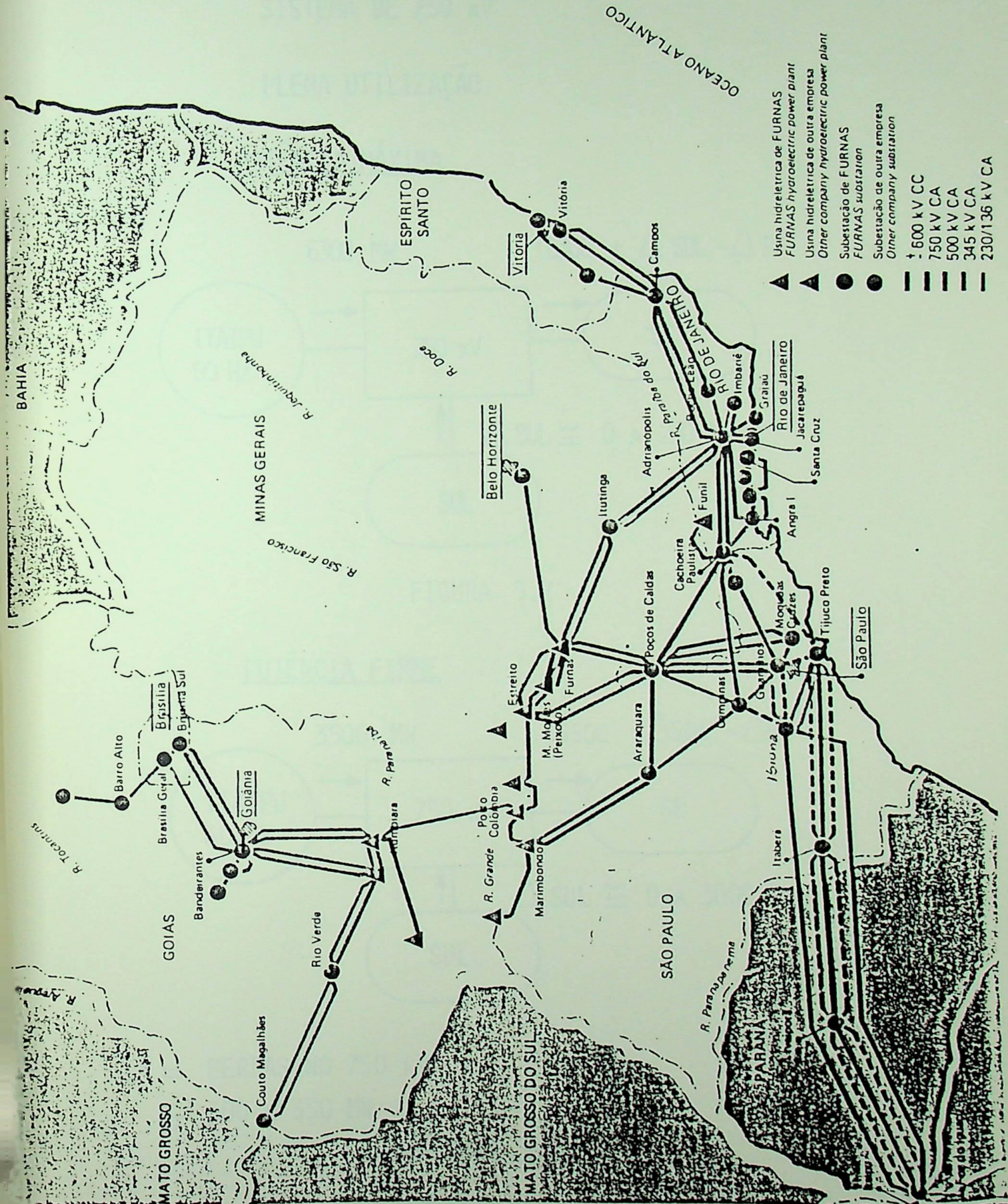


Figura 5.1a

# SISTEMA DE 750 kV

## PLENA UTILIZAÇÃO

### - POTÊNCIA MÁXIMA

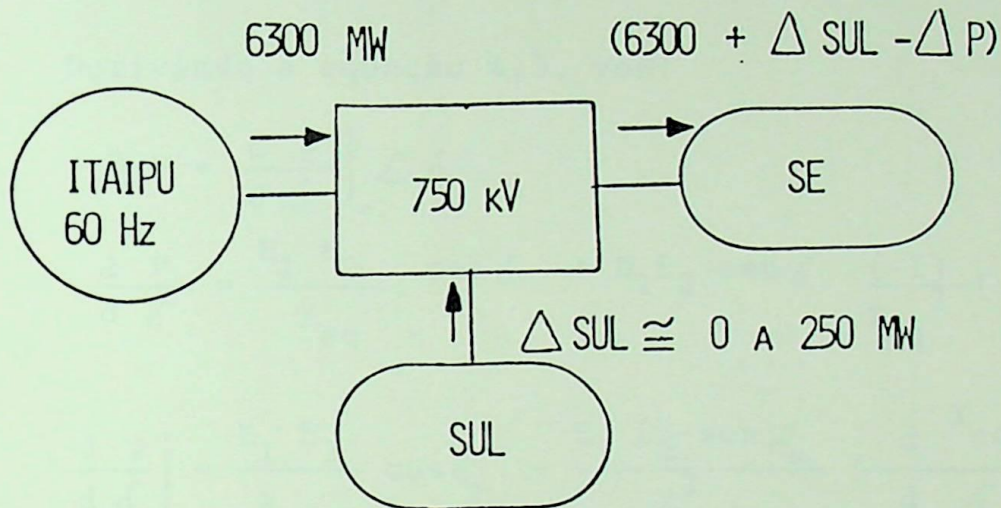
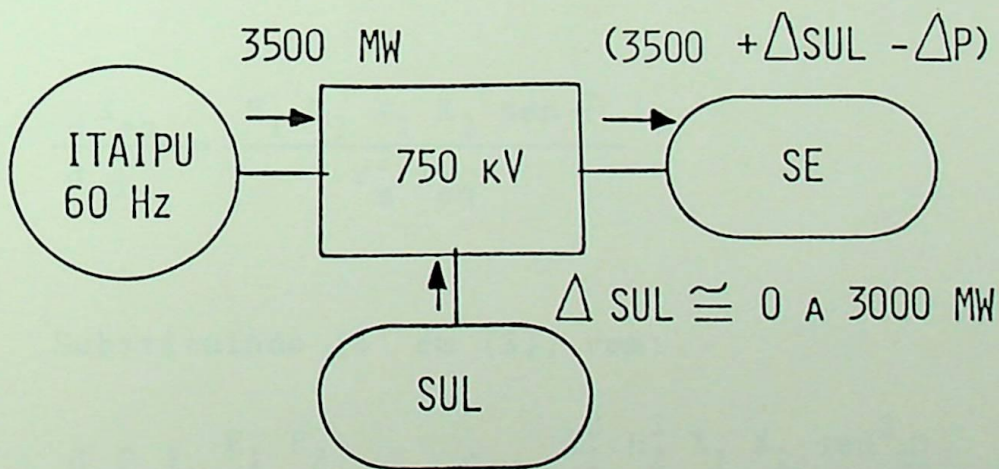


FIGURA 5.2

### - POTÊNCIA FIRME



$\Delta P =$  PERDAS NO 750 kV  
 $\approx$  300 A 350 MW

FIGURA 5.3

APÊNDICE A

Da equação 4.7, vem:

$$X_{eq} = \frac{1}{V_m} \sqrt{E_1^2 X_2^2 + E_2^2 X_1^2 + 2 E_1 E_2 X_1 X_2 \cos \delta} \quad (1)$$

Derivando a equação 4.3, vem:

$$\Delta P = \left. \frac{d P}{d \delta} \right|_o \Delta \delta \quad (2)$$

$$\frac{d P}{d \delta} = \frac{E_1 E_2}{X_{eq}} \cos \delta + E_1 E_2 \operatorname{sen} \delta \frac{(-1)}{X_{eq}^2} \left( \frac{d X_{eq}}{d \delta} \right)$$

$$\left. \frac{d P}{d \delta} \right|_o = \frac{E_1 E_2}{X_{eq}} \cos \delta_o - \frac{E_1 E_2 \operatorname{sen} \delta_o}{X_{eq}^2} \left( \frac{d X_{eq}}{d \delta} \right) \quad (3)$$

$$\frac{d X_{eq}}{d \delta} = - \frac{E_1 E_2 X_1 X_2 \operatorname{sen} \delta}{V_m \sqrt{E_1^2 X_2^2 + E_2^2 X_1^2 + 2 E_1 E_2 X_1 X_2 \cos \delta}}$$

$$\frac{d X_{eq}}{d \delta} = - \frac{E_1 E_2 X_1 X_2 \operatorname{sen} \delta}{V_m^2 X_{eq}} \quad (4)$$

Substituindo (4) em (3), vem:

$$\left. \frac{d P}{d \delta} \right|_o = \frac{E_1 E_2}{X_{eqo}} \cos \delta_o + \frac{E_1^2 E_2^2 X_1 X_2 \operatorname{sen}^2 \delta_o}{V_{mo}^2 X_{eqo}^3}$$

$$\frac{d P}{d \delta} = \frac{E_1 E_2}{X_{eqo}} \cos \delta_o + \frac{X_1 X_2}{X_{eqo}} \left( \frac{E_1 E_2 \operatorname{sen} \delta_o}{V_{mo} X_{eqo}} \right)^2$$

$$\frac{d P}{d \delta} = \frac{E_1 E_2}{X_{eqo}} \cos \delta_o + \frac{X_1 X_2}{X_{eqo}} \left( \frac{P_{eo}}{V_{mo}} \right)^2 \quad (5)$$

Substituindo (5) em (2), vem:

$$\Delta P = \left[ \frac{E_1 E_2}{X_{eqo}} \cos \delta_o + \frac{X_1 X_2}{X_{eqo}} \left( \frac{P_{eo}}{V_{mo}} \right)^2 \right] \Delta \delta$$

$$\Delta P = K \Delta \delta \quad (6)$$

Onde K é o coeficiente de potência sincronizante, conforme definido no capítulo 3.

APÊNDICE B

Para um sistema composto de uma máquina ligada a uma barra infinita, com uma compensação estática intermediária, vem:

1 - Cálculo das constantes  $K_1$  e  $K_2$

$$K_1 = \left. \frac{d F_p}{d \delta} \right|_0 ; K_2 = \left. \frac{d F_p}{d X_{eq}} \right|_0$$

onde  $F_p = P_e = \frac{E_1 E_2}{X_{eq}} \text{sen } \delta$

então:

$$K_1 = \frac{E_1 E_2}{X_{eqo}} \cos \delta_0 ; \text{ portanto, } K_1 > 0$$

$$K_2 = - \frac{E_1 E_2}{X_{eqo}^2} \text{sen } \delta_0 ; \text{ portanto, } K_2 < 0$$

2 - Cálculo das constantes  $K_3$  e  $K_4$

$$K_3 = \left. \frac{d F_v}{d \delta} \right|_0 ; K_4 = \left. \frac{d F_v}{d X_{eq}} \right|_0$$

onde  $F_v = V_m = \frac{1}{X_{eq}} \sqrt{E_1^2 X_2^2 + E_2^2 X_1^2 + 2 E_1 E_2 X_1 X_2 \cos \delta}$

então:

$$K_3 = \frac{1}{X_{eqo}} \frac{- 2 E_1 E_2 X_1 X_2 \text{sen } \delta_0}{2 \sqrt{E_1^2 X_2^2 + E_2^2 X_1^2 + 2 E_1 E_2 X_1 X_2 \cos \delta_0}}$$

$$K_3 = \frac{- E_1 E_2 X_1 X_2 \text{sen } \delta_0}{X_{eqo}^2 V_{mo}} = \frac{- X_1 X_2}{X_{eqo} V_{mo}} P_{eo} ;$$

portanto,  $K_3 < 0$

$$K_4 = \frac{-\sqrt{E_1^2 X_2^2 + E_2^2 X_1^2 + 2 E_1 E_2 X_1 X_2 \cos \varphi_0}}{X_{\text{eqo}}^2}$$

$$K_4 = - \frac{V_{\text{mo}}}{X_{\text{eqo}}} ; \text{ portanto, } K_4 < 0$$

3 - Cálculo da constante  $K_5$

$$K_5 = \left. \frac{d F_x}{d B_s} \right|_0$$

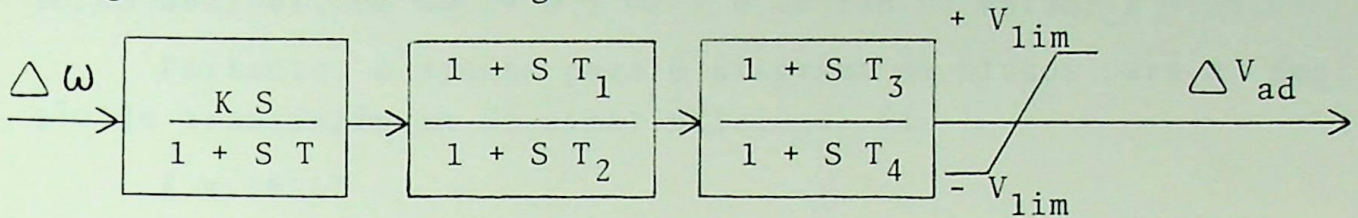
onde  $F_x = X_{\text{eq}} = (X_1 + X_2) - X_1 X_2 B_s$

então:

$$K_5 = - B_{s0} ; \text{ portanto, } K_5 < 0$$

APÊNDICE C

A função de transferência para o sinal adicional é a representada pelo modelo típico para esta tipo de equipamento, no diagrama de blocos a seguir:



Substituindo-se os valores dos parâmetros do compensador estático, conforme apresentados no capítulo 2, na equação 2.8, verifica-se que o mesmo apresenta para uma frequência de 6 rad/s (frequência dominante no sistema estudado no capítulo 5), um ganho de 0,96 e uma fase de  $-1,6^\circ$ . Entretanto, para ser um desempenho do compensador estático em fase com a variação de velocidade angular das máquinas de 60 Hz da usina de Itaipu, naquela frequência, o sinal adicional deverá proporcionar um avanço de aproximadamente  $50^\circ$  no desempenho do compensador estático. Então, pela equação 1, vem:

$$\varnothing_{c_{\text{máx}}} = \text{sen}^{-1} \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \quad (1)$$

Como no diagrama de blocos da função de transferência do sinal adicional acima, temos um duplo "avanço-atraso"; tem-se que fazer um avanço de aproximadamente  $25^\circ$  em cada simples "avanço-atraso". Assim, para  $\varnothing_{c_{\text{máx}}} = 25^\circ \rightarrow \alpha = 0,4$

Pela equação 2, vem:

$$\omega_{\text{máx}} = \frac{1}{T\sqrt{\alpha}} \quad (2)$$

Dessa forma para  $\omega_{\text{máx}} = 6 \text{ rad/s}$  e  $\alpha = 0,4$ , tem-se:

$$T_1 = T_3 = 0,26$$

como  $T_2 = T_4 = \alpha T_1 \rightarrow T_2 = T_4 = 0,10$

O ajuste da constante de tempo T, deverá ser igual a:

$$T = \frac{1}{\omega'} , \text{ onde } \omega' = 0,1 \omega_{\text{máx}} ; \text{ então: } T = 1,67 \text{ s}$$

O valor de K deverá proporcionar um ganho transitório nulo, em decibel, em  $\omega'' = 0,1 \omega' = 0,06 \text{ rad/s}$ ; então:  $K = 16,67$ .

