

Este exemplar corresponde a redação final  
da tese defendida por Julio Borges de Souza e  
aprovada pela Comissão Julgadora em 07/05/86.

*Julio Borges de Souza*

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INFLUENCIA  
DE ELOS CC NA DINAMICA DE SISTEMAS CA,  
ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO DIGITAL.**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INFLUENCIA  
DE ELOS CC NA DINAMICA DE SISTEMAS CA,  
ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO DIGITAL.

JULIO BORGES DE SOUZA

ORIENTADORES :

Prof. Dr. José Carlos de Oliveira

Prof. Dr. André Luís Morelato França

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

- Abril 1986 -

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

Dedico este trabalho  
a meu pai (in memoriam)  
e a minha mãe.

## AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. José Carlos de Oliveira, por sua orientação, incentivo e amizade dedicados durante todo o nosso convívio.
- Ao Prof. Dr. André Luís Morelato França, por sua orientação, estímulo e compreensão, sem os quais este trabalho não teria condições de ser realizado.
- Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e do Núcleo de Processamento de Dados da Universidade Federal de Uberlândia, pelo auxílio técnico e pela amizade.
- Ao Eiji, pela dedicação com que executou os desenhos.
- À Universidade Federal de Uberlândia pela permissão para usar seu Centro de Processamento de Dados.
- À CAPES/PICD pelo apoio financeiro.
- À Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, através os Professores do DEE por possibilitarem meu afastamento das atividades didáticas.
- A todos aqueles, companheiros e amigos, que, de uma forma ou de outra, amenizaram as dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho, oferecendo-me seu carinho e seu incentivo.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o estudo da influência de elos CC na dinâmica de sistemas CA.

Para tanto são pesquisados e implementados vários modelos visando a modulação da potência ativa transmitida pelo elo e também a modulação do ângulo de extinção da inversora.

É também investigado o efeito da reatância do sistema CA sobre a reatância de comutação das conversoras e sobre o cálculo das potências requeridas pelas mesmas.

Casos práticos são simulados, analisados e discutidos, concluindo-se a respeito da eficiência das modelagens apresentadas e conseqüente efeito sobre o amortecimento das oscilações e controle de frequência.

## **ABSTRACT**

This work aims to study the effect of HVDC systems upon the dynamic of AC systems.

In this way, several models which use dc power modulation and extinction angle control are considered and included into a digital transient stability programme.

Apart from this, the effect of the AC system commutation reactance on the active and reactive AC power calculations is investigated using a digital computer programme.

Practical studies are then carried out and the corresponding results are analysed so to conclude about the required damping introduced by the functions included on the oscillations and frequency control.

## INDICE.

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>Capítulo I - Introdução</b> -----  | 1    |
| <br>  |      |
| <b>Capítulo II - A Reatância de comutação e seus efeitos sobre a<br/>operação dos conversores</b> -----                               | 5    |
| 2.1 - Introdução -----  | 5    |
| 2.2 - Considerações físicas sobre<br>a reatância de comutação-----  | 7    |
| 2.3 - Avaliação prática da relação $X_{ss}/X_t$ -----   | 12   |
| 2.4 - Método matricial e procedimento de cálculo -----  | 14   |
| 2.5 - Algoritmo computacional para<br>cálculo da reatância de comutação -----   | 15   |
| 2.6 - Casos analisados -----  | 16   |
| 2.7 - Análise operacional comparativa<br>entre estações conversoras -----   | 16   |
| 2.8 - Análise comparativa entre dois estudos<br>de estabilidade transitória utilizando-se<br>$X_c = X_t$ e $X_c = X_t + X_{ss}$ ----- | 19   |
| <br>  |      |
| <b>Capítulo III - Controle de Sistemas de Transmissão<br/>em Corrente Contínua</b> -----  | 24   |
| 3.1 - Característica básica de controle -----   | 24   |
| 3.1.1 - O controle manual e suas limitações -----   | 26   |
| 3.1.2 - O controle automático -----   | 28   |
| 3.1.2.1 - Características individuais do<br>retificador e do inversor -----   | 29   |
| 3.1.3 - Dispositivos do sistema de controle -----   | 33   |
| 3.1.3.1 - Controle do ângulo de<br>ignição constante - CIA -----  | 33   |

|  |    |
|--|----|
| 3.1.3.2 - Controle da corrente                             |    |
| constante - CCC -----                                      | 33 |
| 3.1.3.3 - Controle do ângulo de                            |    |
| extinção constante - CEA -----                             | 35 |
| 3.2 - Característica de controle modificada -----          | 37 |
| 3.2.1 - Ângulo de ignição constante no inversor ----       | 37 |
| 3.2.2 - Controle do erro da corrente -----                 | 37 |
| 3.2.3 - Limitador da ordem de corrente                     |    |
| dependente da tensão -----                                 | 38 |
| 3.2.4 - Unidade de bloqueio e desbloqueio -----            | 40 |
| 3.3 - Sistema de controle completo -----                   | 41 |
| 3.4 - Modulação da potência cc -----                       | 42 |
| 3.5 - Definição da corrente ordem -----                    | 43 |
| 3.5.1 - Sinal definido pelo CDC -----                      | 44 |
| 3.5.2 - Sinal de amortecimento -----                       | 45 |
| 3.5.3 - Sinal para correção da frequência -----            | 46 |
| 3.6 - Efeito simultâneo dos vários sinais de controle ---- | 47 |
| 3.7 - Funções de transferência -----                       | 48 |
| 3.7.1 - Modelo I -----                                     | 48 |
| 3.7.2 - Modelo II -----                                    | 49 |
| 3.7.3 - Modelo III -----                                   | 50 |
| 3.7.4 - Modelo IV -----                                    | 50 |
| 3.8 - Modulação do ângulo de extinção -----                | 51 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Capítulo IV - Implementação digital das funções de</b> |           |
| <b>amortecimento e controle de frequência -----</b>       | <b>53</b> |
| 4.1 - Introdução -----                                    | 53        |
| 4.2 - Considerações sobre um                              |           |
| sistema típico a ser simulado -----                       | 54        |
| 4.2.1 - Análise para o retificador com                    |           |
| resultados estendidos para o inversor ----                | 56        |

|   |    |
|---|----|
| 4.2.2 - Método trapezoidal implícito -----  | 58 |
| 4.3 - Desenvolvimento das funções de<br>amortecimento e controle de frequência -----  | 61 |
| 4.3.1 - Modelo I -----  | 61 |
| 4.3.2 - Modelo II -----   | 66 |
| 4.3.3 - Modelo III -----  | 71 |
| 4.3.4 - Modelo IV -----   | 73 |
| 4.3.5 - Modelo V -----  | 77 |
| 4.4 - Subrotinas alteradas para a<br>implementação das funções de transferência ----- | 79 |
| 4.4.1 - Subrotina Eloip -----   | 79 |
| 4.4.2 - Subrotina Elocon -----  | 79 |
| 4.4.3 - Subrotina Elotra -----  | 80 |
| 4.4.4 - Subrotina Elout -----   | 80 |

**Capítulo V - Desempenho das funções de**

|  |     |
|--|-----|
| <b>amortecimento e controle</b> -----                    | 81  |
| 5.1 - Introdução -----                                   | 81  |
| 5.2 - Características do sistema simulado -----          | 81  |
| 5.2.1 - Diagrama unifilar -----                          | 81  |
| 5.2.2 - Parâmetros do sistema -----                      | 83  |
| 5.2.3 - Fluxo de carga ca-cc -----                       | 83  |
| 5.2.4 - Modelagem das cargas -----                       | 83  |
| 5.3 - Simulações realizadas -----                        | 91  |
| 5.3.1 - Estudos de amortecimento<br>das oscilações ----- | 91  |
| 5.3.1 - A - Caso 1 -----                                 | 91  |
| 5.3.1 - B - Caso 2 -----                                 | 92  |
| 5.3.1 - C - Caso 3 -----                                 | 99  |
| 5.3.1 - D - Caso 4 -----                                 | 99  |
| 5.3.1 - E - Caso 5 -----                                 | 103 |

|  |            |
|--|------------|
| 5.3.1 - F - Caso 6 -----   | 110        |
| 5.3.2 - Estudo de controle da frequência -----                                   | 110        |
| 5.3.2 - A - Caso 1 -----   | 110        |
| 5.3.2 - B - Caso 2 -----   | 114        |
| 5.3.2 - C - Caso 3 -----   | 120        |
| 5.3.2 - D - Caso 4 -----   | 124        |
| 5.3.2 - E - Caso 5 -----   | 124        |
| 5.3.2 - F - Caso 6 -----   | 131        |
| 5.3.3 - Exemplo de estabilização proporcionada<br>pela modulação do elo cc ----- | 131        |
| <b>Capítulo VI - Conclusões -----</b>  | <b>140</b> |
| <b>Referências Bibliográficas -----</b>  | <b>144</b> |

## CAPITULO 1

### **INTRODUÇÃO.**

O interesse na transmissão de energia elétrica por sistemas de corrente contínua em alta tensão, tem crescido consideravelmente nas últimas décadas, devido a necessidade cada vez maior da transmissão de grandes quantidades de energia a longas distâncias, e das boas perspectivas da transmissão cc como uma alternativa para a transmissão ca.

Ultimamente a transmissão em corrente contínua tem ido muito além do objetivo do projeto original de transmissão submarina interligando, em 1954, a ilha de Gotland à Suécia. Atualmente ela inclui, além de transmissão por cabos, interligações através de longas linhas de transmissão, bem como a ligação assíncrona entre sistemas ca.

Com a implantação do primeiro sistema de transmissão em corrente contínua no Brasil, projeto Itaipu, e a política energética de exploração de recursos hídricos, distantes dos principais centros de consumo, acredita-se que, para o futuro, novas ligações em corrente contínua, se farão presentes no sistema energético brasileiro. Estes fatores evidenciam a necessidade de estudos mais detalhados sobre esta forma de transmissão de energia, de modo que, a médio prazo, se possa atingir um domínio maior desta técnica.

Destaca-se, ainda, o fato do rápido tempo de resposta da ação de controle de um elo cc, constituir-se numa importante característica que o distingue dos sistemas ca. Um sistema cc típico é capaz de alterar sua potência, de um valor correspondente à sua potência nominal, com um tempo de resposta da ordem de 100 ms. Esta velocidade de resposta, extremamente rápida, pode ser utilizada para modular a potência transmitida pelo elo cc, segundo as necessidades dos sistemas ca, de forma a amortecer suas oscilações ou controlar suas frequências. Esta característica tem sido reconhecida há muito tempo (10, 11), mas somente

para os sistemas mais recentes ela tem sido aplicada com sucesso. Como exemplos destas operações, tem-se as já consagradas experiências com os sistemas Eel River - Nelson River, no Canadá, e o Pacific Intertie, nos Estados Unidos (12, 13).

Embora seja improvável, no momento, que um elo cc seja construído somente com o propósito de amortecer as oscilações dos sistemas ca, esta função pode ser de fundamental importância para a implantação, ou não, de um sistema cc.

Atualmente, os estudos de estabilidade de grandes sistemas elétricos de potência dependem, quase que inteiramente, da simulação digital do comportamento dinâmico do sistema. A simulação implica na existência de modelos matemáticos de uma grande variedade de componentes, do conhecimento de dados dos diversos parâmetros que constituem um sistema de potência e, finalmente, de um bom programa para computador.

Na análise de estabilidade transitória dos sistemas ca-cc, existe a necessidade de se simular o comportamento transitório do elo cc no mesmo nível de precisão dos componentes do sistema ca. Isto exige a sua formulação com um modelo mais preciso, de forma a cobrir todas as características e particularidades de sua operação.

Este trabalho tem por objetivo dar continuidade ao desenvolvimento de um programa para computador digital, associado a estudos dinâmicos com a incorporação de elos de corrente contínua (13).

No programa elaborado, cujos detalhes são descritos na citada referência, a preocupação maior foi a incorporação de um modelo completo da parte de potência e dos dispositivos de controle/disparo. Embora os aspectos relacionados ao controle do amortecimento das oscilações e de frequência tenham sido destacados em sua versão original, o programa aceita apenas uma única função de amortecimento. Cabe, todavia, ressaltar que várias outras propostas tem sido feitas e divulgadas na literatura especializada (8, 9, 10, 11). Procurando contribuir neste sentido,

este trabalho tem como uma de suas metas, investigar, modelar, implementar e analisar o desempenho de sistemas elétricos de potência com as diversas funções de amortecimento e controle de frequência propostas.

Além dos aspectos acima citados, no decorrer dos estudos constatou-se, e achou-se por bem, considerar uma limitação imposta ao programa original no que diz respeito à reatância de comutação. Objetivando maior simplicidade nos estudos, adotava-se a reatância de comutação como sendo constituída apenas pela reatância de dispersão do denominado transformador-conversor. A proposta seria compatível com uma boa aproximação desde que os barramentos fossem suficientemente fortes. Todavia, outras situações poderiam levar a erros significativos nos resultados obtidos. Assim, uma outra proposta deste trabalho, que de fato se apresenta com características bastante distintas da anterior, foi a de investigar o citado parâmetro. Em outras palavras, isto implica na verificação do efeito de barramento finito na operação das pontes conversoras.

Definidos estes objetivos, a dissertação passa a ter uma estrutura, conforme descrita a seguir.

No capítulo II efetua-se considerações físicas sobre a composição da reatância de comutação, elabora-se um programa para computador digital que permite calcular esta reatância, levando-se em conta todo o sistema ativo atrás do transformador-conversor, além de um outro que permite calcular a operação do elo cc (P e Q) e com estas informações processa-se inúmeros casos práticos com o objetivo de concluir sobre a importância do efeito da simplificação adotada.

No capítulo III é apresentada a teoria básica do controle de sistemas de transmissão em corrente contínua, os dispositivos utilizados nos sistemas de controle, o sistema de controle completo, bem como são realizadas considerações a respeito da modulação da potência cc. Ainda neste capítulo, são apresentadas e discutidas as funções de transferência

utilizadas para se amortecer as oscilações e para se controlar a frequência, fornecidas pela literatura.

O capítulo IV esclarece a filosofia de se tratar o elo cc no programa de estabilidade e o método utilizado para se processar a integração das equações diferenciais. Este capítulo traz, ainda, o desenvolvimento das funções de transferência para o amortecimento e controle da frequência e cita as subrotinas alteradas para que estas funções pudessem ser implementadas no programa digital.

No capítulo V apresenta-se as características do sistema estudado, além das simulações realizadas, seus resultados e a análise dos mesmos.

Finalmente no capítulo VI são realizados comentários e enunciadas conclusões de ordem geral, além de se apresentar sugestões para trabalhos futuros, baseadas na experiência adquirida ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

## CAPITULO 2

### A REATANCIA DE COMUTAÇÃO E SEUS EFEITOS SOBRE A OPERAÇÃO DOS CONVERSORES

#### 2.1 - Introdução

Denomina-se comutação o processo de transferência da corrente de um tiristor, que está saindo de operação, para um outro tiristor que está entrando em operação, de um mesmo lado da ponte conversora.

Para tanto, seja a ponte conversora ilustrada na figura 2.1, onde se considera um instante no qual o tiristor 1 esteja conduzindo. Portanto, a tensão  $e_a$  é superior às tensões  $e_b$  e  $e_c$ . Quando a tensão  $e_b$  se torna superior à tensão  $e_a$ , o tiristor 3 estará apto a entrar em operação bastando, para tanto, que haja sinal apropriado no gatilho do mesmo.

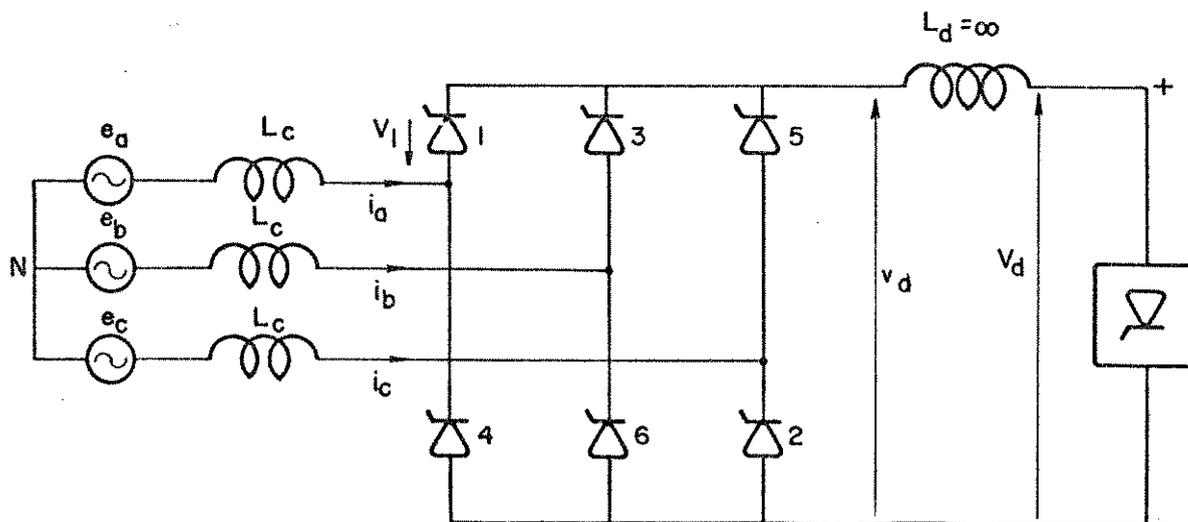


Figura 2.1 - Circuito equivalente para a ponte conversora.

Quando o tiristor 3 entra em operação, tem-se o circuito equivalente ilustrado na figura 2.2. Devido à indutância existente no circuito, a corrente  $i_1$  não atingirá o valor zero, nem a corrente  $i_3$  atingirá o valor  $I_d$ , instantaneamente.

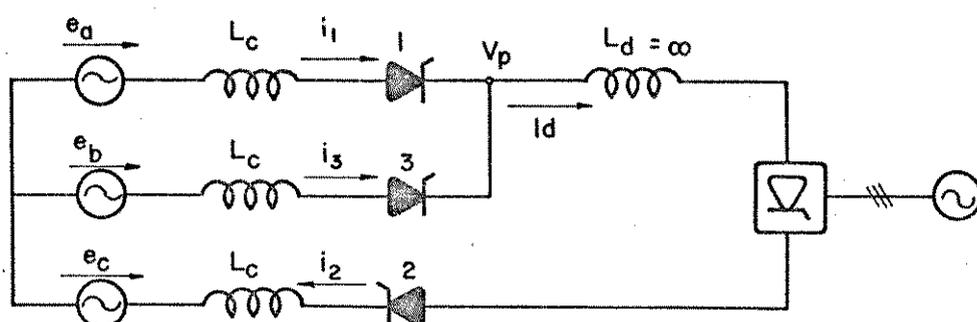


Figura 2.2 - Circuito da ponte conversora durante a comutação da válvula 1 para a válvula 3.

O processo de comutação da corrente  $I_d$ , do tiristor 1 para o tiristor 3 se dará, portanto, em um intervalo diferente de zero. A este intervalo de tempo dá-se o nome de "tempo de comutação", ao qual corresponde um certo ângulo denominado "ângulo de comutação" ( $\mu$ ), dado pela expressão 2.1, onde  $\omega$  é a frequência angular do sistema ca e  $t_c$  é o tempo de comutação.

$$\mu = \omega.t_c \quad (2.1)$$

Devido o fato da comutação da corrente não se processar instantaneamente, ocorre uma queda de tensão, de característica indutiva, na tensão dos terminais cc do conversor. Esta tensão, usualmente denominada tensão cc, é diretamente responsável pela corrente no Elo cc. Portanto, para se calcular as tensões e a corrente no Elo cc, é necessário conhecer-se o valor da reatância devida à indutância do sistema ca, vista pelos terminais do conversor. Naturalmente, a precisão dos resultados de qualquer estudo depende, acima de tudo, do refinamento da modelagem dos componentes utilizados. Assim, o conhecimento e utilização da indutância de comutação de forma a mais realista possível virá, sem dúvida, contribuir neste sentido.

## 2.2 - Considerações Físicas Sobre a Reatância de Comutação

O caso mais geral possível de conexão de pontes conversoras é o de  $n$  pontes em paralelo no lado ca. Este caso está ilustrado na figura 2.3.

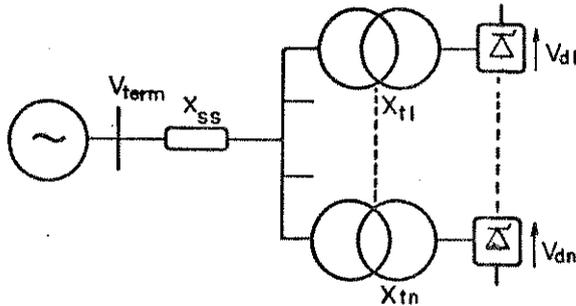


Figura 2.3 -  $N$  pontes conversoras conectadas em paralelo no lado ca.

Se não existe razoável filtragem da tensão no barramento primário dos transformadores, uma tensão puramente senoidal só é encontrada atrás da reatância do sistema e, portanto, esta reatância irá influenciar no processo de comutação.

A reatância de comutação para cada ponte é, genericamente, dada, de acordo com a referência 1, pela expressão 2.2.

$$X_{cj} = X_{ss} + X_{tj} \quad (2.2)$$

Sendo que :

$X_{ss}$  - Parcela de reatância associada ao equivalente do sistema atrás do transformador do conversor.

$X_{tj}$  - Reatância de dispersão do transformador que alimenta a ponte  $j$ .

Do lado cc as pontes podem estar conectadas em série ou em paralelo e, normalmente, para efeito de cálculo, as estações conversoras são representadas por uma única ponte equivalente.

Se as pontes tiverem transformadores com deslocamentos de fases iguais, suas comutações irão ocorrer nos mesmos instantes e isto deve

ser levado em consideração no cálculo da reatância de comutação equivalente, pois, através desta estarão se estabelecendo  $n$  comutações simultâneas.

Por outro lado, se as pontes tiverem transformadores com diferentes deslocamentos de fase, suas comutações irão ocorrer em instantes diferentes.

No entanto, o efeito sobre a tensão cc média, será o mesmo nos dois casos, como mostra a figura 2.4.

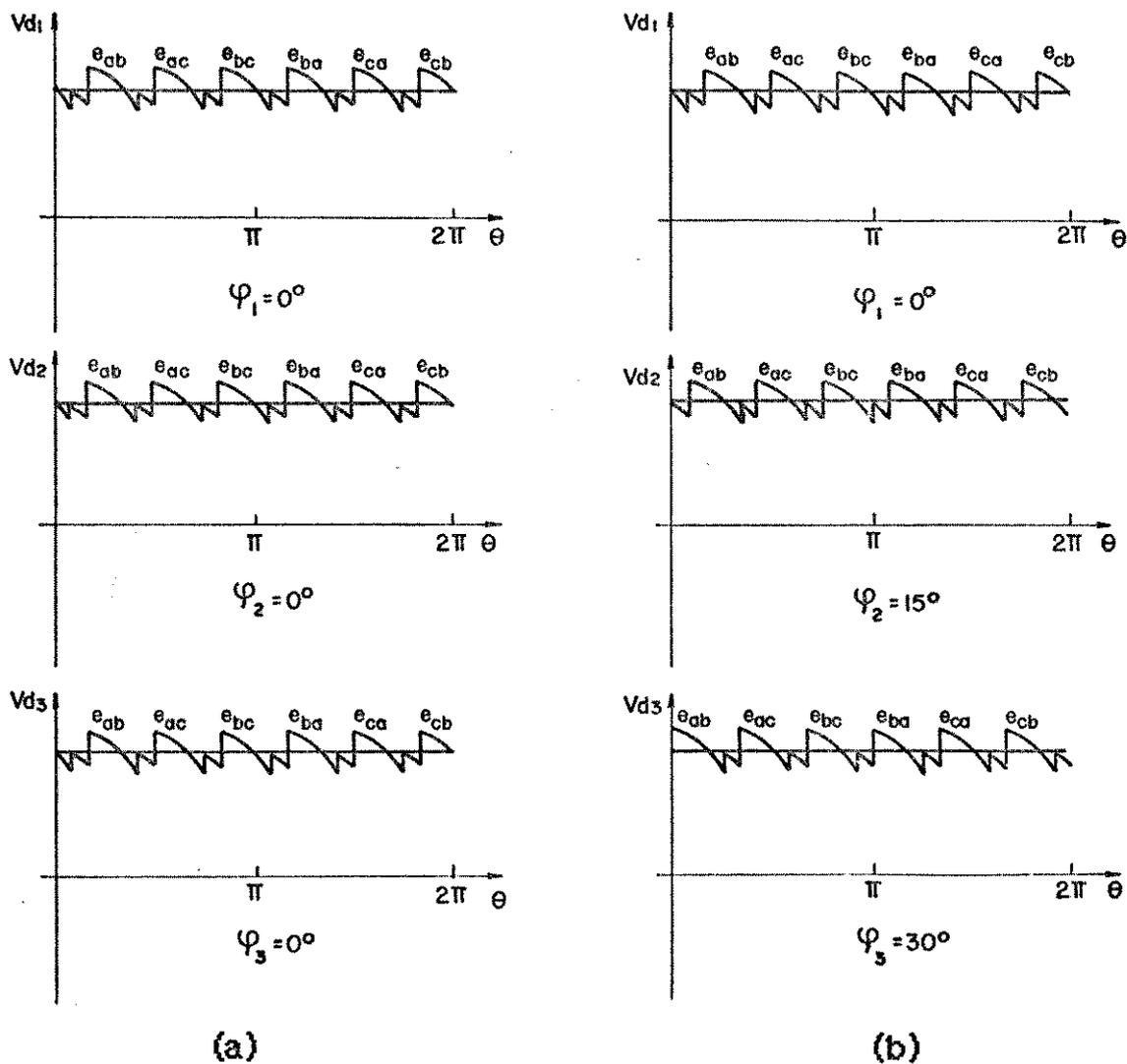


Figura 2.4 - Efeito da reatância de comutação com 3 pontes.

- a) mesmo deslocamento de fase.
- b) diferentes deslocamentos de fase.

A reatância de comutação da ponte equivalente para  $K_s$  pontes, conectadas em série no lado cc, pode ser obtida analisando-se a figura 2.5.

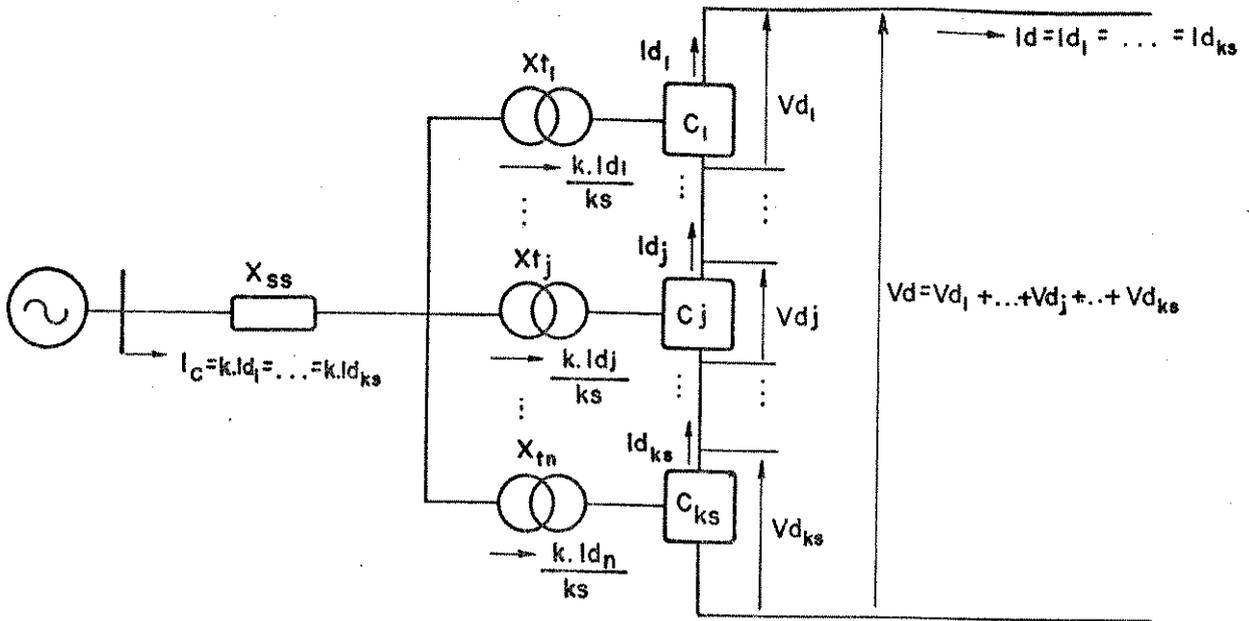


Figura 2.5 - \$K\_s\$ pontes conectadas em série no lado cc.

A queda de tensão total, devida ao processo de comutação é dada pela expressão 2.3.

$$\Delta V_d = \Delta V_{d1} + \dots + \Delta V_{dj} + \dots + \Delta V_{d_{K_s}} \quad (2.3)$$

Onde,  $\Delta V_{dj}$  (queda de tensão na ponte \$j\$) é dada por 2.4.

$$\Delta V_{dj} = \Delta V_{dx_{tj}} + \Delta V_{dx_{ss}} \quad (2.4)$$

Sendo,

$\Delta V_{dx_{tj}}$  - Parcela da queda de tensão na ponte \$j\$, devida à reatância de dispersão do transformador \$j\$.

$\Delta V_{dx_{ss}}$  - Parcela da queda de tensão na ponte \$j\$, devida à reatância do sistema.

Estas parcelas são dadas pelas expressões 2.5 e 2.6.

$$\Delta V_{dx_{tj}} = X_{tj} \cdot K \cdot I_{dj} / K_s \quad (2.5)$$

$$\Delta V_{dx_{ss}} = X_{ss} \cdot K \cdot I_{dj} \quad (2.6)$$

Onde \$K\$ é uma constante de proporcionalidade.

Portanto,

$$\Delta V_{d_j} = (X_{t_j}/K_s + X_{ss})K.I_{d_j} \quad (2.7)$$

Como  $X_{t_j}$  e  $I_{d_j}$  são constantes para todo  $j$ , tem-se 2.8 e 2.9.

$K_s$

$$\Delta V_d = \sum_{j=1} (X_{t_j}/K_s + X_{ss})K.I_{d_j} = K_s.(X_t/K_s + X_{ss})K.I_d \quad (2.8)$$

$j=1$

$$\Delta V_d = (X_t + K_s X_{ss})K.I_d \quad (2.9)$$

De onde se obtém a expressão 2.10.

$$X_{csérie} = X_t + K_s X_{ss} \quad (2.10)$$

De forma análoga, pode-se calcular a reatância de comutação da ponte equivalente para  $K_p$  pontes conectadas em paralelo no lado cc, analisando-se a figura 2.6.

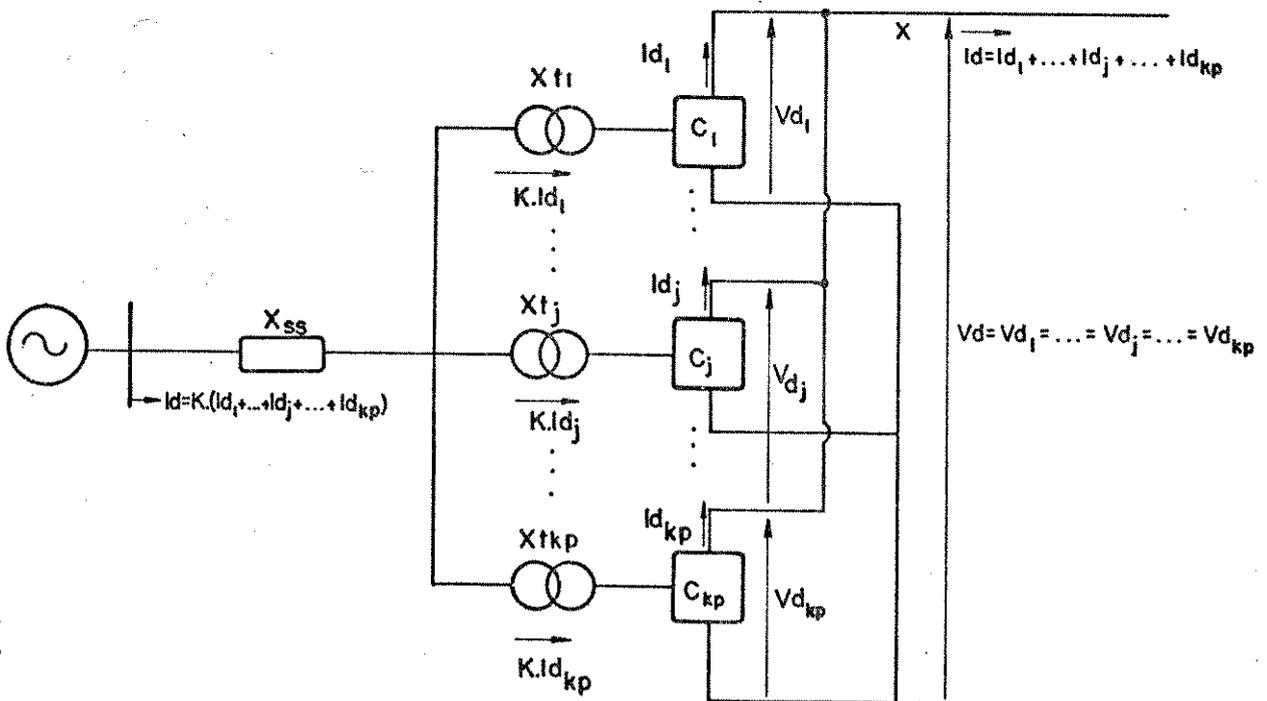


Figura 2.6 -  $K_p$  pontes conectadas em paralelo no lado cc.

Como se pode constatar pela figura 2.6, a queda de tensão total é igual à queda de tensão em cada ponte, que é dada pela expressão 2.11.

$$\Delta V_d = \Delta V_{d1} = \dots = \Delta V_{dj} = \dots = \Delta V_{dkp} \quad (2.11)$$

Seguindo-se um raciocínio semelhante ao descrito anteriormente, tem-se as seguintes expressões:

$$\Delta V_{dj} = \Delta V_{dX_{tj}} + \Delta V_{dX_{ss}} \quad (2.12)$$

$$\Delta V_{dX_{tj}} = X_{tj}.K.Id_j \quad (2.13)$$

$$\Delta V_{dX_{ss}} = X_{ss}.K.Id \quad (2.14)$$

$$Id_j = Id/K_p \quad (2.15)$$

$$\Delta V_{dj} = X_{tj}.K.Id/K_p + X_{ss}.K.Id \quad (2.16)$$

$$\Delta V_d = \Delta V_{dj} = (X_{tj}/K_p + X_{ss}).K.Id \quad (2.17)$$

Portanto, pode-se concluir que  $X_{cparalelo}$  é dada por 2.18.

$$X_{cparalelo} = X_t/K_p + X_{ss} \quad (2.18)$$

Os comentários que se seguem referem-se à natureza física destas reatâncias. Inicialmente deve-se observar que  $X_{tj}$  é a reatância de dispersão dos transformadores que alimentam diretamente a correspondente ponte de 6 pulsos. Quanto a  $X_{ss}$ , é necessário ressaltar que a mesma representa o equivalente ativo de Thevenin, isto é, a reatância vista entre as fontes de fem e o barramento dos conversores. Assim, esta envolve não apenas a reatância equivalente entre as fems dos geradores, mas também, de todo e qualquer outro elemento paralelo ativo. Dentre estes, destaca-se a existência de compensadores síncronos no barramento dos transformadores, com o objetivo de se compensar a potência reativa consumida pelos conversores. Observando-se o fundamento físico da comutação, constata-se que o processo envolve somente uma fração de um ciclo. Portanto, para cálculo da reatância de comutação, devem ser consideradas as reatâncias subtransitórias dos geradores e compensadores síncronos.

De acordo com a referência 2, a reatância de comutação está intimamente relacionada com a capacidade de curto-circuito do sistema, no barramento dos conversores. Portanto, para sistemas considerados fracos, isto é, com baixa capacidade de curto-circuito, a reatância do sistema terá um valor apreciável para efeito de comutação.

Estes efeitos em conjunto fazem com que a simples adoção da reatância de dispersão dos transformadores pode, para certas situações, comprometer a exatidão dos estudos. Assim, um tratamento mais detalhado não apenas caracterizará melhor o processo, mas também fornecerá subsídios para uma análise comparativa entre a utilização de uma reatância simplificada e uma mais completa.

### 2.3 - Avaliação Prática da Relação $X_{\text{sistema}}/X_{\text{transformador}}$ .

Inicialmente, seja a figura 2.7, que representa o arranjo básico de uma estação conversora e seu sistema ca de alimentação.

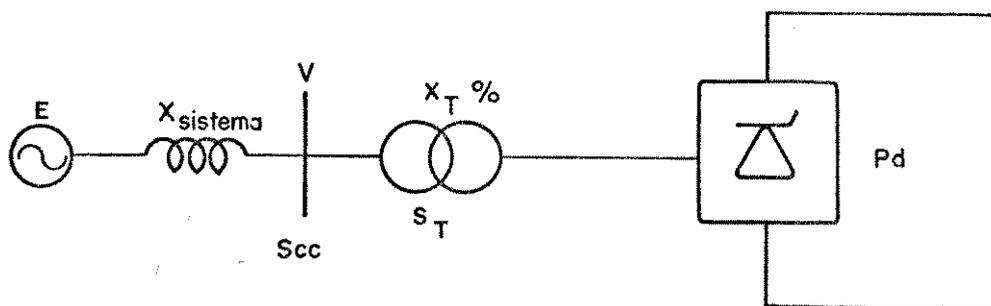


Figura 2.7 - Estação conversora e sistema ca.

A experiência tem demonstrado que, para a operação satisfatória da estação conversora e de seu controle, a relação entre o nível de curto-circuito do barramento ca ( $S_{cc}$ ) e a potência a ser transmitida ( $P_d$ ), chamada Relação de Curto-Circuito (RCC), dada pela expressão 2.19, deve assumir valores característicos.

$$RCC = S_{cc}/P_d$$

(2.19)

Para os primeiros sistemas em corrente contínua colocados em operação, estabeleceu-se que, em função da qualidade mais restrita dos equipamentos disponíveis na época, um número  $SCR > 15$  seria aceitável. Isto, em outras palavras, indica a necessidade de um sistema bastante forte para que o funcionamento da estação conversora seja estável e seguro. Posteriormente, com o aperfeiçoamento dos equipamentos utilizados, um número SCR da ordem de 10 foi aceito e, atualmente valores inferiores a este constituem exemplos de aplicação. Este é, por exemplo, o caso do lado da estação retificadora do sistema Itaipu, onde este número aproxima-se de 2 ou 3.

Para que se tenha um idéia mais física dos elementos acima citados, é conveniente observar a expressão 2.20.

$$S_{cc}[pu] = 1/X_{ss}[pu] \quad (2.20)$$

Assim, considerando-se um sistema que apresente:

$$P_d = 1000 \text{ MW}$$

$$S_t = 1100 \text{ MVA}$$

$$X_t = 8,8\% \text{ (na base do transformador)}$$

$$X_t = 0,008 \text{ pu (na base de 100 MVA)}$$

Se para este sistema definir-se  $RCC = 15$ , então, de acordo com 2.19,  $S_{cc} = 15.000 \text{ MVA}$ , ou,  $S_{cc} = 150 [pu]$  (na base de 100 MVA) e, conforme a expressão 2.20,  $X_{ss} = 0,0067 [pu]$ . Utilizando-se o mesmo procedimento para outros valores de RCC chega-se à tabela 2.1.

Desta forma constata-se que a simples adoção de  $X_t$  como sendo a reatância de comutação conduz, para os casos práticos, a cálculos relativamente imprecisos.

| RCC | Sc(pu) | Xss(pu) | Xt(pu) | Xss/Xt |
|-----|--------|---------|--------|--------|
| 20  | 200    | 0,005   | 0,008  | 0,625  |
| 10  | 100    | 0,010   | 0,008  | 1,250  |
| 5   | 50     | 0,020   | 0,008  | 2,500  |
| 2   | 20     | 0,050   | 0,008  | 6,250  |

Tabela 2.1 - Relação entre Xsistema e Xtransformador em função da RCC.