Portanto, o ajuste para o diagrama de blocos para a função de transferência do sinal adicional é:

$$K = 16,67$$

$$T = 1,67 \text{ s}$$

$$T_1 = T_3 = 0,26 \text{ s}$$

$$T_2 = T_4 = 0,10 \text{ s}$$

$$V_{\text{lim}} = \pm 0,10$$



## SIGNIFICADO DAS ABREVIATURAS

- ANG-M-SE - Ângulo médio das máquinas do sistema Sudeste;
- ANG-IT60 - Ângulo das máquinas de Itaipu 60 Hz;
- VEL-IT60 - Variação de velocidade angular das máquinas de Itaipu 60 Hz;
- V-ITAB7 - Tensão da barra de Itaberá 750 kV;
- V-TPRE7 - Tensão da barra de Tijuco Preto 750 kV;
- V-SROQ3 - Tensão da barra de Ibiuna 345 kV (Estação Inversora do Sistema de Corrente Contínua);
- EFD-TPCS - Tensão de campo do compensador síncrono de Tijuco Preto;
- EFD-SRCS - Tensão de campo dos compensadores síncronos de Ibiuna;
- EFD-IT60 - Tensão de campo das máquinas de Itaipu 60 Hz;
- P-IT60 - Potência ativa gerada pelas máquinas de Itaipu 60 Hz;
- Q-IT60 - Potência reativa gerada pelas máquinas de Itaipu 60Hz;
- Q-TPCS - Potência reativa gerada pelo compensador síncrono de Tijuco Preto;
- IDC1 - Corrente contínua do polo 1;
- P-IT50 - Potência ativa gerada pelas máquinas de Itaipu 50 Hz;