#### 2.4 - Método Matricial e Procedimento de Cálculo.

O método utilizado para se calcular a reatância de comutação de uma ponte conversora consiste em se reduzir toda a rede, incluindo as reatâncias dos componentes ativos, a uma reatância equivalente de Thevenin vista dos terminais do lado primário do transformador do conversor. Deve-se ter em mente que é necessário executar o mesmo procedimento para cada conversor do sistema cc.

Para se obter este equivalente de Thevenin utiliza-se a matriz admitância da rede, alterada pela inclusão das reatâncias subtransitórias dos componentes ativos nos elementos da diagonal, correspondentes aos barramentos onde estes se encontram.

Injetando-se no barramento onde se encontra o conversor, uma corrente de 1 [pu] e, em todos os outros, uma corrente nula, obtém-se um vetor de tensões, cuja componente relativa ao barramento do conversor corresponde à reatância procurada (3).

Em termos matriciais tem-se a expressão 2.21.

$$[Y_{\text{modificada}}] \cdot [V] = [I_{\text{inj}}] \quad (2.21)$$

Sendo que  $[I_{\text{inj}}]$  é dado pela expressão 2.22.

$$[I_{\text{inj}}] = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ I_c \ 0 \ \dots \ 0]^t \quad (2.22)$$

Resolvendo-se 2.21 para  $I_c = 1[\text{pu}]$ , obtém-se 2.23.

$$[V] = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_c \ \dots \ V_{n-1} \ V_n]^t \quad (2.23)$$

Portanto, de acordo com o exposto anteriormente,  $V_c = X_{th} = X_c$ .

## 2.5 - Algoritmo Computacional Para Cálculo da Reatância de Comutação.

O algoritmo empregado obedece a seguinte estrutura:

- (i) - Leitura dos parâmetros das linhas, transformadores, filtros e geradores, com o propósito de se obter as admitâncias entre barramentos e entre estes e a referência;
- (ii) - Montagem dos elementos de composição da matriz admitância, utilizando-se técnicas de esparsidade (4);
- (iii) - Fatoração triangular da matriz admitância, armazenada compactamente, para a obtenção dos elementos de composição da inversa da matriz admitância (4);
- (iv) - Montagem do vetor corrente injetada, conforme exposto no item 2.4 e multiplicação deste pela inversa da matriz admitância obtendo-se, assim, o vetor tensão;
- (v) - A tensão obtida na barra do conversor será a própria impedância equivalente de Thevenin para o barramento considerado, que é a impedância de comutação do conversor conectado neste barramento.

## 2.6 - Casos Analisados.

Utilizando-se de um programa desenvolvido, com esta finalidade específica, procederam-se a vários testes, no sentido de comprovar e ilustrar situações em que a simples adoção da reatância de comutação como sendo igual à reatância de dispersão do transformador causa erros bastante significativos nos resultados obtidos. Para tanto, optou-se por apresentar os resultados do sistema ilustrado na figura 2.8. O sistema, na situação apresentada, corresponde ao que se denomina situação 1. Eliminando-se os geradores das barras 33 e 35, tem-se a situação 2. Habitualmente, nesta segunda condição tem-se um sistema mais fraco, o que irá resultar num efeito mais significativo do sistema atrás do barramento do transformador sobre a reatância de comutação.

## 2.7 - Análise Operacional Comparativa Entre Estações Conversoras.

Dentro do exposto no item anterior, a simples consideração das reatâncias dos transformadores das estações conversoras, ou a consideração de todo o sistema ca, leva aos resultados da tabela 2.2.

| SITUAÇÃO               |                | 1      | 2      |
|------------------------|----------------|--------|--------|
| R<br>E<br>T<br>I<br>F. | $X_t$          | 0,008  | 0,008  |
|                        | $X_t + X_{ss}$ | 0,0177 | 0,0245 |
|                        | %              | 122    | 207    |
| I<br>N<br>V<br>E<br>R. | $X_t$          | 0,008  | 0,008  |
|                        | $X_t + X_{ss}$ | 0,0159 | 0,0228 |
|                        | %              | 99     | 185    |

Tabela 2.2 - Reatâncias de comutação em pu na base 100 MVA.

A título de verificar a influência destes parâmetros na operação das conversoras, apresentam-se os principais valores na tabela 2.3.

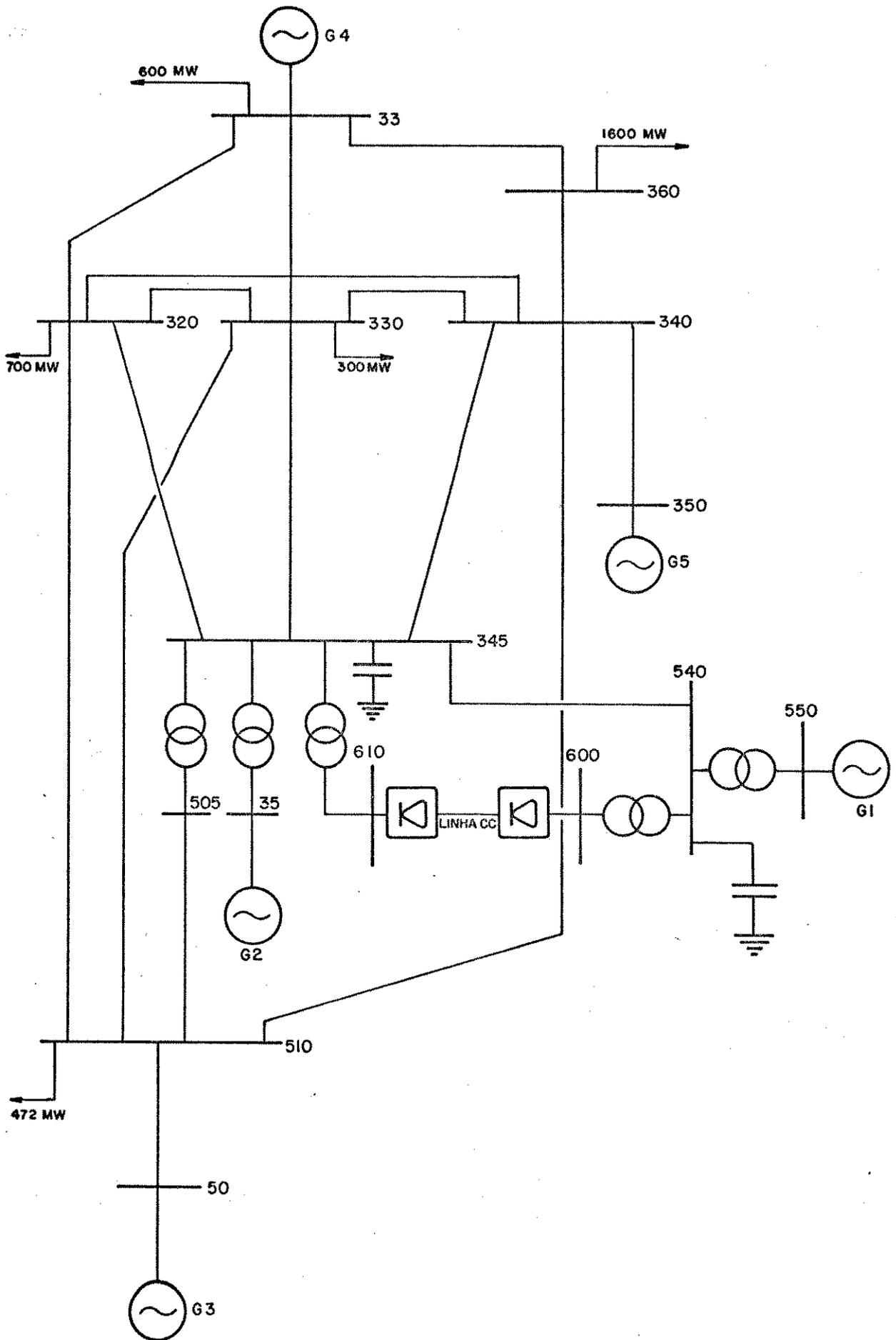


Figura 2.6 - Diagrama unifilar do sistema estudado.

| SITUAÇÃO   |          |                | 1      | 2      |
|--|----------|----------------|--------|--------|
| R<br>E<br>T<br>I<br>F<br>I<br>C<br>A<br>D<br>O<br>R<br>A | $\alpha$ | $X_t$          | 12,86  | 12,86  |
|  |          | $X_t + X_{ss}$ | 9,15   | 8,60   |
|  |          | %              | 40,45  | 49,53  |
|  | $\mu$    | $X_t$          | 14,88  | 14,88  |
|  |          | $X_t + X_{ss}$ | 29,92  | 38,62  |
|  |          | %              | 50,27  | 61,47  |
|  | P        | $X_t$          | 10,26  | 10,26  |
|  |          | $X_t + X_{ss}$ | 10,29  | 10,33  |
|  |          | %              | 0,29   | 0,68   |
|  | o        | $X_t$          | 3,97   | 3,97   |
|  |          | $X_t + X_{ss}$ | 5,25   | 6,47   |
|  |          | %              | 24,38  | 38,64  |
| I<br>N<br>V<br>E<br>R<br>S<br>O<br>R<br>A                | $\alpha$ | $X_t$          | 28,99  | 28,99  |
|  |          | $X_t + X_{ss}$ | 39,28  | 47,62  |
|  |          | %              | 26,20  | 39,12  |
|  | $\mu$    | $X_t$          | 13,99  | 13,99  |
|  |          | $X_t + X_{ss}$ | 24,28  | 32,62  |
|  |          | %              | 42,38  | 57,11  |
|  | P        | $X_t$          | -10,00 | -10,00 |
|  |          | $X_t + X_{ss}$ | -10,00 | -10,00 |
|  |          | %              | 0,00   | 0,00   |
|  | o        | $X_t$          | 4,18   | 4,18   |
|  |          | $X_t + X_{ss}$ | 5,50   | 6,72   |
|  |          | %              | 24,00  | 37,80  |

Tabela 2.3 - Comparação entre as principais grandezas das conversoras para as duas situações analisadas.

## 2.8 - Análise Comparativa Entre Dois Estudos de Estabilidade Transitória Utilizando-se $X_c = X_t$ e $X_c = X_t + X_{ss}$ .

Uma vez constatadas diferenças significativas entre os resultados obtidos para as estações retificadoras e inversoras, quando da adoção da reatância de comutação simplificada e da completa, procede-se, neste item, à investigação destes efeitos sobre o comportamento dinâmico de um sistema elétrico. Para tanto utilizou-se o sistema cujo diagrama unifilar é apresentado na figura 2.8. Como fonte de distúrbio considerou-se que em  $t=0$  s estabelece-se um curto-circuito na barra 33, o qual permanece durante 0,1 segundos.

Nas tabelas 2.4 e 2.5, a seguir, apresentam-se os resultados do fluxo de carga para as duas condições citadas, e os gráficos 2.1 e 2.2 indicam as curvas  $\delta = f(t)$  para o gerador 1.

Embora, por questões de espaço, apenas a máquina 1 tenha sido ilustrada, resultados semelhantes foram obtidos para as demais.

Uma análise comparativa entre estes resultados indica que, de uma maneira geral, as formas das oscilações continuam as mesmas, porém, com as amplitudes significativamente afetadas. Para os casos ilustrados variações de até 57,5% entre os  $\delta_{\max}$  foram constatadas.

| BARRA | TENSÃO | ANG.  | MW G.  | MVAR G. | MW C.  | MVAR C. |
|-------|--------|-------|--------|---------|--------|---------|
| 550   | 1.0000 | 0.00  | 1981.2 | 164.7   | 0.0    | 0.0     |
| 540   | 0.9981 | -1.59 | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
| 510   | 1.0010 | -7.35 | 0.0    | 0.0     | 472.0  | 0.0     |
| 505   | 0.9985 | -3.93 | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
| 50    | 1.0000 | -0.85 | 250.0  | -78.4   | 0.0    | 0.0     |
| 360   | 0.9784 | -17.5 | 0.0    | 0.0     | 1600.0 | 0.0     |
| 350   | 1.0100 | -10.7 | 450.0  | 106.9   | 0.0    | 0.0     |
| 35    | 1.0000 | 0.6   | 800.0  | 97.0    | 0.0    | 0.0     |
| 345   | 0.9947 | -2.7  | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
| 340   | 0.9954 | -11.8 | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
| 330   | 0.9981 | -9.3  | 0.0    | 0.0     | 300.0  | 0.0     |
| 33    | 0.9900 | -16.9 | 300.0  | 213.2   | 600.0  | 0.0     |
| 320   | 0.9946 | -10.8 | 0.0    | 0.0     | 700.0  | 0.0     |
| 600   | 1.0100 | -8.5  | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
| 610   | 0.9700 | 2.1   | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0     |

Tabela 2.4 - Fluxo de Carga com  $X_c = X_t$ .

| BARRA | TENSAO | ANG.  | MW G.  | MVAR G. | MW C.  | MVAR C. |
|-------|--------|-------|--------|---------|--------|---------|
| 550   | 1.0000 | 0.00  | 1979.4 | 96.8    | 0.0    | 0.0     |
| 540   | 0.9991 | -1.59 | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
| 510   | 1.0013 | -7.33 | 0.0    | 0.0     | 472.0  | 0.0     |
| 505   | 0.9990 | -3.92 | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
| 50    | 1.0000 | -0.84 | 250.0  | -79.2   | 0.0    | 0.0     |
| 360   | 0.9785 | -17.5 | 0.0    | 0.0     | 1600.0 | 0.0     |
| 350   | 1.0100 | -10.7 | 450.0  | 103.8   | 0.0    | 0.0     |
| 35    | 1.0000 | 0.6   | 800.0  | 89.2    | 0.0    | 0.0     |
| 345   | 0.9953 | -2.7  | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
| 340   | 0.9955 | -11.8 | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
| 330   | 0.9984 | -9.3  | 0.0    | 0.0     | 300.0  | 0.0     |
| 33    | 0.9900 | -16.9 | 300.0  | 211.1   | 600.0  | 0.0     |
| 320   | 0.9950 | -10.8 | 0.0    | 0.0     | 700.0  | 0.0     |
| 600   | 1.0066 | -6.5  | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0     |
| 610   | 0.9700 | 2.1   | 0.0    | 0.0     | 0.0    | 0.0     |

Tabela 2.5 - Fluxo de Carga com  $X_c = X_t + X_{ss}$

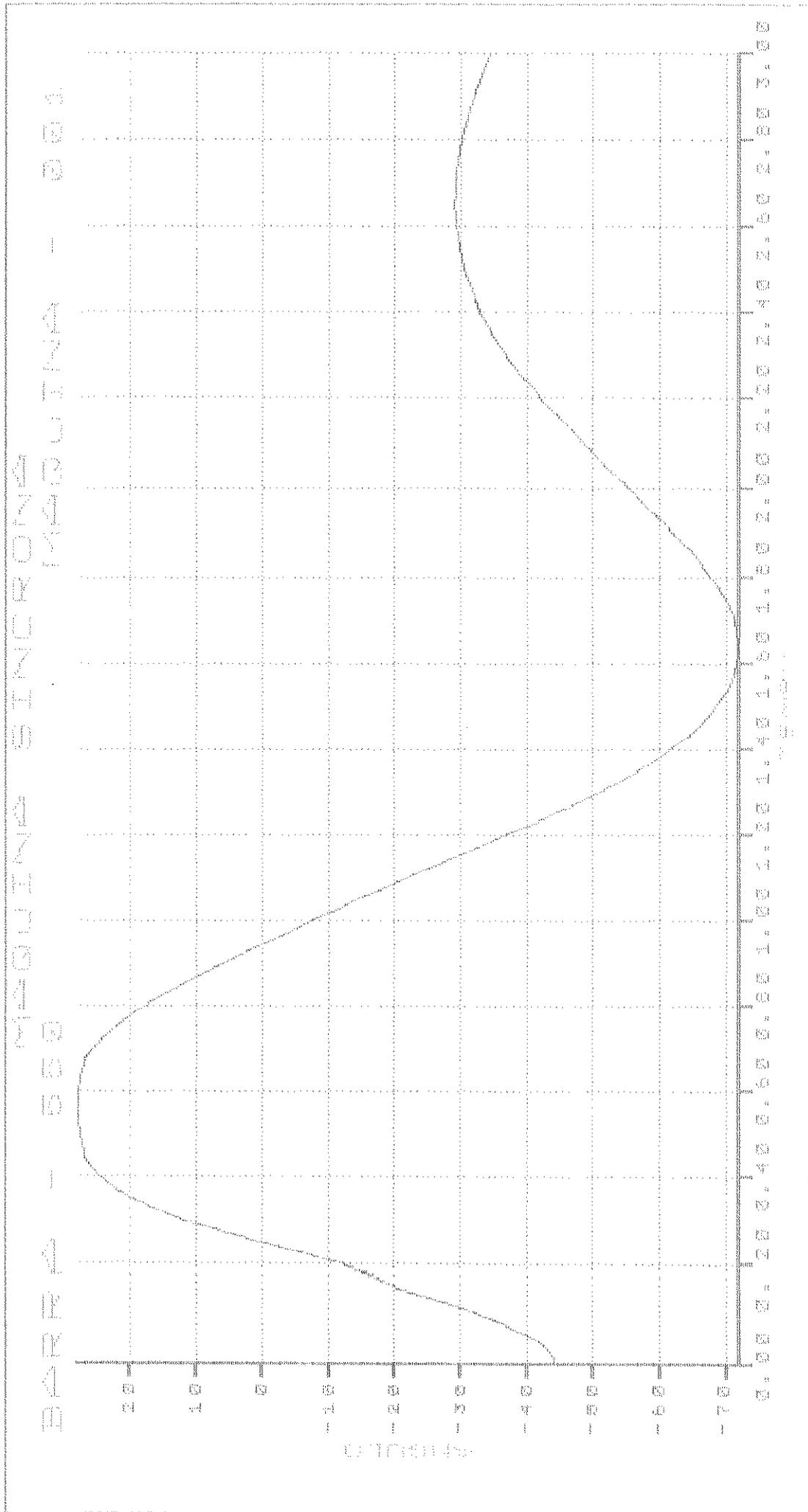


Gráfico 2.1 -  $X_c = X_t$ .

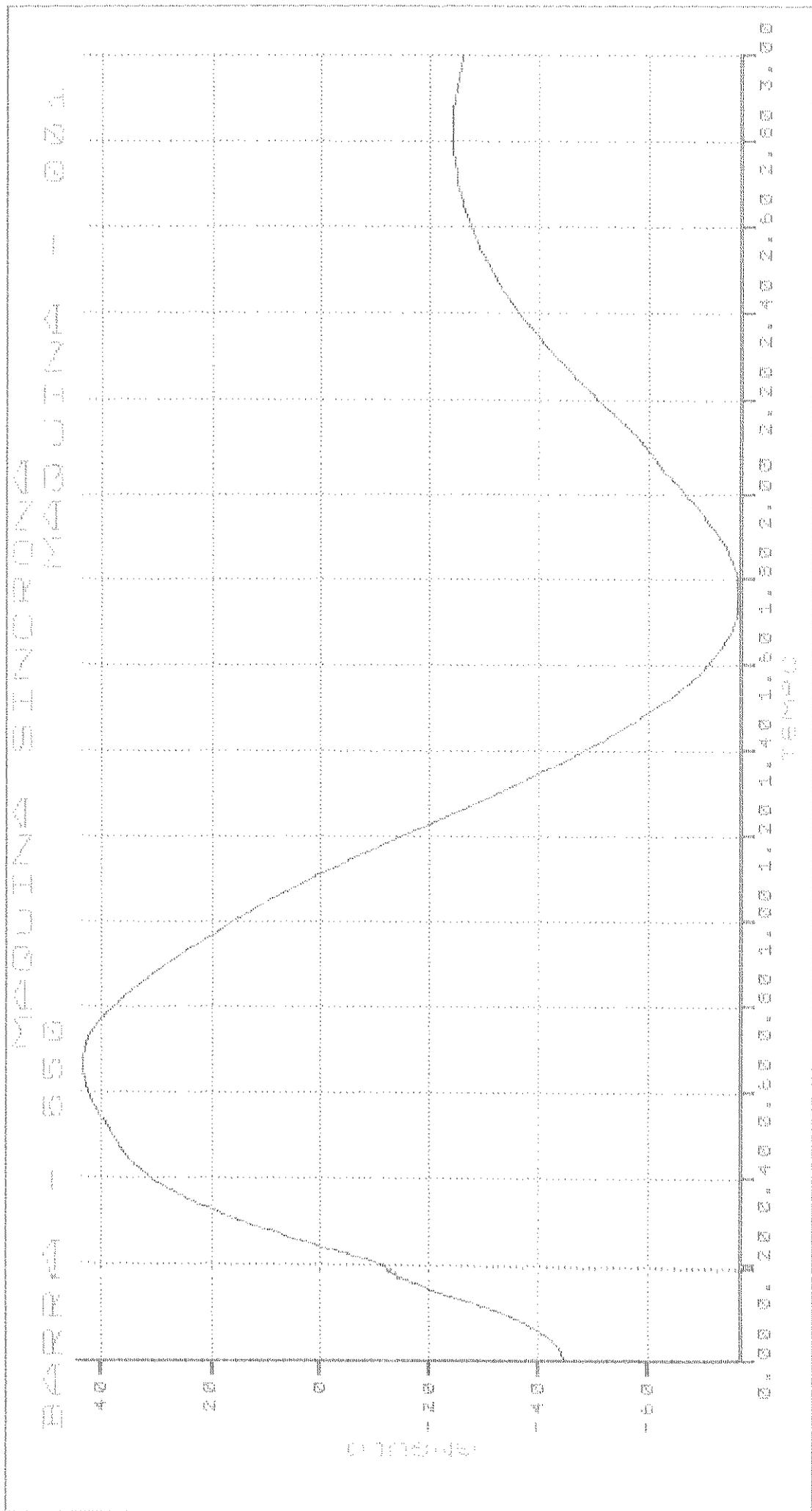


Gráfico 2.2 -  $Y_c = X_t + X_{ss}$ .

### CAPITULO 3

## CONTROLE DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTINUA.

### 3.1 - Característica Básica de Controle.

Um sistema típico de transmissão por corrente contínua em alta tensão é apresentado na figura 3.1, onde o índice r denota grandezas do retificador e o índice i denota grandezas do inversor.

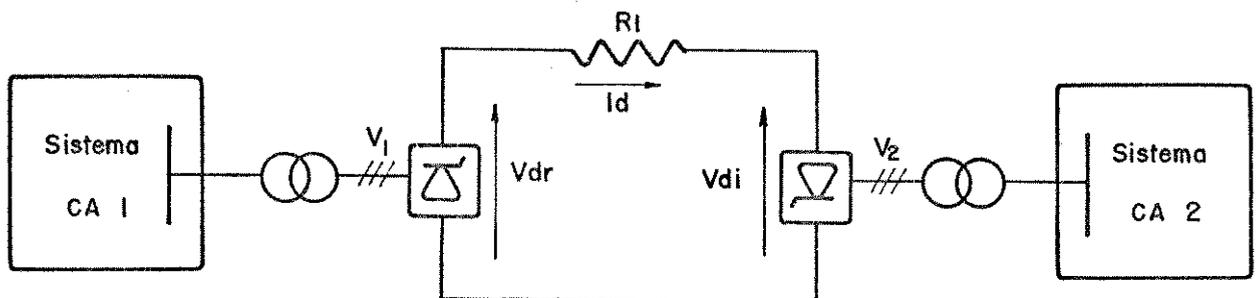


Figura 3.1 - Sistema típico de transmissão por corrente contínua em alta tensão.

De acordo com a teoria básica de transmissão em corrente contínua (5 e 6), pode-se obter o circuito equivalente apresentado pela figura 3.2, onde:

$V_{1,2}$  - Tensão eficaz fase-neutro no secundário do transformador.

$V_{dor,i}$  - Tensão contínua com o ângulo de ignição nulo e sem considerar a comutação  $(3\sqrt{2}/\pi) \cdot V_{1,2}$

$V_{dor,i} \cdot \cos(\alpha, \gamma)$  - Tensão contínua considerando o ângulo de ignição e não considerando a comutação - tensão interna do conversor.

$V_{dr,i}$  - Tensão contínua nos terminais do conversor  $(V_{dor,i} - R_{cr,i} \cdot I_d)$ .

$\alpha$  - Angulo de ignição do conversor operando como retificador.

$\gamma$  - Ângulo de extinção do conversor operando como inversor.

$R_{cr,i}$  - Resistência de comutação do conversor.

$R_l$  - Resistência da linha em corrente contínua.

$I_d$  - Corrente contínua na linha.

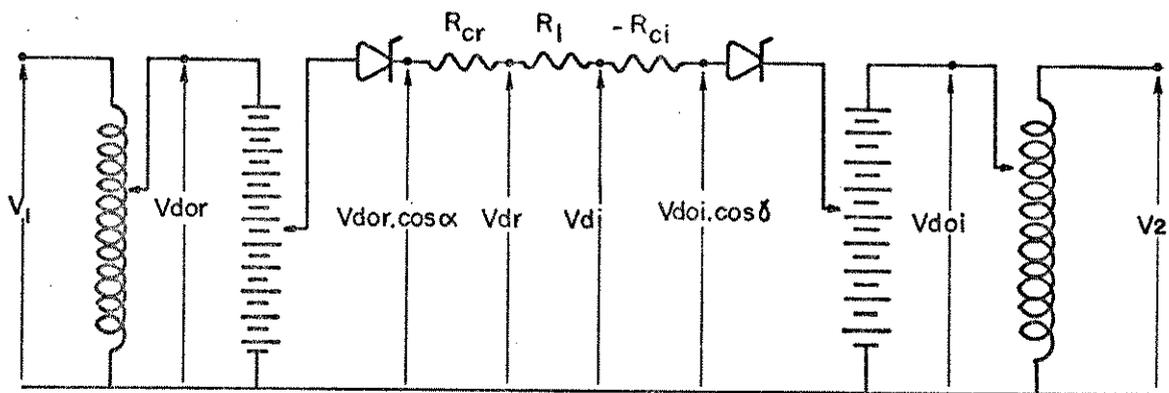


Figura 3.2 - Circuito equivalente de um Sistema de Transmissão por Corrente Contínua.

Pela análise da figura 3.2, conclui-se que a corrente na linha de corrente contínua ( $I_d$ ) é dada pela expressão 3.1.

$$I_d = (V_{dor} \cdot \cos \alpha - V_{doi} \cdot \cos \gamma) / (R_{cr} + R_l - R_{ci}) \quad (3.1)$$

Como a resistência da linha e as resistências de comutação são parâmetros do sistema e, portanto, fixas, a corrente  $I_d$  é proporcional à diferença das duas tensões internas e é controlada variando-se estas tensões.

Logo, pode-se conseguir uma alteração na corrente  $I_d$  e na potência transmitida, alterando-se quaisquer dos seguintes parâmetros:

- O ângulo de ignição do retificador ( $\alpha$ ).
- O ângulo de extinção do inversor ( $\gamma$ ).
- A tensão do secundário do transformador do retificador ( $V_1$ ).
- A tensão do secundário do transformador do inversor ( $V_2$ ).

As alternativas a e b seriam realizadas pelo sistema de geração de pulsos de ignição dos sistemas de controle dos conversores, enquanto que as alternativas c e d seriam incrementadas através da utilização de transformadores providos de taps.

Devido à grande diferença no tempo de atuação entre estes dois processos, o controle da tensão, em cada terminal, é realizado combinando-se a rapidez do controle de disparo ( $\alpha$  e/ou  $\gamma$ ) com a lentidão da mudança de taps ( $V_1$  e/ou  $V_2$ ) da seguinte forma : inicialmente o controle de disparo é usado, devido a sua rápida ação (1 a 10ms), e em seguida, o controle de mudança de taps (5 a 6 s por degrau) é acionado, retornando certas quantidades (ângulo de ignição no retificador ou tensão no inversor) a seus valores normais.

Por causa de sua grande velocidade de atuação o sistema de ignição é responsável pelo retorno às condições de operação desejadas para o sistema em corrente contínua, dentro das limitações impostas pelo sistema de controle, após a ocorrência de distúrbios no sistema de corrente alternada ou faltas nos conversores.

Apesar do sistema de controle em questão ser totalmente automático, uma análise considerando um controle manual é interessante para se esclarecer os conceitos e princípios envolvidos no controle automático. Portanto, a análise será iniciada com um controle manual e em seguida será desenvolvido o controle automático, incluindo todas as funções de controle existentes.

### 3.1.1 - O Controle Manual e Suas Limitações.

A análise do controle manual é realizada baseando-se na característica de regulação para um ponto qualquer da linha em corrente contínua.

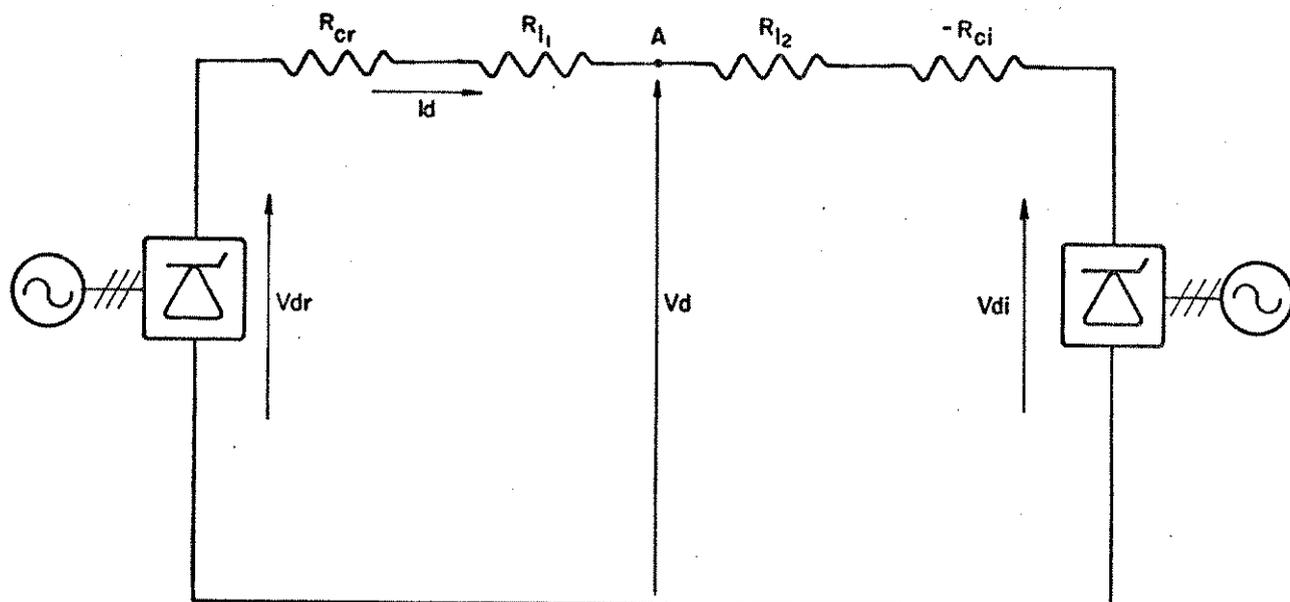


Figura 3.3 - Sistema de transmissão em corrente contínua -  
Ponto genérico ao longo da curva.

De acordo com a figura 3.3, onde a resistência da linha é dividida em duas partes, não necessariamente iguais, a fim de se caracterizar o ponto genérico A, tem-se  $V_d$  em função das grandezas do retificador e do inversor.

$$V_d = V_{dor} \cdot \cos \alpha - (R_{cr} + R_{l1}) \cdot I_d \quad (3.2)$$

$$V_d = V_{doi} \cdot \cos \gamma + (-R_{ci} + R_{l2}) \cdot I_d \quad (3.3)$$

Desde que  $V_{dor}$ ,  $V_{doi}$ ,  $\alpha$  e  $\gamma$  sejam constantes, as funções  $V_d = f(I_d)$  serão representadas por retas cujas inclinações dependerão do coeficiente que multiplica  $I_d$ . A característica do retificador intercepta o eixo vertical no valor correspondente à tensão interna do retificador,  $V_{dor} \cdot \cos \alpha$  e sua inclinação é dada por  $-(R_{cr} + R_{l1})$ , que é sempre negativa. A característica do inversor intercepta o eixo vertical no valor correspondente à tensão interna do inversor,  $V_{doi} \cdot \cos \gamma$  e sua inclinação é dada por  $(-R_{ci} + R_{l2})$ , que poderá ser negativa ou positiva, de acordo com os valores relativos de  $R_{ci}$  e  $R_{l2}$ .

Considerando-se vários valores para as tensões em corrente alternada aplicadas no retificador e no inversor, e fazendo-se  $R_{l2} > R_{ci}$ , o que fornece uma inclinação positiva para a característica do inversor, obtém-se a figura 3.4, onde se pode avaliar a variação da corrente  $I_d$  em função das tensões alternadas.

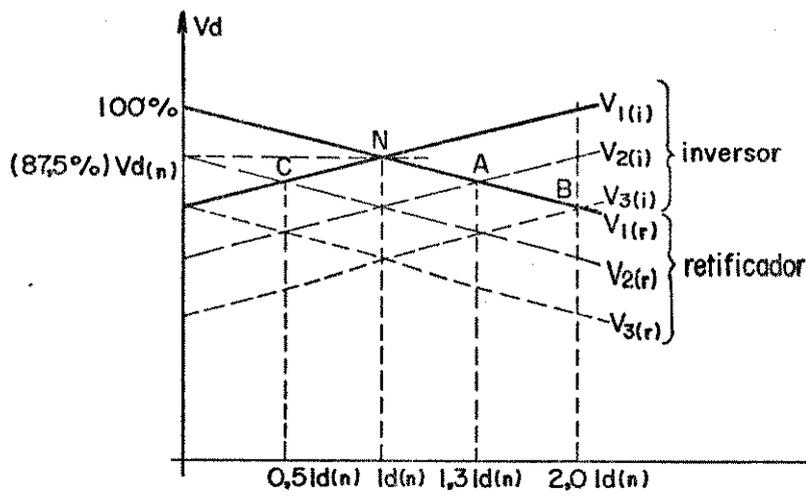


Figura 3.4 - Variações na corrente  $I_d$  em função das tensões ca.

Pela análise da figura 3.4, constata-se que a corrente  $I_d$  é bastante sensível às variações das tensões de alimentação do retificador e do inversor. É evidente que tais flutuações da corrente são inadmissíveis em um sistema real. A existência de altas correntes é bastante indesejável, pois pode levar a problemas tais como falha de comutação ou mesmo danificação das válvulas. Desta forma, a utilização de um sistema de controle automático seria a solução indicada.

### 3.1.2 - O Controle Automático.

No item anterior concluiu-se sobre a necessidade de se utilizar um sistema de controle dotado de características tais, que possibilitem um desempenho rápido e eficaz do sistema de transmissão em corrente contínua. Para tanto, serão deduzidas as características individuais do retificador e do inversor.

### 3.1.2.1 - Características Individuais do Retificador e do Inversor.

As características do retificador e do inversor são traçadas considerando-se a tensão contínua  $V_d$  como sendo função da corrente contínua  $I_d$ , para um ponto comum da linha em corrente contínua, nos terminais do retificador. Neste caso, as equações para as características de regulação são dadas pelas expressões 3.4 e 3.5.

$$V_d = V_{dor} \cdot \cos \alpha - R_{cr} \cdot I_d \quad (3.4)$$

$$V_d = V_{doi} \cdot \cos \gamma + (R_l - R_{ci}) \cdot I_d \quad (3.5)$$

Se, para a característica em termos de grandezas do inversor, for assumida uma resistência  $R_{ci} > R_l$ , a inclinação da reta representativa do inversor será negativa, tal como a do retificador. As características de regulação são mostradas na figura 3.5, onde a interseção destas características define o ponto de operação.

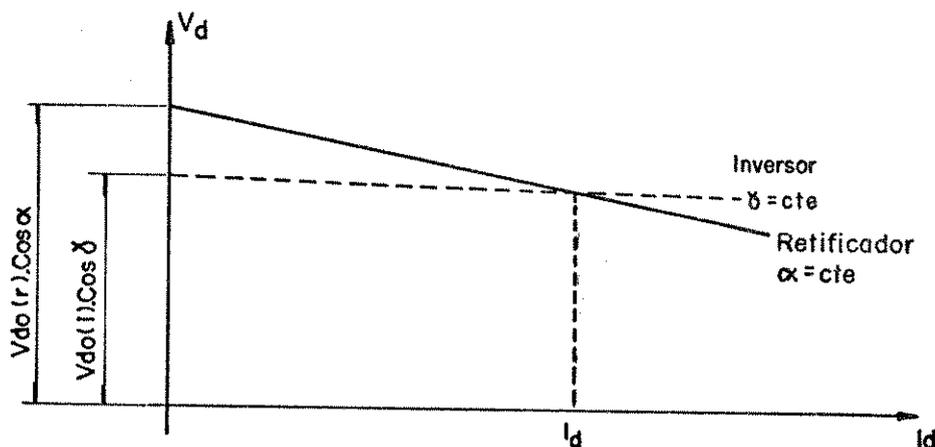


Figura 3.5 - Características de regulação do retificador e do inversor, considerando-se um ponto nos terminais do retificador.

Pela análise da figura 3.5, percebe-se que variações, mesmo que pequenas, nas tensões de alimentação, provocarão o deslocamento destas características, paralelamente a si mesmas, produzindo grandes variações

na corrente  $I_d$ . Este problema pode ser resolvido provendo-se o retificador de um dispositivo capaz de manter a corrente  $I_d$  constante. Tal dispositivo atua medindo a corrente  $I_d$  e comparando-a com um valor de referência  $I_{do}$ . A diferença entre estes dois valores, correspondente a um sinal de erro, é amplificada de forma a poder atuar sobre o sistema de produção de pulsos de ignição, alterando automaticamente o ângulo  $\alpha$ , de modo a aumentar ou diminuir a tensão  $V_d$ , objetivando manter a corrente  $I_d$  igual à corrente de referência  $I_{do}$ . Se este regulador de corrente constante funcionasse de forma ideal, a característica do retificador seria uma reta vertical. Na prática, ela terá uma alta inclinação negativa como mostra a figura 3.6. Este dispositivo é conhecido pela sigla CCC (Constant Current Control).

Com o objetivo de evitar-se falhas de comutação no inversor, este é dotado de um dispositivo capaz de manter o ângulo de extinção ( $\gamma$ ) constante. Este dispositivo é conhecido pela sigla CEA (Constant Extinction Angle Control), e está representado na figura 3.6, onde se tem duas características para o inversor, com o mesmo ângulo  $\gamma$  e diferentes tensões de alimentação.

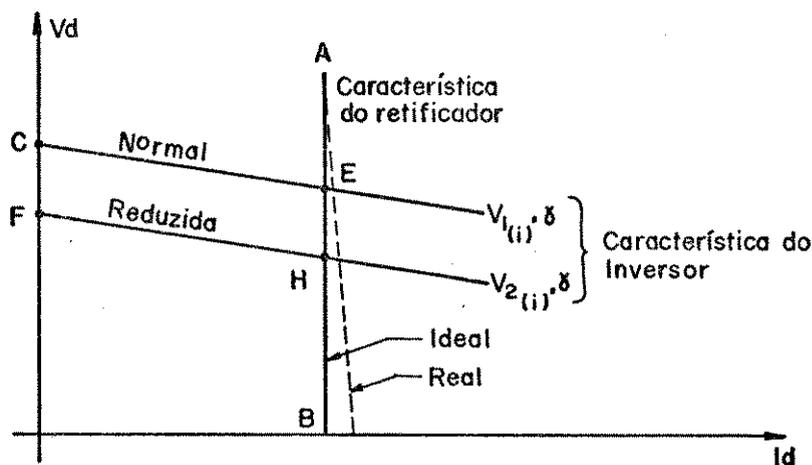


Figura 3.6 - Características de controle incluindo o CCC no retificador e o CEA no inversor.

Como um ponto de operação é caracterizado por um único par tensão-corrente, fica claro que estes valores devem ser dados pelas coordenadas da interseção das características do retificador e do inversor.

O controle do sistema de transmissão em corrente contínua pode ser entendido com a ajuda das características da figura 3.6, através do deslocamento destas paralelamente a si mesmas. A característica do retificador poderá ser deslocada para a esquerda ou para a direita por alteração na corrente ordem (ou de referência), a qual constitui uma das entradas do regulador de corrente, enquanto que a do inversor poderá ser deslocada para cima ou para baixo, variando-se os valores da tensão ca de alimentação, através os taps do transformador do inversor.