\*1991-CARGA LEVE\*ITA50=6000/IT60=3880 MU\*S/CE-SA C/MG  
 \*CC1FTF750KV C/PERDA.1LT ITAB-TF C/PCC=0 30MS\*MRA5

FROM -190.000 TO 50.000  
 -70.000 170.000  
 -0.020 0.100

ANG-M-SE ANG-IT60 VEL-IT60  
 S I V

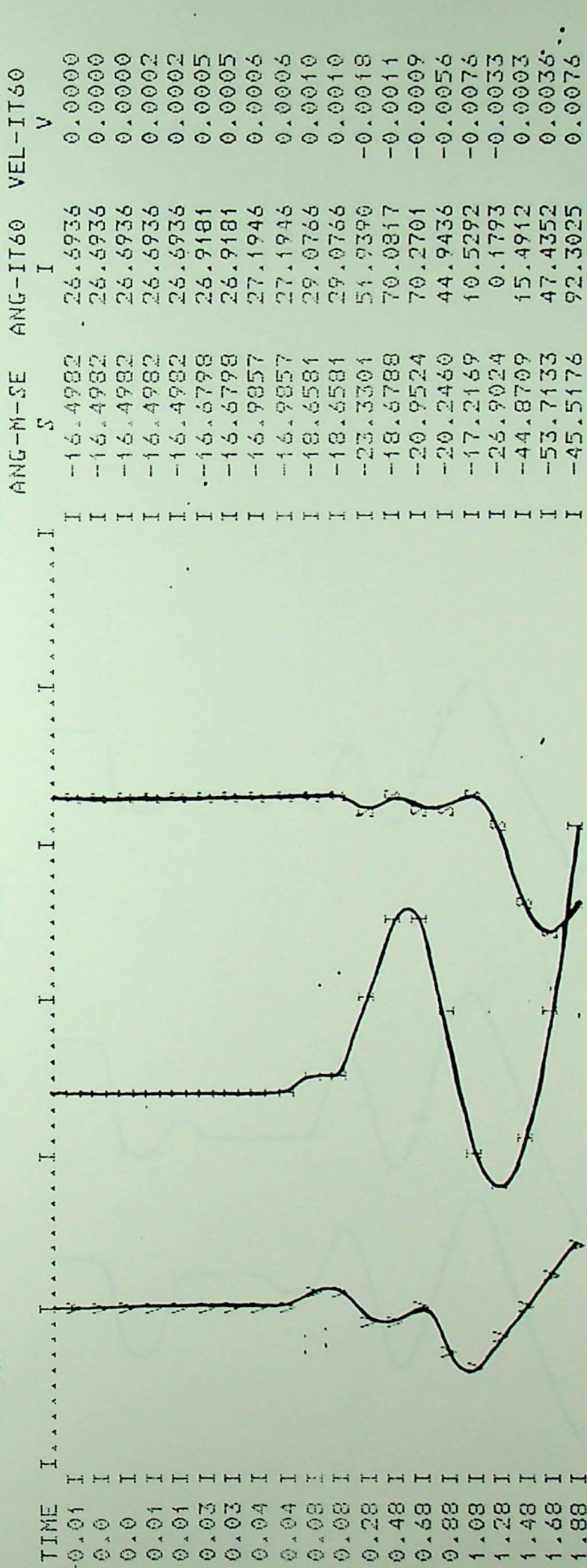


Figura 5.4-A

\*1991-CARGA LEVE\*IT450=6000/IT460=3880 MW\*5/CE-SA C/MG  
 \*CC1FTP750KV C/FERDA\*1T ITAB\*1P C/FCC=0 30MS\*MR45

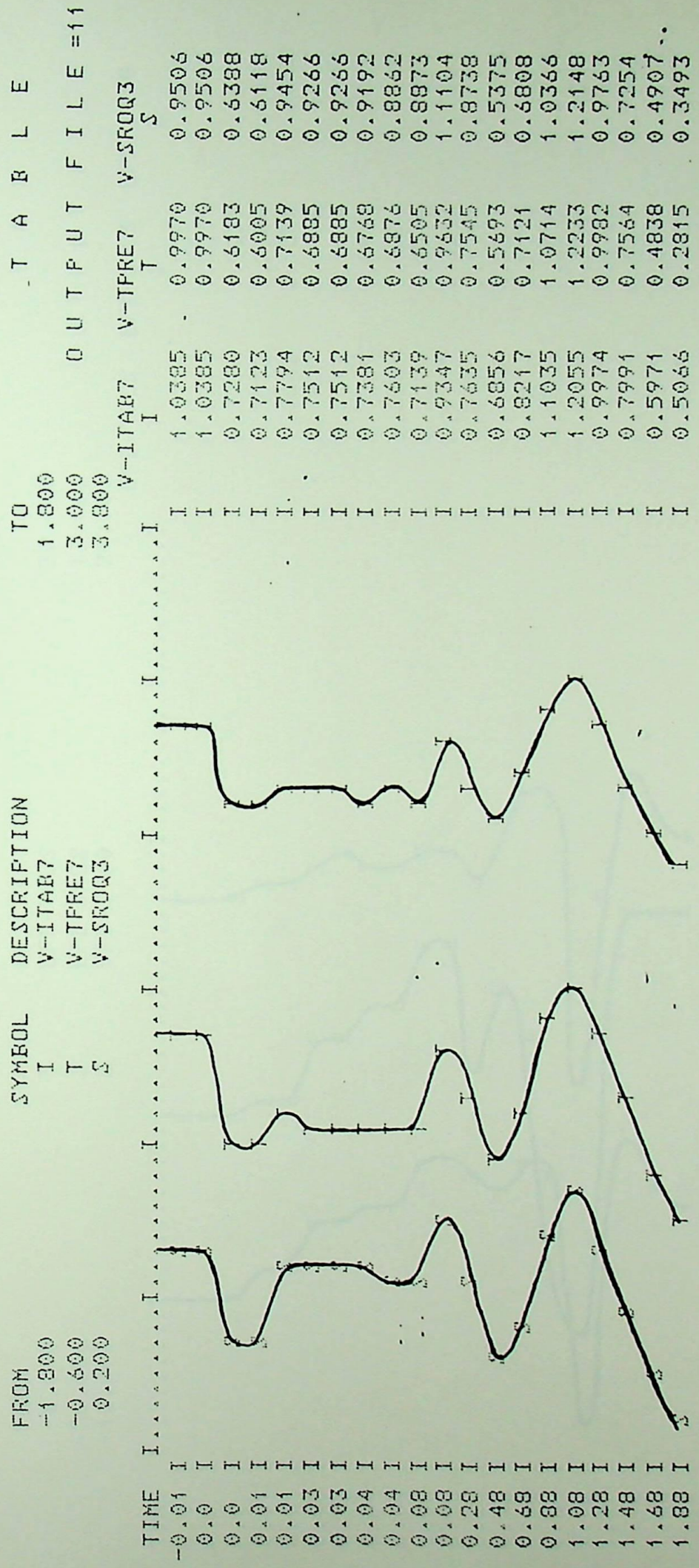


Figura 5.4-B

\*1991-CARGA LEVE\*ITA50=6000/ITA60=3880 MU\*S/CE-SA C/MG  
 \*CC1FTF750KV C/PERDA\*1LT ITAB\*TP C/PCC=0 30MS\*HRAS

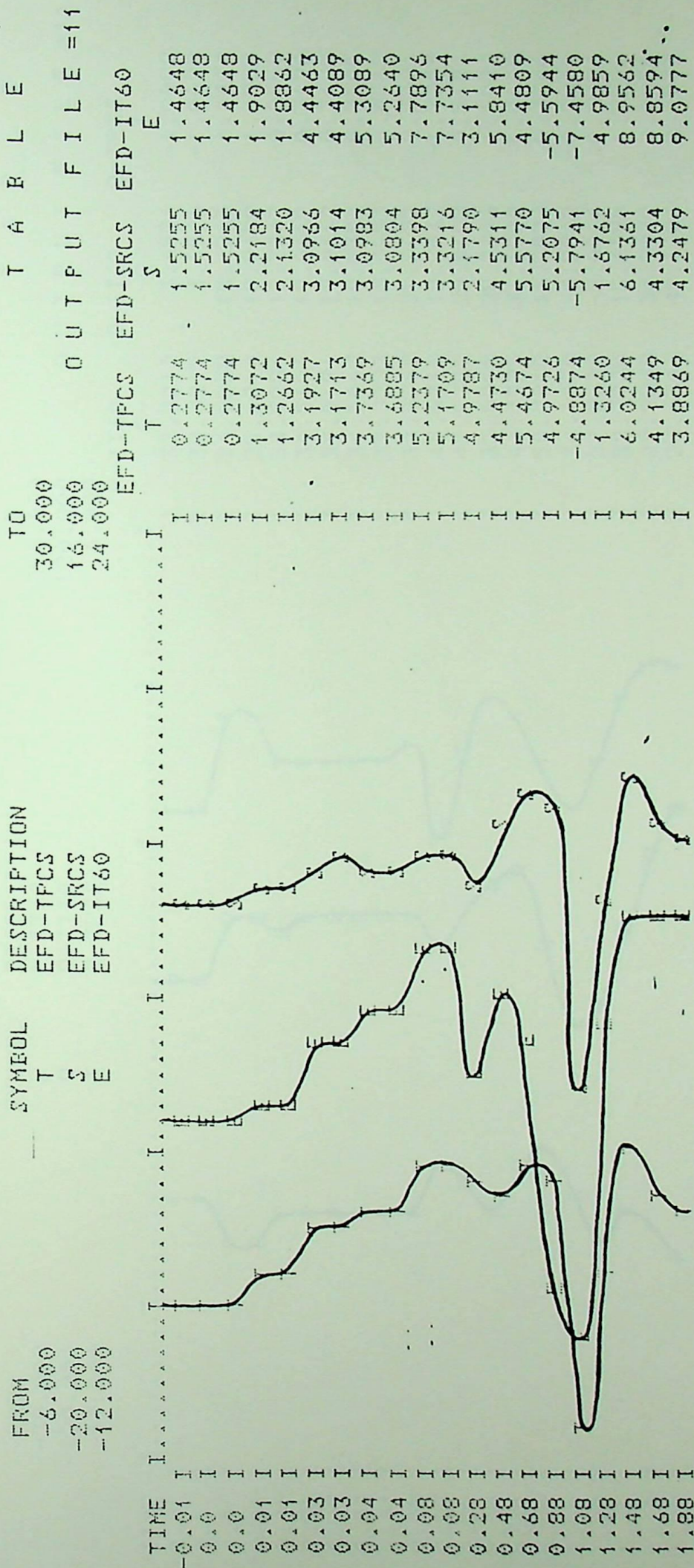


Figura 5.4-C

\*1991-CARGA LEVE\*IT450=6000/IT460=3880 MW\*5/CE-SA C/MG  
 \*CC1FTP750KV C/PERDA-1LT ITAB-TP C/PCC=0 30MS\*MRA5

TO  
 210.000  
 120.000  
 6.000

FROM  
 -30.000  
 -120.000  
 -17.000

SYMBOL DESCRIPTION  
 F F-IT60  
 Q Q-IT60  
 T Q-TPCS

OUTPUT FILE=11

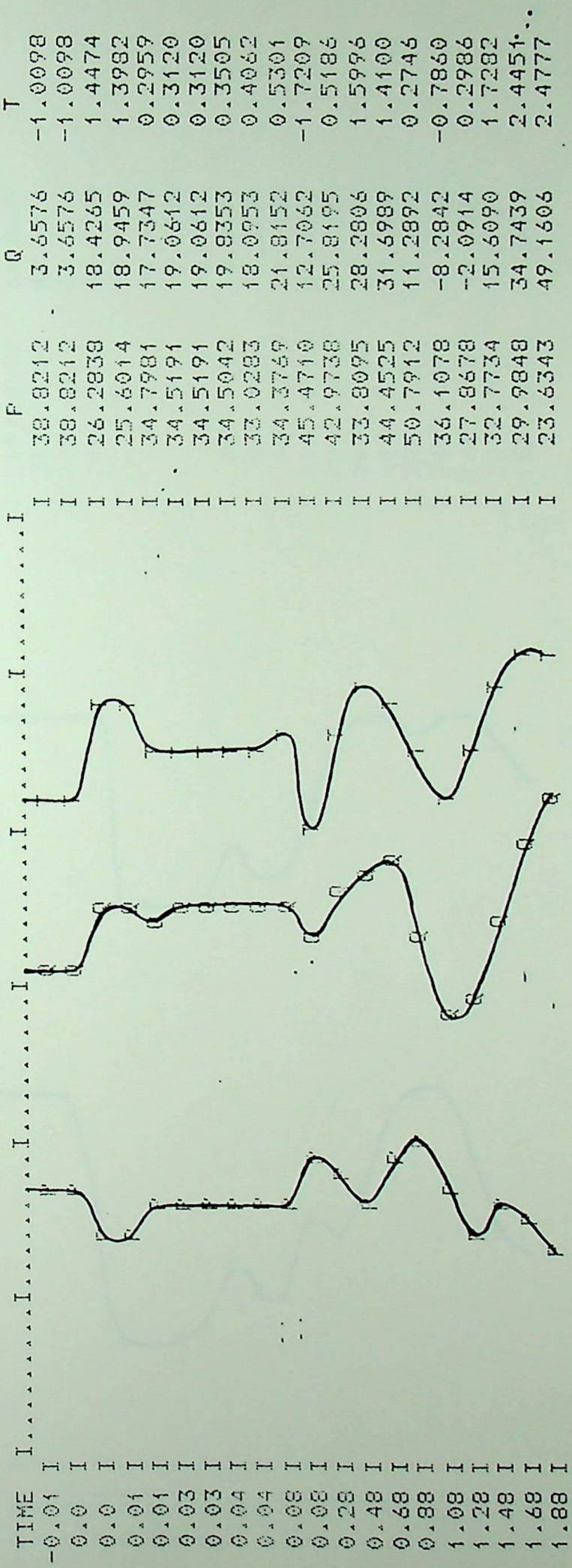


Figura 5.4-D

\*1991-CARGA LEVE\*IT150=6000/IT160=3880 MU\*S/CE-SA C/MG  
 \*CC1FTF750KV C/PERDA,1LT ITAB-TP C/PCC=0 30MS\*MRAS

TO 5000.000  
 210.000  
 IDC1  
 P-IT50

SYMBOL DESCRIPTION  
 I --- IDC1  
 P P-IT50

FROM  
 \*\*\*\*\*  
 -30.000

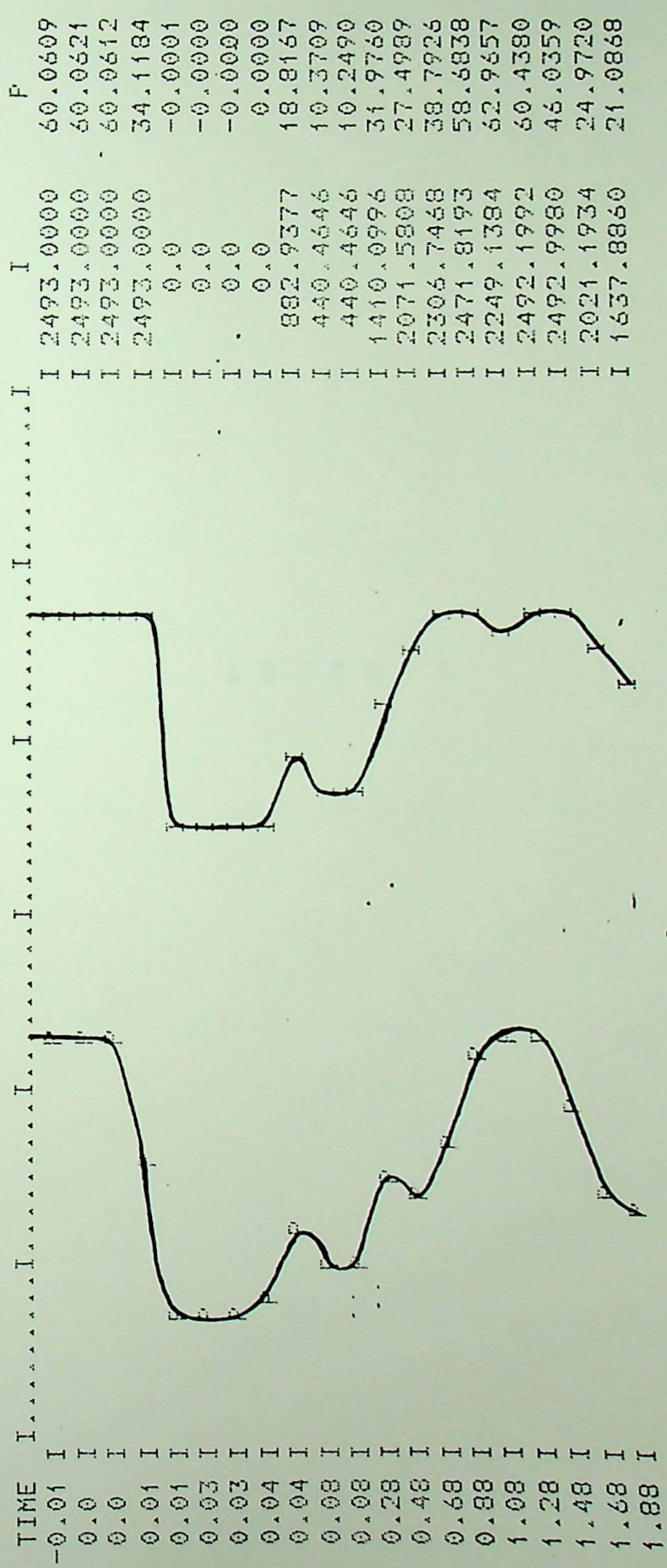


Figura 5.4-E



## SIGNIFICADO DAS ABREVIATURAS

- ANG-M-SE - Ângulo médio das máquinas do sistema Sudeste;
- ANG-IT60 - Ângulo das máquinas de Itaipu 60 Hz;
- VEL-IT60 - Variação de velocidade angular das máquinas de Itaipu 60 Hz;
- V-ITAB7 - Tensão da barra de Itaberá 750 kV;
- V-TPRE7 - Tensão da barra de Tijuco Preto 750 kV;
- V-SROQ3 - Tensão da barra de Ibiuna 345 kV (Estação Inversora do Sistema de Corrente Contínua);
- EFD-TPCS - Tensão de campo do compensador síncrono de Tijuco Preto;
- EFD-SRCS - Tensão de campo dos compensadores síncronos de Ibiuna;
- EFD-IT60 - Tensão de campo das máquinas de Itaipu 60 Hz;
- P-IT60 - Potência ativa gerada pelas máquinas de Itaipu 60 Hz;
- Q-IT60 - Potência reativa gerada pelas máquinas de Itaipu 60 Hz;
- Q-TPCS - Potência reativa gerada pelo compensador síncrono de Tijuco Preto;
- IDC1 - Corrente contínua do polo 1;
- P-IT50 - Potência ativa gerada pelas máquinas de Itaipu 50 Hz;
- V-CON-CE - Tensão controlada pelo compensador estático de Tijuco Preto;
- \*Y-CE\* - Admitância do compensador estático de Tijuco Preto;
- SSA-CE - Saída do sinal adicional do compensador estático de Tijuco Preto.

\*1991-CARGA LEVE\*IT450=6000/IT460=3880 MU\*CE-SA C/MG  
 \*CC4FTP750KV C/PERDA 1LT ITAB-TP C/PCC=0 30MS\*MRA4

FROM: -190.000  
 -70.000  
 -0.020

TO: 50.000  
 170.000  
 0.100

SYMBOL DESCRIPTION  
 S ANG-M-SE  
 I ANG-IT60  
 V VEL-IT60

ANG-M-SE ANG-IT60 VEL-IT60

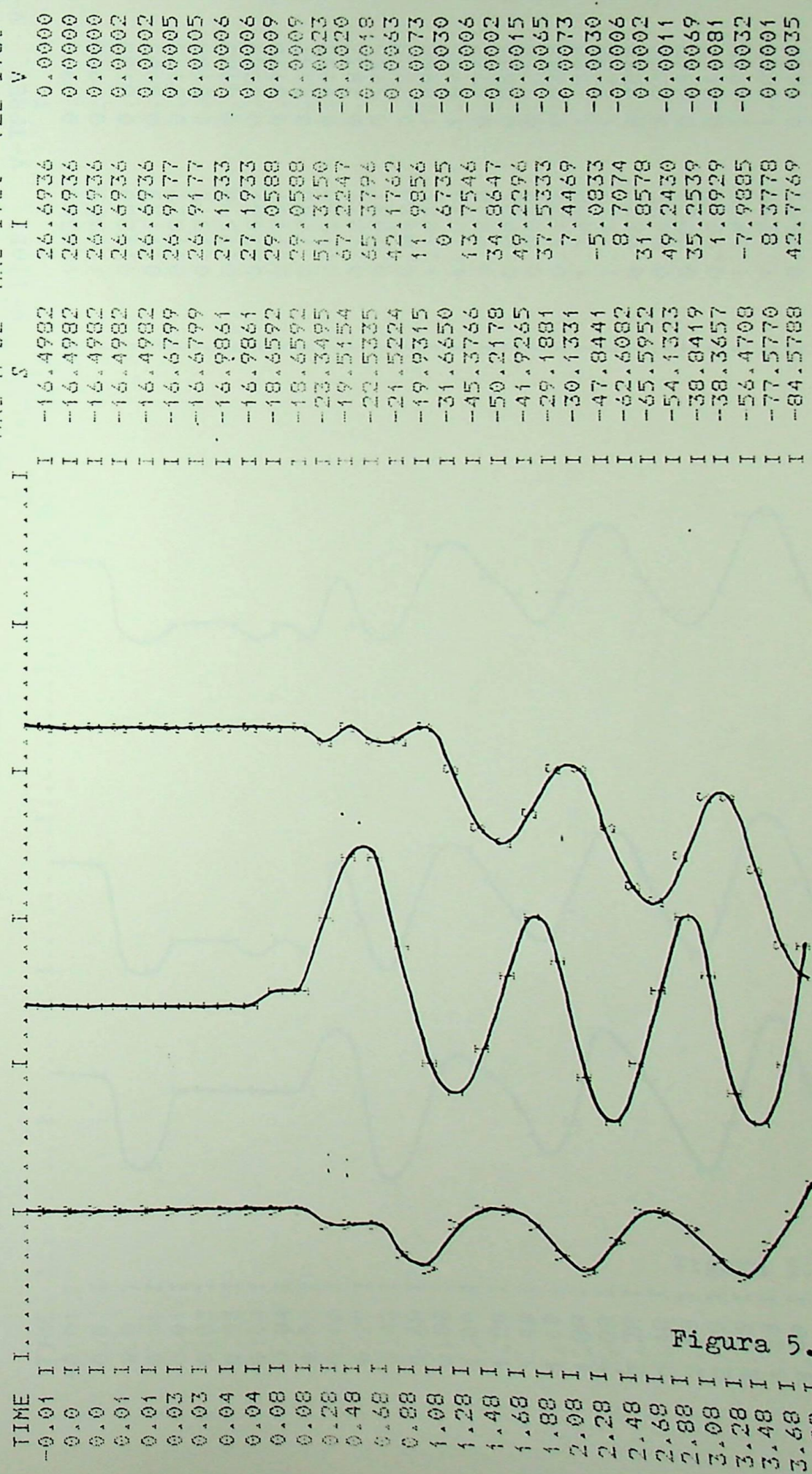


Figura 5.5-A

\*1991-CARGA LEVE\*ITA50=6000/ITA60=3880 MM\*IC/DE-SA C/MG  
 \*C1FTP750KV C/PERDA 1LT ITAB-TF C/PCC=0 30MS\*MR44

T A B L E  
 O U T P U T F I L E = 11

TO  
 1.800  
 3.000  
 3.800

SYMBOL DESCRIPTION  
 I V-ITAB7  
 T V-TPRE7  
 S V-SROQ3

FROM  
 -1.800  
 -0.600  
 0.200

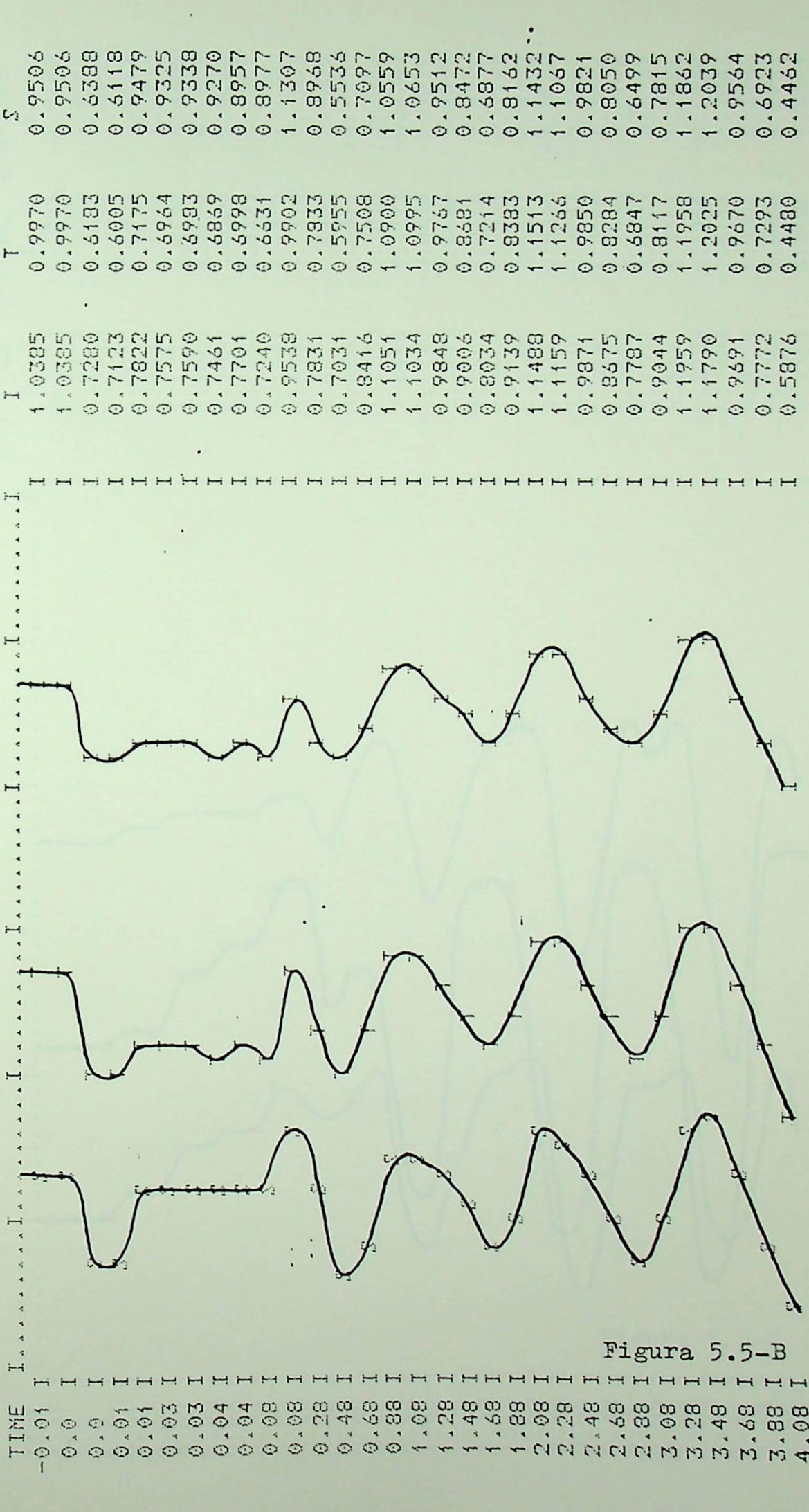


Figura 5.5-B

\*1991-CARGA LEVE\*ITA50=6000/ITA60=3880 MU\*IC/CE-SA C/MG  
 \*CC1FTF750KV C/PERDA 1LT ITAB-TP C/PCC=0 30MS\*MR44

TO  
 30.000  
 16.000  
 24.000

OUTPUT FILE = 11

FROM  
 -6.000  
 -20.000  
 -12.000

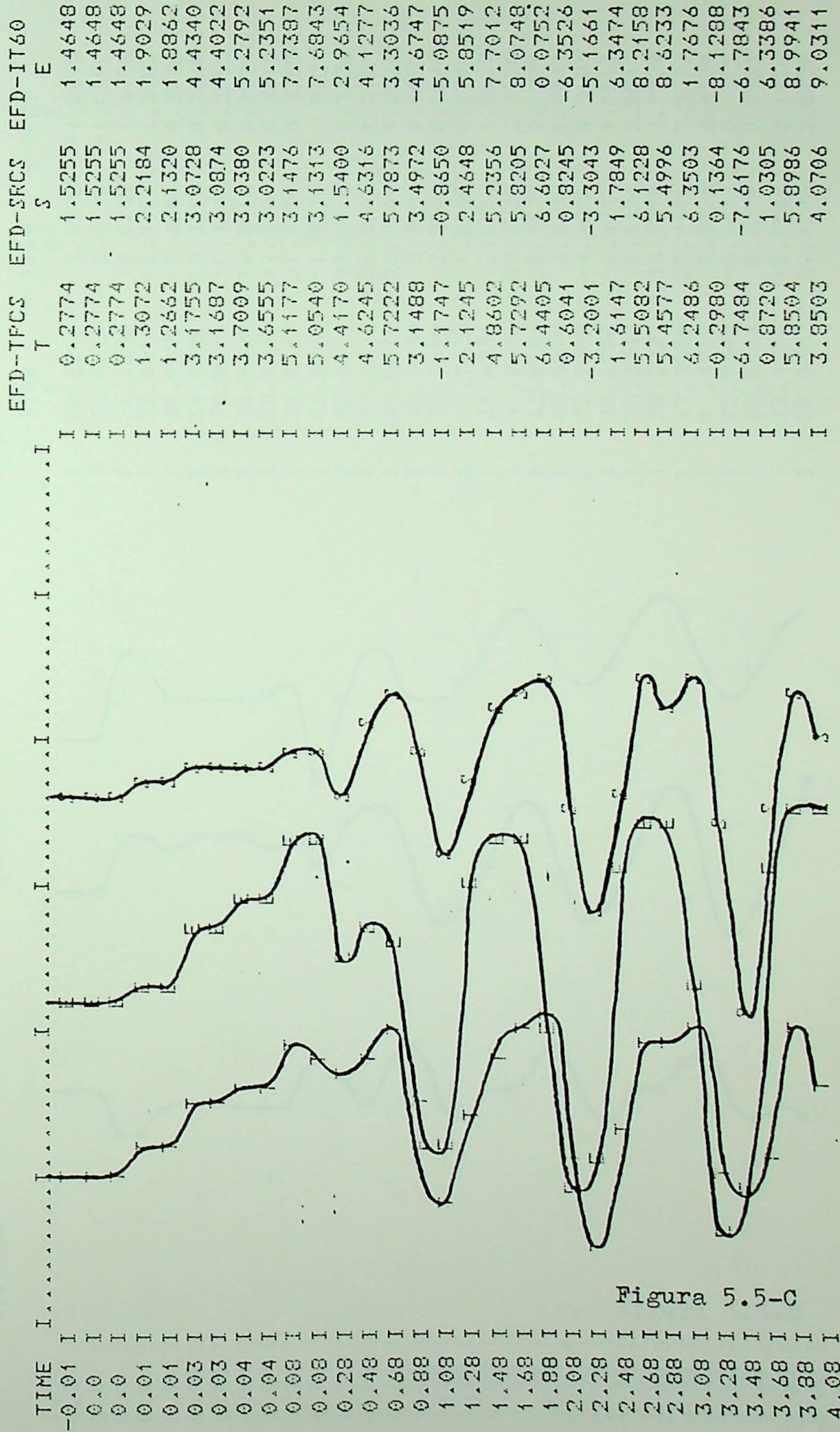


Figura 5.5-C

\*1991-CARGA LEVE\*ITAE50=6000/ITAE60=3880 MU\*CE-SA C/MG  
 #CC1FTP750KV C/PERDA 1LT ITAB-TP C/PCC=0 30MS\*NR44

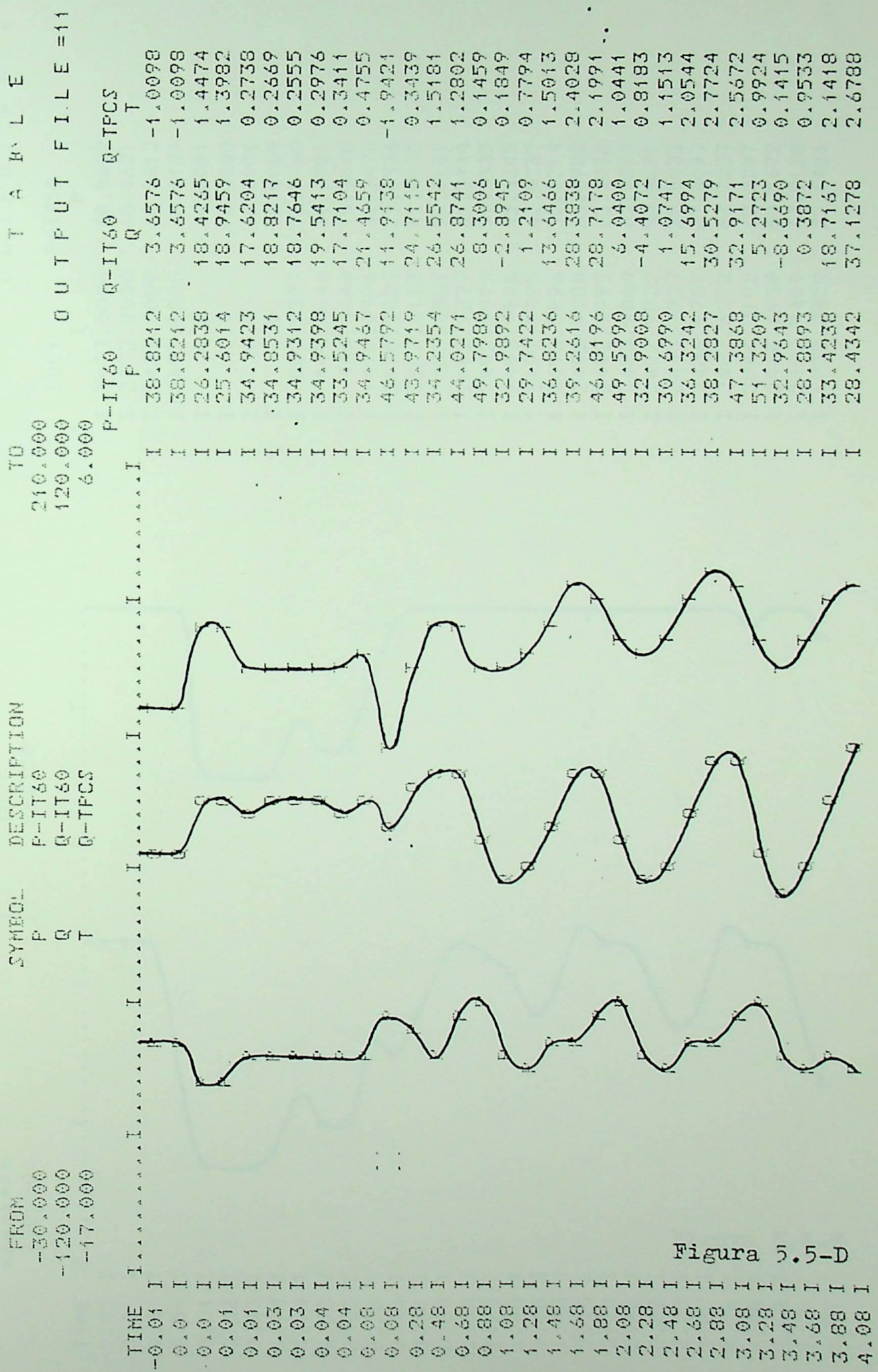


Figura 5.5-D

\*1991-CARGA LEVE\*ITA50=6000/ITA60=3880 MW\*CE-SA C/MG  
 \*CC1FTP750KV C/PERDA 1LT ITAB-TF C/PCC=0 30MS\*MRA4

FROM \*\*\*\*\*  
 -30.000

TO  
 5000.000  
 210.000

OUTPUT FILE =11

SYMBOL DESCRIPTION  
 I IDC1  
 F F-IT50

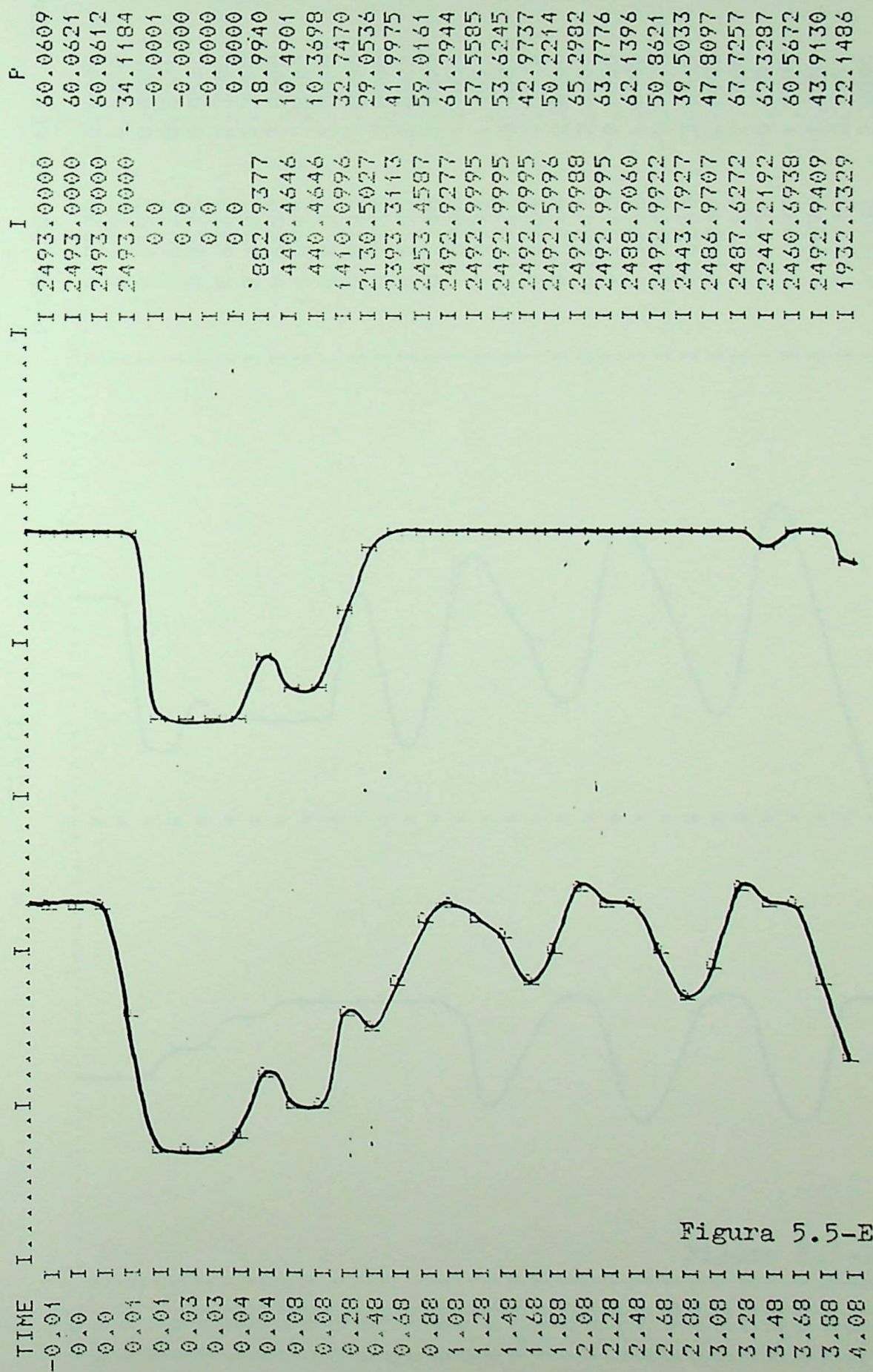


Figura 5.5-E

\*1991-CARGA LEVE\*ITAE50=6000/ITAE60=3880 MMKC/CE-SA C/MG  
 \*CC1FTP750KV C/PERDA 1LT ITAB-TF C/PCC=0 30MS\*MRA4

FROM -0.800 TO 1.600  
 -8.000 28.000  
 -1.200 1.200

SYMBOL V Y \*

DESCRIPTION V-CON-CE \*Y-CE\* SSA-CE