Uma vez que a tensão ca de alimentação afeta o valor de  $\gamma$ , tão logo a mudança de taps seja efetuada, o CEA retorna  $\gamma$  ao valor desejado. Além disso, qualquer operação no inversor, no sentido de alterar  $V_d$ , tende a modificar o valor da corrente  $I_d$ . Porém, tão logo isto aconteça, o CCC entra em atuação e a corrente na linha é rapidamente devolvida ao valor especificado.

De certa forma, pode-se dizer que o controle da corrente é realizado pelo retificador, enquanto que o inversor fica responsável pelo controle da tensão na linha em corrente contínua.

Nota-se ainda, que, devido a existência de limites para a variação do ângulo  $\alpha$  e para o tap do transformador de alimentação, a característica do retificador possui um outro segmento correspondente a  $\alpha$  constante e igual a  $\alpha_{\min}$ . A existência de um valor mínimo para o ângulo de disparo do retificador é um compromisso entre a necessidade de se obter um fator de potência, para o conversor, o mais alto possível e a necessidade de que a tensão anodo-catodo atinja um valor suficientemente elevado para poder causar a ignição simultânea de todos os tiristores associados em série. A característica deste controle adicional do retificador é apresentada na figura 3.7, considerando-se dois valores para a tensão ca aplicada ao retificador. Neste caso existe o ponto de operação, definido pela interseção das características do retificador e do inversor. O dispositivo capaz de manter o ângulo num valor constante e igual a  $\alpha_{\min}$  é o CIA (Constant Ignition Angle Control).

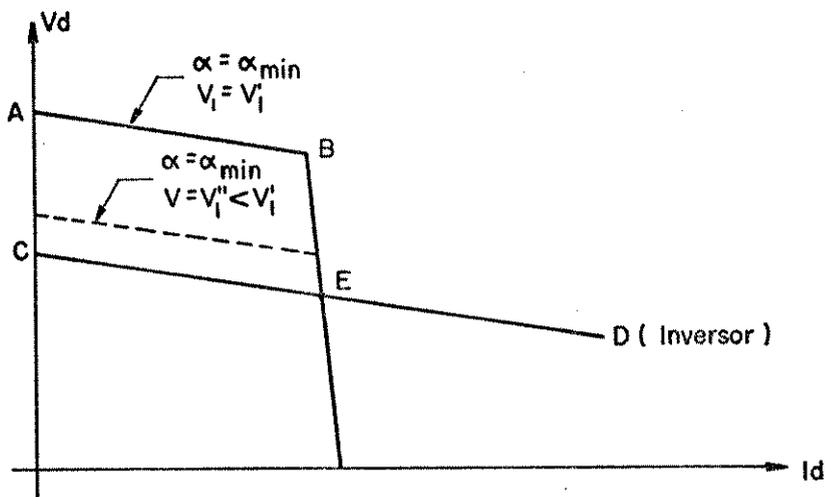


Figura 3.7 - Característica incluindo o controle de  $\alpha_{\min}$  no retificador.

Pela figura 3.7, nota-se que se a tensão alternada no retificador for reduzida drasticamente, não haverá interseção entre as características do inversor e do retificador. Isto significa que, após um transitório definido praticamente pelos reatores cc, a potência e a corrente contínua serão reduzidas a zero. Este problema é solucionado equipando-se o inversor com um dispositivo para se manter a corrente constante, idêntico ao do retificador (CCC), exceto pelo valor da corrente ordem, a qual é inferior à do retificador de um valor denominado "margem de corrente". Esta situação está ilustrada na figura 3.8, onde se percebe que a corrente está sendo controlada pelo inversor, enquanto que o retificador controla a tensão  $V_d$ .

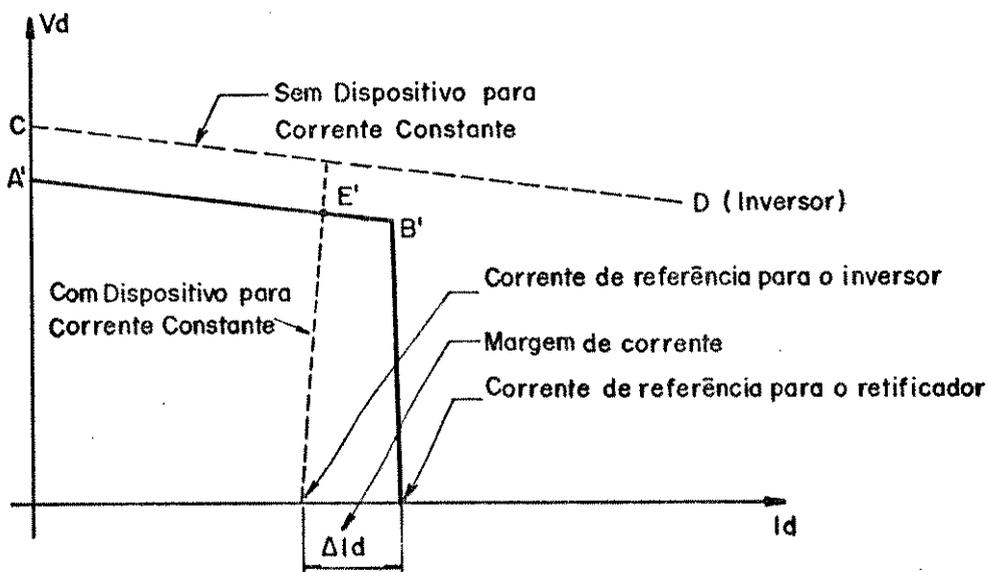


Figura 3.8 - Característica incluindo o CCC no inversor.

### 3.1.3 - Dispositivos do Sistema de Controle.

Serão descritos, a seguir, os dispositivos responsáveis pelos vários segmentos que compõem as características estáticas dos conversores do sistema de transmissão em corrente contínua.

#### 3.1.3.1 - Controle do Ângulo de Ignição Constante - CIA.

A função deste dispositivo é a de estabelecer o mínimo valor que o ângulo de ignição ( $\alpha$ ) pode assumir. Caso este valor mínimo seja zero, o CIA pode ser dispensado, pois o ângulo de ignição naturalmente não poderá assumir valores menores.

No entanto, como a maioria das estações conversoras existentes possuem associações em série de tiristores, há a necessidade de se estipular um valor mínimo para o ângulo de ignição de tal modo que todos os tiristores tenham condição de entrar em operação no mesmo instante. Este valor mínimo é da ordem de  $5^\circ$ .

O funcionamento do CIA baseia-se na medição da tensão alternada no secundário do transformador que é a tensão aplicada na cadeia de tiristores em série. Enquanto esta tensão não atingir um valor mínimo, correspondente a  $\alpha = 5^\circ$ , o sistema de produção de pulsos ficará bloqueado. Após a tensão ultrapassar o valor mínimo, o sistema de produção de pulsos ficará livre para atuar, dependendo, naturalmente, apenas dos outros dispositivos de controle.

#### 3.1.3.2 - Controle da Corrente Constante - CCC.

O dispositivo responsável pela manutenção da corrente contínua em um valor pré-definido (CCC), é representado na característica estática dos conversores pelos segmentos quase-verticais.

O CCC atua mediante as seguintes etapas :

- a) Medição da corrente  $I_d$ .
- b) Comparação de  $I_d$  com um valor de referência para a corrente ( $I_{do}$ ).
- c) Amplificação do sinal de erro ( $I_{do} - I_d$ ).
- d) Utilização do sinal amplificado para atuar sobre o sistema de produção de pulsos, alterando o ângulo  $\alpha$ .

O sinal amplificado irá atuar sobre o sistema de produção de pulsos do retificador da seguinte forma : se a corrente medida for menor do que a corrente de referência,  $\alpha$  deve ser diminuído ( $\cos\alpha$  aumentado) de forma a elevar a tensão interna do retificador e conseqüentemente aumentar a corrente  $I_d$ ; se a corrente medida for maior do que a de referência, o procedimento deve ser inverso ao anterior.

No caso do conversor que controla a corrente estar atuando como inversor, o procedimento é o seguinte : se a corrente medida for menor do que a corrente de referência, a tensão nos terminais do inversor deve diminuir para que a corrente cresça e, portanto, o ângulo  $\beta$  deve crescer, o que significa que o ângulo  $\alpha$  ( $\alpha = \pi - \beta$ ) deve diminuir; se a corrente medida for maior do que a de referência, o procedimento deve ser inverso ao anterior.

Nota-se, pelo raciocínio anterior, que o CCC irá atuar da mesma forma, quer esteja junto ao retificador ou ao inversor. A única diferença é que a corrente de referência para o CCC do inversor será diminuída de um valor correspondente à margem de corrente.

O esquema básico de um dispositivo para se manter a corrente  $I_d$  constante é apresentado na figura 3.9

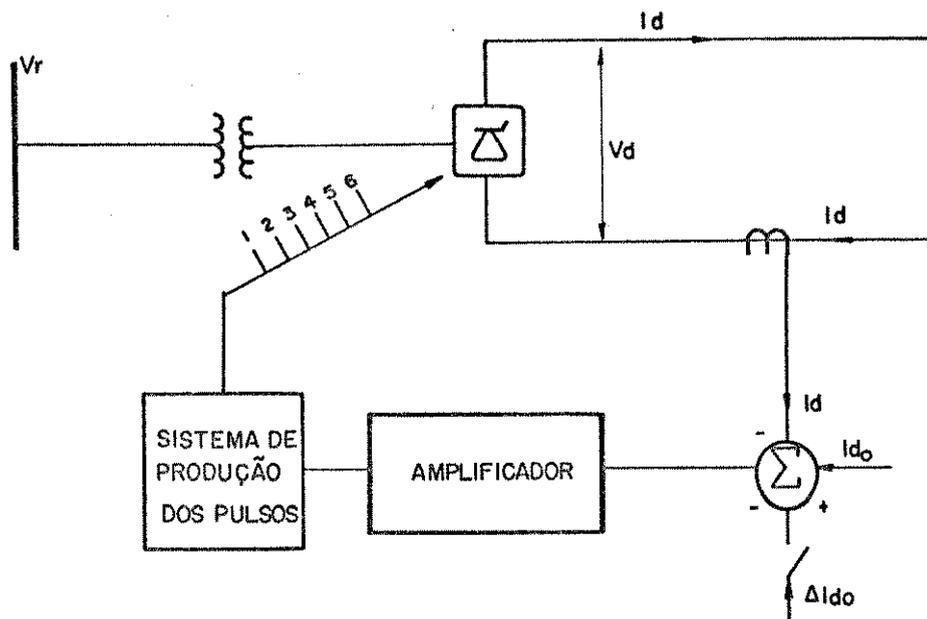


Figura 3.9 - Esquema básico de um CCC.

### 3.1.3.3 - Controle do Ângulo de Extinção Constante - CEA.

O segmento horizontal da característica do conversor que atua como inversor representa a ação do dispositivo responsável pela manutenção do ângulo de extinção em um valor constante ( $\gamma_n$ ).

Da referência 5 tem-se a expressão 3.6.

$$-\sqrt{3}E_{2m}\cos\omega t_1 = \sqrt{3}E_{2m}\cos\gamma_n - 2\omega L_{ci}I_d \quad (3.6)$$

Sendo que :

$$\omega t_1 = \alpha_1 = \pi - \beta \quad (3.7)$$

Portanto, substituindo-se 3.7 em 3.6 e isolando-se  $\cos \alpha$ , obtém-se as expressões 3.8 e 3.9.

$$\cos \alpha_i = (3 \cdot \omega \cdot L_c \cdot I_d) / (\sqrt{3} \cdot E_{2m}) - \cos \gamma_n \quad (3.8)$$

$$\cos \beta = \cos \gamma_n - (2 \cdot \omega \cdot L_c \cdot I_d) / (\sqrt{3} \cdot E_{2m}) \quad (3.9)$$

Através das expressões anteriores pode-se calcular o valor de  $t_i$  ( $\alpha_i$  ou  $\beta$ ) que corresponde ao instante em que a ignição do inversor deverá ocorrer a fim de proporcionar um ângulo de extinção igual ao desejado ( $\gamma_n$ ). Deve-se observar que  $\alpha_i$  depende de  $\gamma_n$ ,  $L_c$ ,  $E_{2m}$  e  $I_d$ .

O esquema básico de um dispositivo para se manter o ângulo constante é apresentado na figura 3.10.

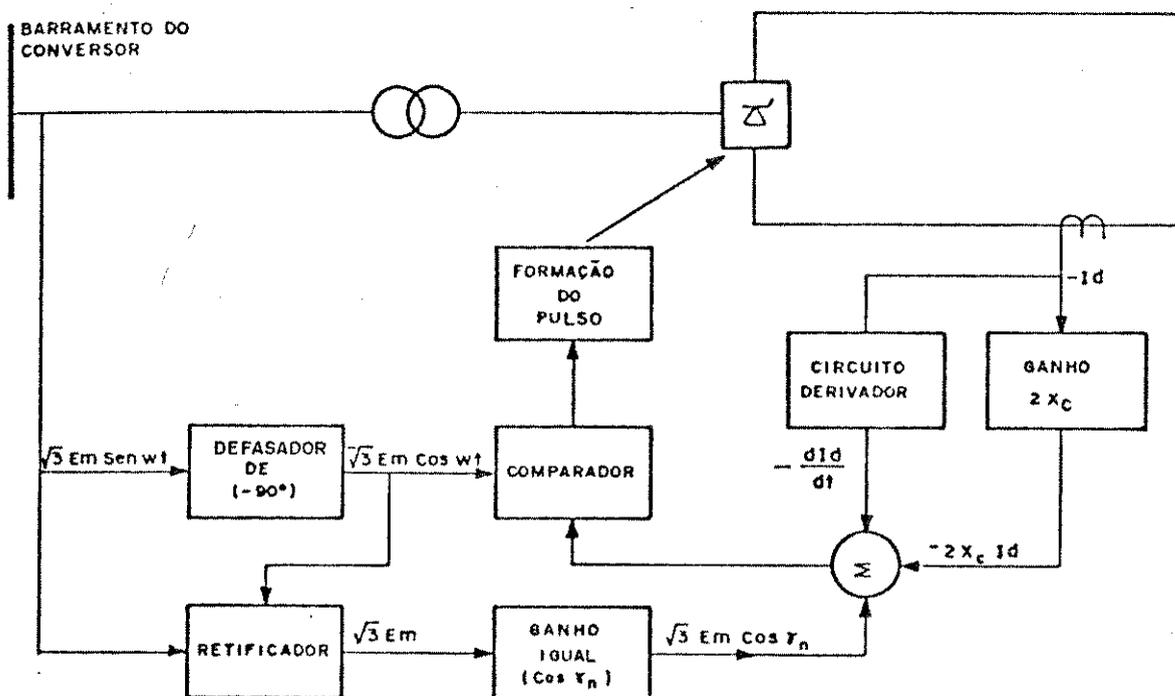


Figura 3.10 - Esquema básico de um CEA.

### 3.2 - Característica de Controle Modificada.

Nos elos de corrente contínua em operação, além da implementação das características básicas de controle já mencionadas, pode-se encontrar outras, introduzidas com o objetivo de melhorar o desempenho dinâmico face a perturbações internas ou externas ao elo, ou ainda, proteger as válvulas das estações conversoras.

#### 3.2.1 - Angulo de Ignição Constante no Inversor.

O CIA aplicado à inversora, limita o valor mínimo do ângulo de disparo das válvulas desta estação conversora. Sua função é evitar que a ponte inversora entre, por erros operativos, na região retificadora. Pode-se observar esta característica na figura 3.11.

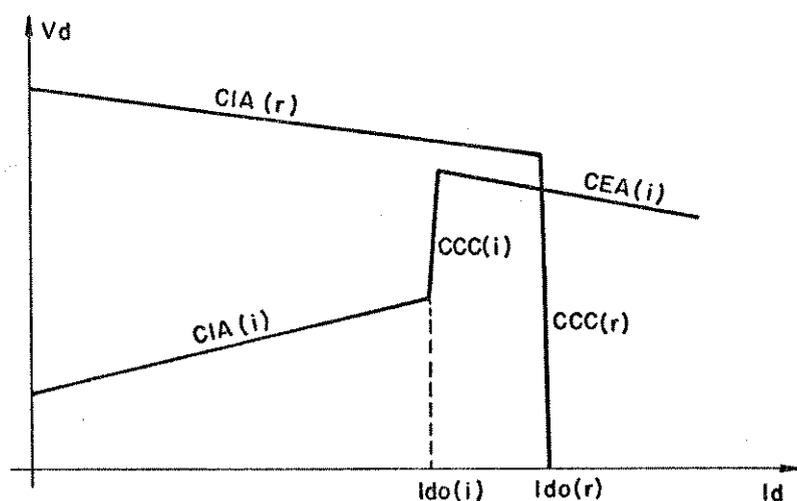


Figura 3.11 - Característica incluindo o CIA no inversor.

#### 3.2.2 - Controle do Erro da Corrente.

Uma modificação interessante (7) da característica estática básica da inversora é a introduzida pelo controle do erro da corrente - CEC.

Quando a resistência equivalente de comutação da inversora excede a resistência da linha de corrente contínua, as características do retificador e do inversor podem apresentar mais de um ponto de

cruzamento, como indicado na figura 3.12, provocando instabilidade do controle da ligação em corrente contínua, conhecida como "Three Point Cross-Over Instability".

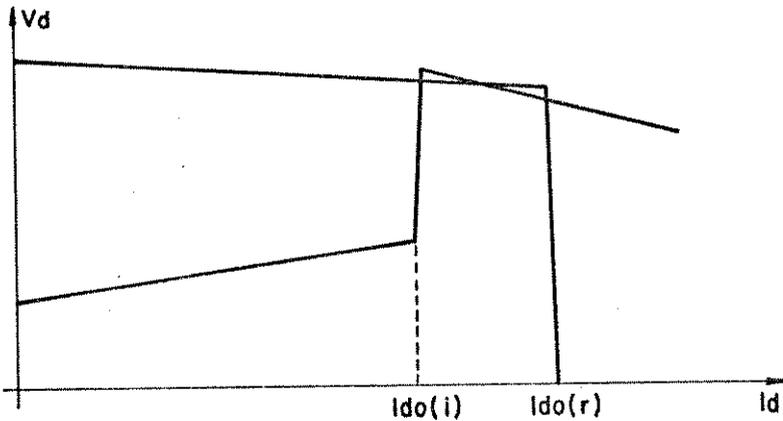


Figura 3.12 - Múltiplos cruzamentos entre características estáticas do retificador e do inversor.

O controle do erro de corrente modifica a característica estática da inversora no intervalo definido pela margem de corrente, como indica a figura 3.13, eliminando o problema.

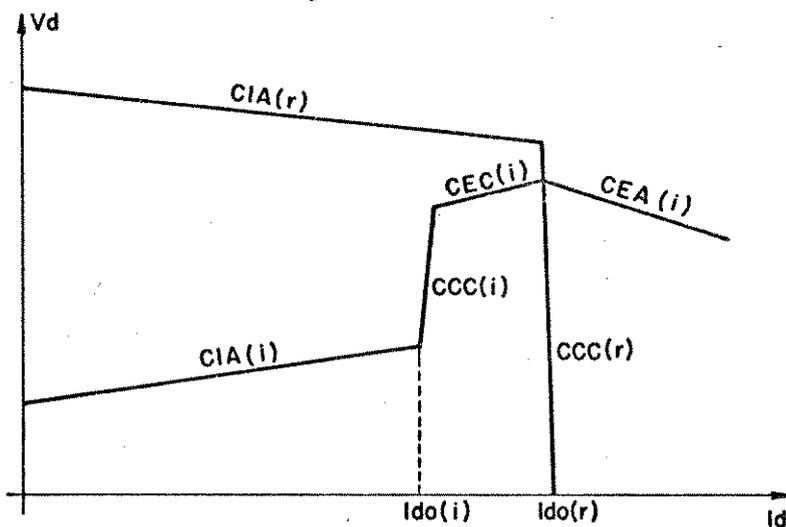


Figura 3.13 - Alteração na característica do inversor provocada pelo CEC.

### 3.2.3 - Limitador da Ordem de Corrente Dependente da Tensão.

Um outro equipamento que altera a característica estática do elo, embora sem definir um modo de controle, é o "Voltage Dependent Current Order Limiter" (VDCOL), que tem como função primordial proteger

os conversores, limitando a ordem de corrente quando a tensão no elo é baixa (8,13). Na figura 3.14 mostra-se a característica estática do VDCOL. Quando a tensão no elo cai a valores entre  $V_{d1}$  e  $V_{d2}$ , o VDCOL limita a ordem de corrente proporcionalmente à tensão contínua, diminuindo, em consequência, a absorção de reativos pelo conversor. Esta atuação do VDCOL melhora o desempenho transitório do sistema integrado ca-cc. Quando a tensão contínua cai abaixo de  $V_{d1}$ , o VDCOL limita a ordem de corrente a um valor máximo igual a  $I_{d1}$ . Conforme mencionado, esta atuação tem como finalidade proteger as válvulas das estações conversoras quando de faltas internas ao elo e o sistema de telecomunicações não estiver operando. A figura 3.14 ilustra o comportamento do VDCOL.

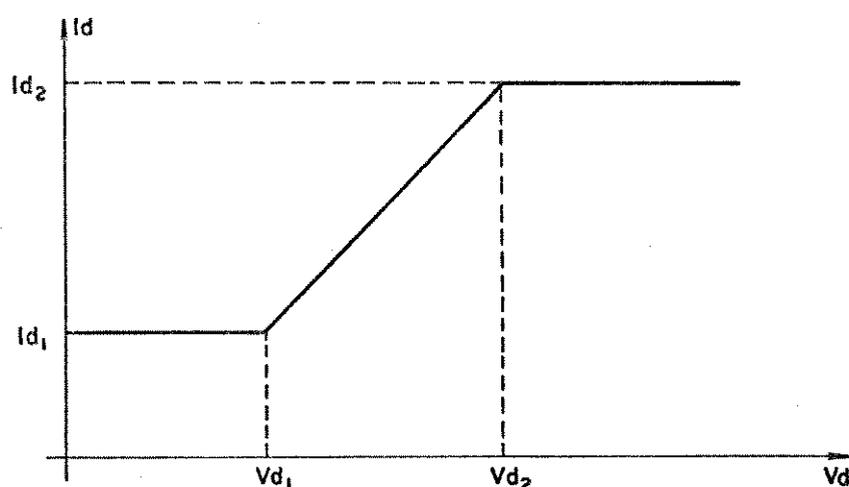
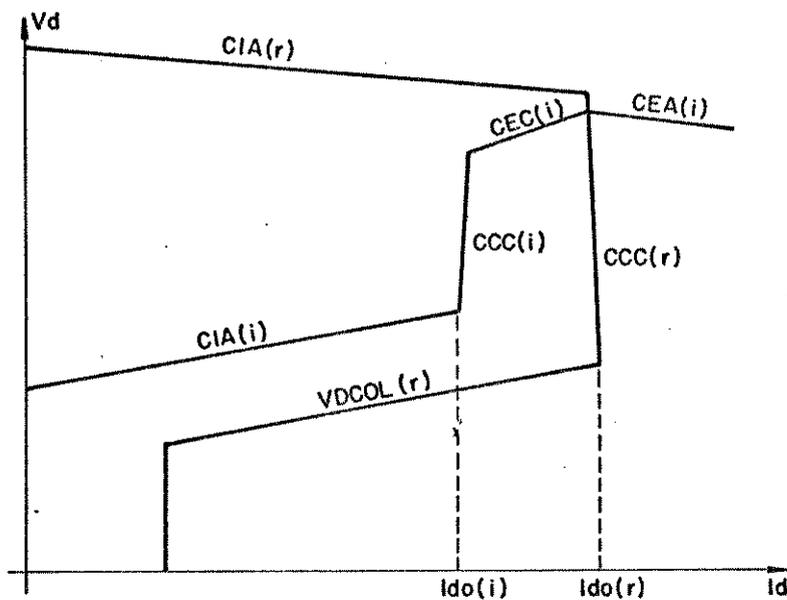


Figura 3.14 - Característica estática do VDCOL.

O VDCOL pode ser incluído em ambas as estações conversoras, ou apenas no retificador. Neste segundo caso, o ângulo mínimo de ignição do inversor deve ser tal que a característica CIA, no inversor, permaneça sempre acima da característica do VDCOL, sem que haja cruzamento entre elas.

A figura 3.15 mostra a característica estática de um Sistema de Transmissão em Corrente Contínua, com os modos de operação ângulo de ignição constante e corrente constante no retificador e ângulo de ignição constante, corrente constante, controle do erro de corrente e ângulo de extinção constante no inversor, além do VDCOL na estação retificadora.



Figuras 3.15 - Características estáticas completas.

### 3.2.4 - Unidade de Bloqueio e Desbloqueio.

No caso de uma drástica redução das tensões ca aplicadas nos conversores, devido a perturbações nos sistemas ca, o sistema de transmissão em cc poderá deixar de operar ou, então, operar com um alto consumo de reativo, o que é indesejável. Nestas duas situações o STCC deve ser retirado de operação.

Há duas formas de se retirar o STCC de operação : através do rápido aumento do ângulo de ignição ( $\alpha$ ) do retificador e/ou através da redução da corrente ordem a zero.

O STCC só poderá ser religado um certo tempo depois, denominado "Tempo de Religamento" ( $T_r$ ), quando as tensões nas barras ca dos conversores tiverem se recuperado, atingindo o mínimo valor  $V_{min}$ .

Com o objetivo de se evitar um impacto muito grande no sistema ca, o desbloqueio do STCC é feito a partir de uma certa corrente ordem de religamento ( $I_{dr}$ ), tendo um aumento linear segundo uma rampa de inclinação especificada. Este comportamento é mostrado na figura 3.16.

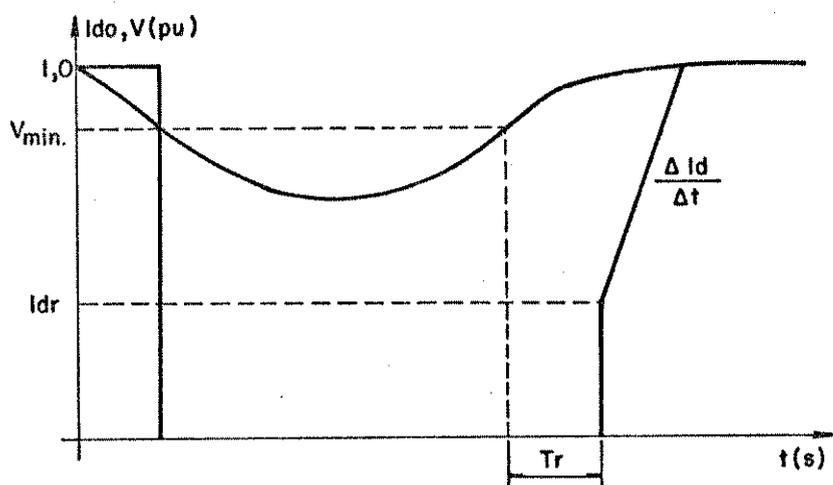


Figura 3.16 - Bloqueio e desbloqueio do STCC.

### 3.3 - Sistema de Controle Completo.

O sistema de controle de um STCC é constituído por três unidades principais e distintas, como ilustra a figura 3.17, que são :

- Controle principal ou controle do fluxo de potência.
- Controle do pólo.
- Controle do conversor.

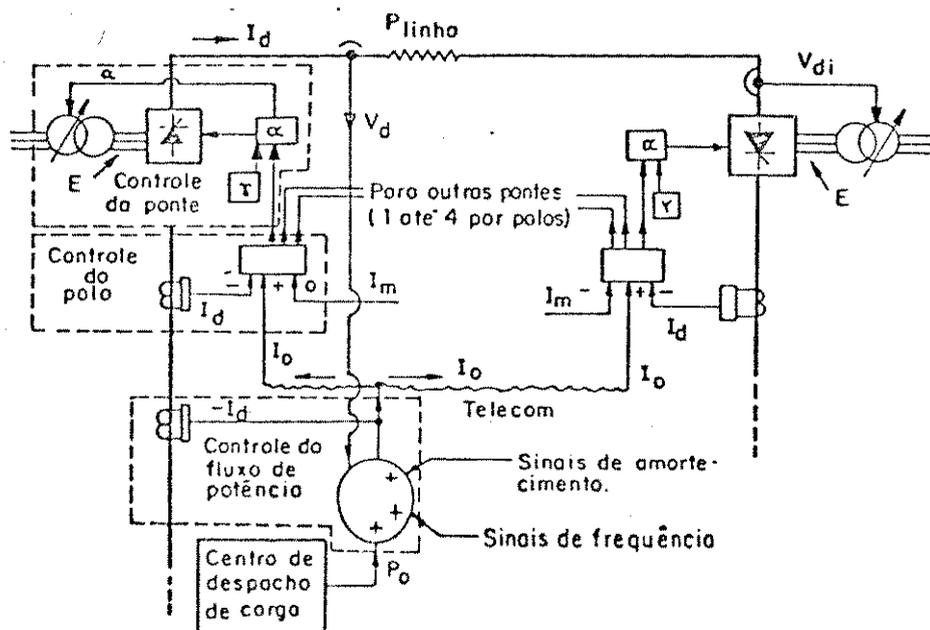


Figura 3.17 - Diagrama em blocos do sistema de controle de um STCC.

O controle principal é o responsável pela ordem de início e coordenação das ações de controle que alteram o estado operativo do elo, como por exemplo, a reversão do sentido do fluxo de potência, o paralelismo e a entrada ou saída de operação dos pólos. É também responsável pela coordenação das ações que determinam e alteram a ordem de potência, ou corrente, do elo, como por exemplo a modulação da ordem de potência para controlar a frequência ou amortecer as oscilações dinâmicas das redes de corrente alternada associadas às conversoras, tendo sempre por base a potência definida pelo Centro de Despacho de Carga.

O controle do pólo tem por função determinar o erro da corrente contínua, tendo como informações o sinal medido e o sinal fornecido pelo controle principal, além da margem de corrente no caso do inversor.

Já a função do controle do conversor é a de definir os instantes de disparo das válvulas das pontes conversoras, com base no sinal fornecido pelo controle do pólo.

### **3.4 - Modulação da Potência CC.**

A importância de um elo cc em relação a sistemas ca aos quais ele está conectado é relativamente grande, pois pela ação de um controle adequado, o elo cc pode ser usado não somente para transmitir grandes blocos de potência, mas também para exercer um forte efeito estabilizante sobre os sistemas ca. Isto tem sido usado na maioria dos esquemas implantados em todo o mundo.

Um elo cc tem uma propriedade singular entre os componentes do sistema de potência ca, que é a resposta extremamente rápida para a ação de controle, sendo capaz de alterar sua potência, em seu valor nominal, com um tempo de resposta da ordem de 50 ms, dependendo da capacitância da linha, com a adição de aproximadamente 30 ms, devido o atraso causado pelos canais de telecomunicação. Portanto, o controle do elo cc é substancialmente mais rápido do que os controles dos campos dos

geradores ou dos reguladores de velocidade das turbinas. Mesmo a ação relativamente rápida de abertura de um disjuntor, tem um equivalente mais rápido no elo cc, o qual pode interromper completamente sua corrente ca em menos da metade de um ciclo, através da ação de seu controle.

Deve-se ressaltar que a justificativa econômica da implantação de elos cc em detrimento da transmissão ca tem, geralmente, sido baseada na economia de custo nas linhas ou cabos de transmissão, visto que faltas insignificantes não alimentam um elo cc, podendo, portanto, permitir economia nos sistemas ca associados.

Entretanto não é amplamente avaliado que o elo cc pode proporcionar não somente economia e flexibilidade no controle de operação do fluxo de potência. Com a adição de circuitos de controle extras, para variar rapidamente a potência transmitida em resposta às necessidades dos sistemas ca, os elos cc podem melhorar, substancialmente, a resposta das redes ca para uma grande gama de distúrbios, sem perda da capacidade de transferência da potência determinada para regime permanente. Tais características tem um claro valor econômico, muito embora este não seja sempre fácil de se quantificar.

### 3.5 - Definição da Corrente Ordem.

A definição da corrente ordem (ou de referência) ocorre segundo um processo dinâmico, tendo por base a potência ordem já modulada, de acordo com a relação dada pela expressão 3.10.

$$I_{ordem} = P_{ordem}/V_d \quad (3.10)$$

Conforme exposto no item anterior e de acordo com a figura 3.17, a potência ordem é determinada considerando-se :

- a) - a potência a ser transmitida conforme definida pelo Centro de Despacho de Carga;

- b) - a modulação da potência para atender requisitos de estabilização das oscilações oriundas de distúrbios nos sistemas de corrente alternada;
- c) - a modulação da potência para atender requisitos de controle de frequência.

A seguir descreve-se a participação dos sinais, acima citados, na formação da potência ordem.

### 3.5.1 - Sinal Definido Pelo Centro de Despacho de Carga - CDC.

O Centro de Despacho de Carga de um sistema de energia elétrica é o órgão responsável pela definição das potências a serem geradas e dos fluxos de potências nas linhas que interligam áreas distintas. Portanto, a potência a ser transmitida pelo elo cc será definida pelo Centro de Despacho de Carga, levando-se em consideração o limite próprio do elo cc.

Deve ainda ser destacado que, com o intuito de se minimizar as perturbações sobre as redes ca, provocadas por alterações bruscas na potência transmitida pelo elo, as alterações da ordem de potência, definida pelo CDC, são realizadas lentamente, segundo rampas de inclinação ajustável, como mostra a figura 3.18.

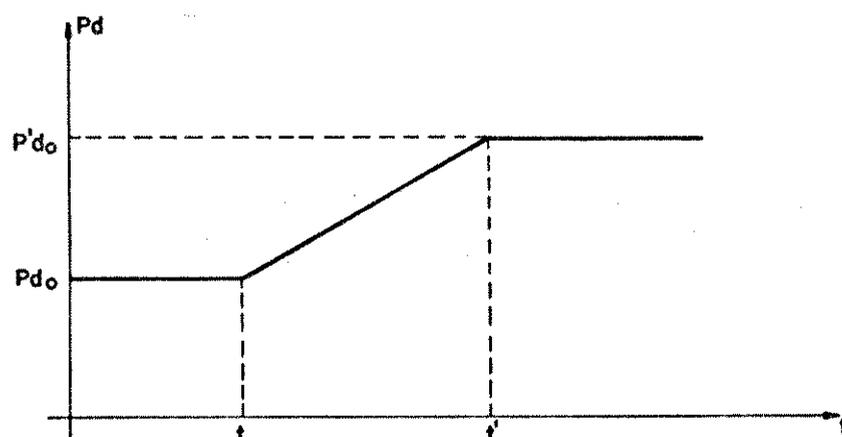


Figura 3.18 - Variação da Potência Ordem pelo CDC.

### 3.5.2 - Sinal de Amortecimento.

Com a finalidade de se buscar a melhoria do comportamento dos sistemas ca durante os transitórios aos quais podem ser submetidos, utiliza-se um sinal a ser adicionado à potência definida pelo CDC.

Os sinais a serem introduzidos para melhorar as condições de estabilidade dos sistemas ca podem ser obtidos a partir da medição de frequência ou da diferença entre os ângulos de fase. O uso destes sinais está baseado no fato de que perturbações em grandes sistemas ca causam oscilações da frequência em torno do valor nominal, bem como oscilações dos ângulos de fase.

Se houver substancial geração no sistema receptor, então adicionando-se à ordem de potência principal um sinal proporcional ao erro de frequência, obter-se-á uma característica potência-frequência muito melhor do que a do gerador ca convencional, e contribuirá para o controle do amortecimento de todos os geradores do sistema.

No caso de um elo cc alimentado por uma estação geradora isolada, sua característica potência constante tende a eliminar os efeitos de estabilização usuais de um grande sistema ca receptor sobre o regulador de velocidade do gerador. Também neste caso um sinal proporcional à frequência, adicionado à ordem de potência principal pode estabilizar os reguladores e, além disso, proporcionar suficiente amortecimento extra, de modo a reduzir o uso dos mecanismos do regulador devido às flutuações normais de fluxo de água em uma turbina hidráulica.

Quanto ao uso da diferença entre os ângulos de fase das barras ca, às quais o elo cc está conectado, para efeito de modulação de sua potência, sabe-se que as frequências naturais das oscilações de fase são tipicamente da ordem de 1 Hz, exceto quando uma linha ca, relativamente fraca, interliga dois grandes sistemas isolados, onde então a frequência natural de oscilação pode atingir até 0,3 Hz. Estando o amortecimento natural de um sistema principalmente nos enrolamentos amortecedores

das máquinas, ele é fraco para 1 Hz e mais fraco ainda para 0,3 Hz.

O elo cc pode, portanto, oferecer excelente amortecimento para tais freqüências, no caso de perturbações repentinas e para flutuações contínuas.

No entanto, o uso dos sinais proporcionais à diferença do ângulo de fase entre as tensões das barras da linha ca exigem canais de telecomunicação. Desse modo um sinal mais efetivo pode normalmente ser obtido localmente, dispensando-se assim os canais de telecomunicação, através de uma função de mudança do ângulo de fase absoluto da tensão de barra ca, usando-se um transdutor eletrônico. Neste método um laço fechado de fase fornece uma referência de fase local temporária para a medição do ângulo de fase da tensão ca de barra. Sua fase é automaticamente restabelecida para aquela da tensão de barra em regime permanente, com uma constante de tempo adequada, para que ela não tenha efeito sobre a potência do elo cc em regime permanente, mas module a potência cc para amortecer o sistema ca somente nas perturbações.

A quantidade de modulação da potência cc exigida é normalmente pequena e afeta de forma desprezível a operação normal, mesmo para contínuas flutuações de carga. O efeito de amortecimento pode se estender a consideráveis distâncias da estação inversora.

Este método de amortecimento é, de certo modo, análogo àquele algumas vezes usado em geradores, no qual sinais suplementares de potência ou ângulo de eixo são adicionados no sistema de excitação, sendo, no entanto, muito mais poderoso.

### 3.5.3 - Sinal Para Correção da Freqüência.

O desvio de freqüência, em relação à freqüência nominal de um sistema de potência, é proporcional ao desbalanço entre a potência mecânica fornecida às unidades geradoras e a potência ativa consumida

neste sistema mais as perdas nas linhas de transmissão. Portanto se em um certo intervalo de tempo, a potência ativa consumida mais as perdas for superior à potência mecânica, a frequência do sistema tende a cair. Se, ao contrário, a potência mecânica for maior, a frequência tende a aumentar.

Pelo exposto percebe-se que o elo cc pode operar de modo a melhorar os perfis de frequência do sistema ca por ele interligados. Caso a frequência do sistema ca receptor sofra uma variação, o elo atuará de modo a fornecer mais ou menos potência ativa, de forma a trazer a frequência a seu valor nominal. Por outro lado, se o sistema ca emissor sofrer uma variação na sua frequência, o elo atuará retirando mais ou menos potência ativa do sistema, trazendo a frequência a seu valor nominal.

Deve-se notar que onde o elo cc abastece um sistema ca isolado, sem geração local, a frequência do sistema depende inteiramente do controle do elo.

### **3.6 - Efeito Simultâneo dos Vários Sinais de Controle.**

É possível, na prática, utilizar simultaneamente, vários dos sinais já descritos para o controle de um elo cc. Geralmente eles tendem a operar independentemente pois respondem a diferentes frequências, ou seja, o sinal de ângulo de fase responde para frequências entre 0,1 a 2 Hz, enquanto que o sinal de frequência do sistema receptor responde a frequências entre 0,01 a 0,2 Hz e o sinal de controle do CDC pode corrigir a frequência absoluta do sistema em tempos da ordem de minutos. Não tem importância se várias bandas da frequência de controle se sobrepuserem, muito pelo contrário, isto será uma vantagem.

Naturalmente desde que um elo cc contém uma energia armazenada desprezível (comparada com a armazenada nos rotores dos geradores) qualquer ação do elo cc para amortecer uma perturbação em um sistema deve naturalmente produzir alguma perturbação no outro lado.

Isto não tem um grande efeito, uma vez que, em geral, as frequências de oscilação críticas são normalmente diferentes. Entretanto, mesmo se frequências de oscilações similares estiverem envolvidas nos dois sistemas, com um controle adequado as perturbações em cada um dos sistemas serão divididas em uma razão pré-determinada, e ambos os sistemas, juntos, amortecerão a perturbação rapidamente.

### 3.7 - Funções de Transferência.

Os sistemas de controle que tem por objetivo a melhoria do comportamento dinâmico dos sistemas ca dependem da filosofia adotada em cada projeto, sendo que suas funções de transferência podem assumir diversos graus de complexidade conforme o tipo de estudo que se pretende realizar, bem como das informações disponíveis sobre o controle. Constantes estudos têm sido realizados objetivando o aperfeiçoamento deste sistema e à medida que se constata a necessidade de um novo tipo de controle, este é incorporado aos Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua.

Estes sistemas de controle são constituídos, basicamente, de transdutores de sinal, bem como de filtros, amplificadores, diferenciadores, compensadores e atrasos devidos aos dispositivos de telecomunicação, além de limitadores. A seguir são apresentados os diagramas de blocos utilizados para o processamento dos principais sinais discutidos no item 3.6.

#### 3.7.1 - Modelo I.

O modelo I é apresentado pela referência 9 e seu diagrama de blocos é mostrado na figura 3.19. O diagrama encontra-se ligeiramente alterado com o propósito de se obter uma função de transferência mais genérica, que possua como entrada um sinal de erro de frequência proveniente de uma das barras do sistema em falta.

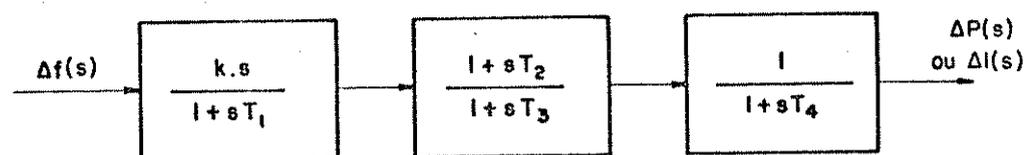


Figura 3.19 - Função de transferência do modelo I.

Deve-se observar que este modelo, bem como os seguintes, podem dar origem a vários outros, bastando, para tanto, fazer uma ou mais constantes de tempo iguais a zero. Isto possibilitará uma variação no número de pólos e zeros da função de transferência.

### 3.7.2 - Modelo II.

O modelo II é apresentado pela referência 10 e mostrado na figura 3.20, através de seu diagrama de blocos.

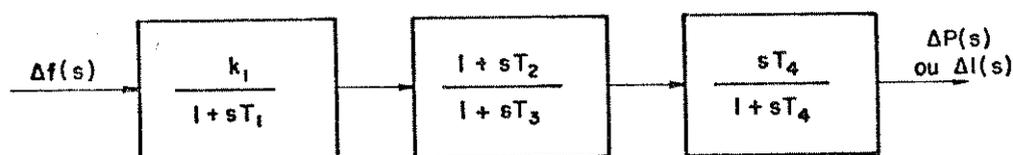


Figura 3.20 - Função de transferência do modelo II.

O sinal utilizado como entrada para este modelo é o erro de frequência de qualquer uma das barras do sistema ca do lado da inversora. Este erro de frequência é limitado em 6,0% da frequência nominal do sistema, ou seja, 3,6 Hz. Isto significa que desvios de frequência acima de 3,6 Hz serão substituídos por este valor.

### 3.7.3 - Modelo III.

Este modelo também é apresentado pela referência 10 e é mostrado na figura 3.21, através de seu diagrama de blocos.

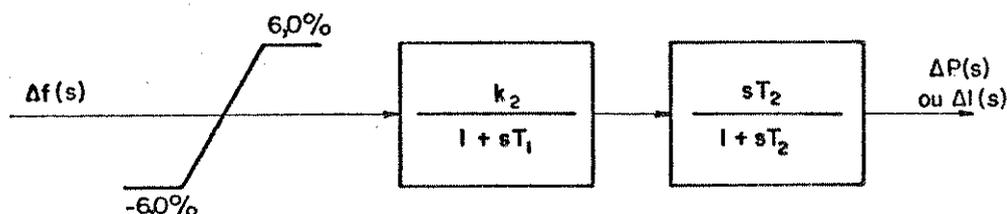


Figura 3.21 - Função de transferência do modelo III.

Na realidade, este modelo é uma simplificação do apresentado pela referência 10, onde existe um ramo suplementar cujo objetivo é zerar a potência do elo cc, caso a frequência do sistema emissor caia abaixo de um determinado valor. Decidiu-se pela eliminação deste ramo, por se julgar mais conveniente uma maior oscilação na frequência do que a eliminação do elo cc.

O sinal de erro de frequência utilizado neste modelo é proveniente de qualquer uma das barras do sistema que fornece energia ao elo cc, ou seja, do sistema do lado do retificador.

### 3.7.4 - Modelo IV.

Este modelo também é apresentado pela referência 10 e é mostrado na figura 3.22, através de seu diagrama de blocos.

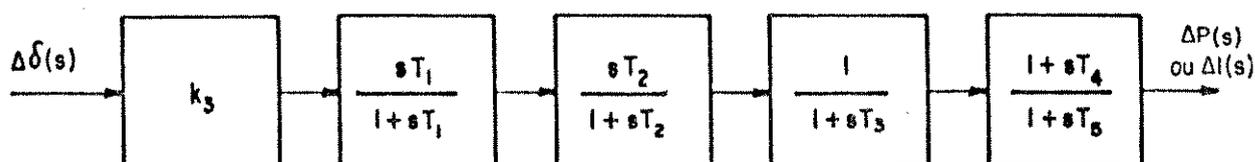


Figura 3.22 - Função de transferência do modelo IV.

A diferença primordial entre este modelo e os anteriores está no sinal de entrada utilizado. Neste caso emprega-se como sinal de entrada o erro existente entre o valor atual do ângulo de tensão da barra do inversor e seu valor inicial.

O sinal assim obtido é processado, levando-se a um sinal que irá alterar a potência ordem ou a corrente ordem.

### 3.8 - Modulação do Ângulo de Extinção.

Dependendo da topologia e das características do sistema ca-cc, a tentativa de estabilizá-lo através do STCC, utilizando o desvio de frequência como sinal de entrada, pode não produzir bons resultados, de acordo com a referência 11.

Ainda de acordo com a referência 11, pode-se afirmar que o comportamento da tensão da barra do inversor tem uma grande influência sobre o desempenho do sistema receptor. Portanto, se a oscilação de tensão desta barra puder ser eliminada, haverá uma grande melhoria para o sistema ca.

O modo normal de controle para um STCC é o retificador controlar a corrente e o inversor controlar a tensão cc. Isto significa que o inversor está controlando o ângulo  $\gamma$  no seu valor mínimo de operação normal. Como a potência reativa consumida pelo inversor é função do valor do ângulo  $\gamma$ , um aumento no valor do ângulo  $\gamma_{\text{mínimo}}$  significa um aumento no consumo de reativos. Assim, é possível controlar a tensão na barra ca do inversor por meio de modulação do valor limite de  $\gamma$ .

Este tipo de controle proporciona as seguintes vantagens :

- a) - A ação de controle pode ser feita sem qualquer comunicação entre o retificador e o inversor, podendo-se eliminar este canal do sistema de telecomunicação;

b) - Não há nenhuma influência sobre o sistema ca emissor, pois o objetivo principal a ser atingido com este tipo de controle é manter a tensão constante, o que significa potência cc constante.

O princípio do controle é medir a tensão da barra ca do inversor e, via um regulador, modular o valor limite de  $V_{\text{mínimo}}$  com uma adequada fase e amplitude. Com este tipo de controle só tensões acima do valor de referência podem ser controladas porque não há possibilidade de operação com um valor de  $V_{\text{mínimo}}$  menor que o valor nominal.

Pela inexistência de uma modelagem mais genérica, neste trabalho optou-se pela utilização da função de transferência empregada pelo STCC de Itaipu, fornecida pela referência 11 e alterada, em sua estrutura, com o propósito de facilitar sua implementação no programa digital utilizado.

A figura 3.23 apresenta o diagrama de blocos da modulação do ângulo  $\delta$ .

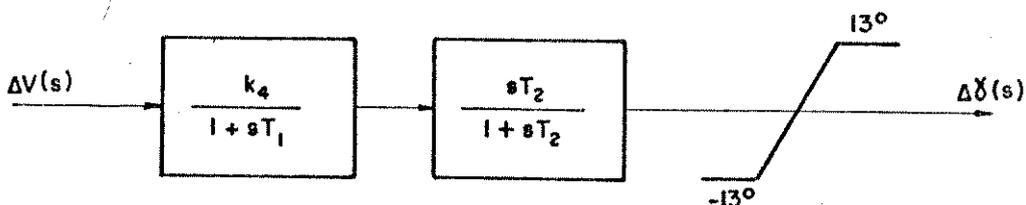


Figura 3.23 - Diagrama de blocos da modulação do ângulo  $\delta$ .

## CAPITULO 4

### **IMPLEMENTAÇÃO DIGITAL DAS FUNÇÕES DE AMORTECIMENTO E CONTROLE DE FREQUÊNCIA**

#### **4.1 - Introdução.**

Utilizando a filosofia já estabelecida pelo programa empregado para a simulação dinâmica dos sistemas elétricos (12), a forma de se representar um elo cc é através de fontes de corrente injetadas nas barras onde se encontram conectados os conversores do referido elo. Estas fontes de corrente são obtidas a partir das potências absorvidas ou fornecidas pelos conversores e das tensões das barras associadas..

O comportamento dinâmico de um sistema elétrico de potência, em estudos de estabilidade, é descrito por sistemas de equações algébricas e diferenciais. Portanto, a simulação do comportamento dinâmico do sistema consiste na resolução, simultânea no tempo, destes sistemas de equações.

O sistema de equações algébricas representa a rede de transmissão, os estatores das máquinas síncronas e as cargas que apresentam respostas instantâneas às perturbações às quais são submetidas.

O sistema de equações diferenciais descreve o comportamento dinâmico das partes girantes das máquinas síncronas (rotor, turbina), bem como seus sistemas de controle, cargas dinâmicas do sistema de potência ou qualquer outro componente que apresente características de operação que são alteradas ao longo do tempo.

No programa de estabilidade utilizado a simulação, ao longo do tempo, é executada em duas fases, para cada intervalo de tempo. Estas fases são :

a) As correntes injetadas pelas máquinas e cargas são calculadas, inicialmente, utilizando-se as informações fornecidas pela solução do fluxo de potência em regime permanente. A seguir são determinadas as tensões em todas as barras, utilizando-se a matriz admitância, armazenada de forma compacta, e a equação abaixo.

$$\bar{V} = [Y]^{-1} \bar{I}$$

b) As tensões e correntes obtidas na fase anterior são utilizadas como entradas para as máquinas e seus sistemas de controle, cujas respostas são determinadas por equações diferenciais. Uma vez obtidas as condições terminais das máquinas, retorna-se à primeira fase.

O processo continua iterativamente em cada intervalo de tempo, até que as variações das grandezas do sistema, em relação à iteração anterior, sejam menores que uma dada tolerância, o que equivale a se atingir a convergência no intervalo considerado. A seguir, passa-se a um novo intervalo de estudo, para o qual o método se repete.

A integração numérica das equações diferenciais é feita pelo método trapezoidal implícito, que será tratado adiante.

#### **4.2 - Considerações Sobre Um Sistema Típico a Ser Simulado.**

Com o intuito de esclarecer o modo de se incluir o elo cc no programa de estabilidade, considere-se o sistema típico apresentado na figura 4.1.

O programa de estabilidade transforma os geradores, as cargas dinâmicas e os conversores em fontes de corrente, como ilustra a figura 4.2.

O procedimento para se obter as fontes de corrente, que substituem os conversores, é apresentado a seguir.

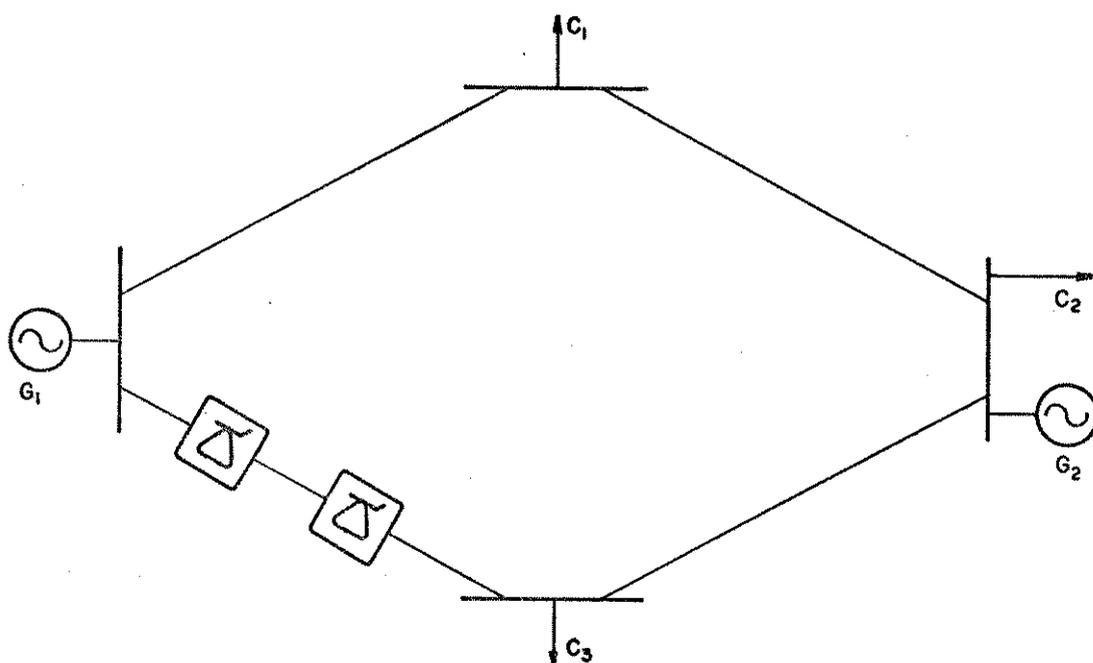


Figura 4.1 - Sistema típico simulado.

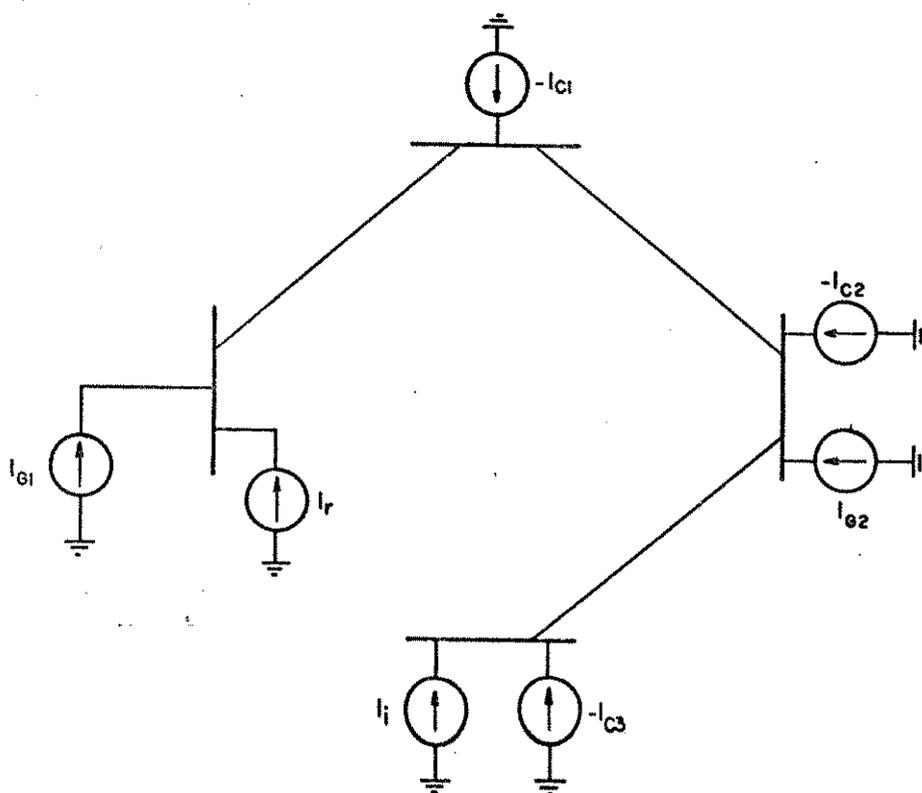


Figura 4.2 - Sistema transformado pelo programa de estabilidade

#### 4.2.1 - Análise Para o Retificador Com Resultados Estendidos Para o Inversor.

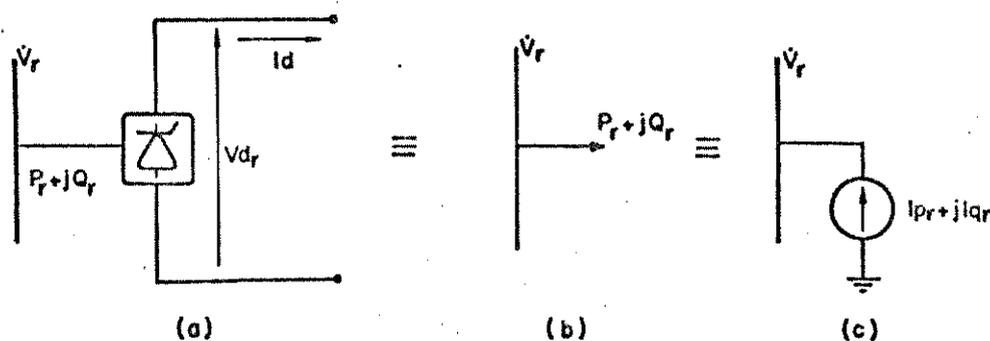


Figura 4.3 - a ) Circuito equivalente da ponte conversora.  
 b ) Representação por uma potência equivalente.  
 c ) Representação por fonte de corrente equivalente.

Conforme ilustra a figura 4.3, o problema consiste sempre em avaliar os novos valores de  $P$  e  $Q$ , para atender determinadas condições operativas. Assim, a cada momento, deve-se calcular  $V_{dr}$  e  $I_d$ , que são diretamente influenciados pelo ângulo de disparo ( $\alpha$ ), pela tensão na barra ca ( $V_r$ ) e pelos parâmetros do sistema ca.

Assim, torna-se relevante representar o elo cc pelo esquema mostrado na figura 4.4, onde aparece o controle de  $\alpha$ .

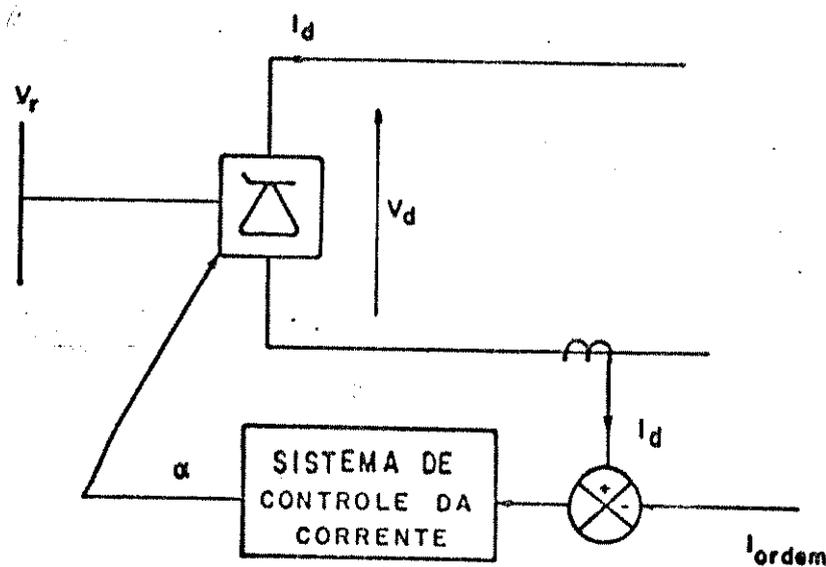


Figura 4.4 - Constituição básica do sistema de controle de um retificador para manter  $I_d$  constante.

A análise matemática, de acordo com a referência 6, mostra que:

$$V_{dr} = (3 \cdot \sqrt{2} \cdot V_r) \cdot [\cos \alpha + \cos (\alpha + \mu)] / (2 \cdot \pi) \quad (4.1)$$

$$V_{dr} = (3 \cdot \sqrt{2} \cdot V_r \cdot \cos \alpha) / \pi - (3 \cdot X_{cr} \cdot I_d) / \pi \quad (4.2)$$

$$V_{di} = (3 \cdot \sqrt{2} \cdot V_i) \cdot (\cos \gamma + \cos \beta) / (2 \cdot \pi) \quad (4.3)$$

$$V_{di} = (3 \cdot \sqrt{2} \cdot V_i \cdot \cos \gamma) / \pi - (3 \cdot X_{ci} \cdot I_d) / \pi \quad (4.4)$$

$$I_d = (V_{dr} - V_{di}) / R_l \quad (4.5)$$

As expressões anteriores são consideradas do tipo algébrico e apenas as variações impostas pelo controle, por exemplo, em  $\alpha$ , fornecem expressões do tipo diferencial. A título de ilustração, o controle de corrente constante impõe uma função do tipo da apresentada na figura 4.5.

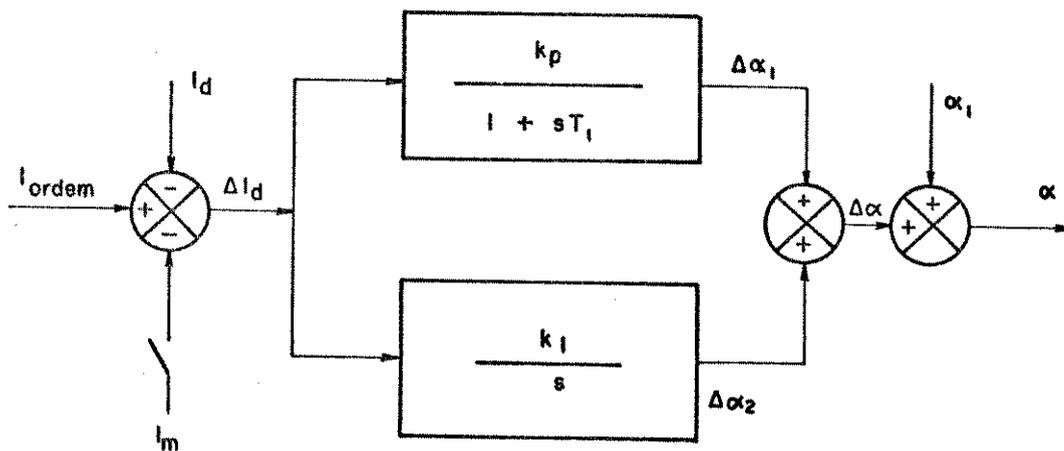


Figura 4.5 - Diagrama de blocos do controle do ângulo de ignição ( $\alpha$ ).

A saída ( $\alpha$ ) da figura 4.5 leva a equações diferenciais que, resolvidas pelo método trapezoidal, conduzem a cada iteração a um novo valor de  $\alpha$  a ser empregado nas expressões algébricas.

Embora o exposto acima tenha sido indicado de forma bastante resumida, pois o tratamento mais detalhado (referência 13) já se considera clássico, a apresentação teve por objetivo ilustrar como o elo cc é tratado na simulação dinâmica. Em vista dos propósitos deste trabalho, que é o de incorporar funções adicionais que venham a afetar  $\alpha$  ou  $\gamma$ , para um melhor desempenho dos sistemas ca, procurar-se-á adiante, desenvolver as equações destas funções adicionais de forma detalhada.

#### 4.2.2 - Método Trapezoidal Implícito.

O conjunto de equações algébricas pode ser resolvido por métodos convencionais que utilizem processos iterativos, enquanto que o conjunto de equações diferenciais pode ser solucionado através de métodos de integração numérica.

Seguindo a metodologia já implantada para a solução das equações diferenciais representativas do comportamento dinâmico dos componentes ca, foi utilizado para a obtenção da solução das equações diferenciais que representam o comportamento dinâmico dos componentes cc, o método trapezoidal implícito. Neste método as equações diferenciais cc são tratadas de forma a serem transformadas em equações algébricas a diferenças finitas que serão resolvidas da mesma forma, e ao mesmo tempo, que o conjunto de equações diferenciais ca.

A filosofia do método trapezoidal consiste em se aproximar a função integrável  $\dot{y}(t)$  por uma reta, em pequenos intervalos de tempo, obtendo-se assim, trapézios infinitesimais, cuja área corresponde a uma aproximação bastante boa da integral da função  $\dot{y}(t)$  no intervalo considerado.

De forma geral, uma equação diferencial  $\dot{y}(t) = y(t)$  pode ser colocada, para a resolução passo-a-passo, na forma da expressão 4.6.

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \int_t^{t + \Delta t} \dot{y}(t).dt \quad (4.6)$$

A figura 4.6 ilustra o caso de uma função integrável no tempo.

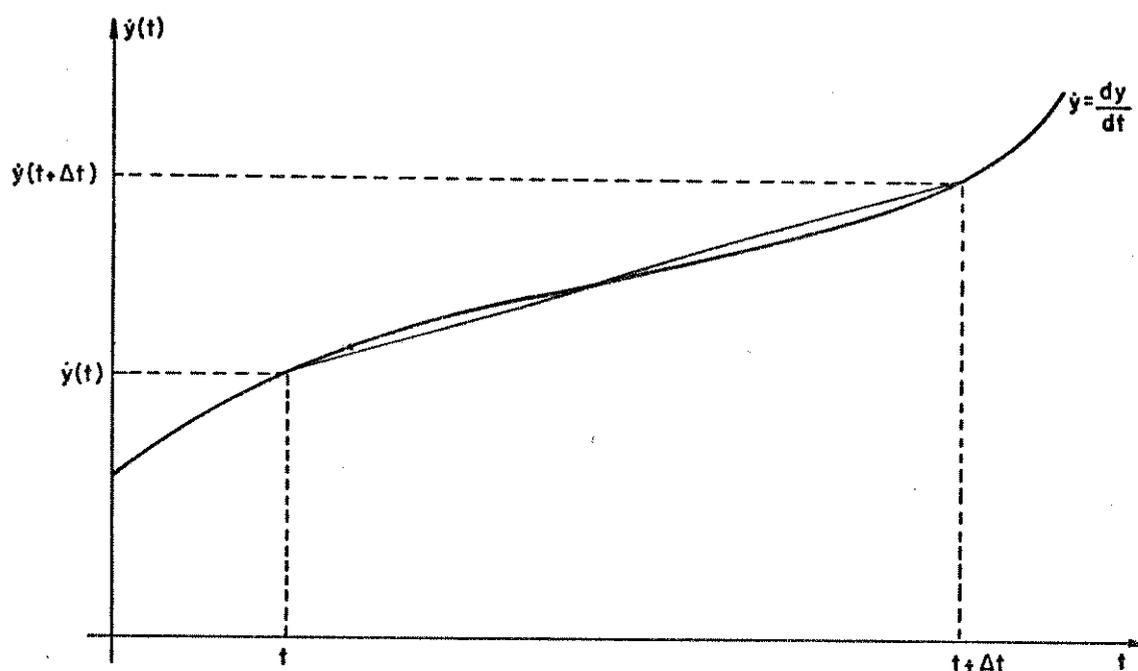


Figura 4.6 - Representação gráfica do método trapezoidal.

A partir de uma condição inicial  $[t_0, y(t_0)]$ , calcula-se a área do primeiro trapézio, limitado pelas abcissas  $t_0$  e  $t_1 = t_0 + \Delta t$ , que corresponde à área sob a curva que representa a função  $\dot{y}(t)$ . O valor desta área é adicionado ao valor de  $y(t_0)$ , obtendo-se assim o valor da função  $y(t)$  no instante  $t_1 = t_0 + \Delta t$  ou seja,  $y(t_1)$ .

Dando prosseguimento a este procedimento, obtém-se  $y(t_2)$ , com  $t_2 = t_1 + \Delta t$ , e assim até o limite do tempo de integração.

A partir da figura 4.6, pode-se escrever a expressão 4.7, que corresponde à área sob um trapézio infinitesimal, genérico.

$$\int_t^{t + \Delta t} \dot{y}(t).dt = (\Delta t/2) \cdot [\dot{y}(t + \Delta t) + \dot{y}(t)] \quad (4.7)$$

Levando-se 4.7 em 4.6 obtém-se 4.8, que é uma expressão algébrica.

$$y(t + \Delta t) = y(t) + (\Delta t/2).[\dot{y}(t + \Delta t) + \dot{y}(t)] \quad (4.8)$$

Uma função típica, genérica, no domínio da frequência, que deverá ser resolvida através do método trapezoidal implícito, é apresentada, no diagrama de blocos na figura 4.7.

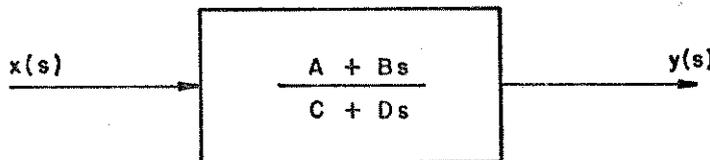


Figura 4.7 - Função de amortecimento típica, genérica.

De acordo com a figura 4.7, tem-se a expressão 4.9.

$$Y(S) = [(A + B.S)/(C + D.S)]X(S) \quad (4.9)$$

O desenvolvimento de (4.9) leva às expressões seguintes :

$$(C + D.S).Y(S) = (A + B.S)X(S) \quad (4.10)$$

$$C.Y(S) + D.S.Y(S) = A.X(S) + B.S.X(S) \quad (4.11)$$

$$S.[D.Y(S) - B.X(S)] = A.X(S) + C.Y(S) \quad (4.12)$$

A expressão (4.12), no domínio do tempo leva à expressão 4.13.

$$d[D.y(t) - B.x(t)]/dt = A.x(t) + C.y(t) \quad (4.13)$$

A solução de 4.13 é obtida aplicando-se o método trapezoidal implícito. Este método é, nos itens seguintes, aplicado às funções de amortecimento tipicamente encontradas nos elos cc e cujos aspectos físicos foram discutidos no capítulo anterior. Destaca-se, porém, que as funções a serem analisadas matematicamente fornecerão saídas que correspondem às definições de potência ordem, ou corrente ordem, conforme visto na figura 4.5.

### 4.3 - Desenvolvimento das Funções de Amortecimento e Controle de Frequência.

#### 4.3.1 - Modelo I.

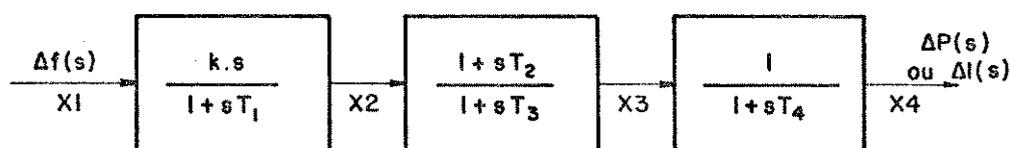


Figura 4.8 - Diagrama de blocos do modelo I.

A resolução da função de transferência é feita em etapas, como é mostrado a seguir :

#### A ) X2 em função de X1.

Da figura 4.8 tem-se 4.14.

$$X2 = [S.K/(1 + ST1)]X1 \quad (4.14)$$

Desenvolvendo 4.14, obtém-se 4.15 e 4.16.

$$X_2.(1 + S.T_1) = S.KX_1 \quad (4.15)$$

$$S.(KX_1 - T_1X_2) = X_2 \quad (4.16)$$

Colocando-se 4.16 no domínio do tempo tem-se 4.17.

$$d(KX_1 - T_1X_2)/dt = X_2 \quad (4.17)$$

Colocando-se o termo entre parenteses de forma a ser resolvido pelo método trapezoidal, tem-se 4.18.

$$\begin{aligned} KX_1(t + \Delta t) - T_1X_2(t + \Delta t) &= KX_1(t) - T_1X_2(t) + \\ (H/2).\{d[KX_1(t + \Delta t) - T_1X_2(t + \Delta t)]/dt\} &+ \\ d[KX_1(t) - T_1X_2(t)]/dt &\quad (4.18) \end{aligned}$$

Substituindo 4.17 em 4.18 tem-se 4.19.

$$\begin{aligned} KX_1(t + \Delta t) - T_1X_2(t + \Delta t) &= KX_1(t) - \\ - T_1X_2(t) + (H/2).[X_2(t + \Delta t) + X_2(t)] &\quad (4.19) \end{aligned}$$

Indicando-se as variáveis no instante  $t$  pelo índice  $A$  e as no instante  $t + \Delta t$  sem índice, obtém-se 4.20, 4.21 e 4.22.

$$KX_1 - T_1X_2 = KX_{1A} - T_1X_{2A} + (H/2).(X_2 + X_{2A}) \quad (4.20)$$

$$(T_1 + H/2)X_2 = (H/2 - T_1)X_{2A} + KX_{1A} - KX_1 \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} X_2 &= [(2.T_1 - H)/(2.T_1 + H)]X_{2A} - 2K.(2.T_1 + H)X_{1A} \\ &+ 2K.(2.T_1 + H)X_1 \quad (4.22) \end{aligned}$$

Com o objetivo de ordenar as expressões, faz-se as igualdades a seguir.

$$S1 = (2.T1 + H) \quad (4.23)$$

$$S2 = (2.T1 - H)/S1 \quad (4.24)$$

$$SB1 = 2.K/S1 \quad (4.25)$$

$$SA1 = S2.X2A + SB1.X1A \quad (4.26)$$

Substituindo-se 4.25 e 4.26 em 4.22 tem-se uma equação, 4.27, que expressa X2 em função de X1.

$$X2 = SA1 + SB1.X1 \quad (4.27)$$

### B ) X3 em função de X2.

Da figura 4.8 tem-se a expressão 4.28.

$$X3 = [(1 + S.T2).(1 + S.T3)]X2 \quad (4.28)$$

Desenvolvendo 4.28, obtém-se 4.29 e 4.30.

$$X3 + S.T3.X3 = X2 + S.T2.X2 \quad (4.29)$$

$$S.(T3.X3 - T2.X2) = X2 - X3 \quad (4.30)$$

Levando-se 4.30 para o domínio do tempo tem-se 4.31.

$$d(T3.X3 - T2.X2)/dt = X2 - X3 \quad (4.31)$$

Colocando-se o termo entre parenteses de forma a ser resolvido pelo método trapezoidal, tem-se 4.32.

$$\begin{aligned} T3.X3(t + \Delta t) - T2.X2(t + \Delta t) = & T3.X3(t) - T2.X2(t) + \\ (H/2). \{d[T3.X3(t + \Delta t) - T2.X2(t + \Delta t)]/dt\} + & \\ d[T3.X3(t) - T2.X2(t)]/dt & \end{aligned} \quad (4.32)$$

Substituindo 4.31 em 4.32 tem-se 4.33.

$$T_3 X_3(t + \Delta t) - T_2 X_2(t + \Delta t) = T_3 X_3(t) - T_2 X_2(t) + (H/2) [X_2(t + \Delta t) - X_3(t + \Delta t) + X_2(t) - X_3(t)] \quad (4.33)$$

Indicando-se as variáveis no instante  $t$  pelo índice  $A$  e as no instante  $t + \Delta t$  sem índice, obtém-se 4.34, 4.35 e 4.36.

$$T_3 X_3 - T_2 X_2 = T_3 X_{3A} - T_2 X_{2A} + (H/2) (X_2 - X_3 + X_{2A} - X_{3A}) \quad (4.34)$$

$$(T_3 + H/2) X_3 = (T_3 - H/2) X_{3A} + (H/2 - T_2) X_{2A} + (T_2 + H/2) X_2 \quad (4.35)$$

$$X_3 = [(2.T_3 - H)/(2.T_3 + H)] X_{3A} + [(H - 2.T_2)/(2.T_3 + H)] X_{2A} + [(2.T_2 + H)/(2.T_3 + H)] X_2 \quad (4.36)$$

Com o objetivo de ordenar as expressões faz-se as igualdades a seguir.

$$S_3 = (2.T_3 + H) \quad (4.37)$$

$$S_4 = (2.T_3 - H)/S_3 \quad (4.38)$$

$$S_5 = (H - 2.T_2)/S_3 \quad (4.39)$$

$$S_{B2} = (2.T_2 + H)/S_3 \quad (4.40)$$

$$S_{A2} = S_4 X_{3A} + S_5 X_{2A} \quad (4.41)$$

Substituindo-se 4.40 e 4.41 em 4.36 tem-se uma equação, 4.42, que expressa  $X_3$  em função de  $X_2$ .

$$X_3 = S_{A2} + S_{B2} X_2 \quad (4.42)$$

C) X4 em função de X3.

Da figura 4.8 tem-se 4.43.

$$X4 = [1/(1 + S.T4)]X3 \quad (4.43)$$

Desenvolvendo 4.43, obtém-se 4.44 e 4.45.

$$X4.(1 + S.T4) = X3 \quad (4.44)$$

$$S.T4X4 = X3 - X4 \quad (4.45)$$

Levando-se 4.45 para o domínio do tempo tem-se 4.46.

$$d(T4X4)/dt = X3 - X4 \quad (4.46)$$

Colocando-se o termo entre parenteses de forma a ser resolvido pelo método trapezoidal, tem-se 4.47.

$$T4X4(t + \Delta t) = T4X4(t) + (H/2).\{d[T4X4(t + \Delta t)]/dt + d[T4X4(t)]/dt\} \quad (4.47)$$

Substituindo 4.46 em 4.47 tem-se 4.48.

$$T4X4(t + \Delta t) = T4X4(t) + (H/2).[X3(t + \Delta t) - X4(t + \Delta t) + X3(t) - X4(t)] \quad (4.48)$$

Indicando-se as variáveis no instante t pelo índice A e as no instante t + Δt sem índice, obtém-se 4.49, 4.50 e 4.51.

$$T4X4 = T4X4A + (H/2).(X3 - X4 + X3A - X4A) \quad (4.49)$$

$$(T_4 + H/2)X_4 = (T_4 - H/2)X_{4A} + (H/2)X_{3A} + (H/2)X_3 \quad (4.50)$$

$$X_4 = [(2.T_4 - H)/(2.T_4 + H)]X_{4A} + [H/(2.T_4 + H)]X_{3A} + [H/(2.T_4 + H)]X_3 \quad (4.51)$$

Com o objetivo de ordenar as expressões faz-se as igualdades a seguir.

$$S_6 = (2.T_4 + H) \quad (4.52)$$

$$S_7 = (2.T_4 - H)/S_6 \quad (4.53)$$

$$S_{B3} = H/S_6 \quad (4.54)$$

$$S_{A3} = S_7.X_{4A} + S_{B3}.X_{3A} \quad (4.55)$$

Substituindo-se 4.54 e 4.55 em 4.51 tem-se uma equação, 4.56, que expressa  $X_4$  em função de  $X_3$ .

$$X_4 = S_{A3} + S_{B3}.X_3 \quad (4.56)$$

#### 4.3.2 - Modelo II.

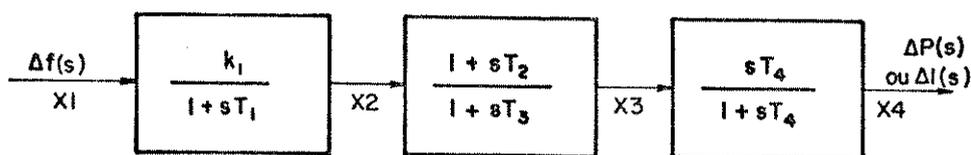


Figura 4.9 - Diagrama de blocos do modelo II.

Da mesma forma do item 4.3.1, apresenta-se a seguir a resolução da função de transferência do modelo II.

A ) X2 em função de X1.