OUTPUT FILE=11

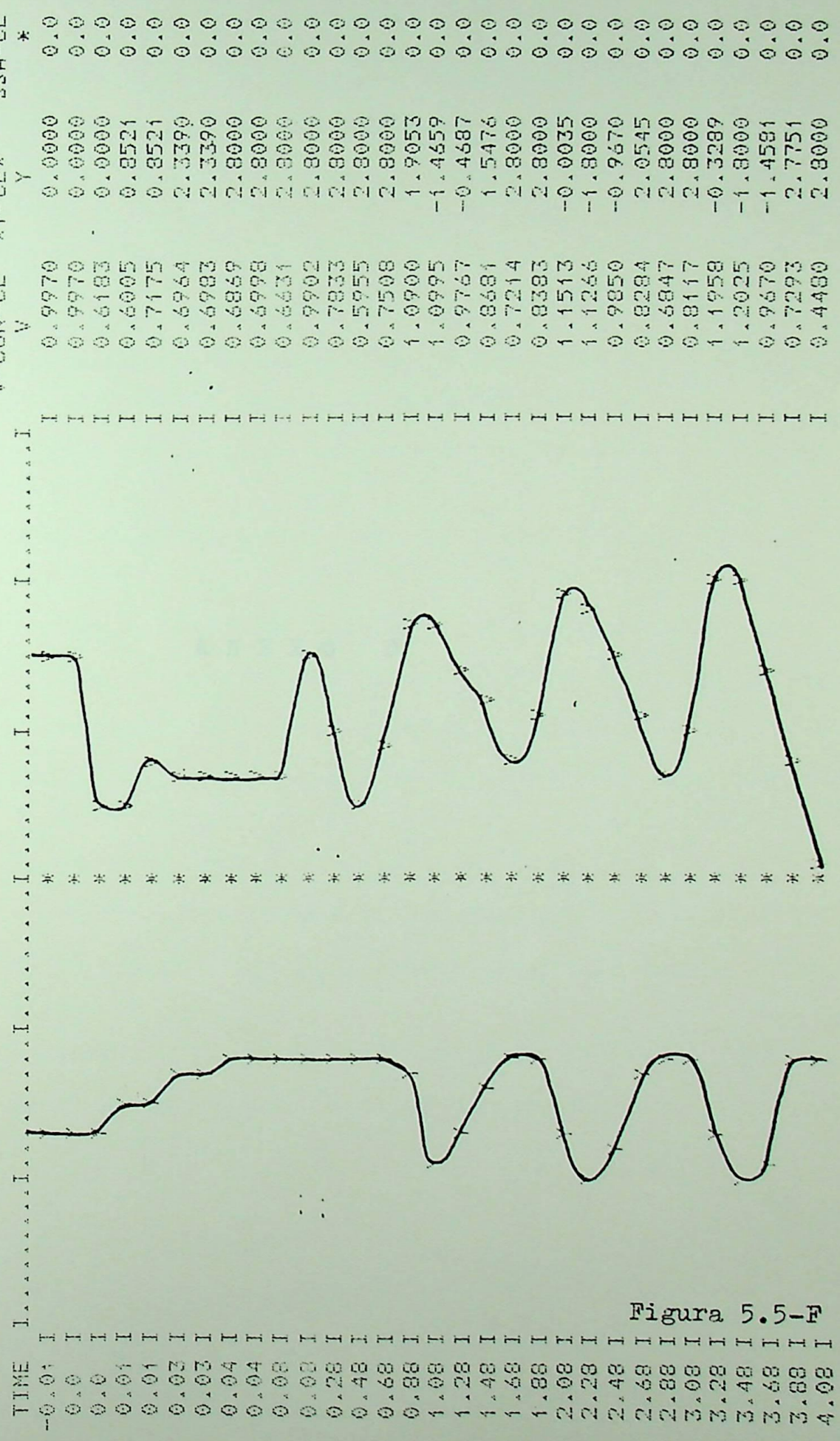


Figura 5.5-F



## SIGNIFICADO DAS ABREVIATURAS

- ANG-M-SE - Ângulo médio das máquinas do sistema Sudeste;
- ANG-IT60 - Ângulo das máquinas de Itaipu 60 Hz;
- VEL-IT60 - Variação de velocidade angular das máquinas de Itaipu 60 Hz;
- V-ITAB7 - Tensão da barra de Itaberá 750 kV;
- V-TPRE7 - Tensão da barra de Tijuco Preto 750 kV;
- V-SROQ3 - Tensão da barra de Ibiuna 345 kV (Estação Inversora do Sistema de Corrente Contínua);
- EFD-TPCS - Tensão de campo do compensador síncrono de Tijuco Preto;
- EFD-SRCS - Tensão de campo dos compensadores síncronos de Ibiuna;
- EFD-IT60 - Tensão de campo das máquinas de Itaipu 60 Hz;
- P-IT60 - Potência ativa gerada pelas máquinas de Itaipu 60 Hz;
- Q-IT60 - Potência reativa gerada pelas máquinas de Itaipu 60Hz;
- Q-TPCS - Potência reativa gerada pelo compensador síncrono de Tijuco Preto;
- IDC1 - Corrente contínua do polo 1;
- P-IT50 - Potência ativa gerada pelas máquinas de Itaipu 50 Hz;
- V-CON-CE - Tensão controlada pelo compensador estático de Tijuco Preto;
- \*Y-CE\* - Admitância do compensador estático de Tijuco Preto;
- SSA-CE - Saída do sinal adicional do compensador estático de Tijuco Preto.

\*1991-CARGA LEVE\*ITA50=6000/ITA60=3980 MU\*DC/CE+SA C/MG  
 \*CC1FTF750KV C/PERDA 1LT ITR-IF C/FCC=0 30MS\*MKAS

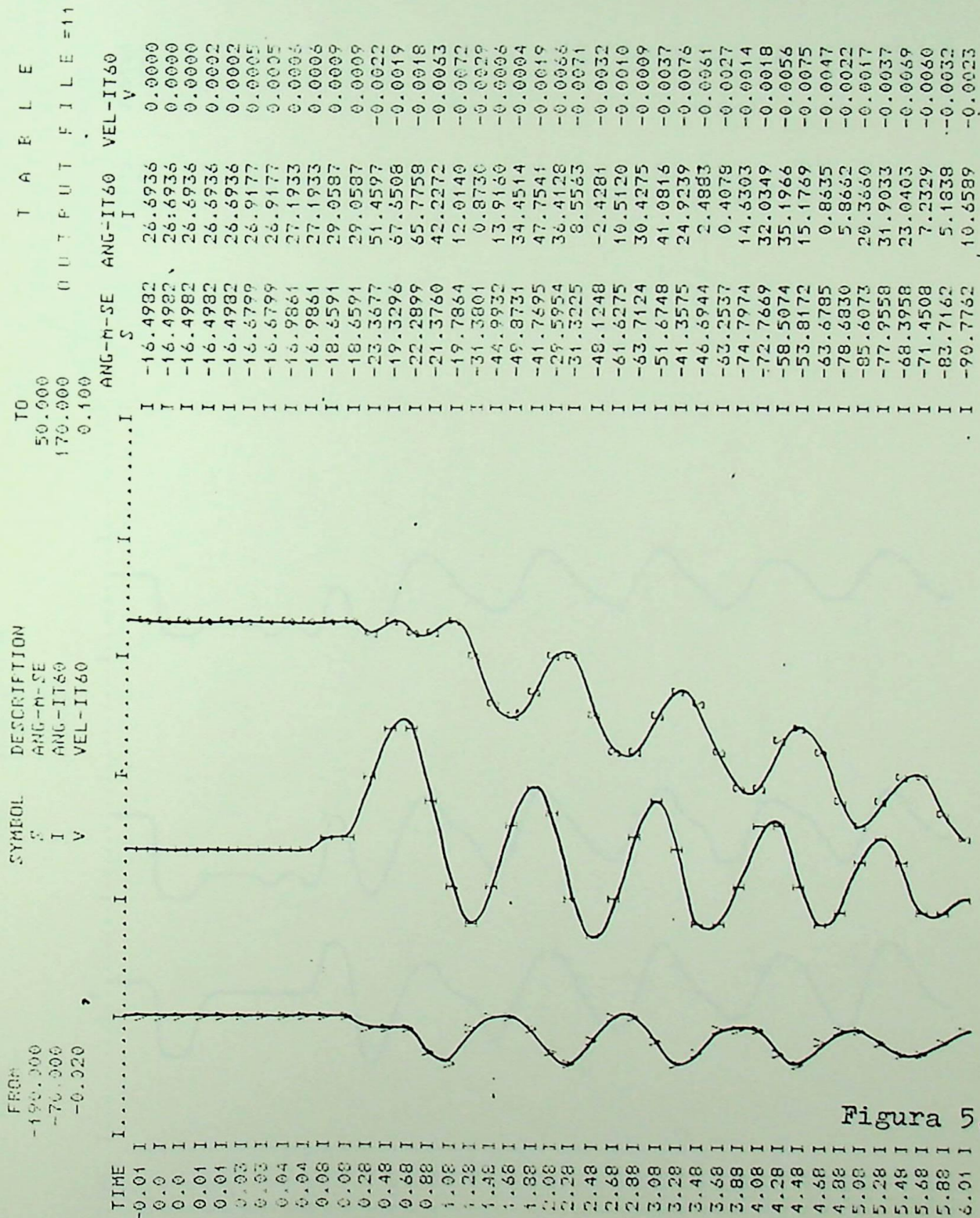


Figura 5.6-A

P T E L F O W E R S Y S T E M S I M U L A T O R K  
 X1991-CARGA LEVE\*ITA50=6000/ITA60=3880 MWKC/CE+SA C/MG  
 \*CCIFTP750KV C/PERDA 1LT ITAR-TP C/FCC=0 30MS\*MRAS  
 T A B L E  
 O U T P U T F I L E =11  
 V-ITAB7 V-TPRE7 V-SROQ3