Da figura 4.9 tem-se 4.57.

$$X2 = [k1/(1 + S.T1)]X1 \quad (4.57)$$

Desenvolvendo 4.57, obtém-se 4.58 e 4.59.

$$X2.(1 + S.T1) = K1X1 \quad (4.58)$$

$$S.T1.X2 = K1X1 - X2 \quad (4.59)$$

A expressão 4.59 no domínio do tempo fornece 4.60.

$$d(T1.X2)/dt = K1X1 - X2 \quad (4.60)$$

Colocando-se o termo entre parenteses de forma a ser resolvido pelo método trapezoidal, tem-se 4.61.

$$T1.X2(t + \Delta t) = T1.X2(t) + (H/2).\{d[T1.X2(t + \Delta t)]/dt + d[T1.X2(t)]/dt\} \quad (4.61)$$

Substituindo 4.60 em 4.61 tem-se 4.62.

$$T1.X2(t + \Delta t) = T1.X2(t) + (H/2).[K1X1(t + \Delta t) - X2(t + \Delta t) + K1X1(t) - X2(t)] \quad (4.62)$$

Indicando-se as variáveis no instante t pelo índice A e as no instante t + Δt sem índice, obtém-se 4.63, 4.64 e 4.65.

$$T1.X2 = T1.X2A + (H/2).(K1X1 - X2 + K1X1A - X2A) \quad (4.63)$$

$$(T1 + H/2)X2 = (T1 - H/2)X2A + (K1H/2)X1A + (K1H/2)X1 \quad (4.64)$$

$$X2 = [(2.T1 - H)/(2.T1 + H)]X2A + [K1H/(2.T1 + H)]X1A + [K1H/(2.T1 + H)]X1 \quad (4.65)$$

Com o objetivo de ordenar as expressões faz-se as igualdades a seguir.

$$S1 = (2.T1 + H) \quad (4.66)$$

$$S2 = (2.T1 - H)/S1 \quad (4.67)$$

$$SB1 = K1H/S1 \quad (4.68)$$

$$SA1 = S2.X2A + SB1.X1A \quad (4.69)$$

Substituindo 4.68 e 4.69 em 4.65 tem-se uma equação, 4.70, que expressa X2 em função de X1.

$$X2 = SA1 + SB1.X1 \quad (4.70)$$

### B ) X3 em função de X2.

Da figura 4.9 tem-se 4.71.

$$X3 = [(1 + S.T2)/(1 + S.T3)].X2 \quad (4.71)$$

O desenvolvimento é semelhante ao do item 4.3.1-B. Portanto, pode-se escrever a expressão 4.72.

$$X3 = [(2.T3 - H)/(2.T3 + H)]X3A + [(H - 2.T2)/(2.T3 + H)]X2A + [(2.T2 + H)/(2.T3 + H)]X2 \quad (4.72)$$

Com o objetivo de ordenar as expressões faz-se as igualdades a seguir.

$$S3 = 2.T3 + H \quad (4.73)$$

$$S4 = (2.T3 - H)/S3 \quad (4.74)$$

$$S5 = (H - 2.T2)/S3 \quad (4.75)$$

$$SB2 = (2.T2 + H)/S3 \quad (4.76)$$

$$SA2 = S4.X3A + S5.X2A \quad (4.77)$$

Substituindo 4.76 e 4.77 em 4.72 tem-se uma equação, 4.78, que expressa X3 em função de X2.

$$X3 = SA2 + SB2.X2 \quad (4.78)$$

### C) X4 em função de X3.

Da figura 4.9 tem-se 4.79.

$$X4 = [S.T4/(1 + S.T4)].X3 \quad (4.79)$$

Desenvolvendo 4.79, obtém-se 4.80 e 4.81.

$$X4.(1 + S.T4) = S.T4.X3 \quad (4.80)$$

$$S.(T4.X4 - T4.X3) = -X4 \quad (4.81)$$

Levando-se 4.81 para o domínio do tempo tem-se 4.82.

$$d(T4.X4 - T4.X3)/dt = -X4 \quad (4.82)$$

Colocando-se o termo entre parenteses de forma a ser resolvido pelo método trapezoidal, tem-se 4.82.

$$T_4 X_4(t + \Delta t) - T_4 X_3(t + \Delta t) = T_4 X_4(t) - T_4 X_3(t) + \\ (H/2) \cdot \{d[T_4 X_4(t + \Delta t) - T_4 X_3(t + \Delta t)]/dt + \\ d[T_4 X_4(t) - T_4 X_3(t)]/dt\} \quad (4.83)$$

Substituindo 4.82 em 4.83 tem-se 4.84.

$$T_4 X_4(t + \Delta t) - T_4 X_3(t + \Delta t) = T_4 X_4(t) - T_4 X_3(t) + \\ (H/2) \cdot [-X_4(t + \Delta t) - X_4(t)] \quad (4.84)$$

Indicando-se as variáveis no instante  $t$  pelo índice  $A$  e as no instante  $t + \Delta t$  sem índice, obtém-se 4.85, 4.86 e 4.87.

$$T_4 X_4 - T_4 X_3 = T_4 X_{4A} - T_4 X_{3A} + \\ (H/2) \cdot (-X_4 - X_{4A}) \quad (4.85)$$

$$(T_4 + H/2) X_4 = (T_4 - H/2) X_{4A} - T_4 X_{3A} + T_4 X_3 \quad (4.86)$$

$$X_4 = [(2 \cdot T_4 - H)/(2 \cdot T_4 + H)] X_{4A} - \\ [2 \cdot T_4/(2 \cdot T_4 + H)] X_{3A} + [2 \cdot T_4/(2 \cdot T_4 + H)] X_3 \quad (4.87)$$

Com o objetivo de ordenar as expressões faz-se as igualdades a seguir.

$$S_6 = (2 \cdot T_4 + H) \quad (4.88)$$

$$S_7 = (2 \cdot T_4 - H)/S_6 \quad (4.89)$$

$$S_{B3} = 2 \cdot T_4/S_6 \quad (4.90)$$

$$S_{A3} = S_7 X_{4A} - S_{B3} X_{3A} \quad (4.91)$$

Substituindo-se 4.90 e 4.91 em 4.87 tem-se uma equação, 4.92, que expressa  $X_4$  em função de  $X_3$ .

$$X_4 = S_{A3} + S_{B3} X_3 \quad (4.92)$$

## 4.3.3 - Modelo III.

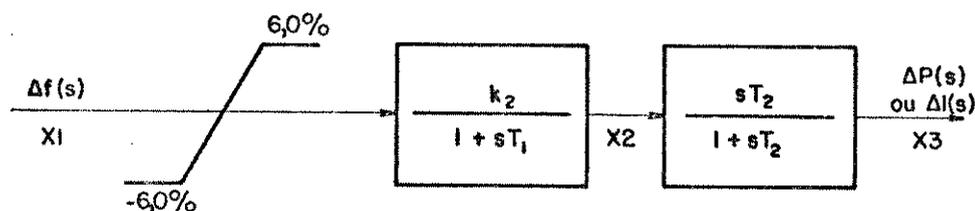


Figura 4.10 - Diagrama de blocos do modelo III.

A ) X2 em função de X1.

Da figura 4.10 tem-se 4.93.

$$X2 = [K2/(1 + S.T1)]X1 \quad (4.93)$$

O desenvolvimento é semelhante ao do item 4.3.2 - A. Portanto pode-se escrever a expressão 4.94.

$$X2 = [(2.T1 - H)/(2.T1 + H)]X2A + [K2.H/(2.T1 + H)]X1A + [K2.H/(2.T1 + H)]X1 \quad (4.94)$$

Com o objetivo de ordenar as expressões faz-se as igualdades a seguir.

$$S1 = (2.T1 + H) \quad (4.95)$$

$$S2 = (2.T1 - H)/S1 \quad (4.96)$$

$$SB1 = K2.H/S1 \quad (4.97)$$

$$SA1 = S2.X2A + SB1.X1A \quad (4.98)$$

Substituindo-se 4.97 e 4.98 em 4.94 tem-se uma equação, 4.99, que expressa  $X_2$  em função de  $X_1$ .

$$X_2 = SA_1 + SB_1 X_1 \quad (4.99)$$

B )  $X_3$  em função de  $X_2$ .

Da figura 4.10 tem-se 4.100.

$$X_3 = [S.T_2/(1 + S.T_2)].X_2 \quad (4.100)$$

O desenvolvimento é semelhante ao do item 4.3.2 - C. Portanto pode-se escrever a expressão 4.101.

$$X_3 = [(2.T_2 - H)/(2.T_2 + H)].X_{3A} - [2.T_2/(2.T_2 + H)].X_{2A} + [2.T_2/(2.T_2 + H)].X_2 \quad (4.101)$$

Com o objetivo de ordenar as expressões faz-se as igualdades a seguir.

$$S_3 = (2.T_2 + H) \quad (4.102)$$

$$S_4 = (2.T_2 - H)/S_3 \quad (4.103)$$

$$SB_2 = 2.T_2/S_3 \quad (4.104)$$

$$SA_2 = S_4.X_{3A} - SB_2.X_{2A} \quad (4.105)$$

Substituindo-se 4.104 e 4.105 em 4.101 tem-se uma equação, 4.106, que expressa  $X_3$  em função de  $X_2$ .

$$X_3 = SA_2 + SB_2 X_2 \quad (4.106)$$

## 4.3.4 - Modelo IV.

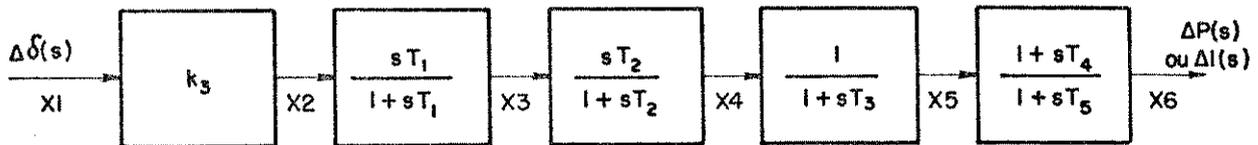


Figura 4.11 - Diagrama de blocos do modelo IV.

A ) X2 em função de X1.

Da figura 4.11 tem-se 4.107.

$$X2 = K3 X1 \quad (4.107)$$

Neste caso X2 já está em função de X1.

B ) X3 em função de X2.

Da figura 4.11 tem-se 4.108.

$$X3 = [sT1 / (1 + sT1)] X2 \quad (4.108)$$

O desenvolvimento é semelhante ao do item 4.3.2 - C. Portanto pode-se escrever a expressão 4.109.

$$X3 = [(2.T1 - H) / (2.T1 + H)] X3A - [2.T1 / (2.T1 + H)] X2A + [2.T1 / (2.T1 + H)] X2 \quad (4.109)$$

Com o objetivo de ordenar as expressões faz-se as igualdades a seguir.

$$S1 = (2.T1 + H) \quad (4.110)$$

$$S2 = (2.T1 - H)/S1 \quad (4.111)$$

$$SB2 = 2.T1/S1 \quad (4.112)$$

$$SA2 = S2.X3A - SB2.X2A \quad (4.113)$$

Substituindo-se 4.112 e 4.113 em 4.109 tem-se uma equação, 4.114, que expressa  $X3$  em função de  $X2$ .

$$X3 = SA2 + SB2.X2 \quad (4.114)$$

C)  $X4$  em função de  $X3$ .

Da figura 4.11 tem-se 4.115.

$$X4 = [S.T2/(1 + S.T2)]X3 \quad (4.115)$$

O desenvolvimento é semelhante ao item 4.3.2 - C. Portanto pode-se escrever a expressão 4.116.

$$X4 = [(2.T2 - H)/(2.T2 + H)]X4A - [2.T2/(2.T2 + H)]X3A + [2.T2/(2.T2 + H)]X3 \quad (4.116)$$

Com o objetivo de ordenar as expressões faz-se as igualdades a seguir.

$$S3 = (2.T2 + H) \quad (4.117)$$

$$S4 = (2.T2 - H)/S3 \quad (4.118)$$

$$SB3 = 2.T2/S3 \quad (4.119)$$

$$SA3 = S4.X4A - SB3.X3A \quad (4.120)$$

Substituindo-se 4.119 e 4.120 em 4.116 tem-se uma equação, 4.121, que expressa  $X_4$  em função de  $X_3$ .

$$X_4 = SA_3 + SB_3 X_3 \quad (4.121)$$

D)  $X_5$  em função de  $X_4$ .

Da figura 4.11 tem-se 4.122.

$$X_5 = [1/(1 + S.T_3)]X_4 \quad (4.122)$$

O desenvolvimento é semelhante ao do item 4.3.1 - C. Portanto pode-se escrever a expressão 4.123.

$$X_5 = [(2.T_3 - H)/(2.T_3 + H)]X_{5A} + [H/(2.T_3 + H)]X_{4A} + [H/(2.T_3 + H)]X_4 \quad (4.123)$$

Com o objetivo de ordenar as expressões faz-se as igualdades a seguir.

$$S_5 = (2.T_3 + H) \quad (4.124)$$

$$S_6 = (2.T_3 - H)/S_5 \quad (4.125)$$

$$SB_4 = H/S_5 \quad (4.126)$$

$$SA_4 = S_6 X_{5A} + SB_4 X_{4A} \quad (4.127)$$

Substituindo-se 4.126 e 4.127 em 4.123 tem-se uma equação, 4.128, que expressa  $X_5$  em função de  $X_4$ .

$$X_5 = SA_4 + SB_4 X_4 \quad (4.128)$$

E ) X6 em função e X5.

Da figura 4.11 tem-se 4.129.

$$X6 = [(1 + S.T4)/(1 + S.T5)]X5 \quad (4.129)$$

O desenvolvimento é semelhante ao do item 4.3.1 - B. Portanto pode-se escrever a expressão 4.130.

$$\begin{aligned} X6 = & [(2.T5 - H)/(2.T5 + H)]X6A + \\ & [(H - 2.T4)/(2.T5 + H)]X5A + \\ & [(2.T4 + H)/(2.T5 + H)]X5 \end{aligned} \quad (4.130)$$

Com o objetivo de ordenar as expressões faz-se as igualdades a seguir.

$$S7 = (2.T5 + H) \quad (4.131)$$

$$S8 = (2.T5 - H)/S7 \quad (4.132)$$

$$S9 = (H - 2.T4)/S7 \quad (4.133)$$

$$SB5 = (2.T4 + H)/S7 \quad (4.134)$$

$$SA5 = S8.X6A + S9.X5A \quad (4.135)$$

Substituindo-se 4.134 e 4.135 em 4.130 tem-se uma equação, 4.136, que expressa X6 em função de X5.

$$X6 = SA5 + SB5.X5 \quad (4.136)$$

## 4.3.5 - Modelo V.

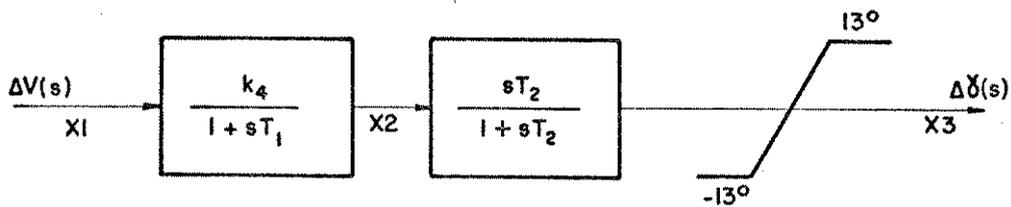


Figura 4.12. Diagrama de blocos do modelo V.

A) X2 em função de X1.

Da figura 4.12 tem-se 4.137.

$$X2 = [K4/(1 + S.T1)]X1 \quad (4.137)$$

O desenvolvimento é semelhante ao do item 4.3.2 - A. Portanto pode-se escrever a expressão 4.138.

$$X2 = [(2.T1 - H)/(2.T1 + H)]X2A + [K4H/(2.T1 + H)]X1A + [K4H/(2.T1 + H)]X1 \quad (4.138)$$

Com o objetivo de ordenar as expressões faz-se as igualdades a seguir.

$$S1 = (2.T1 + H) \quad (4.139)$$

$$S2 = (2.T1 - H)/S1 \quad (4.140)$$

$$SB1 = K4H/S1 \quad (4.141)$$

$$SA1 = S2.X2A + SB1.X1A \quad (4.142)$$

Substituindo-se 4.141 e 4.142 em 4.138 tem-se uma equação, 4.143, que expressa  $X_2$  em função de  $X_1$ .

$$X_2 = SA_1 + SB_1 X_1 \quad (4.143)$$

B )  $X_3$  em função de  $X_2$ .

Da figura 4.12 tem-se 4.144.

$$X_3 = [S.T_2/(1 + S.T_2)]X_2 \quad (4.144)$$

O desenvolvimento é semelhante ao do item 4.3.2 - C. Portanto pode-se escrever a expressão 4.145.

$$X_3 = [(2.T_2 - H)/(2.T_2 + H)]X_{3A} - [2.T_2/(2.T_2 + H)]X_{2A} + [2.T_2/(2.T_2 + H)]X_2 \quad (4.145)$$

Com o objetivo de ordenar as expressões faz-se as igualdades a seguir.

$$S_3 = (2.T_2 + H) \quad (4.146)$$

$$S_4 = (2.T_2 - H)/S_3 \quad (4.147)$$

$$SB_2 = 2.T_2/S_3 \quad (4.148)$$

$$SA_2 = S_4.X_{3A} - SB_2.X_{2A} \quad (4.149)$$

Substituindo-se 4.148 e 4.149 em 4.145 tem-se uma equação, 4.150, que expressa  $X_3$  em função de  $X_2$ .

$$X_3 = SA_2 + SB_2.X_2 \quad (4.150)$$

#### **4.4 - SUBROTINAS ALTERADAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA.**

Com o objetivo de implementar as funções de transferência, desenvolvidas no item anterior, foi necessário realizar alterações em várias subrotinas já existentes no programa digital utilizado para o estudo de estabilidade transitória.

Foi feita a opção pelo procedimento de se alterar subrotinas já existentes, em detrimento da criação de novas, com o intuito de se manter a estrutura original do programa citado.

A seguir menciona-se a função de cada subrotina alterada, bem como as modificações realizadas.

##### **4.4.1 - Subrotina Eloip.**

A subrotina Eloip tem como função a leitura e a impressão dos dados dos conversores, necessários ao processamento, além de alocá-los na topologia do sistema elétrico.

Esta subrotina foi alterada com o objetivo de possibilitar a leitura e a impressão dos ganhos e constantes de tempo das funções de transferência.

##### **4.4.2 - Subrotina Elocon.**

Esta subrotina tem como função o cálculo das constantes das variáveis integráveis do elo, que são usadas no método de integração trapezoidal implícito.

Foram efetuadas alterações nesta subrotina, visando o cálculo das constantes das variáveis integráveis necessárias na solução, pelo método de integração trapezoidal implícito, das funções de transferência em questão.

#### 4.4.3 - Subrotina Elotra.

A subrotina Elotra executa a integração das variáveis integráveis, utilizando o método trapezoidal implícito.

Esta subrotina foi alterada, para executar a integração das variáveis integráveis das funções de transferência já mencionadas.

#### 4.4.4 - Subrotina Elout.

Esta subrotina é responsável pela impressão das curvas e tabelas dos resultados do elo cc, que estavam armazenados no arquivo temporário.

Foram efetuadas alterações necessárias devido à implementação das funções de transferência.

Além das subrotinas mencionadas acima, várias outras tiveram pequenas alterações necessárias ao funcionamento do programa digital.

## CAPITULO 5

### **DESEMPENHO DAS FUNÇÕES DE AMORTECIMENTO E CONTROLE.**

#### **5.1 - Introdução.**

Uma vez propostas as funções de controle, desenvolvidos seus modelos matemáticos e feita a implementação digital, a próxima etapa consiste em verificar a sua eficiência num sistema elétrico. Para tanto, processaram-se diversos casos, sendo os resultados apresentados neste capítulo. Objetivando uma maior simplicidade na interpretação dos resultados, optou-se por um sistema único, cujas principais características são fornecidas em seguida. Para este sistema foram efetuadas diversas simulações, no que tange a variações de funções de controle e seus correspondentes parâmetros, conforme será descrito em detalhe ao longo do capítulo.

Com base nos casos processados poder-se-á, então, estabelecer comparações entre as diferentes funções de controle.

#### **5.2 - Características do Sistema Simulado.**

##### **5.2.1 - Diagrama Unifilar.**

A figura 5.1 apresenta o diagrama unifilar do sistema de potência simulado. Tal sistema é composto por 17 barras, 23 linhas (sendo que 2 linhas correspondem aos transformadores de entrada dos conversores), 4 geradores, 1 linha em corrente contínua (com 2 conversores) e 2 bancos de capacitores responsáveis pelo fornecimento de parte da potência reativa exigida pelos conversores. Diversas cargas completam o sistema em estudo.

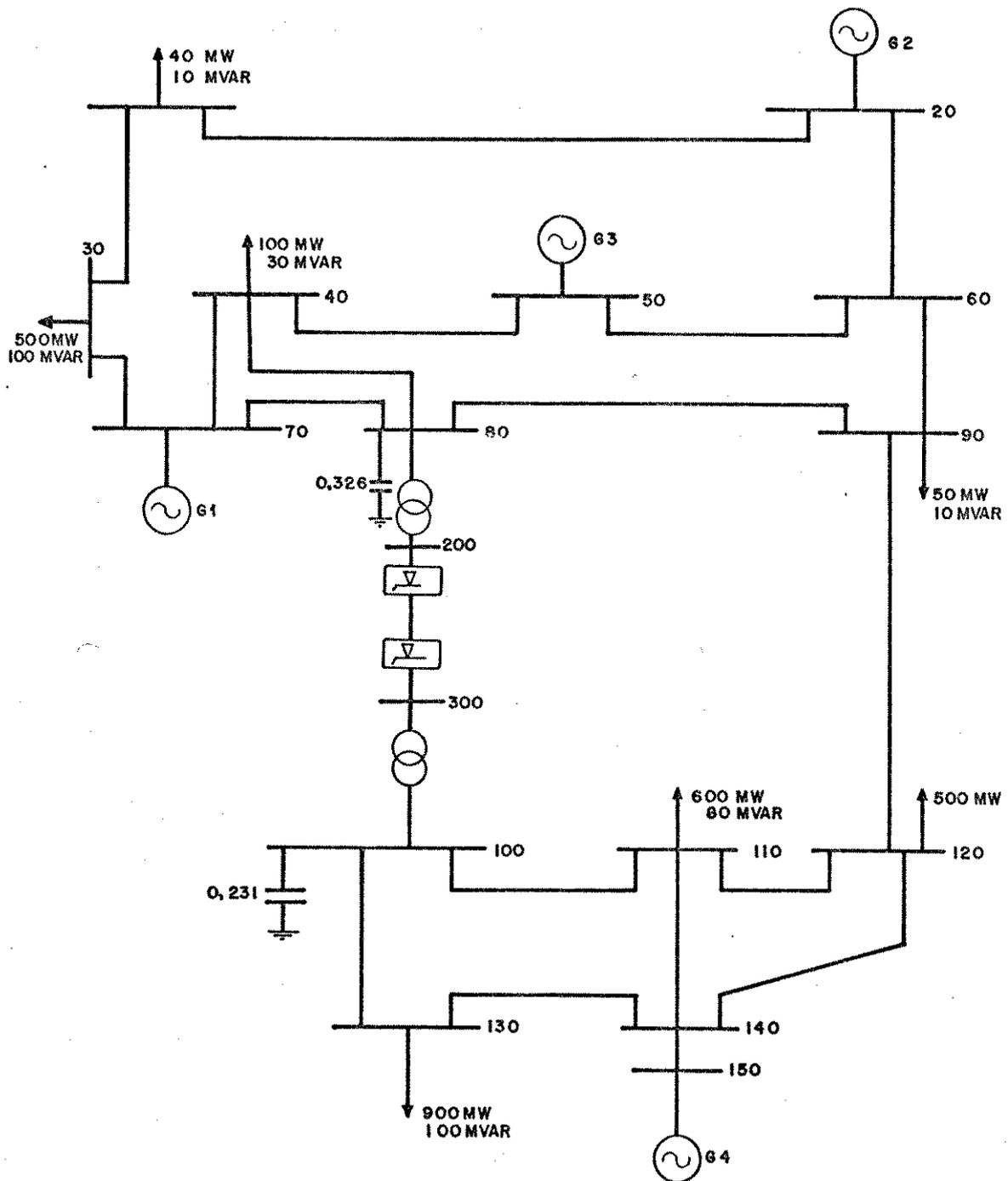


Figura 5.1 - Diagrama unifilar do sistema simulado.

### 5.2.2 - Parâmetros do Sistema.

Os valores dos parâmetros do sistema simulado são apresentados nas seguintes tabelas:

Tabela 5.1 - Parâmetros de linhas e transformadores.

Tabela 5.2 - Parâmetros das máquinas síncronas.

Tabela 5.3 - Parâmetros dos reguladores de tensão.

Tabela 5.4 - Parâmetros dos reguladores de velocidade.

Tabela 5.5 - Parâmetros do Elo cc.

Tabela 5.6 - Parâmetros dos capacitores "shunt".

### 5.2.3 - Fluxo de Carga ca-cc.

O resultado do fluxo de carga do sistema foi obtido utilizando-se um programa de fluxo de carga ca-cc. O resultado é apresentado na tabela 5.7.

### 5.2.4 - Modelagem das Cargas.

Com a preocupação de se destacar os efeitos dinâmicos devidos ao comportamento do elo cc, optou-se por se representar as cargas do sistema por elementos do tipo impedância constante.

A tabela 5.8 apresenta a localização das cargas no sistema, bem como os seus valores.

| B. EMIS. | B. RECEP. | R ( pu) | X (pu)  | XC (pu) |
|----------|-----------|---------|---------|---------|
| 10       | 20        | 0.0053  | 0.0084  | 0.0053  |
| 10       | 30        | 0.0042  | 0.0086  | 0.0073  |
| 20       | 60        | 0.0023  | 0.0058  | 0.0065  |
| 30       | 70        | 0.0074  | 0.0044  | 0.0048  |
| 40       | 50        | 0.0031  | 0.0068  | 0.0052  |
| 40       | 70        | 0.0015  | 0.0055  | 0.0085  |
| 40       | 80        | 0.0012  | 0.0073  | 0.0072  |
| 50       | 60        | 0.0015  | 0.0067  | 0.0035  |
| 60       | 90        | 0.0010  | 0.0051  | 0.0065  |
| 70       | 80        | 0.0008  | 0.0069  | 0.0034  |
| 80       | 90        | 0.0002  | 0.0055  | 0.0088  |
| 90       | 120       | 0.0023  | 0.0058  | 0.0088  |
| 100      | 110       | 0.0020  | 0.0050  | 0.0098  |
| 100      | 130       | 0.0011  | 0.0063  | 0.0160  |
| 110      | 120       | 0.0003  | 0.0052  | 0.0092  |
| 110      | 140       | 0.0004  | 0.0020  | 0.0150  |
| 120      | 140       | 0.0012  | 0.0073  | 0.0090  |
| 130      | 140       | 0.0031  | 0.0060  | 0.0070  |
| 140      | 150       | 0.0009  | 0.0050  | 0.0080  |
| 80       | 200       | 0.0000  | 0.0033  | 0.0000  |
| 100      | 300       | 0.0000  | 0.0033  | 0.0000  |
| 80       | 80        | 0.0000  | -0.3259 | 0.0000  |
| 100      | 100       | 0.0000  | -0.2406 | 0.0000  |

Tabela 5.1 - Parâmetros de linhas e transformadores.

| MAQUINA    | 1      | 2      | 3      | 4      |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| BARRA      | 70     | 20     | 5      | 150    |
| MODELO     | 4      | 4      | 4      | 4      |
| $X_d$      | 1.770  | 1.770  | 1.770  | 1.770  |
| $X_q$      | 1.750  | 1.750  | 1.750  | 1.750  |
| $X'_d$     | 0.330  | 0.330  | 0.330  | 0.330  |
| $X'_q$     | 0.455  | 0.455  | 0.455  | 0.455  |
| $X''_d$    | 0.235  | 0.235  | 0.235  | 0.235  |
| $X''_q$    | 0.235  | 0.235  | 0.235  | 0.235  |
| $T'_{do}$  | 3.400  | 3.400  | 3.400  | 3.400  |
| $T'_{qo}$  | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  |
| $T''_{do}$ | 0.031  | 0.031  | 0.031  | 0.031  |
| $T''_{qo}$ | 0.058  | 0.058  | 0.058  | 0.058  |
| C. INERCIA | 1.000  | INFIN. | 1.000  | 1.000  |
| MVA BASE   | 1400.0 | 300.0  | 1200.0 | 1200.0 |

Tabela 5.2 - Parâmetros das máquinas síncronas.

| MAQUINA                       | 1     | 2     | 3     | 4     |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| BARRA                         | 70    | 20    | 50    | 150   |
| MODELO                        | 1     | 1     | 1     | 1     |
| $K_e(\text{pu})$              | 200   | 200   | 200   | 200   |
| $T_e(\text{s})$               | 0.441 | 0.441 | 0.441 | 0.441 |
| $K_f(\text{pu})$              | 0.067 | 0.067 | 0.067 | 0.067 |
| $T_f(\text{s})$               | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| $E_{\text{max}}(\text{pu})$   | 5.910 | 5.910 | 5.910 | 5.910 |
| $E_{\text{min}}(\text{pu})$   | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| $D_{\text{max}}(\text{pu/s})$ | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| $K_e(\text{pu})$              | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| $T_e(\text{s})$               | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 |

Tabela 5.3 - Parâmetros dos reguladores de tensão.

| MAQUINA     | 1      | 2      | 3      | 4      |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| BARRA       | 70     | 20     | 50     | 150    |
| GANHO(F.B.) | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| Tb(s)       | 0.5000 | 0.5000 | 0.5000 | 0.5000 |
| R(pu)       | 0.0500 | 0.0500 | 0.0500 | 0.0500 |
| T1(s)       | 0.2000 | 0.2000 | 0.2000 | 0.2000 |
| T2(s)       | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| T3(s)       | 0.0830 | 0.0830 | 0.0830 | 0.0830 |
| T4(s)       | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 |
| T5(s)       | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 |
| Pmax.(MW)   | 5000   | 5000   | 5000   | 5000   |

Tabela 5.4 - Parâmetros dos reguladores de velocidade.

|   |                               |       |
|---|-------------------------------|-------|
| Número de polos                                     | 1                             |       |
| Número de pontes/polo                               | 1                             |       |
| Resistência da linha cc/polo (ohms)                 | 10.00                         |       |
| Corrente margem (kA)                                | 0.17                          |       |
| Corrente ordem de religamento (kA)                  | 0.40                          |       |
| Corrente ordem - limite máximo (kA)                 | 5.00                          |       |
| Corrente ordem - limite mínimo (kA)                 | 0.17                          |       |
| Taxa de variação máxima da corrente ordem (kA/s)    | 50.00                         |       |
| Taxa de religamento do elo após bloqueio (kA/s)     | 5.00                          |       |
| Tensão mínima de bloqueio do retificador (kV)       | 0.00                          |       |
| Tensão mínima de bloqueio do inversor (kV)          | 0.00                          |       |
| Limite superior de tensão do VDCOL (kV)             | 0.00                          |       |
| Limite inferior de tensão do VDCOL (kV)             | 0.00                          |       |
| Tempo de religamento do elo após bloqueio (s)       | 0.05                          |       |
| Tempo de transmissão de corrente ordem (s)          | 0.02                          |       |
| Intervalo de tempo de medição de corrente ordem (s) | 0.01                          |       |
| Constantes de tempo (s)                             | da corrente do elo            | 0.200 |
|   | da medição de corrente        | 0.005 |
|   | da medição de tensão cc       | 0.100 |
|   | da medição de tensão ca       | 0.005 |
|   | da medição de tensão p/ VDCOL | 0.100 |
|   | do VDCOL (subida)             | 0.100 |
| do VDCOL (descida)                                  | 0.010                         |       |
| Modo de operação do elo - Potência Constante        |                               |       |
| Estação Retificadora                                |                               |       |
| Barra   | 200                           |       |
| Reat. de comutação (pu)                             | 0.003                         |       |
| Alfa mínimo (graus)                                 | 5.000                         |       |
| Alfa máximo (graus)                                 | 95.00                         |       |
| Constante Kp  | 50.00                         |       |
| Constante Ki  | 10.00                         |       |
| Constante de tempo CCC                              | 0.005                         |       |
| Estação Inversora                                   |                               |       |
| Barra   | 300                           |       |
| Reat. de comutação (pu)                             | 0.003                         |       |
| Alfa mínimo (graus)                                 | 110.0                         |       |
| Gama nominal (graus)                                | 15.00                         |       |
| Constante Kp  | 50.00                         |       |
| Constante Ki  | 10.00                         |       |
| Constante de tempo CCC                              | 0.005                         |       |
| Constante de tempo CEA                              | 0.005                         |       |
| Gama mínimo (graus)                                 | 8.000                         |       |
| Potência cc (MW)                                    | 1000.0                        |       |
| Tensão p/polo (kV)                                  | 600.0                         |       |
| Característica de operação definida para - Inversor |                               |       |

Tabela 5.5 - Parâmetros de Elo cc.

| CAPACITORES SHUNT |        |
|-------------------|--------|
| BARRA             | Xc     |
| 80                | 0.3259 |
| 100               | 0.2406 |

Tabela 5.6 - Parâmetros dos capacitores shunt.

| BARRA | CARGA                |          | COMPOSIÇÃO           |       |
|-------|----------------------|----------|----------------------|-------|
|       | Potência Shunt Total |          | Impedância Constante |       |
|       | P (MW)               | Q (MVAR) | MW                   | MVAR  |
| 10    | 40.0                 | 10.0     | 40.0                 | 10.0  |
| 30    | 500.0                | 0.0      | 500.0                | 0.0   |
| 40    | 100.0                | 30.0     | 100.0                | 30.0  |
| 90    | 50.0                 | 10.0     | 50.0                 | 10.0  |
| 110   | 600.0                | 80.0     | 600.0                | 80.0  |
| 120   | 500.0                | 0.0      | 500.0                | 0.0   |
| 130   | 900.0                | 100.0    | 900.0                | 100.0 |

Tabela 5.8 - Modelagem das cargas do sistema.

| BARRA | TENSAO | ANG.  | MW G. | MVAR G. | MW C. | MVAR C. |
|-------|--------|-------|-------|---------|-------|---------|
| 70    | 1.0000 | 0.00  | 976.7 | 182.7   | 0.0   | 0.0     |
| 10    | 0.9851 | -0.51 | 0.0   | 0.0     | 40.0  | 10.0    |
| 20    | 1.0000 | 0.21  | 250.0 | 123.8   | 0.0   | 0.0     |
| 30    | 0.9748 | -1.13 | 0.0   | 0.0     | 500.0 | 0.0     |
| 40    | 0.9927 | -0.16 | 0.0   | 0.0     | 100.0 | 30.0    |
| 50    | 1.0000 | 1.58  | 800.0 | -79.2   | 0.0   | 0.0     |
| 60    | 0.9948 | 0.08  | 0.0   | 0.0     | 0.0   | 0.0     |
| 80    | 0.9889 | -1.82 | 0.0   | 0.0     | 0.0   | 0.0     |
| 90    | 0.9881 | -1.24 | 0.0   | 0.0     | 50.0  | 10.0    |
| 100   | 0.9811 | -0.17 | 0.0   | 0.0     | 0.0   | 0.0     |
| 110   | 0.9781 | -1.55 | 0.0   | 0.0     | 600.0 | 80.0    |
| 120   | 0.9802 | -1.93 | 0.0   | 0.0     | 500.0 | 0.0     |
| 130   | 0.9697 | -2.32 | 0.0   | 0.0     | 900.0 | 100.0   |
| 140   | 0.9823 | -1.22 | 0.0   | 0.0     | 0.0   | 0.0     |
| 150   | 1.0000 | 1.00  | 800.0 | 223.8   | 0.0   | 0.0     |
| 200   | 0.8356 | -4.49 | 0.0   | 0.0     | 0.0   | 0.0     |
| 300   | 0.8267 | 2.21  | 0.0   | 0.0     | 0.0   | 0.0     |

Tabela 5.7 - Fluxo de carga ca-cc.

### 5.3 - Simulações Realizadas.

A seguir serão apresentados os resultados das simulações realizadas considerando-se os diversos sinais de amortecimento descritos no capítulo 3.

Como destacado, as funções utilizadas neste trabalho possuem dois objetivos distintos, e desse modo os estudos serão agrupados em:

- Estudos de amortecimento das oscilações.
- Estudos de controle de frequência.

Os resultados associados a cada um destes objetivos são apresentados nas seções 5.3.1 e 5.3.2, respectivamente.

#### 5.3.1 - Estudos de Amortecimento das Oscilações.

Com o intuito de se estudar o amortecimento das oscilações do sistema, foi utilizado como fonte de distúrbio, um curto-circuito através de impedância, aplicado na barra 140. O curto foi considerado como ocorrendo em  $t = 0$  s e com duração de 200 ms.

##### A - Caso 1 - Sem Amortecimento.

Inicialmente, simulou-se o distúrbio descrito acima ignorando-se a ação de amortecimento do elo cc. Este caso será utilizado como referência para se analisar, nos casos posteriores, o efeito provocado pelos diversos sinais de amortecimento já descritos.

Os gráficos 5.1 e 5.2 apresentam o ângulo e a frequência da máquina 4, localizada na barra 150. Esta máquina foi a escolhida para efeito de análise, por ser a que está mais próxima do distúrbio, e portanto,

mais susceptível a sofrer suas conseqüências.

Dos gráficos 5.1 e 5.2, ou da tabela 5.9, têm-se os máximos e os mínimos atingidos pelo ângulo e pela freqüência da máquina 4. Nestes estudos considerar-se-á que as máquinas estarão estabilizadas a partir do instante em que as variações de freqüência se mantiverem dentro de valores inferiores a 0,10 Hz, ou seja, a freqüência estiver oscilando entre 59,95 e 60,05 Hz.

| 1º MAX. |       | 1º MIN |       | 2º MAX |       | 2º MIN |       | 3º MAX |       | 3º MIN |       |
|---------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| ANG     | FREQ  | ANG    | FREQ  | ANG    | FREQ  | ANG    | FREQ  | ANG    | FREQ  | ANG    | FREQ  |
| 119     | 61,85 | -134   | 57,59 | -10    | 61,08 | -50    | 59,49 | 1      | 60,46 | -10    | 59,87 |

Tabela 5.9 - Parâmetros e resultados do Caso Base - Sem Amortecimento.

À análise do caso base, mostra que o sistema se estabilizou em 3,25 segundos, embora pequenas oscilações possam ser observadas além deste instante.

Pode-se ainda constatar que, após o distúrbio, o ângulo de potência da máquina 4 oscilará em torno de seu valor em regime permanente, que é de 1,87 graus, até novamente se estabilizar em um ponto próximo a este valor.

#### B - Caso 2 - Modelo I.

Utilizando-se a mesma fonte de distúrbio descrita anteriormente, foram realizadas várias simulações com a adição de um sinal de amortecimento processado através da função de transferência denominada de Modelo I.

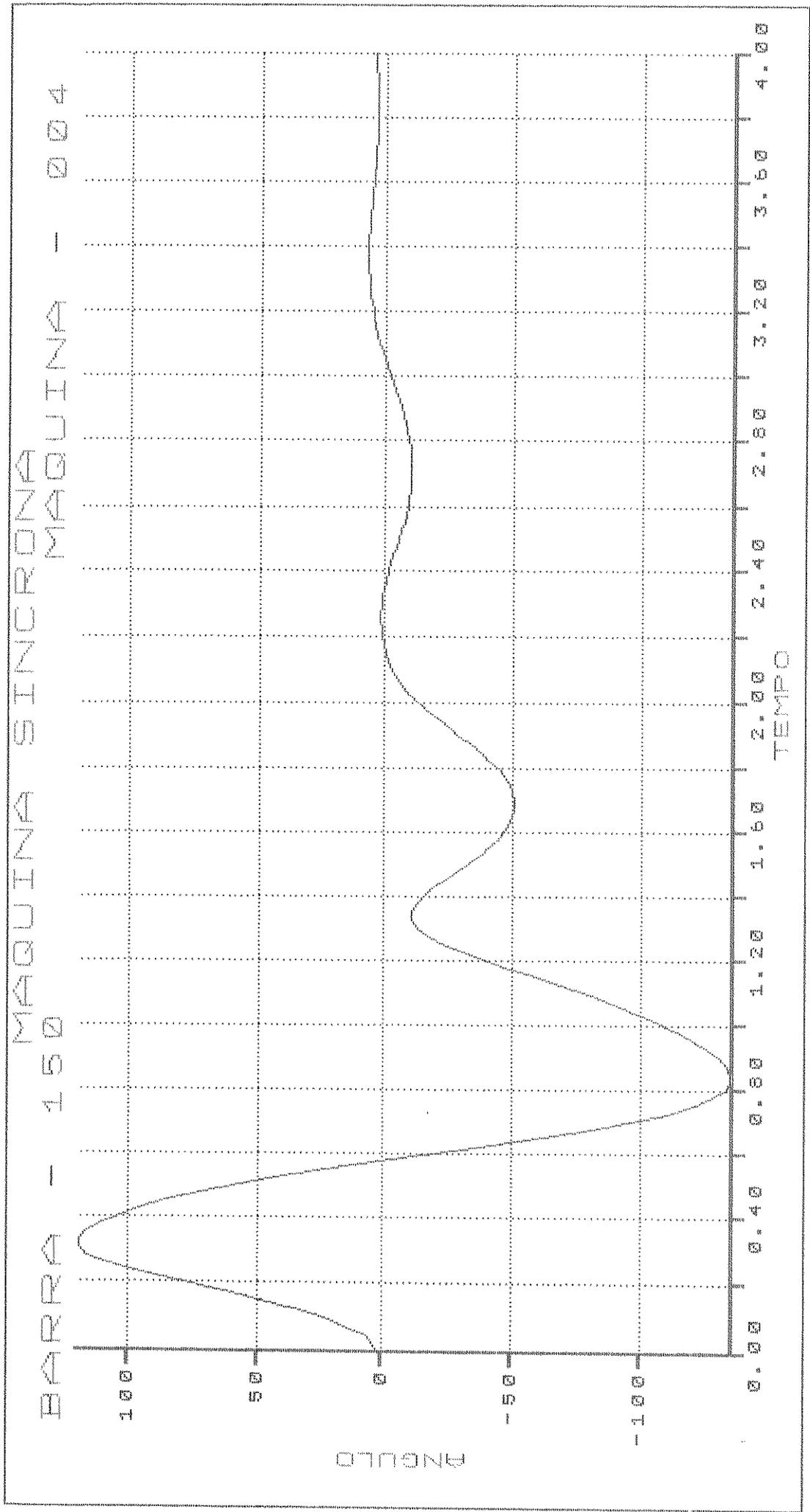


Gráfico 5.1 - Caso 1 - Sem Amortecimento.

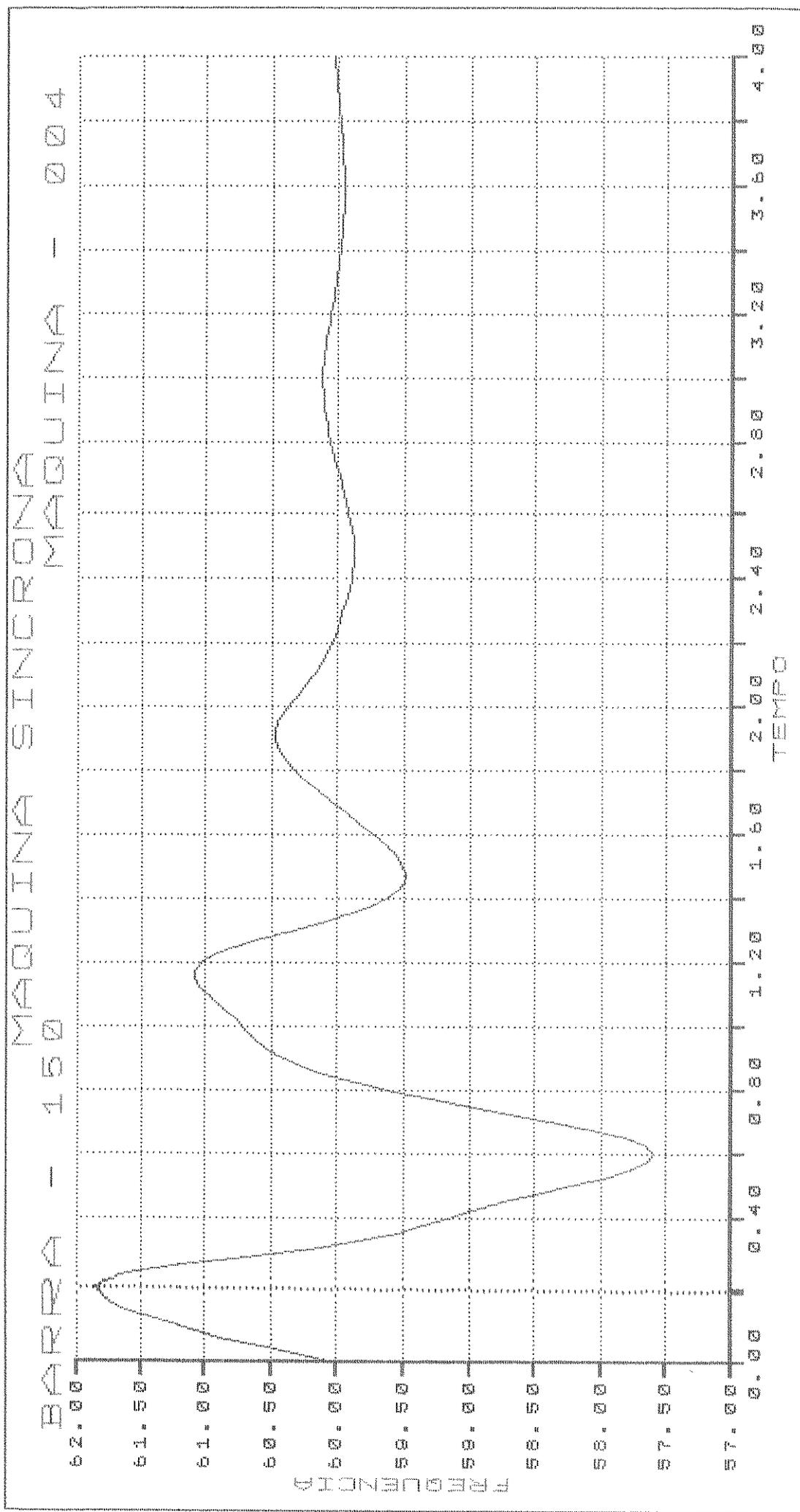


Gráfico 5.2 - Caso 1 - Sem Amortecimento.

O sinal empregado é o sinal de frequência retirado da barra 150, próxima à barra em curto.

Os gráficos 5.3 e 5.4 apresentam as variações do ângulo de potência e da frequência da máquina 4, de uma determinada simulação. Ao comparar-se estes gráficos com os representativos do caso base, percebe-se nitidamente a apreciável melhora ocorrida nos pontos máximos e mínimos da curva do ângulo de potência, bem como da curva da frequência da máquina. Nota-se também que o tempo de estabilização é superior ao do caso base, caracterizando-se por reduções de amplitude e aumento do período das oscilações. Isto é equivalente a dizer que o sistema é beneficiado em termos de amplitude da perturbação, enquanto que, simultaneamente, é prejudicado em relação à duração da mesma. Dependendo dos parâmetros da função de transferência, pode-se conseguir diferentes desempenhos do amortecimento, tanto nas amplitudes quanto na duração das oscilações, conforme será visto a seguir.

A tabela 5.10 fornece os parâmetros utilizados nas várias simulações realizadas, os limites máximos e mínimos atingidos pelas grandezas em observação, bem como o tempo de estabilização verificado em cada caso.

Pode-se dizer, através da tabela 5.10, que um aumento no valor do ganho nem sempre irá promover um aumento do grau de "overshoot". Isto fica bem caracterizado ao se comparar as simulações A-I-5 e A-I-6. Em algumas simulações, como por exemplo, A-I-2 e A-I-6, houve um pequeno aumento das amplitudes, e em outros não houve alteração alguma.

Nota-se que menores constantes de tempo produzem melhor efeito no início das oscilações, enquanto que maiores constantes de tempo têm melhor resultado na parte final das mesmas. O melhor desempenho do modelo em questão, no que se refere às amplitudes das oscilações, é conseguido com alto ganho em combinação com constantes de tempo maiores.

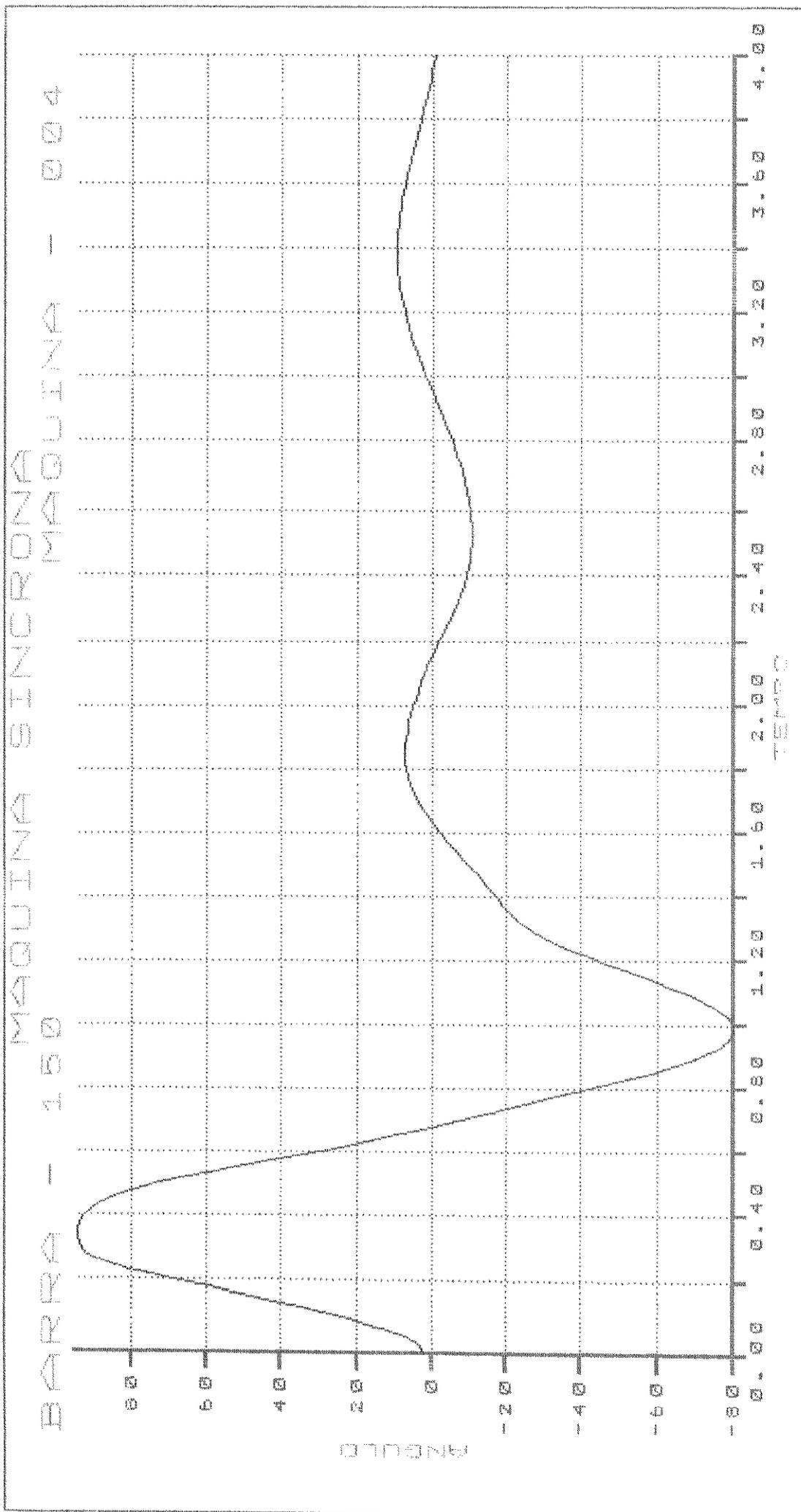


Gráfico 5.3 - Caso 2 - Modelo I - Amortecimento das Oscilações.

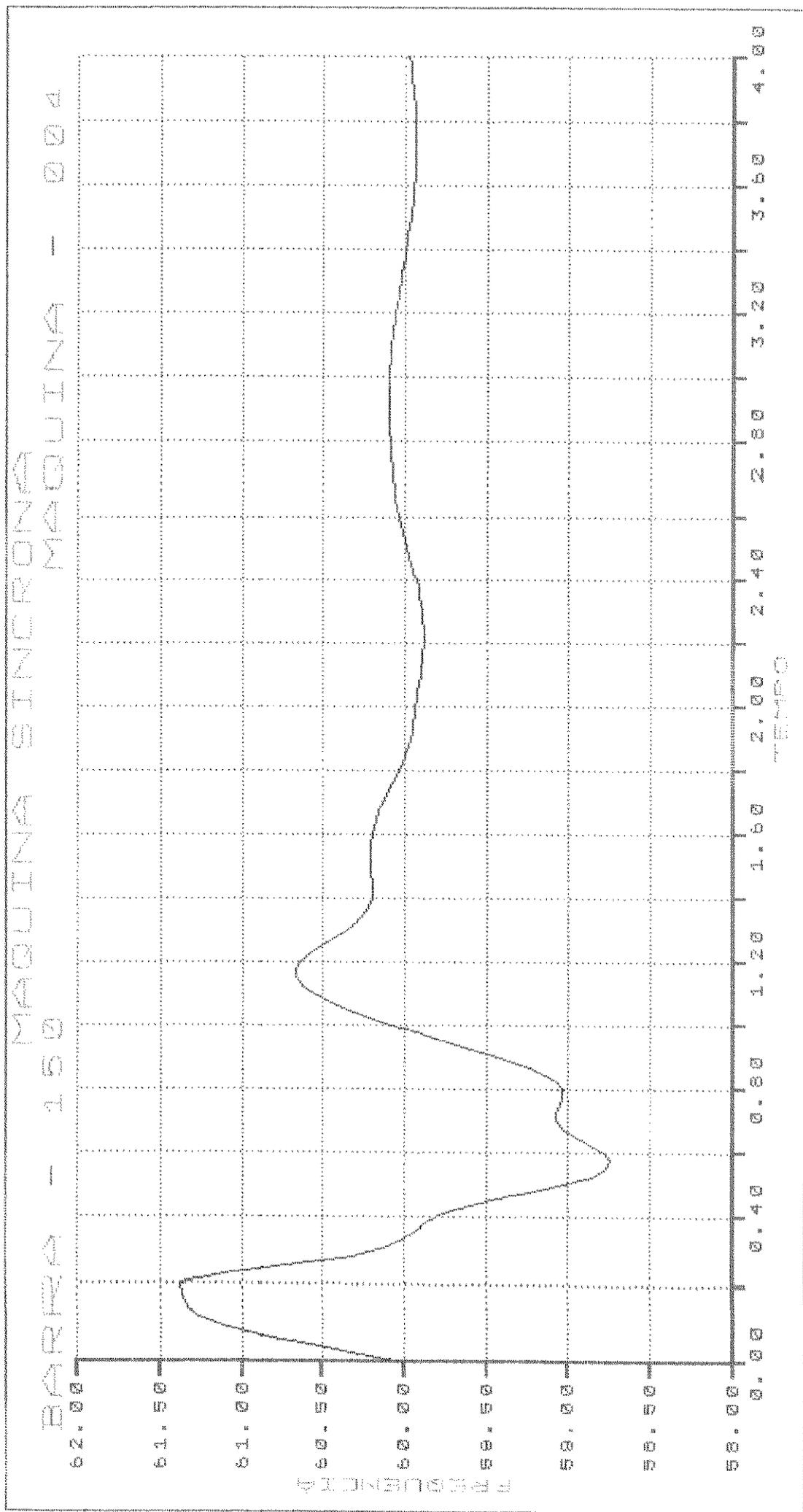


Gráfico 5.4 - Caso 2 - Modelo I - Amortecimento das Oscilações.

| SIMUL.            |       | A 1 1 | A 1 2 | A 1 3 | A 1 4 | A 1 5 | A 1 6 | A 1 7 | A 1 8 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K(PU/HZ)          |       | 0,1   | 10    | 50    | 100   | 0,1   | 10    | 50    | 100   |
| T1(SEG.)          |       | 0,05  | 0,05  | 0,05  | 0,05  | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   |
| T2(SEG.)          |       | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,04  | 0,04  | 0,04  | 0,04  |
| T3(SEG.)          |       | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,04  | 0,04  | 0,04  | 0,04  |
| T4(SEG.)          |       | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,06  | 0,06  | 0,06  | 0,06  |
| 1º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 119   | 119   | 107   | 105   | 117   | 119   | 104   | 96    |
|                   | FREQ. | 61,85 | 61,85 | 61,51 | 61,32 | 61,83 | 61,85 | 61,58 | 61,37 |
| 1º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -134  | -135  | -99   | -101  | -134  | -135  | -86   | -82   |
|                   | FREQ. | 57,59 | 57,58 | 58,43 | 58,63 | 57,59 | 57,57 | 58,37 | 58,81 |
| 2º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | -10   | -11   | 0     | 8     | -9    | -12   | -5    | 7     |
|                   | FREQ. | 61,08 | 61,08 | 60,94 | 60,86 | 61,08 | 61,08 | 60,78 | 60,70 |
| 2º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -50   | -51   | -19   | -19   | -50   | -51   | -10   | -11   |
|                   | FREQ. | 59,49 | 59,49 | 59,81 | 59,80 | 59,47 | 59,49 | 59,94 | 59,87 |
| 3º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 1     | 1     | 9     | 17    | 2     | 0     | 3     | 10    |
|                   | FREQ. | 60,46 | 60,46 | 60,16 | 60,18 | 60,46 | 60,46 | 60,07 | 60,11 |
| 3º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -10   | -10   | -3    | -6    | -10   | -10   | 0     | -     |
|                   | FREQ. | 59,87 | 59,88 | 59,90 | 59,84 | 59,87 | 59,88 | 59,97 | 59,92 |
| Test.(seg)        |       | 3,225 | 3,225 | > 4,0 | > 4,0 | 3,225 | 3,25  | 2,575 | > 4,0 |

Tabela 5.10 - Parâmetros e resultados das simulações realizadas para o modelo I - Amortecimento.

### C - Caso 3 - Modelo II.

Processando-se o sinal de frequência proveniente da barra 150, através a função de transferência denominada de modelo II, e utilizando-se a mesma fonte de distúrbio do caso base, foram realizadas várias simulações, que são apresentadas na tabela 5.11. A simulação mais significativa é a denominada A-II-8, cujas curvas são mostradas pelos gráficos 5.5 e 5.6.

Pelo estudo destes gráficos nota-se uma sensível melhora ocorrida nos pontos máximos e mínimos das curvas do ângulo de potência e da frequência da máquina 4. Percebe-se, ainda, que o tempo de estabilização é superior ao do caso base, o que retrata um aumento do período de oscilações. Portanto, o sistema, com a inclusão deste sinal de amortecimento, é beneficiado no que diz respeito à amplitude da perturbação, enquanto que é prejudicado no que se refere à duração da mesma.

Com base na análise da tabela 5.11, pode-se dizer que é possível conseguir uma redução tanto na amplitude quanto no período das oscilações, como demonstra a simulação A-II-7. Para os ganhos de 0,1 e 1 pu/Hz, nota-se um pequeno aumento nas amplitudes, enquanto que as constantes 50 e 100 pu/Hz promovem uma melhora proporcionalmente ao valor da constante.

Quanto ao efeito das constantes de tempo, conclui-se, através as simulações mais significativas, que as de menor valor produzem uma melhora no período inicial, enquanto que as de maior valor produzem uma melhora significativa nos períodos seguintes.

### D - Caso 4 - Modelo III.

Neste caso o sinal processado através da função de transferência denominada de modelo III, é o sinal de frequência proveniente de uma das

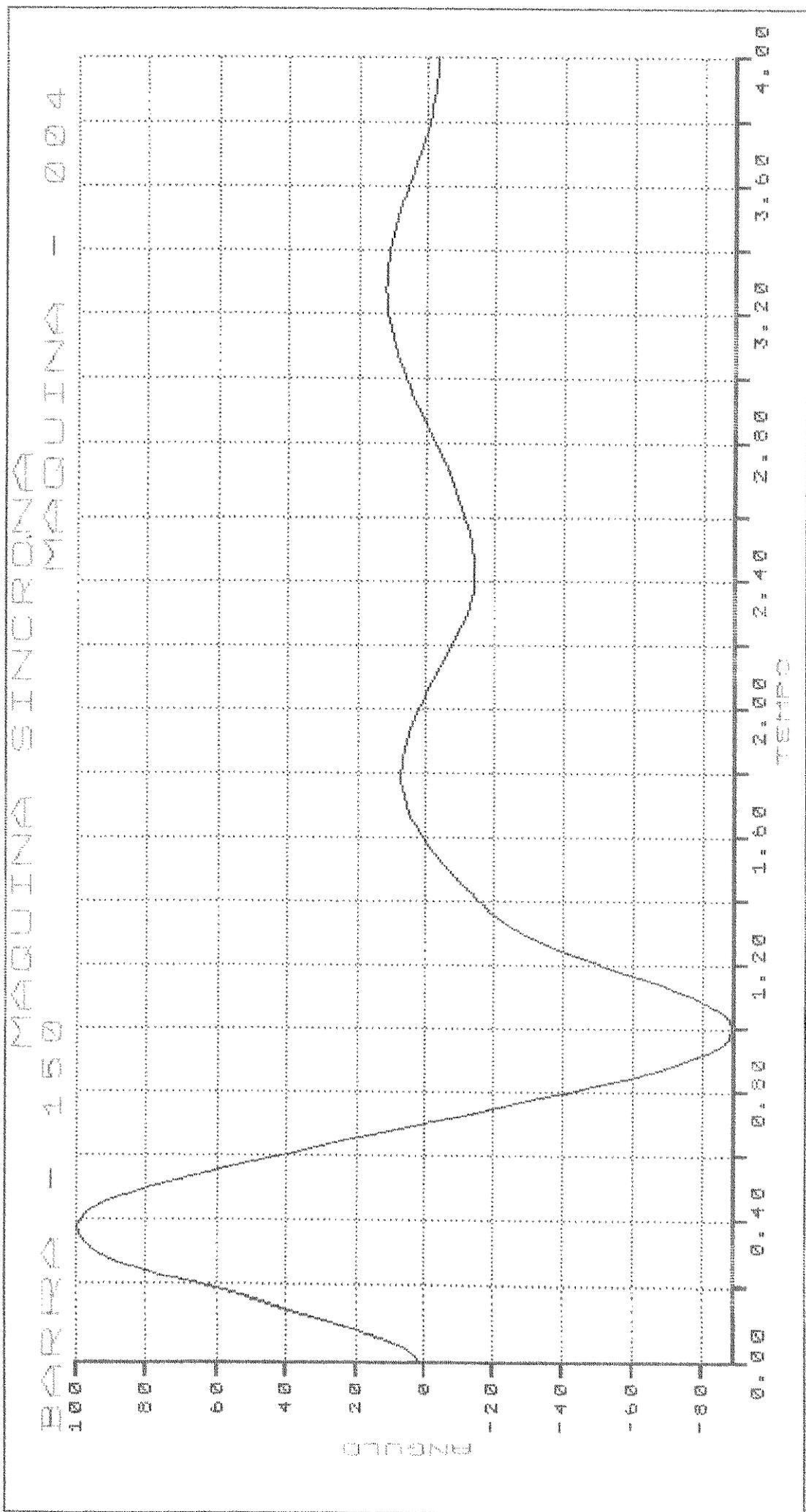


Gráfico 5.5 - Caso 3 - Modelo II - Amortecimento das Oscilações.

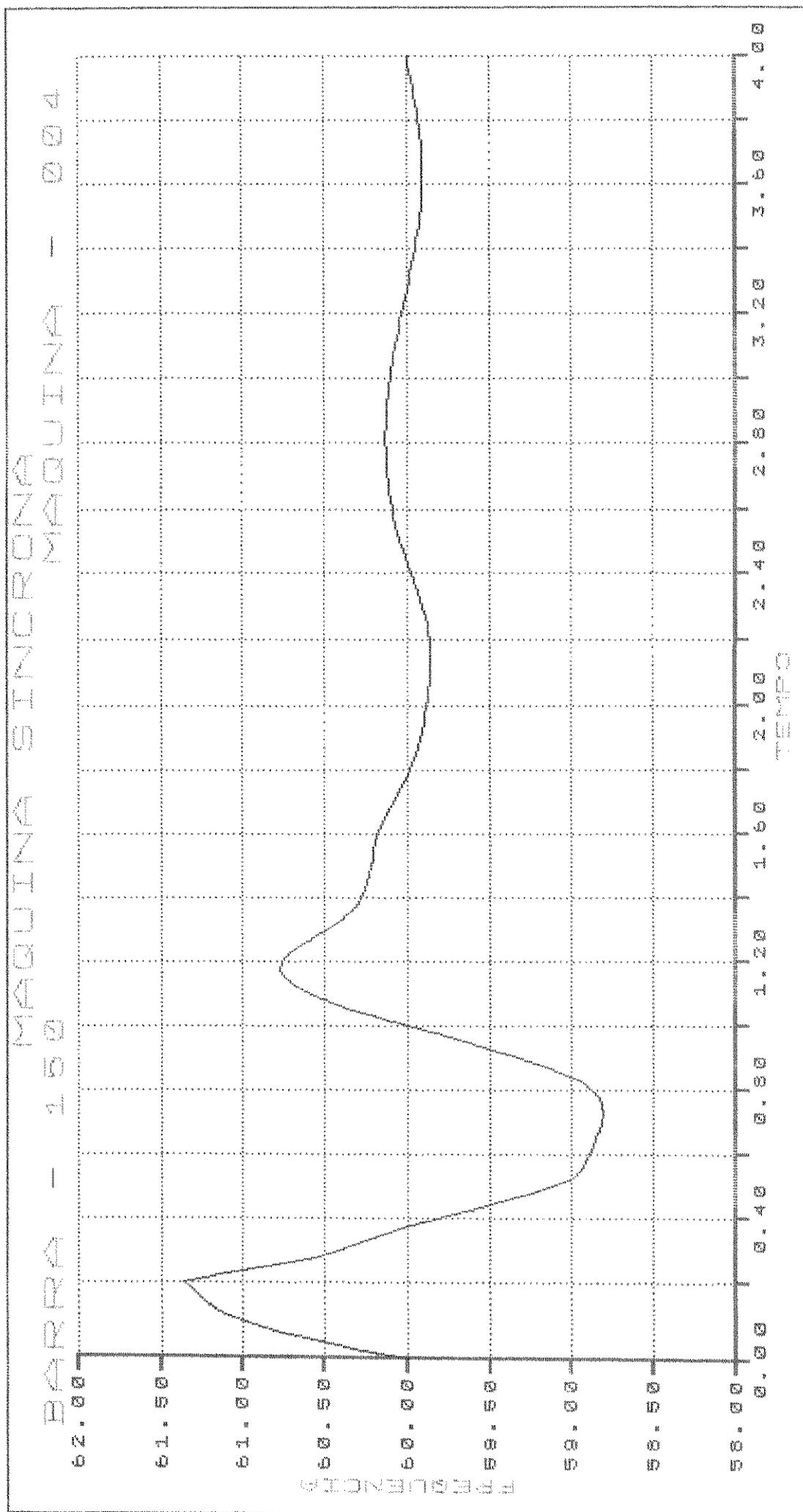


Gráfico 5.6 - Caso 3 - Modelo II - Amortecimento das Oscilações.

| SIMUL.            |       | A II 1 | A II 2 | A II 3 | A II 4 | A II 5 | A II 6 | A II 7 | A II 8 |
|-------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| K(PU/HZ)          |       | 0,1    | 1,0    | 50,0   | 100,0  | 0,1    | 1,0    | 50,0   | 100,0  |
| T1(SEG.)          |       | 0,05   | 0,05   | 0,05   | 0,05   | 0,10   | 0,10   | 0,10   | 0,10   |
| T2(SEG.)          |       | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02   |
| T3(SEG.)          |       | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02   |
| T4(SEG.)          |       | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,04   | 0,04   | 0,04   | 0,04   |
| 1º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 119    | 119    | 108    | 105    | 120    | 119    | 103    | 98     |
|                   | FREQ. | 61,85  | 61,85  | 61,51  | 61,33  | 61,86  | 61,85  | 61,55  | 61,34  |
| 1º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -134   | -135   | -102   | -102   | -137   | -135   | -87    | -85    |
|                   | FREQ. | 57,59  | 57,58  | 58,40  | 58,60  | 57,55  | 57,57  | 58,42  | 58,83  |
| 2º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | -10    | -11    | 1      | 9      | -14    | -12    | -5     | 6      |
|                   | FREQ. | 61,08  | 61,08  | 60,97  | 60,90  | 61,09  | 61,08  | 60,81  | 60,73  |
| 2º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -50    | -51    | -21    | -21    | -53    | -51    | -11    | -11    |
|                   | FREQ. | 59,49  | 59,49  | 59,79  | 59,78  | 59,50  | 59,49  | 59,92  | 59,87  |
| 3º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 1      | 1      | 11     | 19     | 0      | 0      | 4      | 10     |
|                   | FREQ. | 60,46  | 60,46  | 60,18  | 60,20  | 60,48  | 60,46  | 60,08  | 60,11  |
| 3º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -10    | -10    | -4     | -8     | -11    | -10    | 0      | -1     |
|                   | FREQ. | 59,87  | 59,88  | 59,89  | 59,82  | 59,88  | 59,88  | 59,97  | 59,92  |
| Test.(seg)        |       | 3,250  | 3,250  | > 4    | > 4    | 3,225  | 3,250  | 2,600  | > 4    |

Tabela 5.11 - Parâmetros e resultados das simulações realizadas para o modelo II - Amortecimento.

barras do lado do retificador, no caso a barra 90, sendo que a fonte de distúrbio é a mesma do caso base. As simulações realizadas são apresentadas na tabela 5.12. Os gráficos 5.7 e 5.8 mostram as curvas do ângulo de potência e da frequência da máquina 4, da simulação mais significativa, que é a A-III-8.

Os mesmos comentários feitos para o caso 3, podem ser repetidos aqui, com a ressalva de que os resultados obtidos são menos significativos que os anteriores, devido ao fato da barra 90 ser menos sensível às oscilações que a barra 150, para a perturbação em questão.

#### E - Caso 5 - Modelo IV.

Utilizando-se a mesma fonte de distúrbio do caso base, foram realizadas várias simulações adicionando-se um sinal de amortecimento processado através a função de transferência denominada de modelo IV.

O sinal empregado, numa determinada iteração, é a diferença entre o valor do ângulo da tensão na barra do inversor na iteração em questão, e seu valor inicial.

Os gráficos 5.9 e 5.10 apresentam as variações do ângulo de potência e da frequência da máquina 4, para a simulação mais significativa. Ao se comparar estes gráficos com os representativos do caso base, nota-se uma acentuada melhora nos limites atingidos pelas grandezas em estudo. Nesta simulação o tempo de estabilização é muito inferior ao do caso base.

A tabela 5.13 mostra os parâmetros utilizados nas várias simulações realizadas, bem como os limites máximos e mínimos atingidos pelas grandezas em observação, além dos tempos de estabilização verificados.

Percebe-se claramente que, dependendo dos valores do ganho, pode-se conseguir resultados melhores, ou piores, que os do caso base. Quanto às constantes de tempo, conclui-se que menores constantes não implicam em melhores resultados.

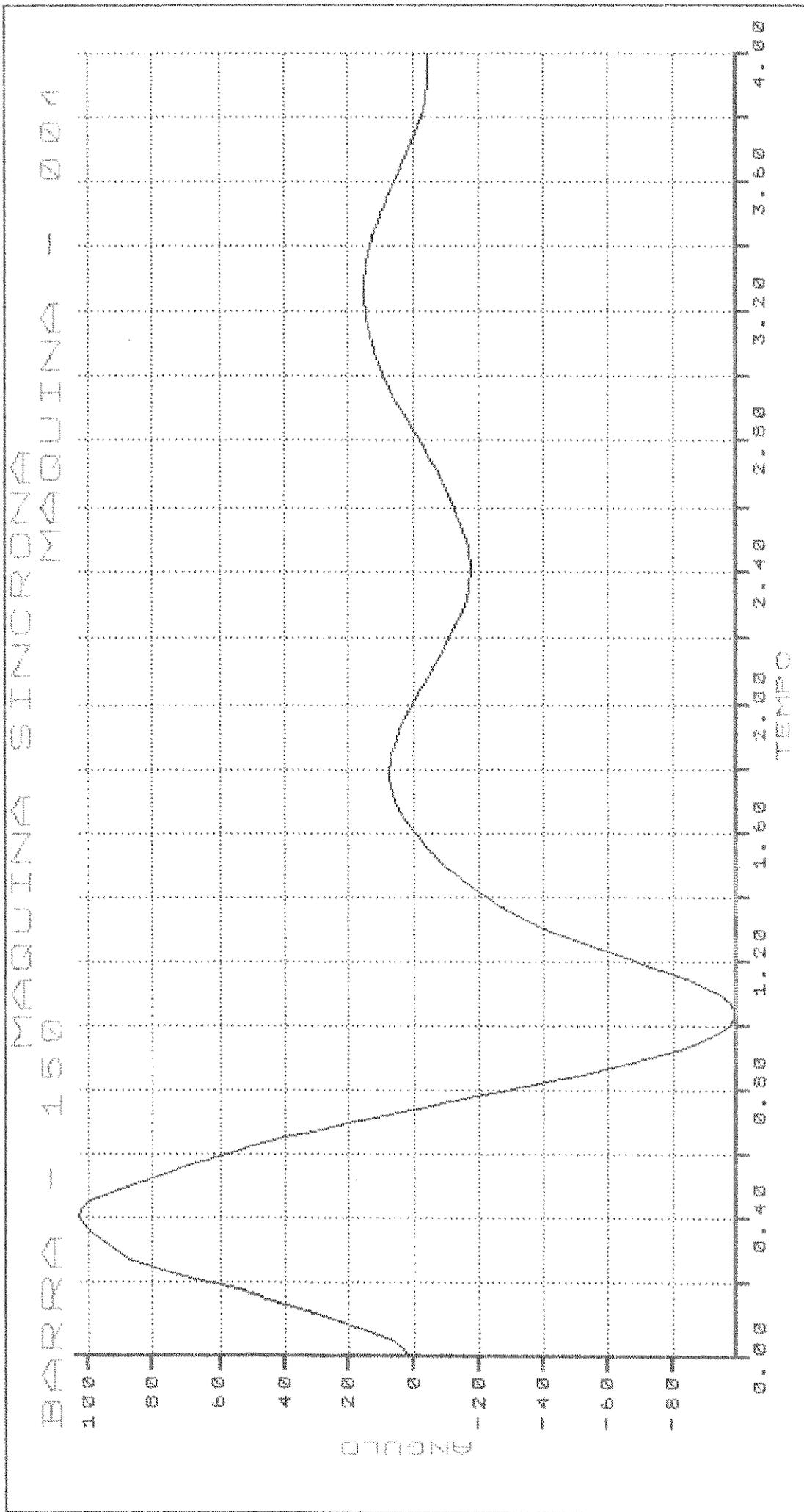


Gráfico 5.7 - Caso 4 - Modelo III - Amortecimento das Oscilações.

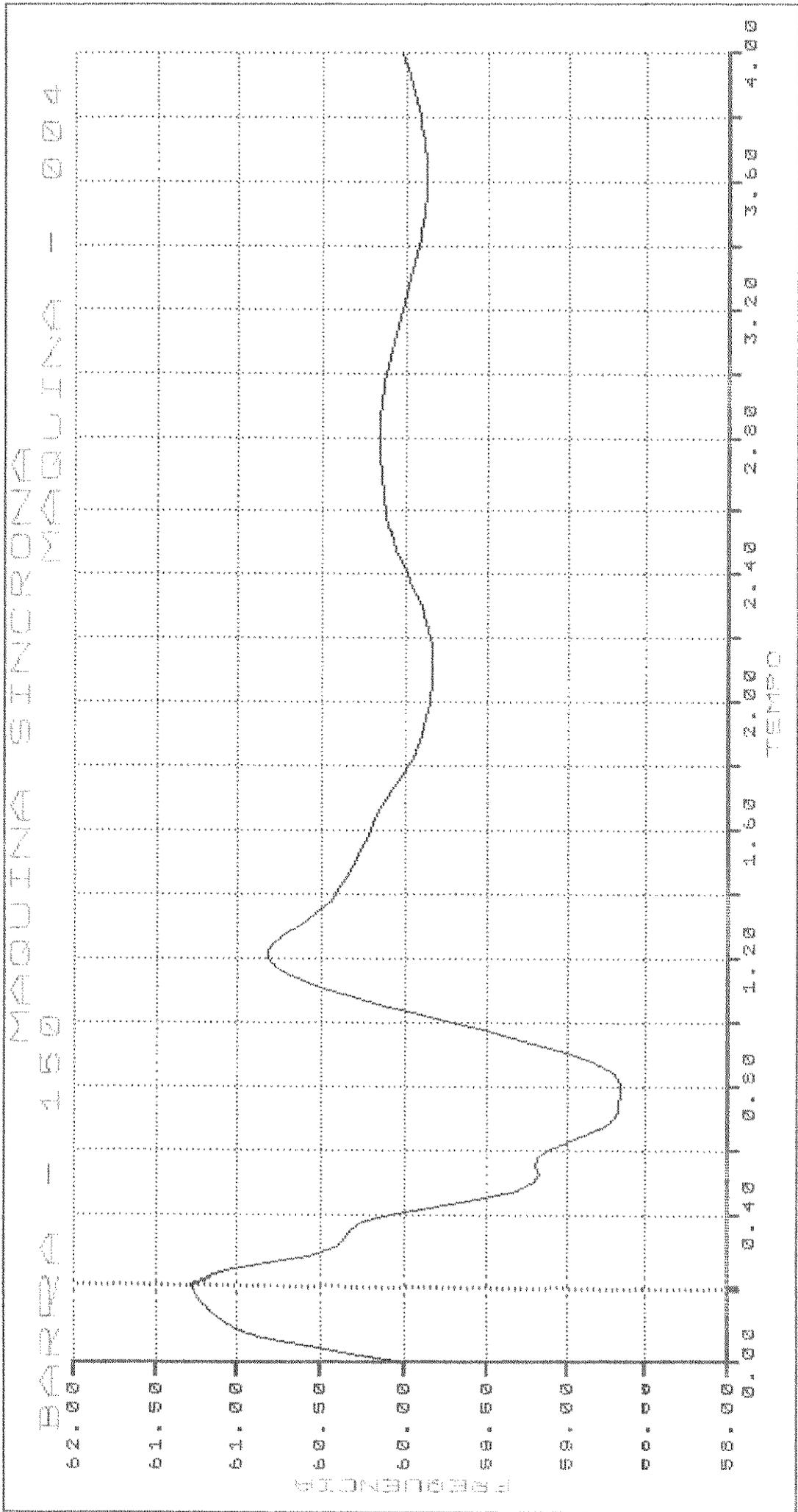


Gráfico 5.8 - Caso 4 - Modelo III - Amortecimento das Oscilações.

| SIMUL.            |       | A III 1 | A III 2 | A III 3 | A III 4 | A III 5 | A III 6 | A III 7 | A III 8 |
|-------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| K(PU/HZ)          |       | 0,1     | 1,0     | 50,0    | 100,0   | 0,1     | 1,0     | 50,0    | 100,0   |
| T1(SEG.)          |       | 0,01    | 0,01    | 0,01    | 0,01    | 0,02    | 0,02    | 0,02    | 0,02    |
| T2(SEG.)          |       | 0,02    | 0,02    | 0,02    | 0,02    | 0,04    | 0,04    | 0,04    | 0,04    |
| 1º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 120     | 119     | 114     | 105     | 120     | 119     | 110     | 103     |
|                   | FREQ. | 61,86   | 61,85   | 61,50   | 61,32   | 61,86   | 61,85   | 61,50   | 61,30   |
| 1º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -137    | -135    | -118    | -111    | -137    | -135    | -107    | -100    |
|                   | FREQ. | 57,55   | 57,58   | 58,25   | 58,52   | 57,55   | 57,58   | 58,36   | 58,65   |
| 2º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | -14     | -11     | 1       | 10      | -14     | -11     | 1       | 10      |
|                   | FREQ. | 61,09   | 61,08   | 61,03   | 60,92   | 61,09   | 61,08   | 61,00   | 60,85   |
| 2º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -53     | -51     | -31     | -26     | -53     | -51     | -24     | -19     |
|                   | FREQ. | 59,50   | 59,49   | 59,71   | 59,73   | 59,50   | 59,49   | 59,76   | 59,79   |
| 3º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 0       | 1       | 15      | 23      | 0       | 1       | 12      | 18      |
|                   | FREQ. | 60,48   | 60,46   | 60,27   | 60,24   | 60,48   | 60,46   | 60,20   | 60,18   |
| 3º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -11     | -10     | -8      | -11     | -11     | -10     | -5      | -7      |
|                   | FREQ. | 59,88   | 59,88   | 59,82   | 59,77   | 59,88   | 59,88   | 59,87   | 59,83   |
| Test.(seg)        |       | 3,225   | 3,250   | > 4     | > 4     | 3,225   | 3,250   | > 4     | > 4     |

Tabela 5.12 - Parâmetros e resultados das simulações realizadas para o modelo III - Amortecimento.