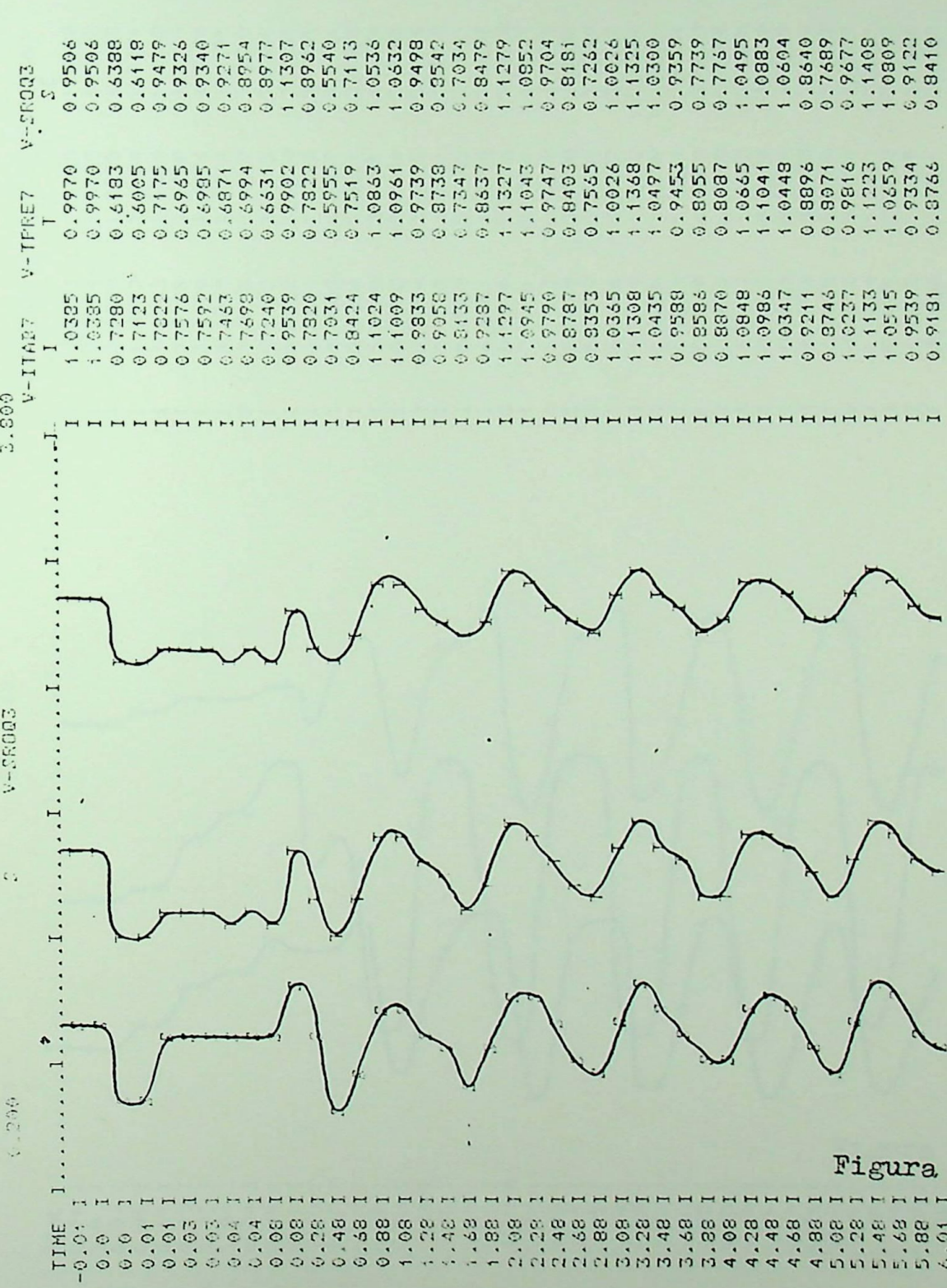


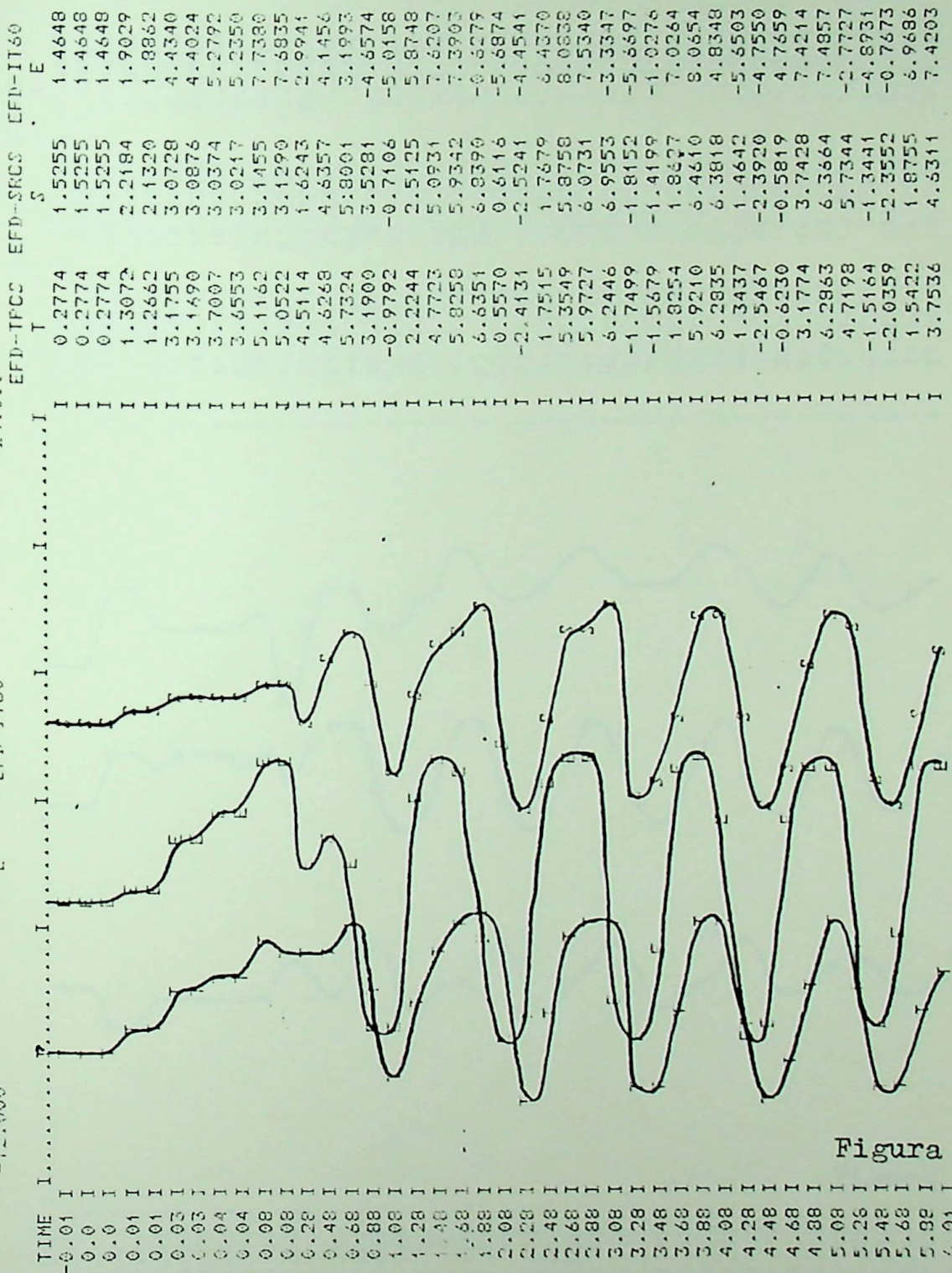
Figura 5.6-B

TO  
 30.000  
 16.000  
 24.000

OUTPUT FILE=11

SYMBOL DESCRIPTION  
 T EFD-TPCS  
 S EFD-SRCS  
 E EFD-IT60

FROM  
 -6.000  
 -20.000  
 -12.000



TIME	T	S	E
0.01	0.2774	1.5255	1.4648
0.0	0.2774	1.5255	1.4648
0.0	0.2774	1.5255	1.4648
0.01	1.3072	2.2184	1.9029
0.01	1.2662	2.1320	1.8862
0.03	3.1755	3.0728	4.4340
0.03	3.1690	3.0876	4.4024
0.04	3.7007	3.0374	5.2792
0.04	3.6553	3.0217	5.2350
0.08	5.1162	3.1455	7.7380
0.08	5.0522	3.1290	7.6935
0.28	4.5114	1.6243	2.9941
0.48	4.6268	4.6357	4.1456
0.68	5.7324	5.8001	3.1993
0.88	3.1900	3.5281	-4.6574
1.08	-0.9792	-0.7106	-5.0158
1.28	2.2244	2.5125	5.8748
1.48	4.7723	5.0931	7.6207
1.68	5.8258	5.9342	7.3903
1.88	6.6351	6.8390	-0.6279
2.08	0.5570	0.6116	-5.6874
2.28	-2.4131	-2.5241	-4.4541
2.48	1.7515	1.7679	6.4370
2.68	5.3549	5.8758	8.0638
2.88	5.9727	6.0731	7.5340
3.08	6.2446	6.9553	-3.3347
3.28	-1.7499	-1.8152	-5.6697
3.48	-1.5679	-1.4199	-1.0276
3.68	1.8254	1.8697	7.0264
3.88	5.9210	6.4610	8.0654
4.08	6.2835	6.3818	4.8348
4.28	1.3437	1.4642	-5.5503
4.48	-2.5467	-2.3920	-4.7550
4.68	-0.6230	-0.5819	4.7659
4.88	3.1774	3.7428	7.4214
5.08	6.2863	6.3664	7.4857
5.26	4.7198	5.7344	-2.7727
5.48	-1.5164	-1.3441	-4.6931
5.68	-2.0359	-2.3552	-0.7673
5.98	1.5422	1.8755	6.9686
6.01	3.7536	4.6311	7.4203

Figura 5.6-C

\*1991-CARGA LEVE\*ITA50=6000/ITA60=3880 MM\*CD/CE\*SA C/MG  
\*CC1F1F750KV C/PERDA 1L1 ITAR-TP C/PCC=0 30MS\*MMRA5

FROM: -30.000  
 -120.000  
 -17.000  
 TO: 210.000  
 120.000  
 6.000  
 OUTPUT FILE =11  
 T A B L E  
 P-IT60 Q-IT60 Q-TFCS  
 S Y M B O L D E S C R I P T I O N  
 F P-IT60  
 Q Q-IT60  
 T Q-TFCS