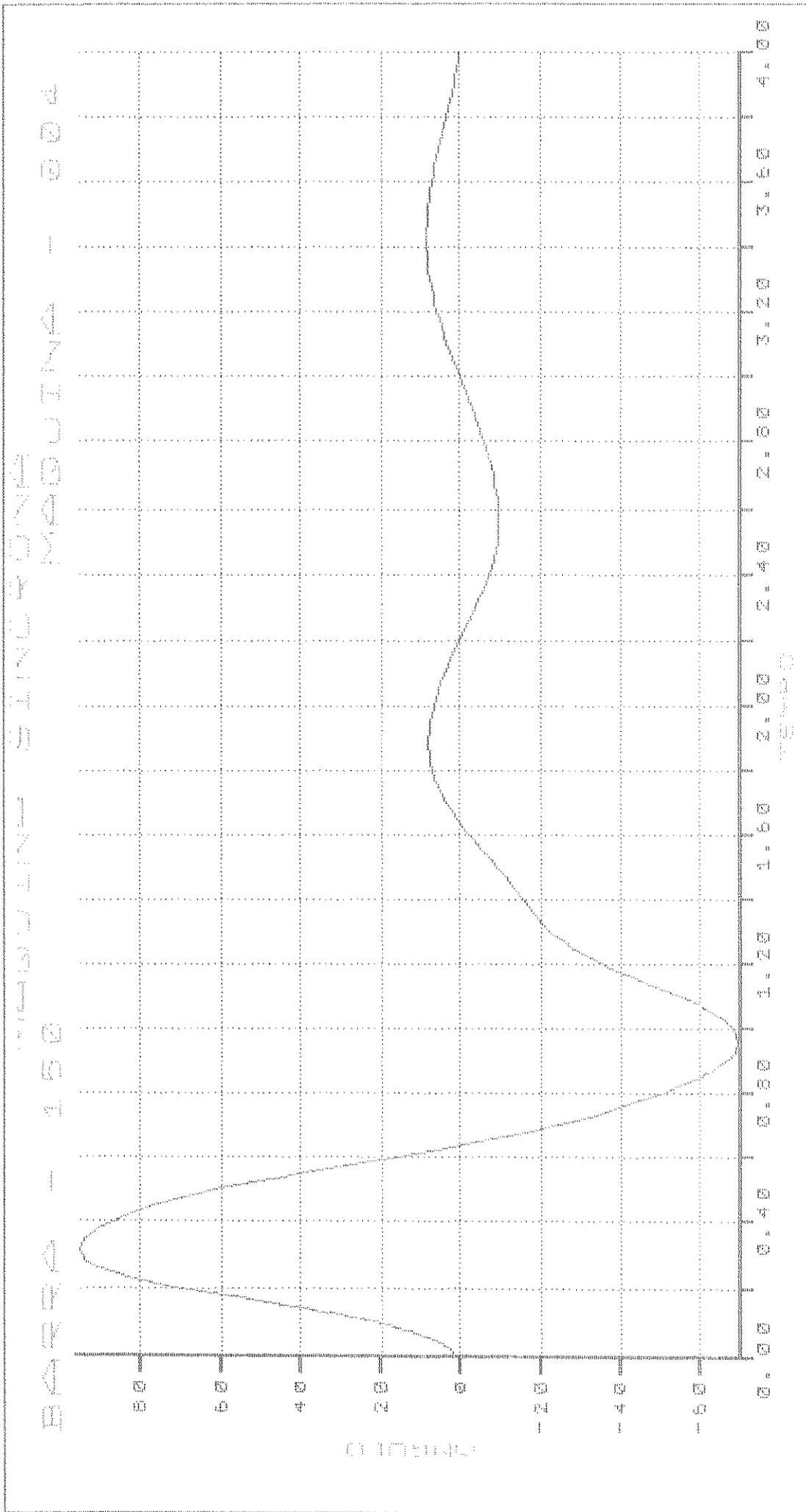


Gráfico 5.9 - Caso 5 - Modelo IV - Amortecimento das Oscilações.

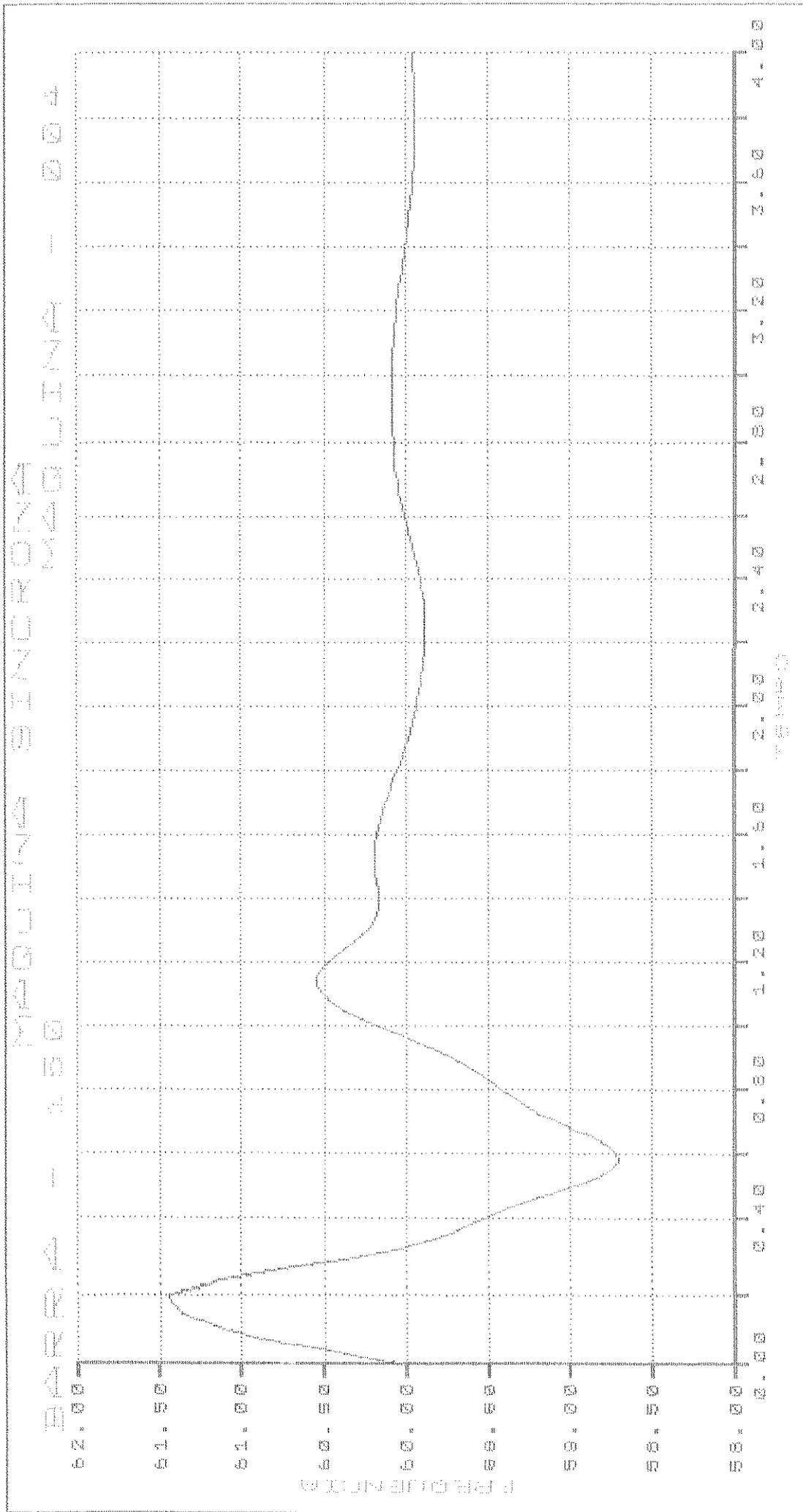


Gráfico 5.10 - Caso 5 - Modelo IV - Amortecimento das Oscilações.

| SIMUL.            | AIV 1 | AIV 2 | AIV 3 | AIV 4 | AIV 5 | AIV 6 | AIV 7 | AIV 8 |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K(PU/%)           | 0,1   | 1,0   | 50,0  | 100,0 | 0,1   | 1,0   | 50,0  | 100,0 |       |
| T1(SEG.)          | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,2   | 0,2   | 0,2   | 0,2   |       |
| T2(SEG.)          | 0,05  | 0,05  | 0,05  | 0,05  | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   |       |
| T3(SEG.)          | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,06  | 0,06  | 0,06  | 0,06  |       |
| T4(SEG.)          | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,2   | 0,2   | 0,2   | 0,2   |       |
| T5(SEG.)          | 0,05  | 0,05  | 0,05  | 0,05  | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   |       |
| 1º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 120   | 119   | 102   | 100   | 117   | 119   | 105   | 96    |
|                   | FREQ. | 61,86 | 61,85 | 61,52 | 61,31 | 61,82 | 61,84 | 61,64 | 61,45 |
| 1º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -137  | -135  | -89   | -94   | -134  | -132  | -84   | -70   |
|                   | FREQ. | 57,55 | 57,58 | 58,45 | 58,72 | 57,59 | 57,60 | 58,25 | 58,69 |
| 2º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | -15   | -12   | -1    | 9     | -9    | -9    | -12   | 7     |
|                   | FREQ. | 61,09 | 61,08 | 60,84 | 60,81 | 61,08 | 61,07 | 60,66 | 60,55 |
| 2º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -53   | -51   | -13   | -16   | -50   | -49   | -12   | -9    |
|                   | FREQ. | 59,51 | 59,49 | 59,88 | 59,83 | 59,47 | 59,49 | 59,98 | 59,88 |
| 3º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 0     | 0     | 5     | 15    | 1     | 1     | -     | 8     |
|                   | FREQ. | 60,48 | 60,46 | 60,10 | 60,15 | 60,46 | 60,45 | 60,05 | 60,08 |
| 3º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -11   | -10   | 0     | -4    | -10   | -9    | -     | -     |
|                   | FREQ. | 59,88 | 59,88 | 59,95 | 59,87 | 59,87 | 59,88 | 60,00 | 59,94 |
| Test.(seg)        | 3,225 | 3,250 | 2,700 | > 4   | 3,225 | 3,250 | 1,600 | > 4   |       |

Tabela 5.13 - Parâmetros e resultados das simulações realizadas para o modelo IV - Amortecimento.

## F - Caso 6 - Modelo V.

A função de transferência classificada como modelo V utiliza como sinal de entrada o erro de tensão na barra da inversora em relação ao seu valor inicial, e fornece um sinal que irá alterar o ângulo de extinção  $\gamma$ .

Os gráficos 5.11 e 5.12 fornecem as curvas do ângulo de potência e da frequência da máquina 4, para a simulação mais significativa do ponto de vista das amplitudes, que é a simulação A-V-3. Os parâmetros utilizados nas simulações A-V-1 e A-V-2 foram fornecidos pela bibliografia ( 8, 14 ).

Pelos gráficos apresentados, percebe-se um excelente amortecimento em relação ao caso base, com um aumento no tempo de estabilização.

Nota-se, pela análise da tabela 5.14, que este modelo apresenta resultados excelentes, quaisquer que sejam os parâmetros utilizados, no que se refere à amplitude das oscilações, além de se conseguir, em quase todas as simulações, tempos de estabilização bem inferiores ao do caso base.

### **5.3.2 - Estudos de Controle da Frequência.**

Com o objetivo de se estudar o controle da frequência do sistema, foi utilizada como fonte de distúrbio a retirada da carga localizada na barra 130 do sistema em questão. A retirada da carga foi considerada como ocorrendo em  $t = 0$  s, sendo reconectada 200 ms depois.

#### A - Caso 1 - Caso sem Controle da Frequência.

Inicialmente simulou-se o distúrbio descrito anteriormente, ignorando-se a ação de controle da frequência através o elo cc. Este caso será utilizado como referência para se analisar, nos casos posteriores, o

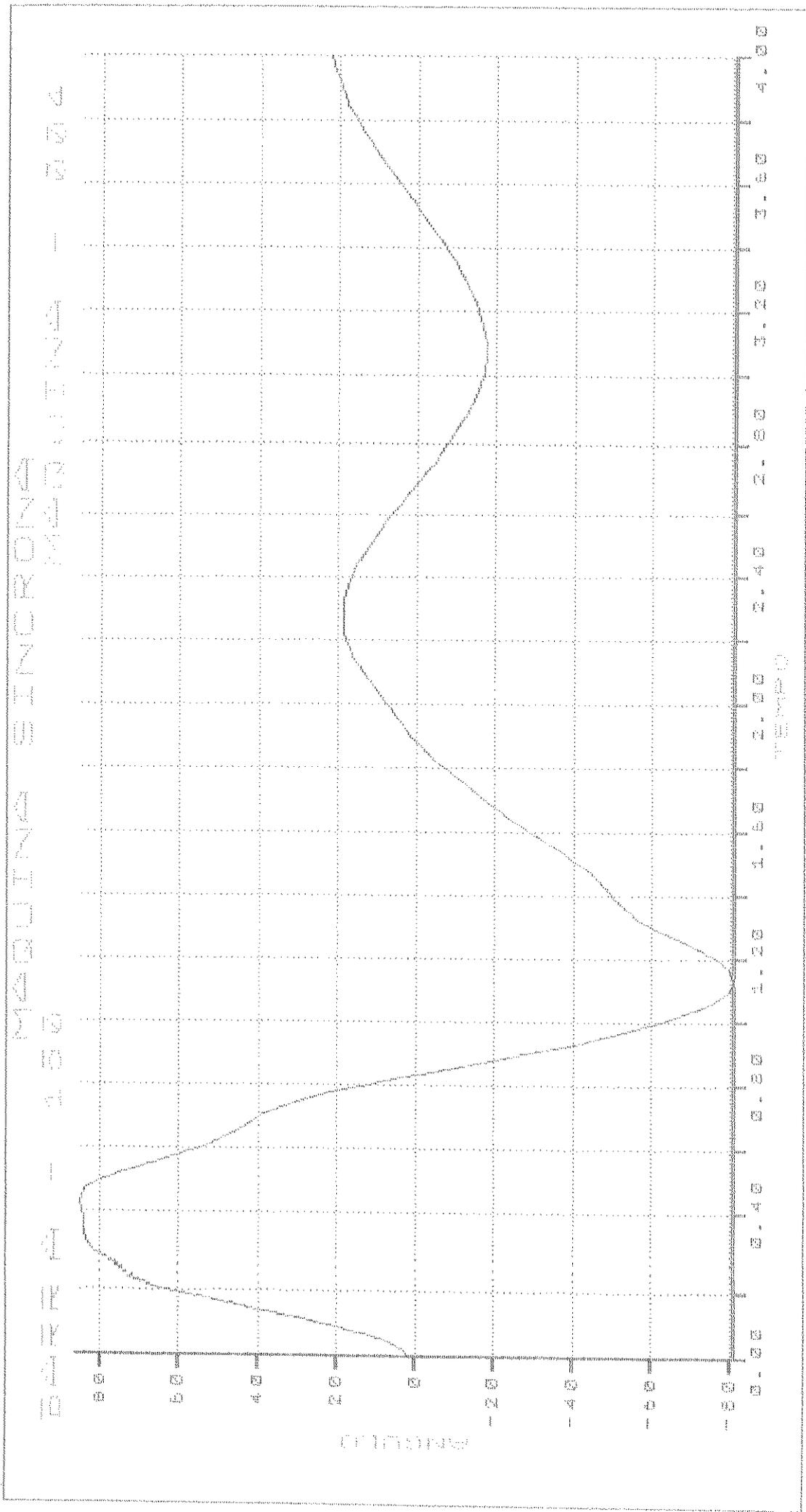


Gráfico 5.11 - Caso 6 - Modelo V - Amortecimento das Oscilações.

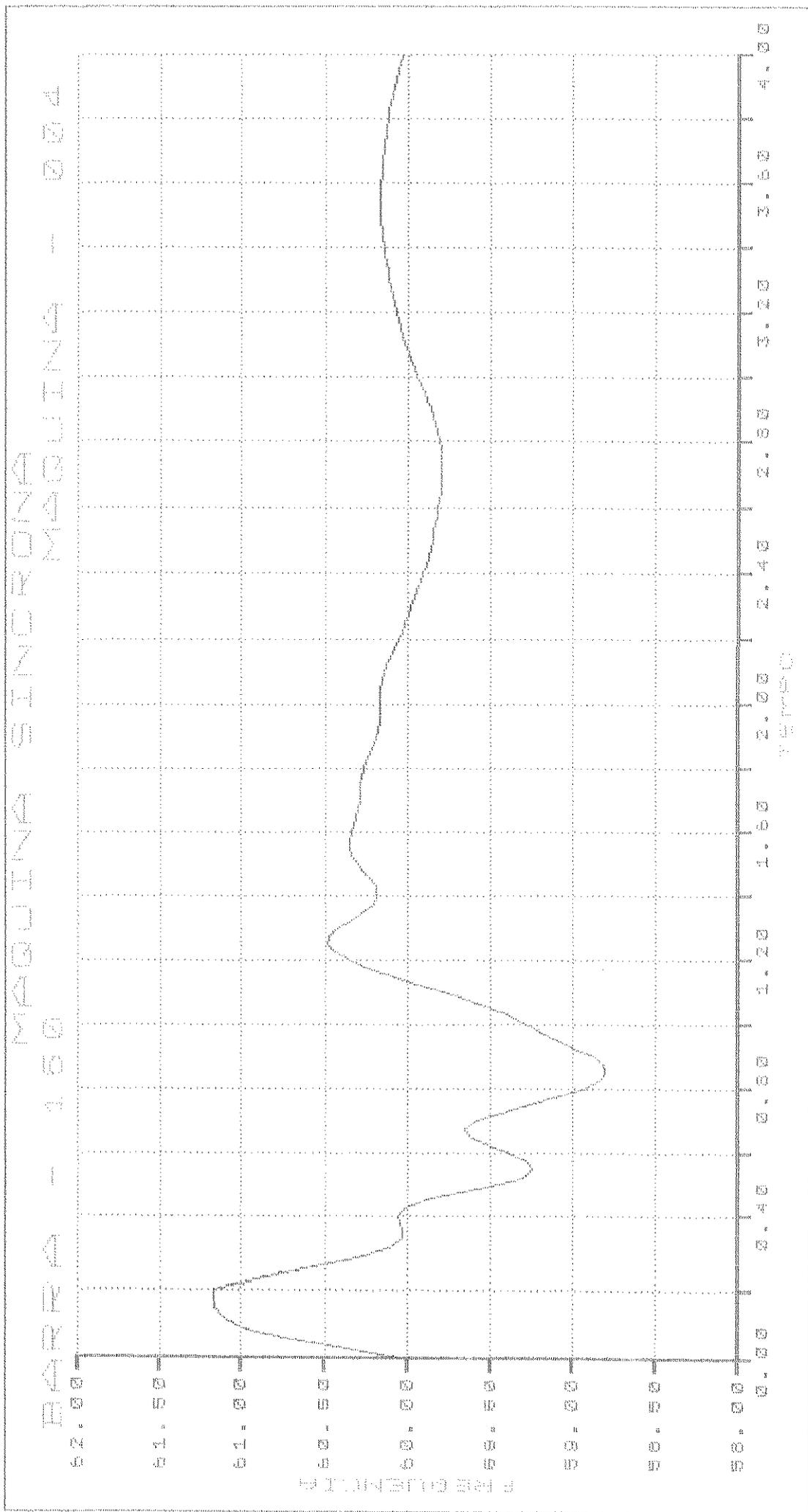


Gráfico 5.12 - Caso 6 - Modelo V - Amortecimento das Oscilações.

| SIMUL.            | AV 1  | AV 2  | AV 3  | AV 4  | AV 5  | AV 6  | AV 7  | AV 8  |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K(PU/HZ)          | 236,4 | 236,4 | 236,4 | 236,4 | 236,4 | 236,4 | 236,4 | 236,4 |       |
| T1(SEG.)          | 0,08  | 0,013 | 0,05  | 0,05  | 0,05  | 0,1   | 0,1   | 0,1   |       |
| T2(SEG.)          | 0,318 | 2,0   | 0,1   | 0,5   | 1,0   | 0,1   | 0,5   | 1,0   |       |
| 1º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 95    | 111   | 83    | 98    | 107   | 86    | 106   | 109   |
|                   | FREQ. | 61,50 | 61,74 | 61,16 | 61,54 | 61,70 | 61,32 | 61,69 | 61,74 |
| 1º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -53   | -106  | -78   | -67   | -98   | -76   | -83   | -109  |
|                   | FREQ. | 58,51 | 57,89 | 58,82 | 58,35 | 57,93 | 58,91 | 58,08 | 57,80 |
| 2º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 8     | -8    | 20    | 3     | -15   | 19    | -27   | -13   |
|                   | FREQ. | 60,29 | 60,97 | 60,48 | 60,46 | 60,94 | 60,47 | 60,79 | 61,05 |
| 2º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -6    | -33   | -18   | -3    | -38   | -15   | -46   | -47   |
|                   | FREQ. | 59,90 | 59,62 | 60,18 | 59,98 | 59,63 | 59,82 | 59,88 | 59,47 |
| 3º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 5     | 1     | 22    | 4     | -1    | -     | 0     | 0     |
|                   | FREQ. | 60,30 | 60,25 | 60,35 | 60,24 | 60,32 | 60,13 | 60,46 | 60,45 |
| 3º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -     | -4    | -     | -     | -3    | -     | -3    | -5    |
|                   | FREQ. | 59,92 | 59,94 | 59,78 | 59,94 | 59,98 | -     | 60,00 | 59,93 |
| Test.(seg)        | 2,750 | 2,475 | > 4   | 2,500 | 1,950 | > 4   | 1,800 | 2,200 |       |

Tabela 5.14 - Parâmetros e resultados das simulações realizadas para o modelo V - Amortecimento.

efeito provocado pelos diversos sinais de controle já descritos.

Os gráficos 5.13 e 5.14 apresentam o ângulo de potência e a frequência da máquina 4, localizada na barra 150. Também neste caso a máquina 4 foi a escolhida para efeito de análise por ser a que está mais próxima do distúrbio e, portanto, mais susceptível a sofrer suas conseqüências. Nestes estudos considerar-se-á que as máquinas estarão estabilizadas a partir do instante em que as variações de frequência se mantiverem dentro de valores inferiores a 0,10 Hz, ou seja, a frequência estiver oscilando entre 59,95 e 60,05 Hz.

| 1º MAX. |       | 1º MIN |       | 2º MAX |       | 2º MIN |       | 3º MAX |       | 3º MIN |       |
|---------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| ANG     | FREQ  | ANG    | FREQ  | ANG    | FREQ  | ANG    | FREQ  | ANG    | FREQ  | ANG    | FREQ  |
| 97      | 61,13 | -39    | 59,03 | 20     | 60,59 | -9     | 59,76 | 10     | 60,16 | -1     | 59,90 |

Tabela 5.15-Parâmetros e resultados do Caso Base - Controle de Frequência.

A análise do gráfico 5.14 mostra que o sistema irá se estabilizar em um instante superior a 4 segundos. A tabela 5.15 fornece os limites atingidos pelas grandezas em observação, para o caso base.

#### B - Caso 2 - Modelo I.

Utilizando-se a mesma fonte de distúrbio descrita no caso base, foram realizadas várias simulações com a adição de um sinal processado através a função de transferência denominada de modelo I, sendo que o sinal empregado é o sinal de frequência retirado da barra 150.

Os gráficos 5.15 e 5.16 fornecem o ângulo de potência e a frequência da máquina 4, localizada na barra 150, da simulação mais significativa em termos de frequência, que é a simulação F-I-8. Os

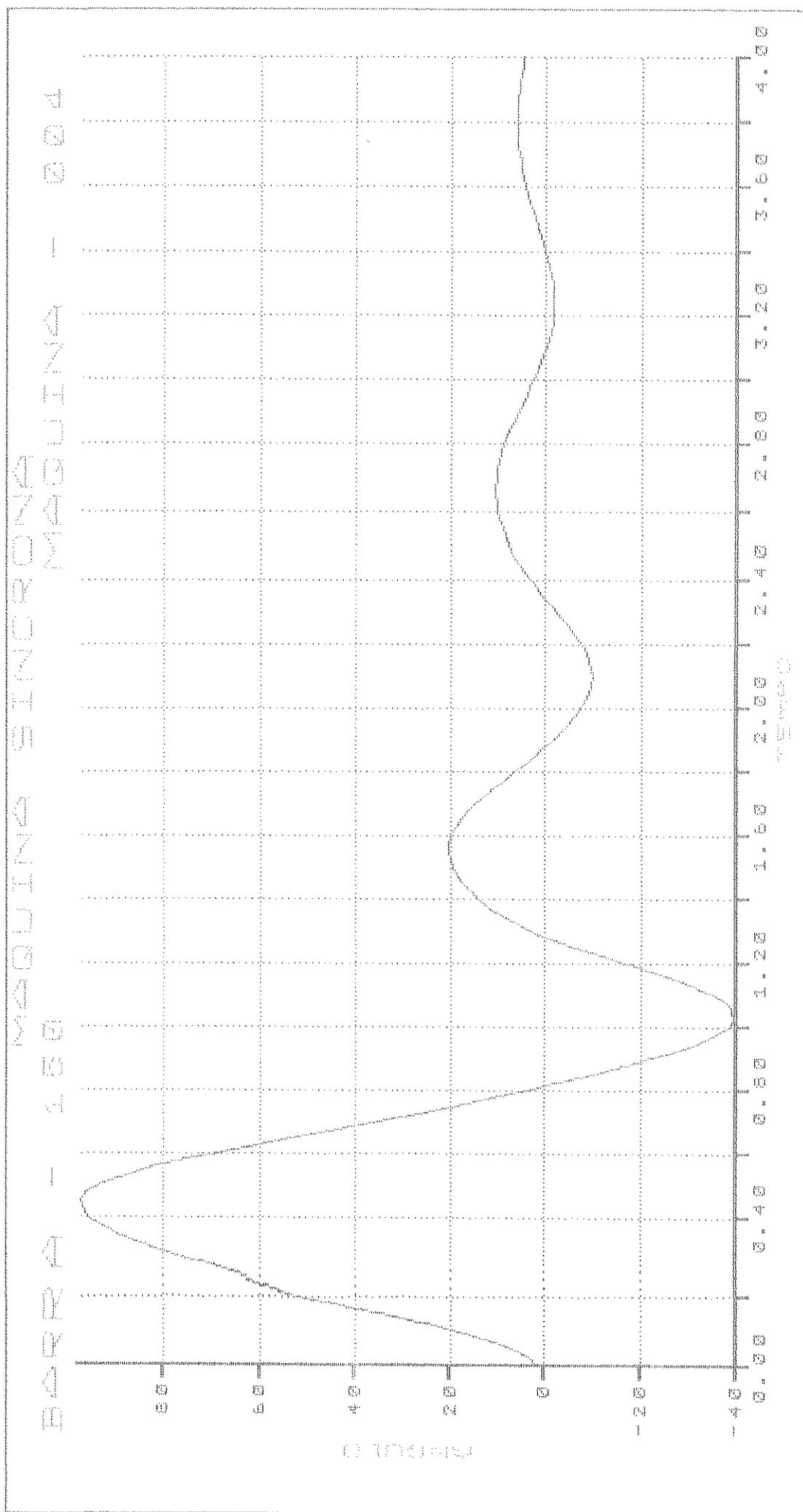


Gráfico 5.13 - Caso 1 - Sem Controle de Frequência.

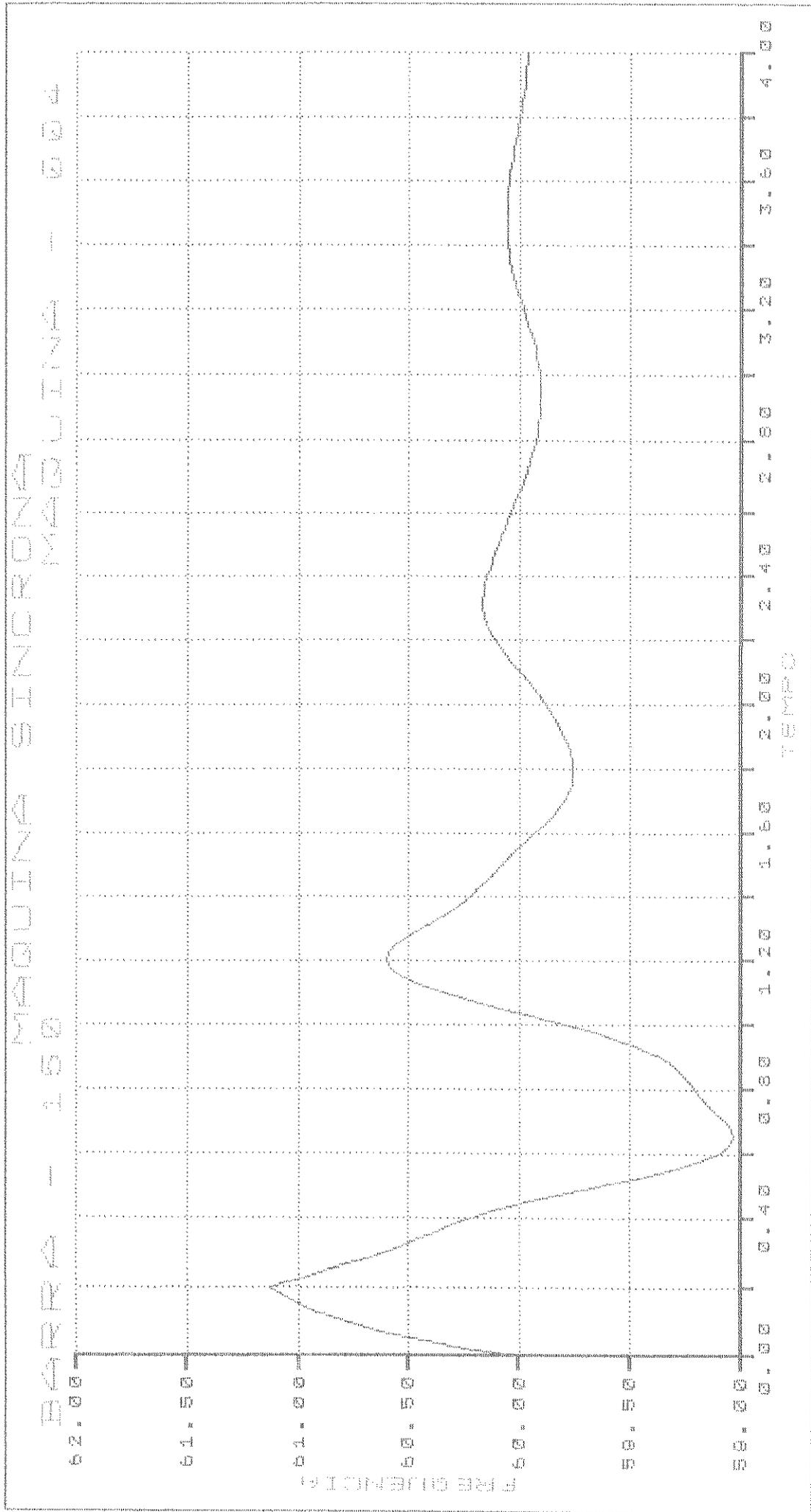


Gráfico 5.14 - Caso 1 - Sem Controle de Frequência.

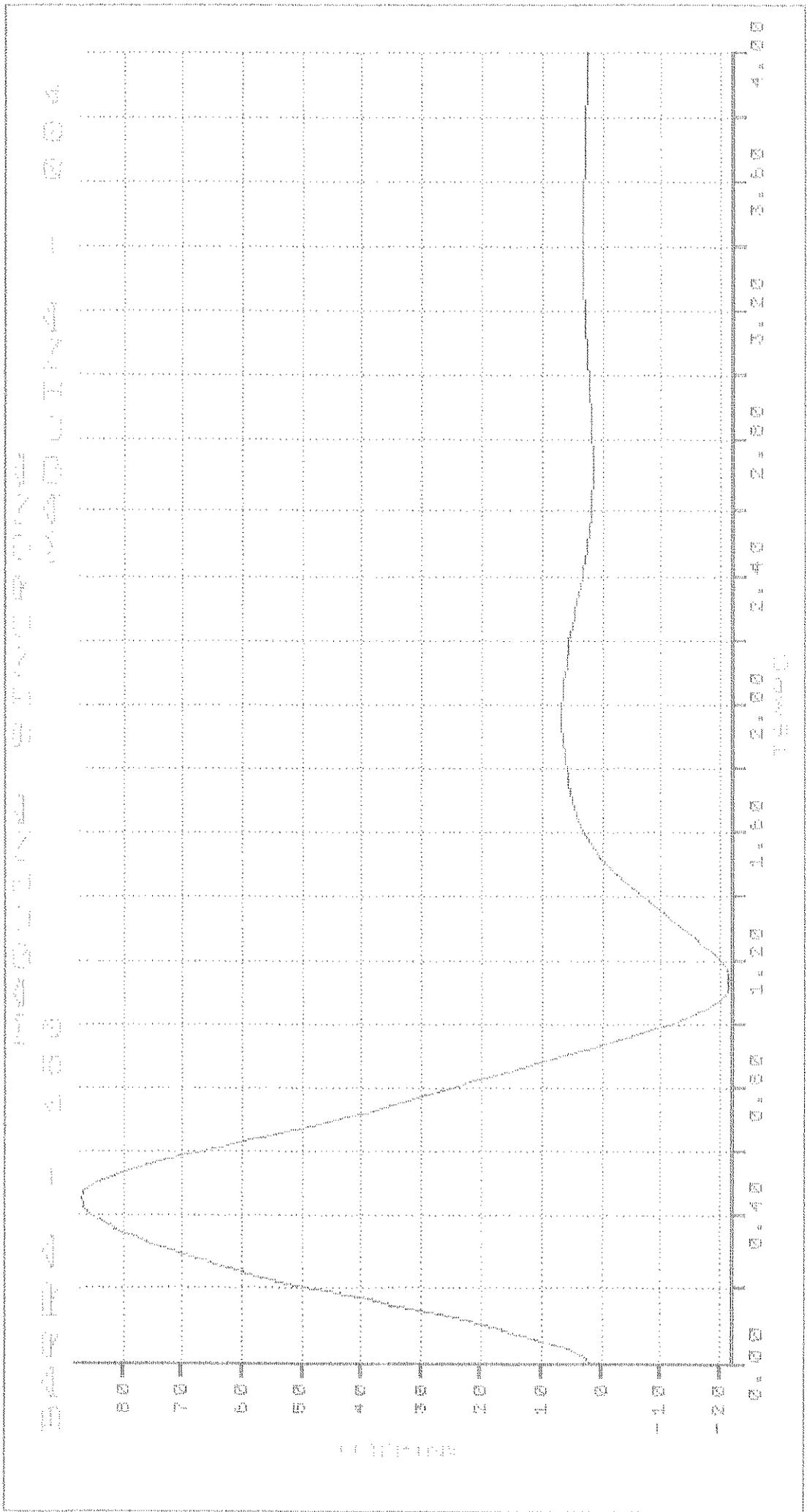


Gráfico 5.15 - Caso 2 - Modelo I - Controle de Frequência.

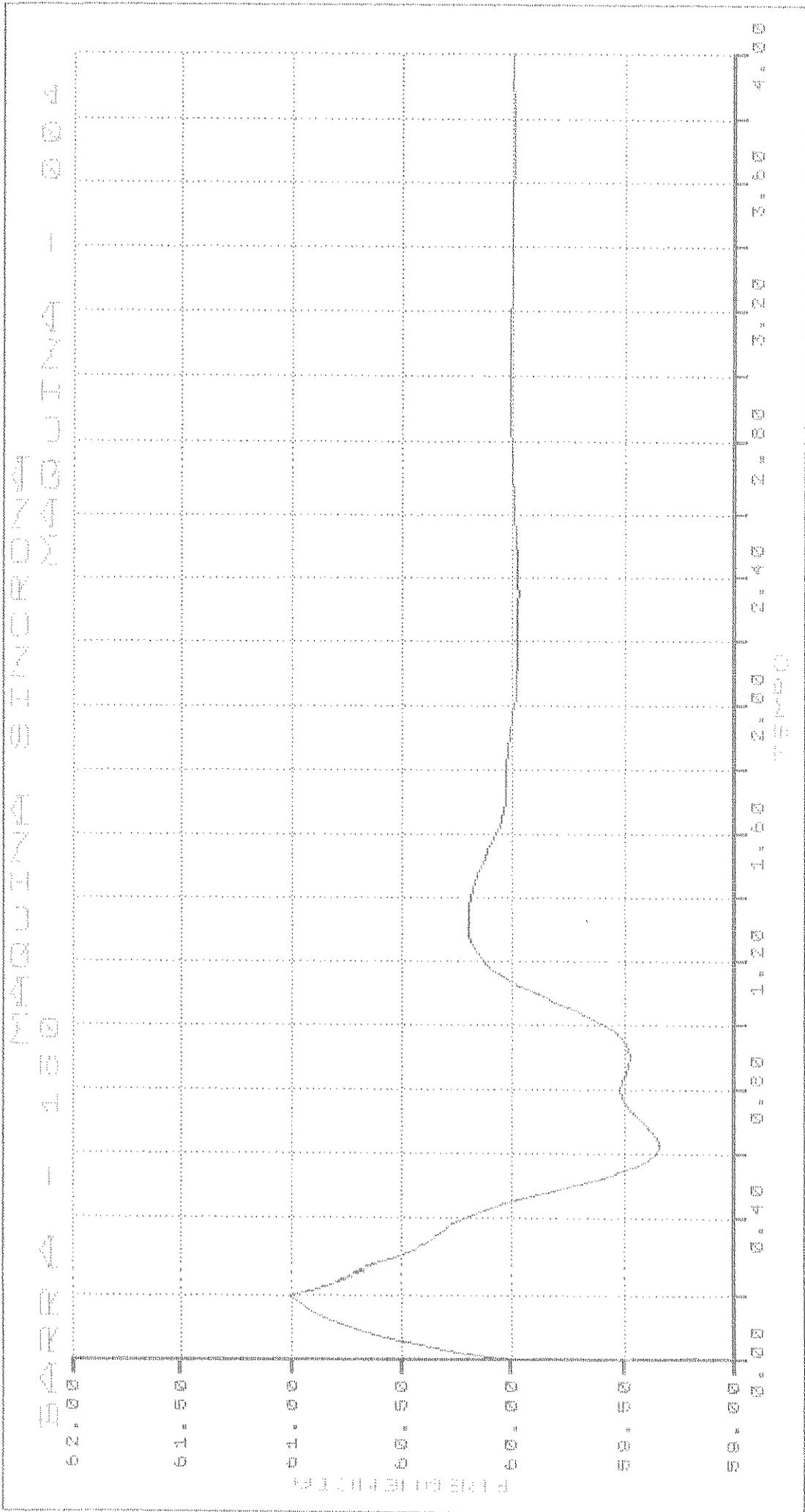


Gráfico 5.16 - Caso 2 - Modelo I - Controle de Freqüência.

| SIMUL.            | F11   | F12   | F13   | F14   | F15   | F16   | F17   | F18   |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K(PU/HZ)          | 1,0   | 50,0  | 100,0 | 200,0 | 1,0   | 50,0  | 100,0 | 200,0 |       |
| T1(SEG.)          | 0,50  | 0,50  | 0,50  | 0,50  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  |       |
| T2(SEG.)          | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,06  | 0,06  | 0,06  | 0,06  |       |
| T3(SEG.)          | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,06  | 0,06  | 0,06  | 0,06  |       |
| T4(SEG.)          | 0,05  | 0,05  | 0,05  | 0,05  | 0,10  | 0,10  | 0,10  | 0,10  |       |
| 1º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 97    | 93    | 89    | 83    | 96    | 94    | 91    | 87    |
|                   | FREQ. | 61,13 | 61,08 | 61,01 | 60,93 | 61,12 | 61,10 | 61,07 | 61,01 |
| 1º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -39   | -31   | -25   | -23   | -38   | -33   | -28   | -21   |
|                   | FREQ. | 59,04 | 59,19 | 59,35 | 59,45 | 59,05 | 59,13 | 59,21 | 59,33 |
| 2º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 20    | 11    | 9     | 12    | 20    | 14    | 9     | 6     |
|                   | FREQ. | 60,59 | 60,38 | 60,25 | 60,18 | 60,58 | 60,46 | 60,35 | 60,19 |
| 2º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -9    | 0     | 0     | -1    | -9    | -3    | 0     | 1     |
|                   | FREQ. | 59,76 | 59,92 | 59,94 | 59,92 | 59,76 | 59,86 | 59,94 | 59,97 |
| 3º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 10    | 4     | 3     | 4     | 10    | 6     | 4     | 3     |
|                   | FREQ. | 60,16 | 60,04 | 60,02 | 60,03 | 60,15 | 60,07 | 60,02 | 60,01 |
| 3º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -1    | 2     | -     | -     | -1    | 1     | 2     | -     |
|                   | FREQ. | 59,91 | 59,98 | 59,99 | -     | 59,91 | 59,96 | 59,98 | 59,99 |
| Test.(seg)        | > 4   | 2,125 | 1,725 | 2,800 | > 4   | 2,575 | 2,075 | 1,650 |       |

Tabela 5.16 - Parâmetros e resultados das simulações realizadas

para o modelo I - Controle de Frequência.

parâmetros desta simulação proporcionam uma melhoria acentuada nos índices de desempenho, notadamente no tempo de estabilização, que passou a ser de 1,65 segundos.