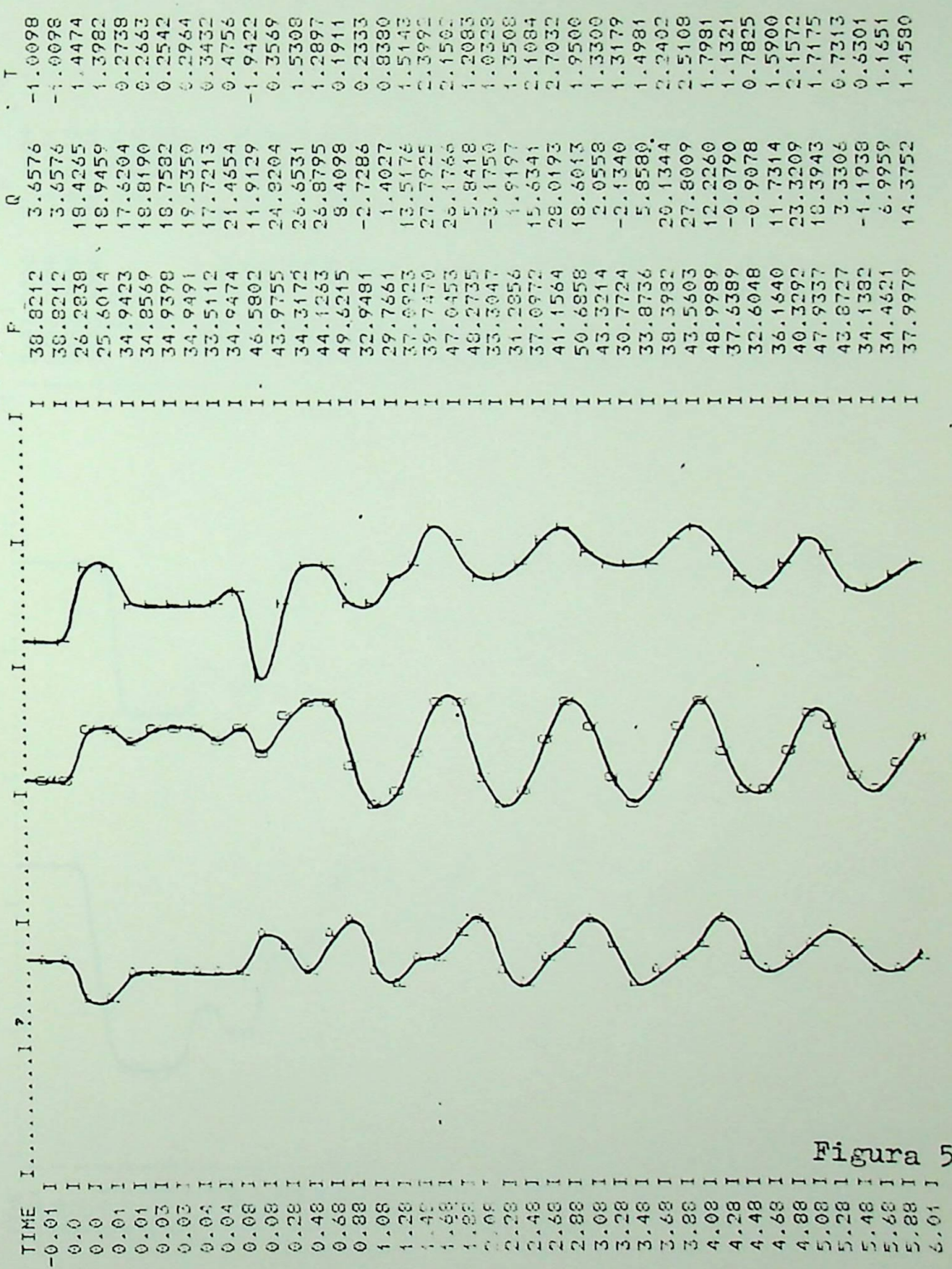


Figura 5.6-D

\*1991-CARGA LEVE\*ITA50=6000/ITA60=3880 MW\*CE/CE+SA C/MG  
 \*CC1FTF750KV C/PERDA 1LT ITAB-TF C/PCC=0 30MS\*MRAS

TO 5000.000  
 210.000

SYMBOL I  
 F

FROM  
 \*\*\*\*\*  
 -50.000

DESCRIPTION  
 IDC1  
 F-IT50

OUTPUT FILE=11  
 F-IT50

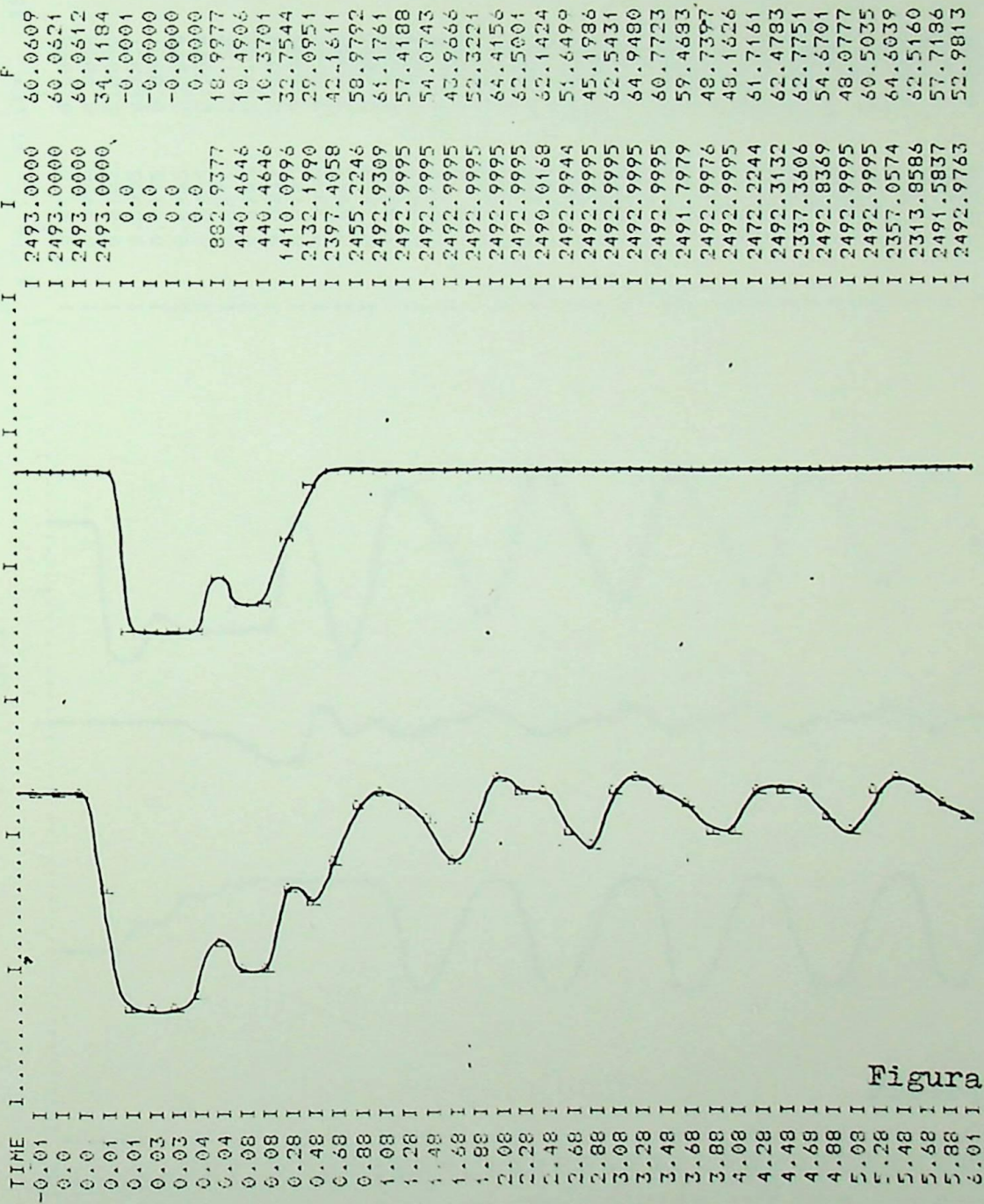


Figura 5.6-E

\*1991-CARGA LEVE\*IT450=6000/IT460=3880 MM=C/CE+SA C/ME  
 \*CC\*ITP750KV C/PERDA 1LT ITAF-TP C/FCC=0.30MMKRAE

FROM -0.800 TO 1.600  
 -0.000 28.000  
 -1.200 1.200

SYMBOL DESCRIPTION  
 V V-CON-CE  
 Y \*Y-CE\*  
 # SSA-CE

OUTPUT FILE=11

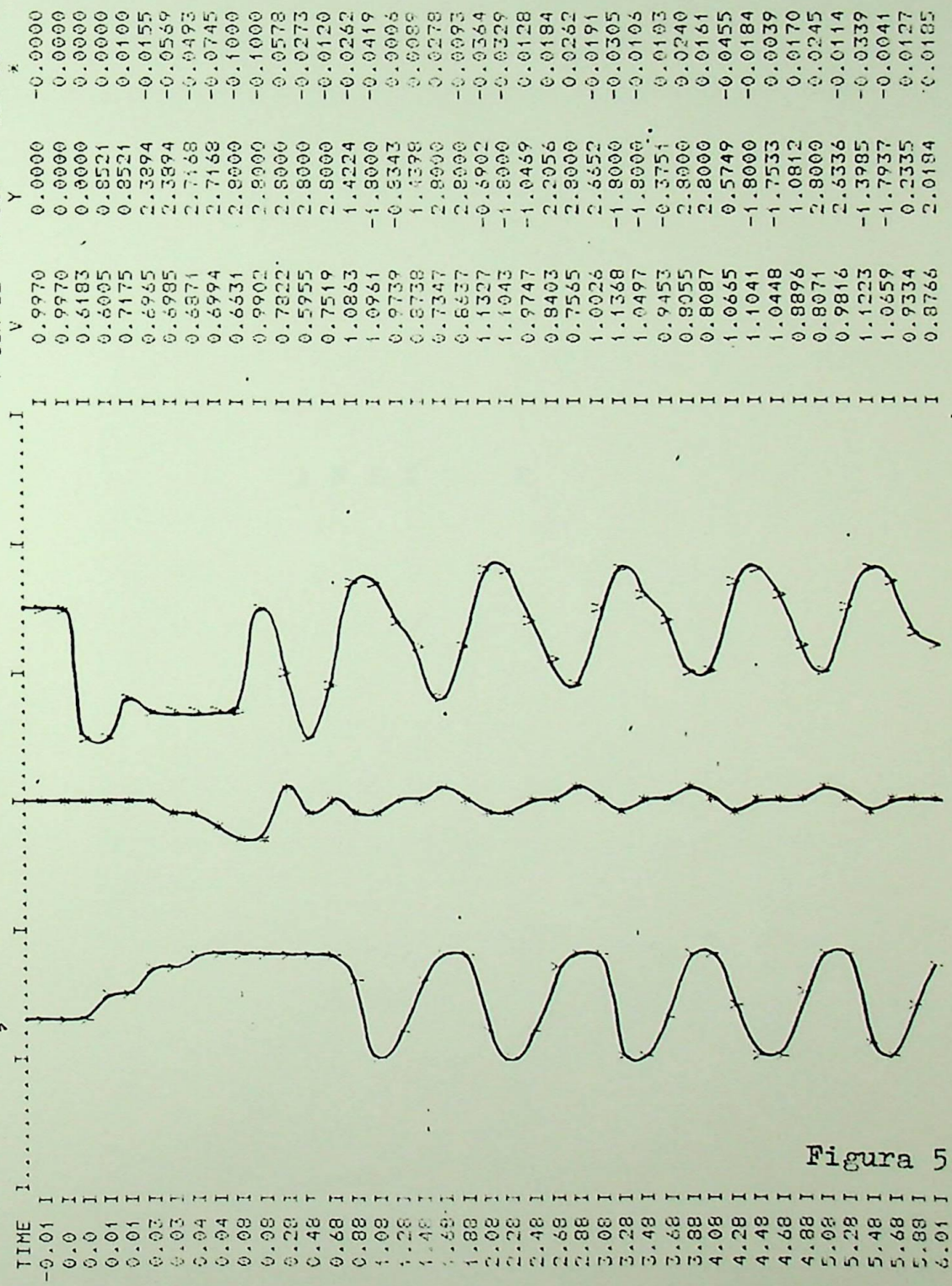


Figura 5.6-F

CONTABILIDADE GERAL

- 100-100 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-110 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-120 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-130 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-140 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-150 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-160 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-170 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-180 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-190 - Livro de registro de contas de ordem

A N E X O E

- 100-200 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-210 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-220 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-230 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-240 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-250 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-260 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-270 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-280 - Livro de registro de contas de ordem
- 100-290 - Livro de registro de contas de ordem

## SIGNIFICADO DAS ABREVIATURAS

- ANG-M-SE - Ângulo médio das máquinas do sistema Sudeste;
- ANG-IT60 - Ângulo das máquinas de Itaipu 60 Hz;
- VEL-IT60 - Variação de velocidade angular das máquinas de Itaipu 60 Hz;
- V-ITAB7 - Tensão da barra de Itaberá 750 kV;
- V-TPRE7 - Tensão da barra de Tijuco Preto 750 kV;
- V-SROQ3 - Tensão da barra de Ibiuna 345 kV (Estação Inversora do Sistema de Corrente Contínua);
- EFD-TPCS - Tensão de campo do compensador síncrono de Tijuco Preto;
- EFD-SRCS - Tensão de campo dos compensadores síncronos de Ibiuna;
- EFD-IT60 - Tensão de campo das máquinas de Itaipu 60 Hz;
- P-IT60 - Potência ativa gerada pelas máquinas de Itaipu 60 Hz;
- Q-IT60 - Potência reativa gerada pelas máquinas de Itaipu 60 Hz;
- Q-TPCS - Potência reativa gerada pelo compensador síncrono de Tijuco Preto;
- IDC1 - Corrente contínua do polo 1;
- P-IT50 - Potência ativa gerada pelas máquinas de Itaipu 50 Hz;
- V-CON-CE - Tensão controlada pelo compensador estático de Tijuco Preto;
- \*Y-CE\* - Admitância do compensador estático de Tijuco Preto;
- SSA-CE - Saída do sinal adicional do compensador estático de Tijuco Preto.

\*1991-CARGA LEVE\*ITA50=6000/ITA60=3880 MM\*CD/CE+SD C/MG  
 \*CCIFTF750KV C/PERDA 1LT ITAB-TP C/FCC=0 30MS\*MRAS

TO 50.000  
 170.000  
 0.100

FROM  
 -190.000  
 -70.000  
 -0.020

SYMBOL DESCRIPTION  
 S ANG-M-SE  
 I ANG-IT60  
 V VEL-IT60

OUTPUT FILE=11

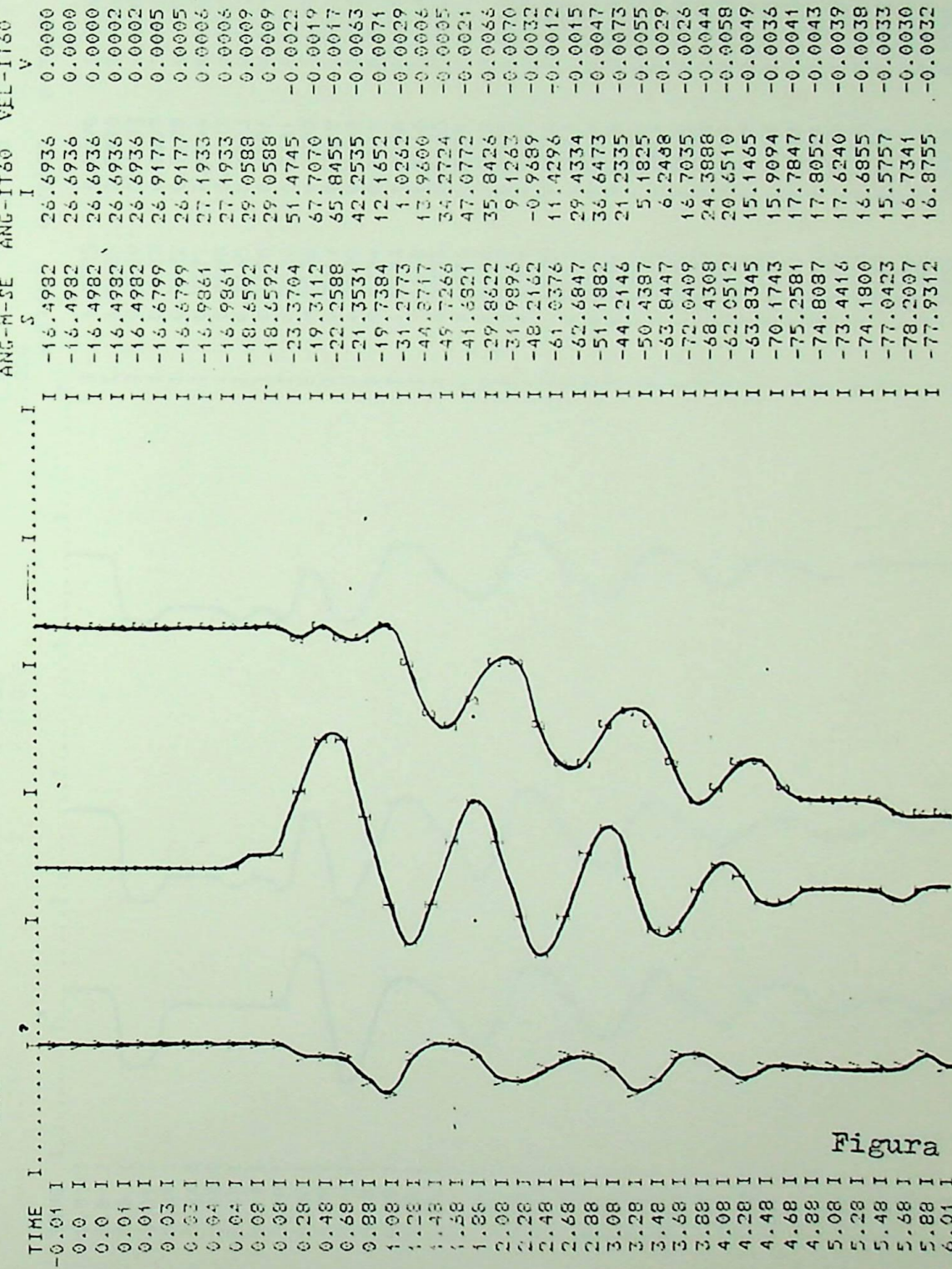


Figura 5.7-A

\*1991-CARGA LEVE\*JTA50=6000/JTA60=3880 MWMC/CE+SA C/MG  
 \*CC1FTF750KV C/FERDA 1LT IIA7-TF C/PC0=0 30MS\*MRAS

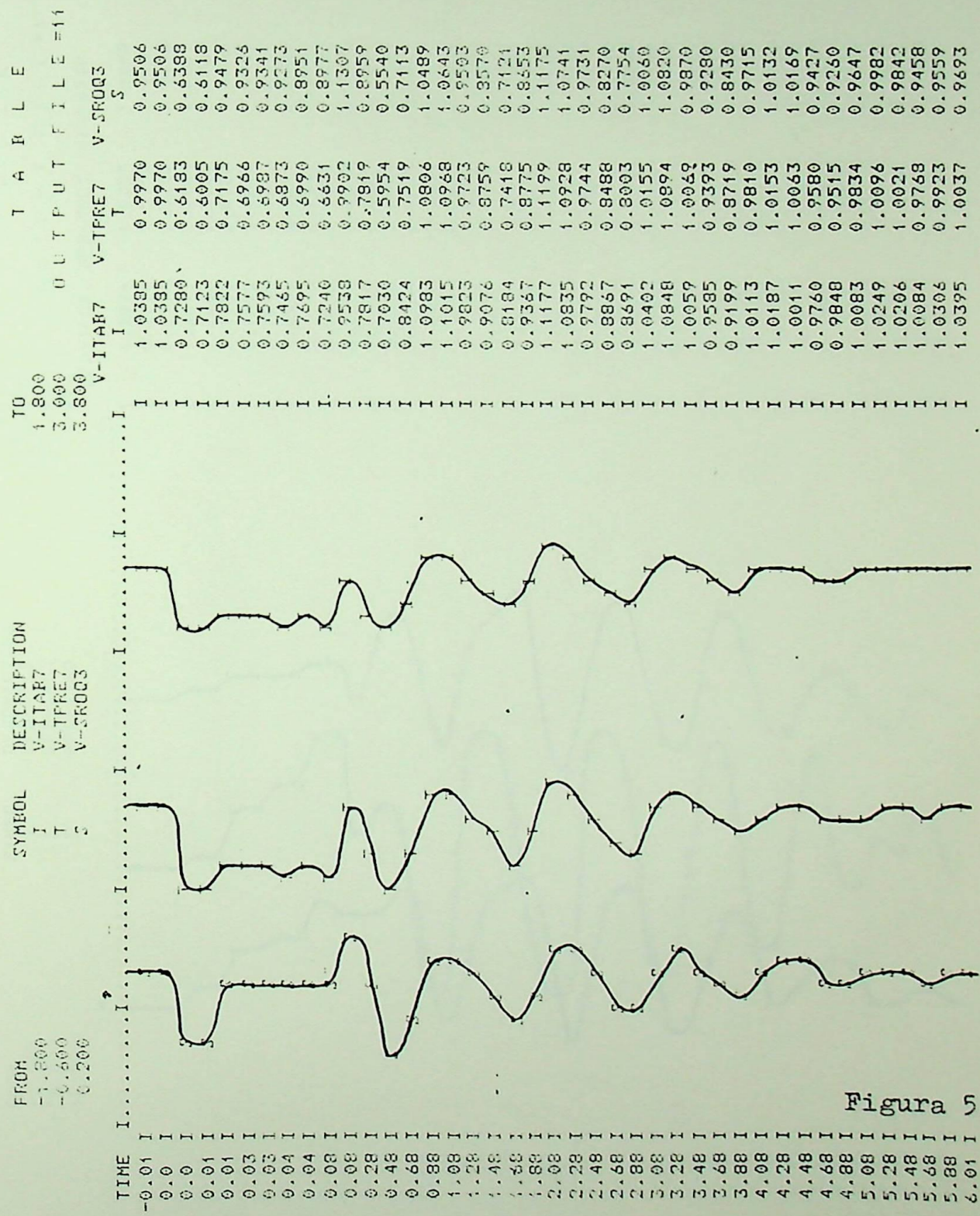


Figura 5.7-B

\*1991-CARGA LEVENTIA50=6000/JTA60=3880 MMKC/CE+SA C/MG  
 #CC1F750KV C/PERDA 1LT I1AB-TF C/FCC=0 30MS\*MR05

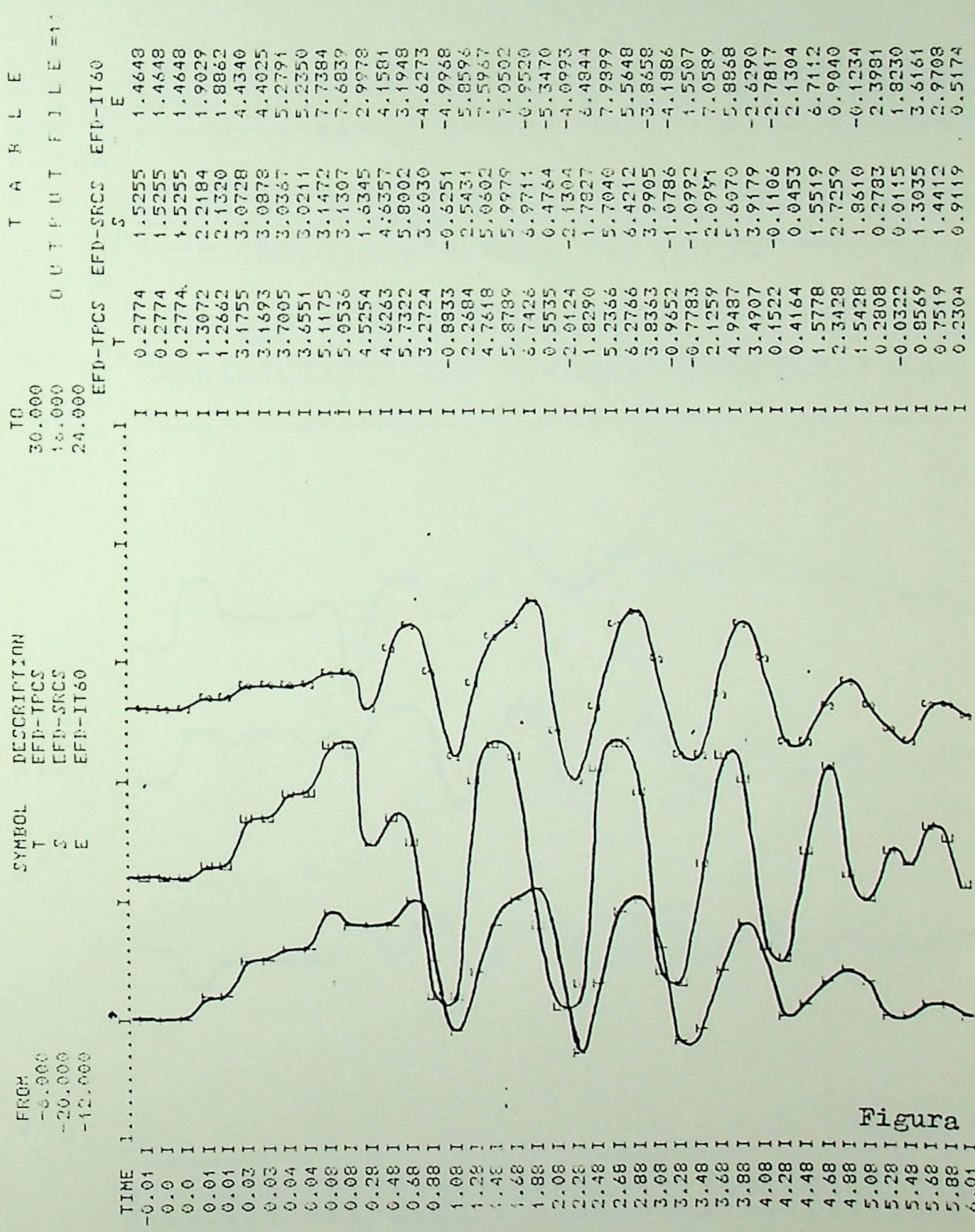


Figura 5.7-C

\*1991-CARGA LEVE\*IT450=6000/IT460=3880 MW\*CE+SA C/MG  
 \*CC1FTF750KV C/PERDA 1LT ITAR-TF C/PCC=0 30MS\*MRAS

FROM -30.000 TO 210.000  
 -120.000 120.000  
 -17.000 6.000

SYMBOL DESCRIPTION  
 F P-IT60  
 Q Q-IT60  
 T Q-TFCS

OUTPUT FILE=11

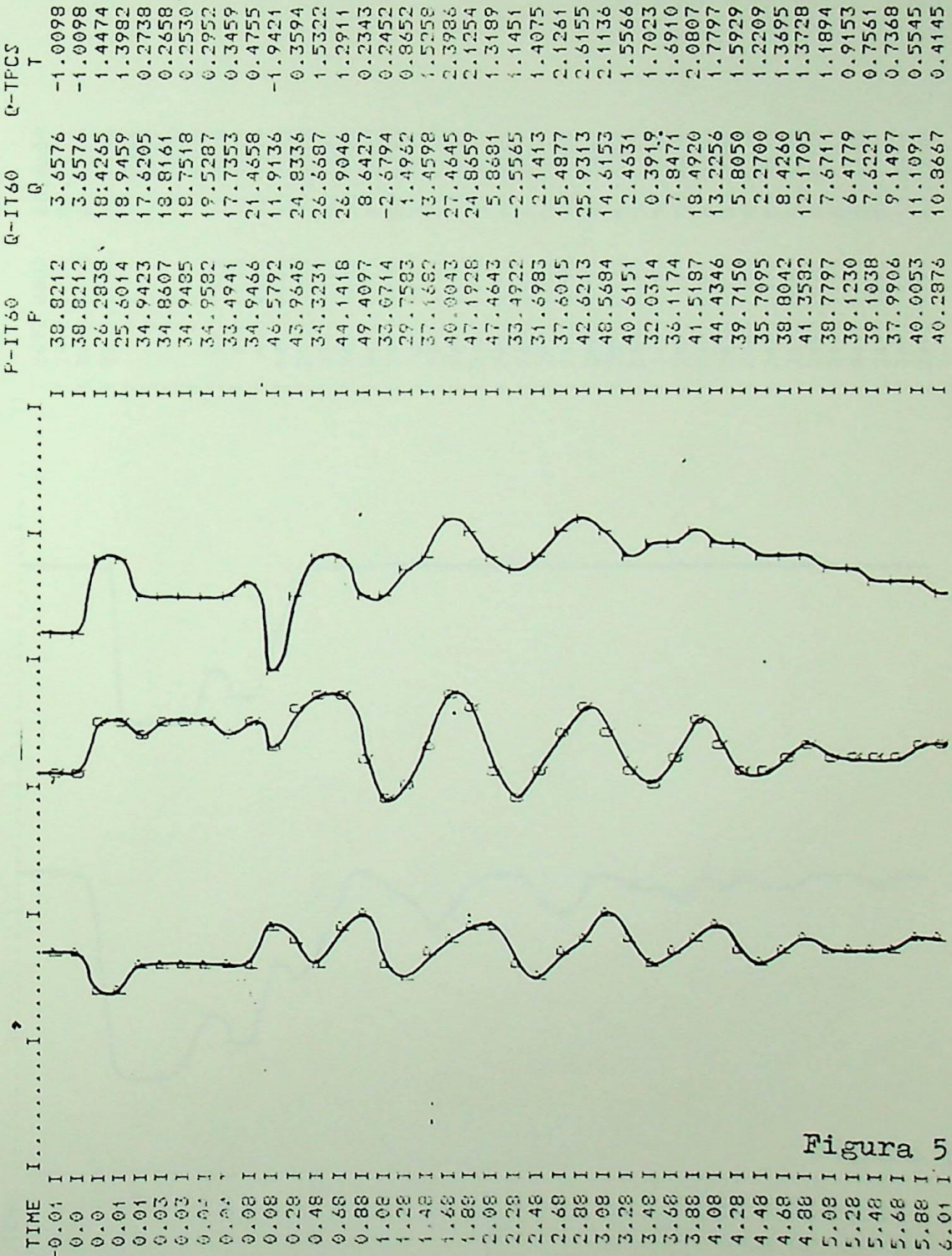


Figura 5.7-D

\*1991-CARGA LEVE\*ITA50=5000/ITA60=3880 MWKC/CE+SA C/MG  
 \*CCIFTP750KV C/PERDA 1LT ITAB-TF C/PCC=0 30MS\*MRAS

TO OUTPUT FILE=11

SYMBOL DESCRIPTION  
 I IDC1  
 F P-II50

FROM  
 \*\*\*\*\*  
 -30.000

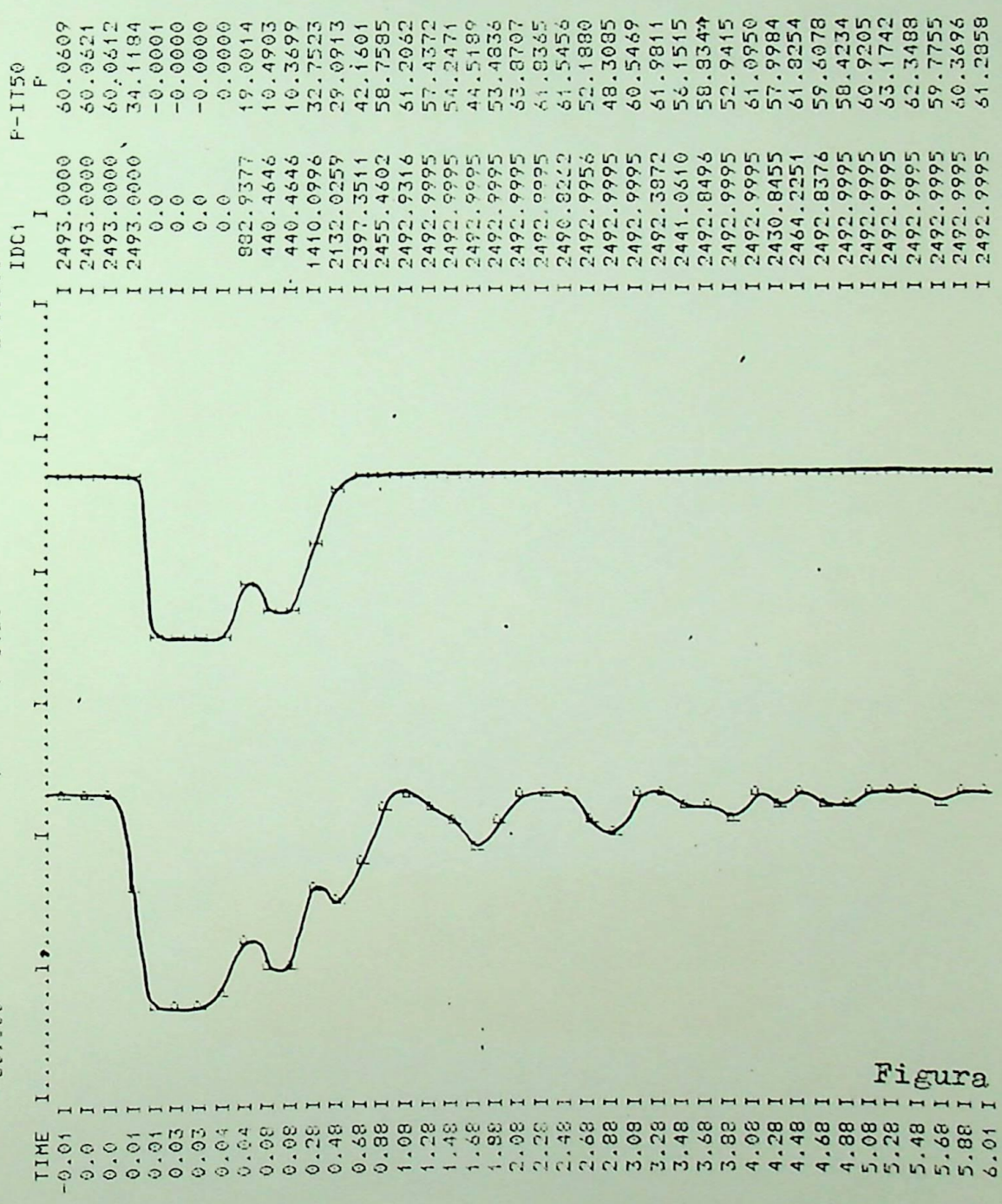


Figura 5.7-E

\*1991-CARGA LEVE\*ITA50=6000/ITA60=3880 MW\*CE+SA C/MG  
 \*CC1FTF750KV C/PERDA 1LT IAR-TP C/PCC=0 30MS\*MKAS

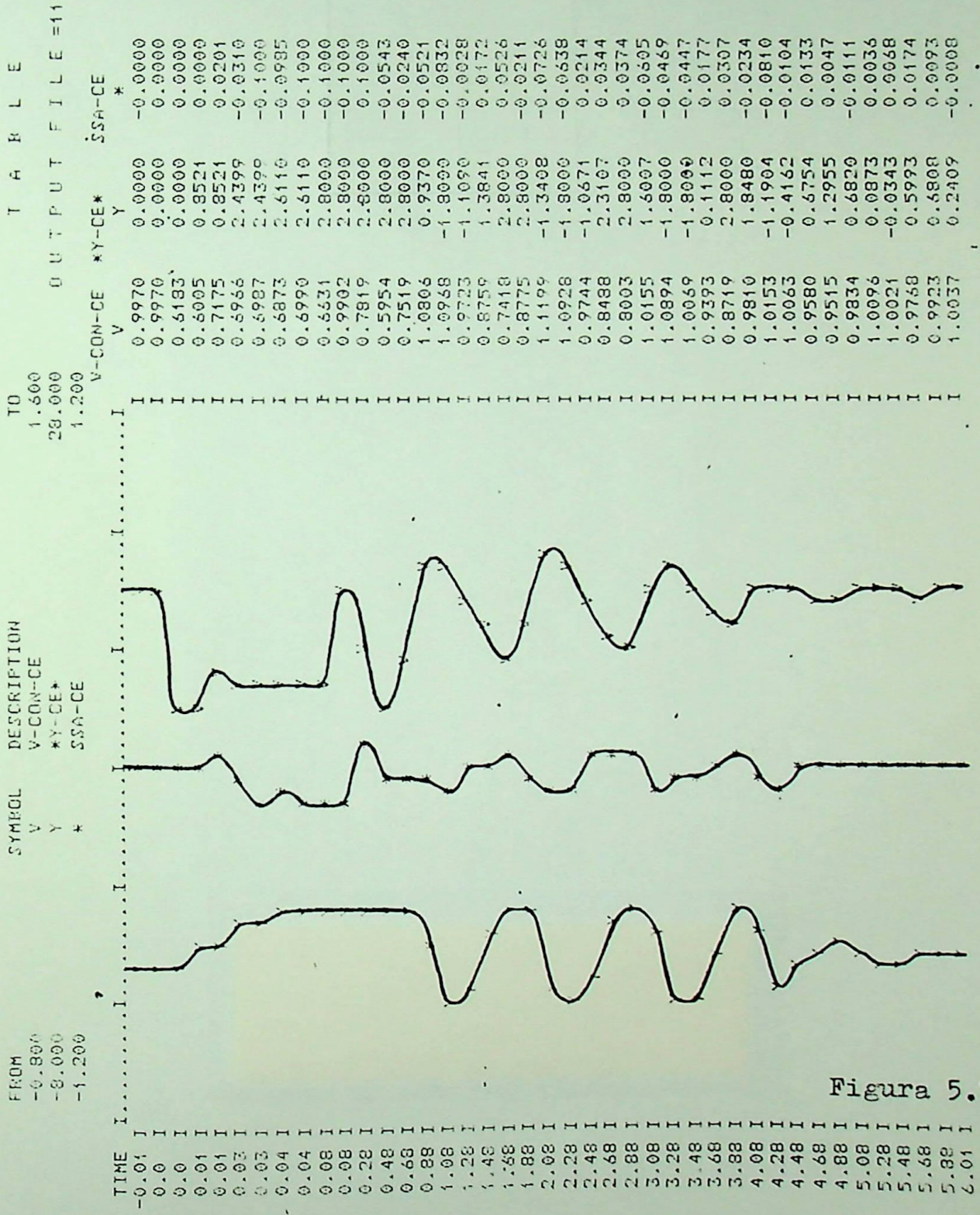


Figura 5.7-F