A tabela 5.16 apresenta os parâmetros utilizados nas várias simulações do Caso 2, bem como os limites atingidos pelas curvas, além dos tempos de estabilização.

É interessante notar que as simulações F-I-3 e F-I-4 apresentam, inicialmente, melhores resultados, enquanto que a F-I-8 se destaca a partir do segundo ciclo. Constata-se, de modo geral, que um aumento do ganho produz um efeito mais acentuado, e, dependendo do seu valor, um aumento das constantes de tempo pode produzir efeito contrário.

### C - Caso 3 - Modelo II.

Processando-se o sinal de frequência proveniente da barra 150, através a função de transferência denominada de modelo II, e utilizando-se a mesma fonte de distúrbio do caso base, foram realizadas várias simulações, que são apresentadas na tabela 5.17. A simulação mais significativa, dentre as processadas é a denominada F-II-4, cujas curvas são mostradas pelos gráficos 5.17 e 5.18.

Estes gráficos comprovam o efeito positivo do sistema utilizado para controle da frequência, conseguindo-se um tempo de estabilização bem inferior ao do caso base.

A tabela 5.17 nos mostra que a simulação F-II-8 proporciona um tempo de estabilização menor que as demais, no entanto, a F-II-4 possui uma curva de frequência mais suave, e que é mais interessante do ponto de vista de efeitos danosos ao sistema. Percebe-se, nitidamente, que um aumento do ganho provocou uma melhoria nos resultados obtidos, no entanto, não se pode fazer nenhuma afirmação categórica a respeito. No que se refere às constantes de tempo, observa-se o oposto, isto é, um aumento destas acarreta efeitos menos significativos.

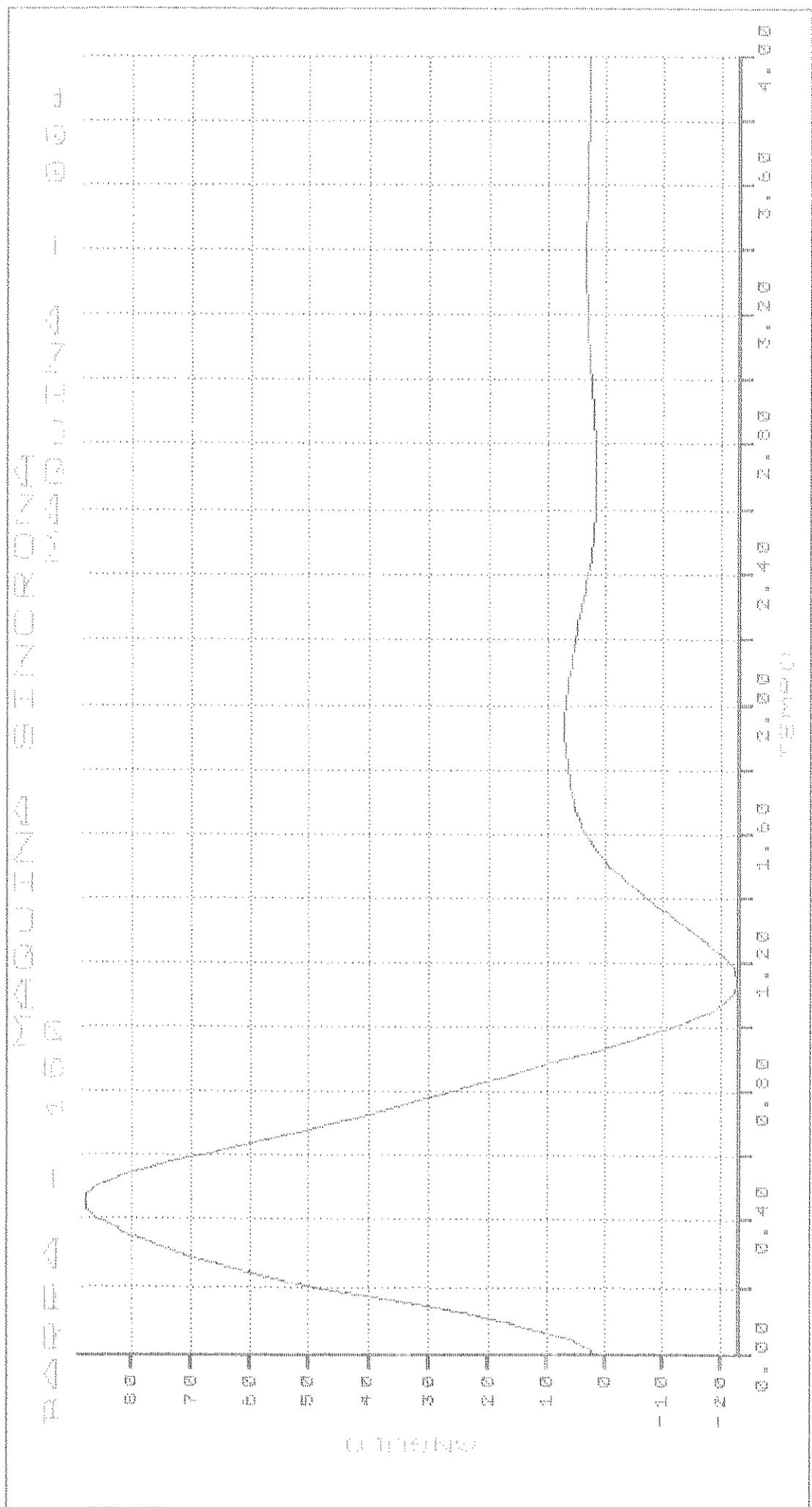


Gráfico 5.17 - Caso 3 - Modelo II - Controle de Frequência.

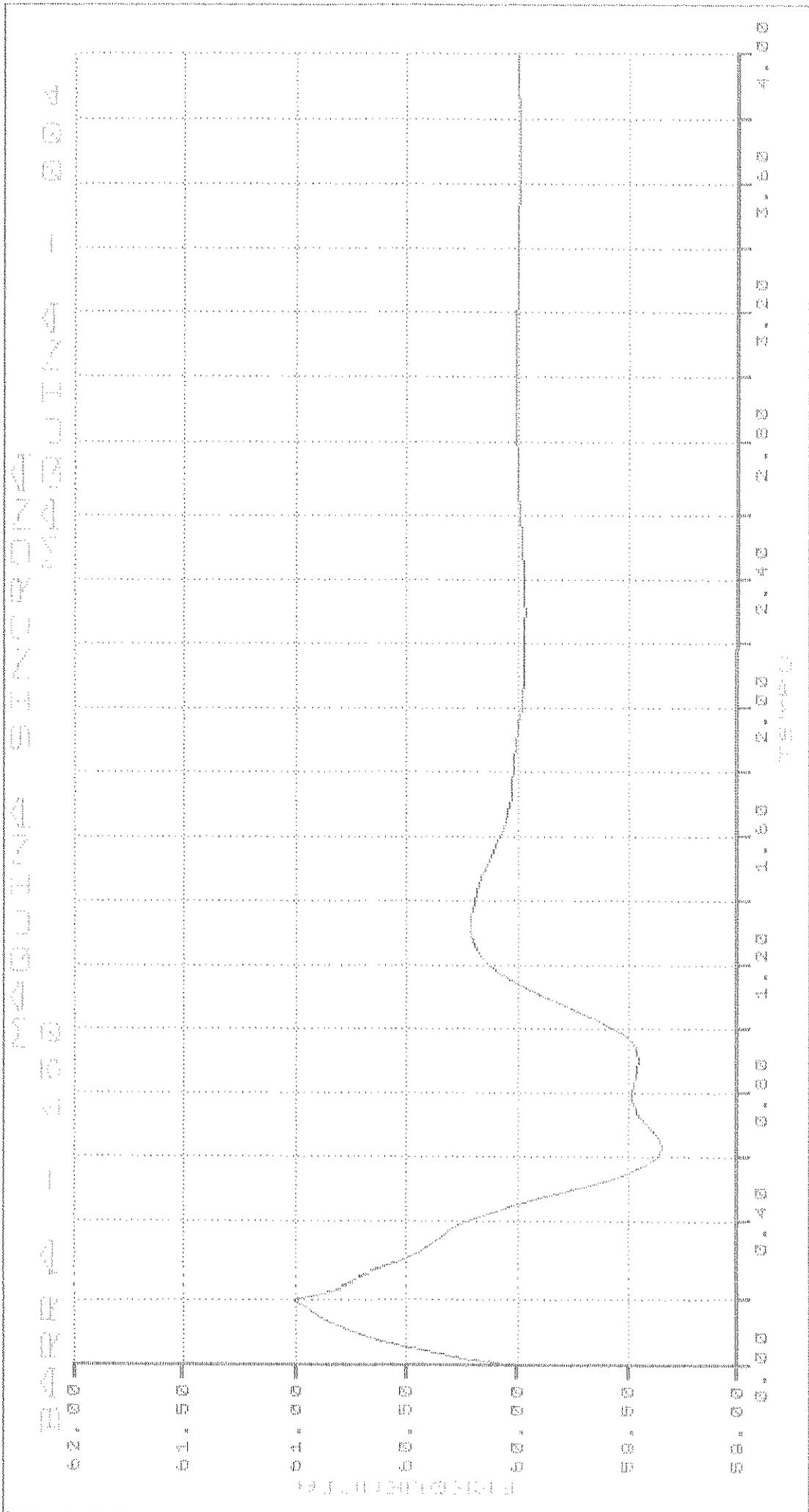


Gráfico 5.18 - Caso 3 - Modelo II - Controle de Frequência.

| SIMUL.            |       | F II 1 | F II 2 | F II 3 | F II 4 | F II 5 | F II 6 | F II 7 | F II 8 |
|-------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| K(PU/HZ)          |       | 1,0    | 50,0   | 100,0  | 200,0  | 1,0    | 50,0   | 100,0  | 200,0  |
| T1(SEG.)          |       | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,50   | 1,50   | 1,50   | 1,50   |
| T2(SEG.)          |       | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,06   | 0,06   | 0,06   | 0,06   |
| T3(SEG.)          |       | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,06   | 0,06   | 0,06   | 0,06   |
| T4(SEG.)          |       | 0,05   | 0,05   | 0,05   | 0,05   | 0,10   | 0,10   | 0,10   | 0,10   |
| 1º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 97     | 94     | 92     | 88     | 97     | 94     | 93     | 90     |
|                   | FREQ. | 61,13  | 61,09  | 61,06  | 61,01  | 61,13  | 61,10  | 61,09  | 61,05  |
| 1º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -39    | -33    | -29    | -22    | -39    | -34    | -31    | -25    |
|                   | FREQ. | 59,04  | 59,14  | 59,22  | 59,35  | 59,03  | 59,10  | 59,16  | 59,25  |
| 2º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 20     | 14     | 10     | 7      | 20     | 15     | 12     | 7      |
|                   | FREQ. | 60,59  | 60,46  | 60,36  | 60,21  | 60,59  | 60,50  | 60,42  | 60,28  |
| 2º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -9     | -3     | 0      | 1      | -9     | -5     | -2     | 1      |
|                   | FREQ. | 59,76  | 59,86  | 59,93  | 59,97  | 59,76  | 59,83  | 59,89  | 59,97  |
| 3º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 10     | 6      | 4      | 3      | 10     | 7      | 5      | 3      |
|                   | FREQ. | 60,16  | 60,08  | 60,03  | 60,01  | 60,16  | 60,10  | 60,05  | 60,01  |
| 3º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -1     | 1      | 2      | -      | -1     | 0      | 1      | 2      |
|                   | FREQ. | 59,91  | 59,96  | 59,98  | 59,99  | 59,90  | 59,95  | 59,97  | 59,99  |
| Test.(seg)        |       | > 4    | 2,600  | 2,100  | 1,675  | > 4    | 2,575  | 2,500  | 1,600  |

Tabela 5.17 - Parâmetros e resultados das simulações realizadas

para o modelo II - Controle de Frequência.

#### D - Caso 4 - Modelo III.

Neste caso o sinal processado através a função de transferência denominada de modelo III, é o sinal de frequência proveniente de uma das barras do lado do retificador, no caso, a barra 90, sendo que a fonte de distúrbio é a mesma do caso base. As simulações realizadas são apresentadas na tabela 5.18 e os gráficos 5.19 e 5.20 mostram as curvas do ângulo de potência e da frequência da máquina para a simulação mais significativa entre as realizadas, que é a F-III-7.

Os gráficos mencionados comprovam o efeito positivo proporcionado por este controle. Deve-se ressaltar que os efeitos não são mais significativos devido ao fato do sinal ser retirado de uma barra localizada relativamente longe da perturbação, e, portanto, não tão sujeita a seus efeitos.

Novamente aqui percebe-se que devem ser feitos ajustes entre os valores dos ganhos e das constantes de tempo, para se obter melhores resultados.

#### E - Caso 5 - Modelo IV.

Utilizando-se a mesma fonte de distúrbio do caso base, foram realizadas várias simulações, adicionando-se um sinal para o controle da frequência, processado através a função de transferência denominada de modelo IV.

O sinal empregado, numa determinada iteração, é a diferença entre o valor do ângulo da tensão na barra do inversor, na iteração em questão, e seu valor inicial.

Os gráficos 5.21 e 5.22 apresentam as variações do ângulo de potência e da frequência da máquina 4, para a simulação mais significativa, que é a F-IV-2. Até a metade do segundo ciclo as simulações F-IV-3, F-IV-4 e F-IV-8 apresentam melhores resultados. Além deste ponto, o

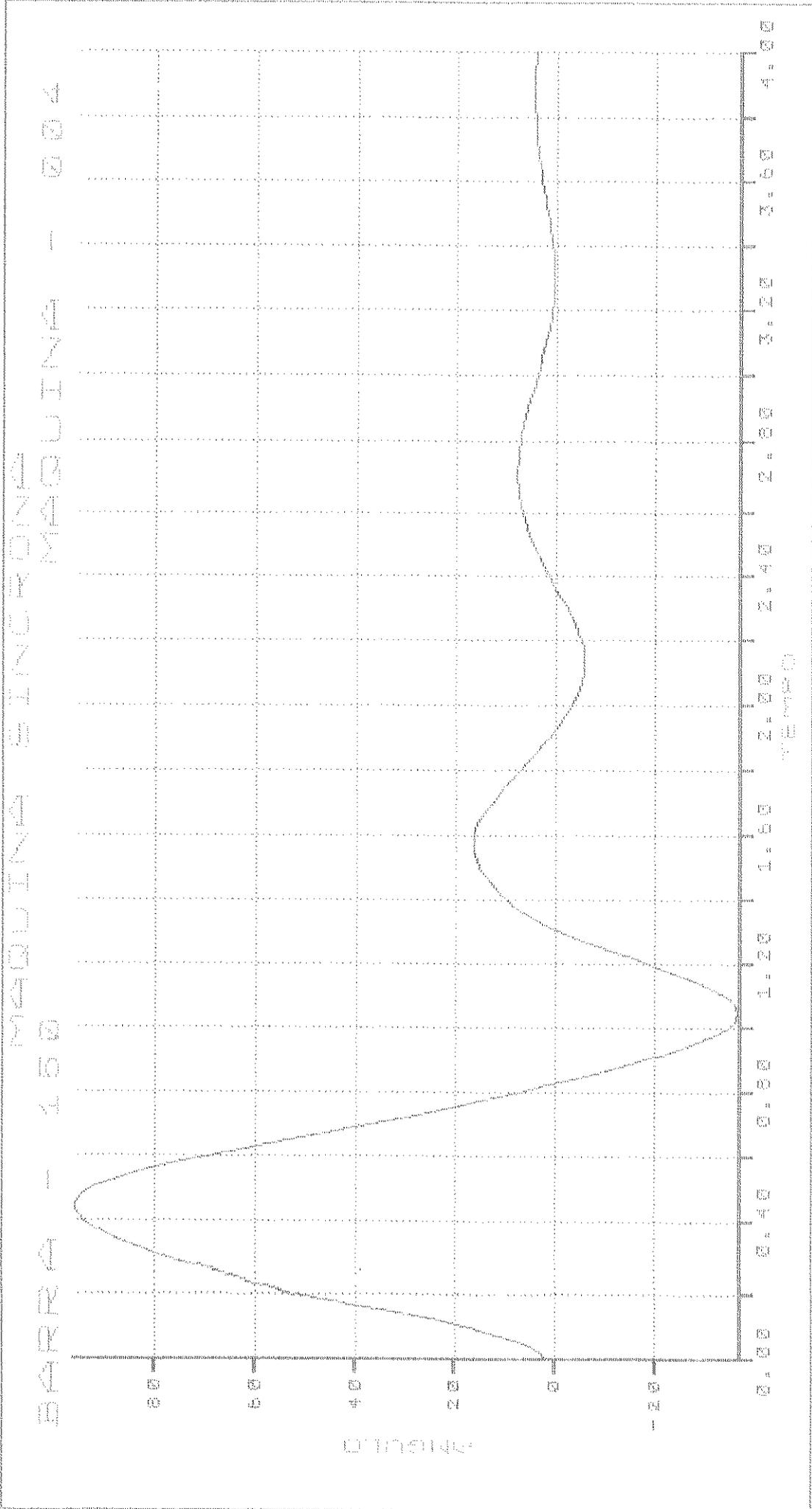


Gráfico 5.19 - Caso 4 - Modelo III - Controle de Frequência.

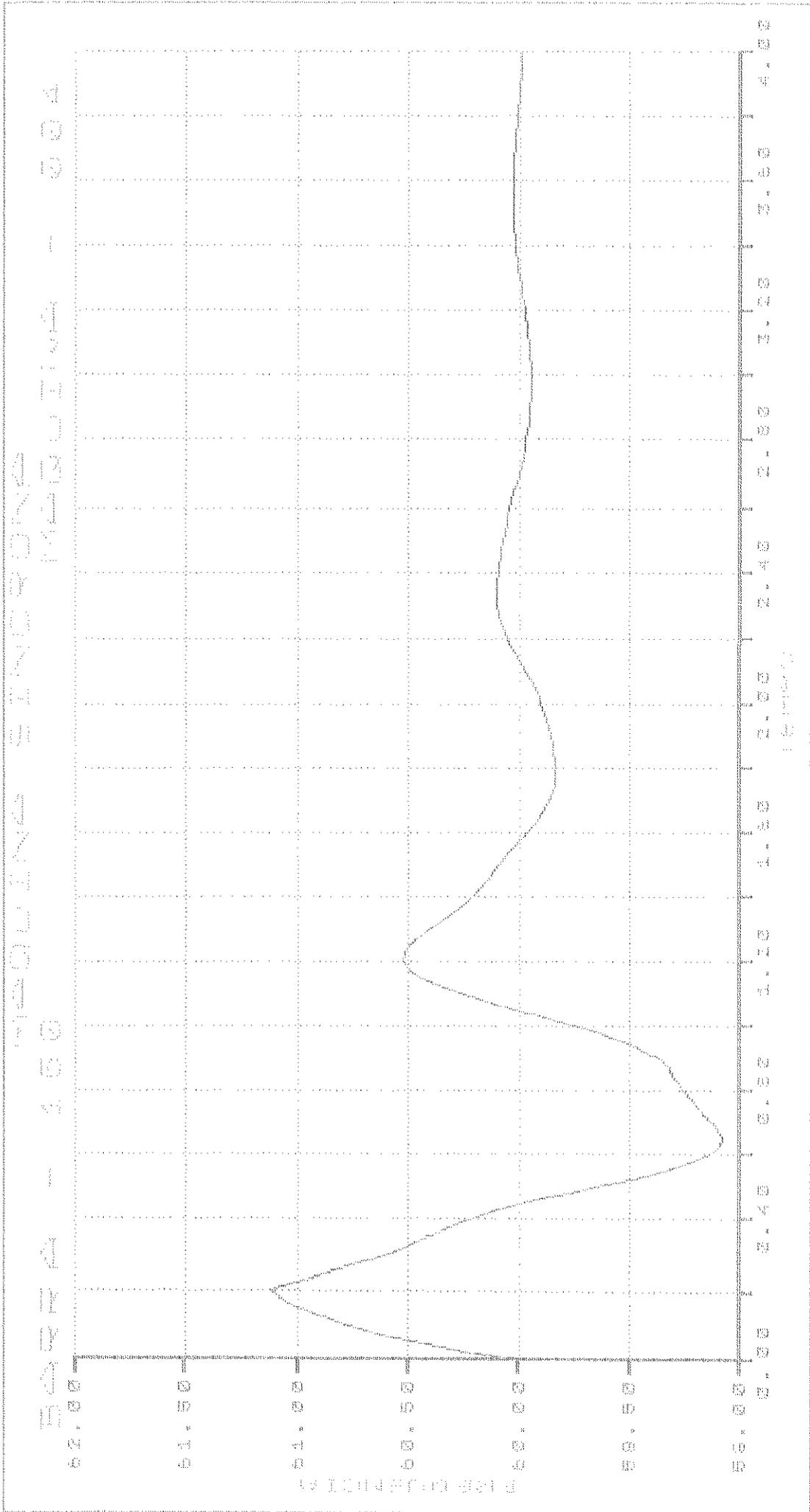


Gráfico 5.20 - Caso 4 - Modelo III - Controle de Frequência.

| SIMUL.            |       | F III 1 | F III 2 | F III 3 | F III 4 | F III 5 | F III 6 | F III 7 | F III 8 |
|-------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| K(PU/HZ)          |       | 0,1     | 1,0     | 10,0    | 100,0   | 0,1     | 1,0     | 10,0    | 100,0   |
| T1(SEG.)          |       | 0,04    | 0,04    | 0,04    | 0,04    | 0,10    | 0,10    | 0,10    | 0,10    |
| T2(SEG.)          |       | 0,05    | 0,05    | 0,05    | 0,05    | 0,20    | 0,20    | 0,20    | 0,20    |
| 1º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 96      | 96      | 95      | 89      | 96      | 97      | 95      | 85      |
|                   | FREQ. | 61,12   | 61,12   | 61,08   | 60,87   | 61,13   | 61,13   | 61,11   | 60,99   |
| 1º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -38     | -38     | -38     | -43     | -38     | -39     | -35     | -24     |
|                   | FREQ. | 59,04   | 59,05   | 59,15   | 59,21   | 59,04   | 59,04   | 59,09   | 59,42   |
| 2º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 20      | 20      | 19      | 32      | 20      | 19      | 16      | 13      |
|                   | FREQ. | 60,58   | 60,58   | 60,52   | 60,38   | 60,58   | 60,59   | 60,51   | 60,22   |
| 2º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -9      | -9      | -8      | -18     | -9      | -9      | -5      | -2      |
|                   | FREQ. | 59,76   | 59,77   | 59,80   | 59,67   | 59,76   | 59,76   | 59,83   | 59,90   |
| 3º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 10      | 10      | 9       | 21      | 10      | 10      | 7       | 5       |
|                   | FREQ. | 60,16   | 60,15   | 60,13   | 60,20   | 60,16   | 60,15   | 60,10   | 60,04   |
| 3º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -1      | -1      | 0       | -       | -1      | -1      | 0       | -       |
|                   | FREQ. | 59,91   | 59,91   | 59,92   | -       | 59,91   | 59,91   | 59,95   | -       |
| Test.(seg)        |       | > 4     | > 4     | 3,725   | > 4     | > 4     | > 4     | 2,600   | 2,725   |

Tabela 5.18 - Parâmetros e resultados das simulações realizadas para o modelo III - Controle de Frequência.

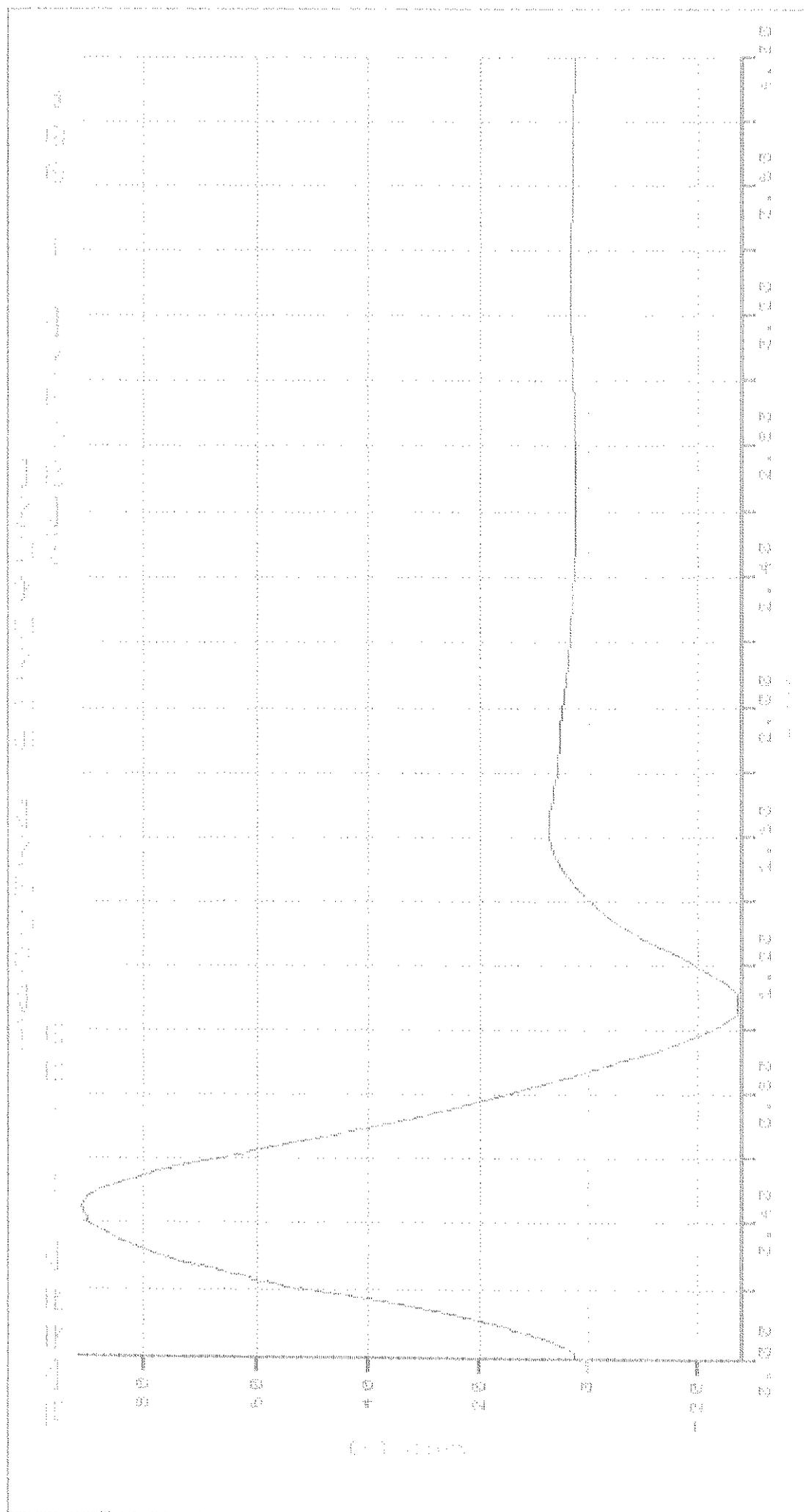


Gráfico 5.21 - Caso 5 - Modelo IV - Controle de Frequência.

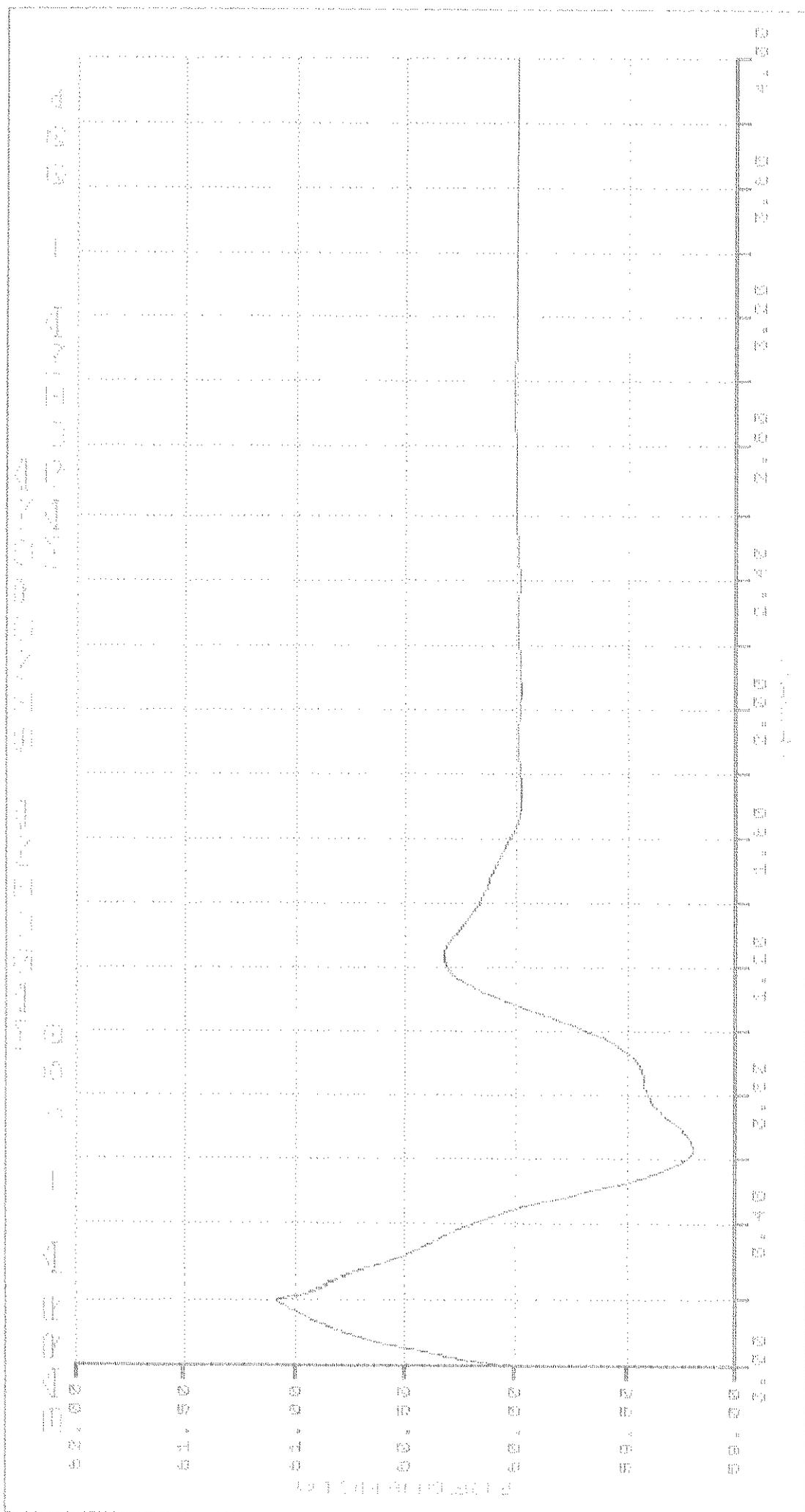


Gráfico 5.22 - Caso 5 - Modelo IV - Controle de Frequência.

| SIMUL.            | F IV 1 | F IV 2 | F IV 3 | F IV 4 | F IV 5 | F IV 6 | F IV 7 | F IV 8 |       |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| K(PU/°)           | 1,0    | 50,0   | 100,0  | 200,0  | 1,0    | 50,0   | 100,0  | 200,0  |       |
| T1(SEG.)          | 0,50   | 0,50   | 0,50   | 0,50   | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,00   |       |
| T2(SEG.)          | 0,25   | 0,25   | 0,25   | 0,25   | 0,50   | 0,50   | 0,50   | 0,50   |       |
| T3(SEG.)          | 0,15   | 0,15   | 0,15   | 0,15   | 0,30   | 0,30   | 0,30   | 0,30   |       |
| T4(SEG.)          | 0,50   | 0,50   | 0,50   | 0,50   | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,00   |       |
| T5(SEG.)          | 0,25   | 0,25   | 0,25   | 0,25   | 0,50   | 0,50   | 0,50   | 0,50   |       |
| 1º<br>M<br>A<br>X | ANG.   | 97     | 91     | 86     | 80     | 96     | 94     | 93     | 88    |
|                   | FREQ.  | 61,13  | 61,08  | 61,04  | 60,96  | 61,12  | 61,11  | 61,11  | 61,07 |
| 1º<br>M<br>I<br>N | ANG.   | -39    | -27    | -20    | -20    | -38    | -32    | -27    | -16   |
|                   | FREQ.  | 59,04  | 59,19  | 59,31  | 59,48  | 59,05  | 59,09  | 59,10  | 59,19 |
| 2º<br>M<br>A<br>X | ANG.   | 20     | 7      | 9      | 13     | 19     | 14     | 9      | 0     |
|                   | FREQ.  | 60,59  | 60,32  | 60,15  | 60,16  | 60,58  | 60,49  | 60,41  | 60,22 |
| 2º<br>M<br>I<br>N | ANG.   | -9     | 2      | 0      | -1     | -9     | -4     | -3     | -2    |
|                   | FREQ.  | 59,76  | 59,97  | 59,94  | 59,92  | 59,76  | 59,82  | 59,86  | 59,95 |
| 3º<br>M<br>A<br>X | ANG.   | 10     | 3      | 3      | -      | 10     | 7      | 6      | 6     |
|                   | FREQ.  | 60,16  | 60,09  | 60,02  | 60,03  | 60,15  | 60,10  | 60,08  | 60,07 |
| 3º<br>M<br>I<br>N | ANG.   | -1     | -      | -      | -      | -1     | 0      | 1      | 2     |
|                   | FREQ.  | 59,91  | 59,99  | -      | -      | 59,91  | 59,94  | 59,95  | 59,97 |
| Test.(seg)        | > 4    | 1,575  | 2,575  | 3,025  | > 4    | 2,875  | 2,350  | 2,150  |       |

Tabela 5.19 - Parâmetros e resultados das simulações realizadas para o modelo IV - Controle de Frequência.

caso F-IV-2 possui uma convergência bastante rápida, vindo a se estabilizar em 1,575 segundos, como mostra a tabela 5.19.

Neste caso, nota-se uma relação de proporcionalidade entre o valor do ganho e o nível dos resultados obtidos nas simulações. Quanto às constantes de tempo, pode-se dizer que um aumento nestas, produziu um aumento nos níveis atingidos pelas grandezas em estudo.

#### F - Caso 6 - Modelo V.

A função de transferência classificada como modelo V utiliza como sinal de entrada o erro de tensão na barra da inversora e fornece um sinal que irá alterar o ângulo de extinção  $\gamma$ .

Os gráficos 5.23 e 5.24 fornecem as curvas do ângulo de potência e da frequência da máquina 4, para a simulação F-V-6, que é a mais significativa do ponto de vista do controle da frequência. Neste caso obtém-se o menor tempo de estabilização, que passou a ser de 1,75 segundos, apesar das simulações F-V-1, F-V-2 e F-V-5 fornecerem limites mais suaves, como atestam a tabela 5.20.

#### 5.3.3 - Exemplo de Estabilização Proporcionalada pela Modulação do Elo cc.

Com o objetivo de se observar o efeito dos sinais estabilizantes, através do elo cc, quando da ocorrência de perturbações suficientemente fortes para levar os sistemas ca à instabilidade, procedeu-se à aplicação de um curto circuito, através de impedância, na barra 140. O curto circuito foi considerado como ocorrendo em  $t = 0$  s e com duração de 300 ms.

Inicialmente desprezou-se a ação de amortecimento do elo cc. Neste caso, percebe-se, pela análise do ângulo e da frequência da máquina localizada na barra 150, que a mesma se comporta de forma instável, como mostram os gráficos 5.25 e 5.26.

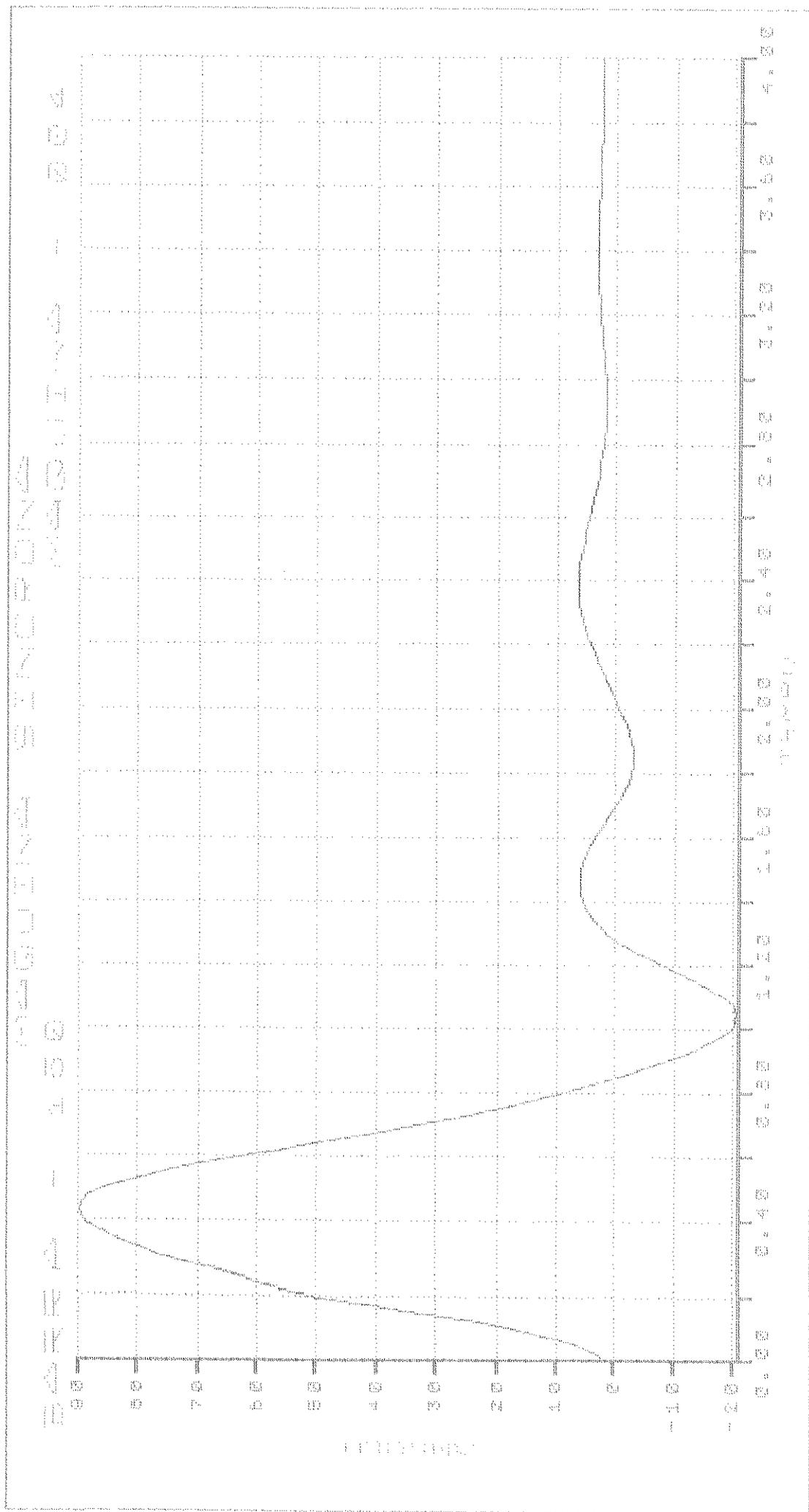


Gráfico 5.23 - Caso 6 - Modelo V - Controle de Frequência.

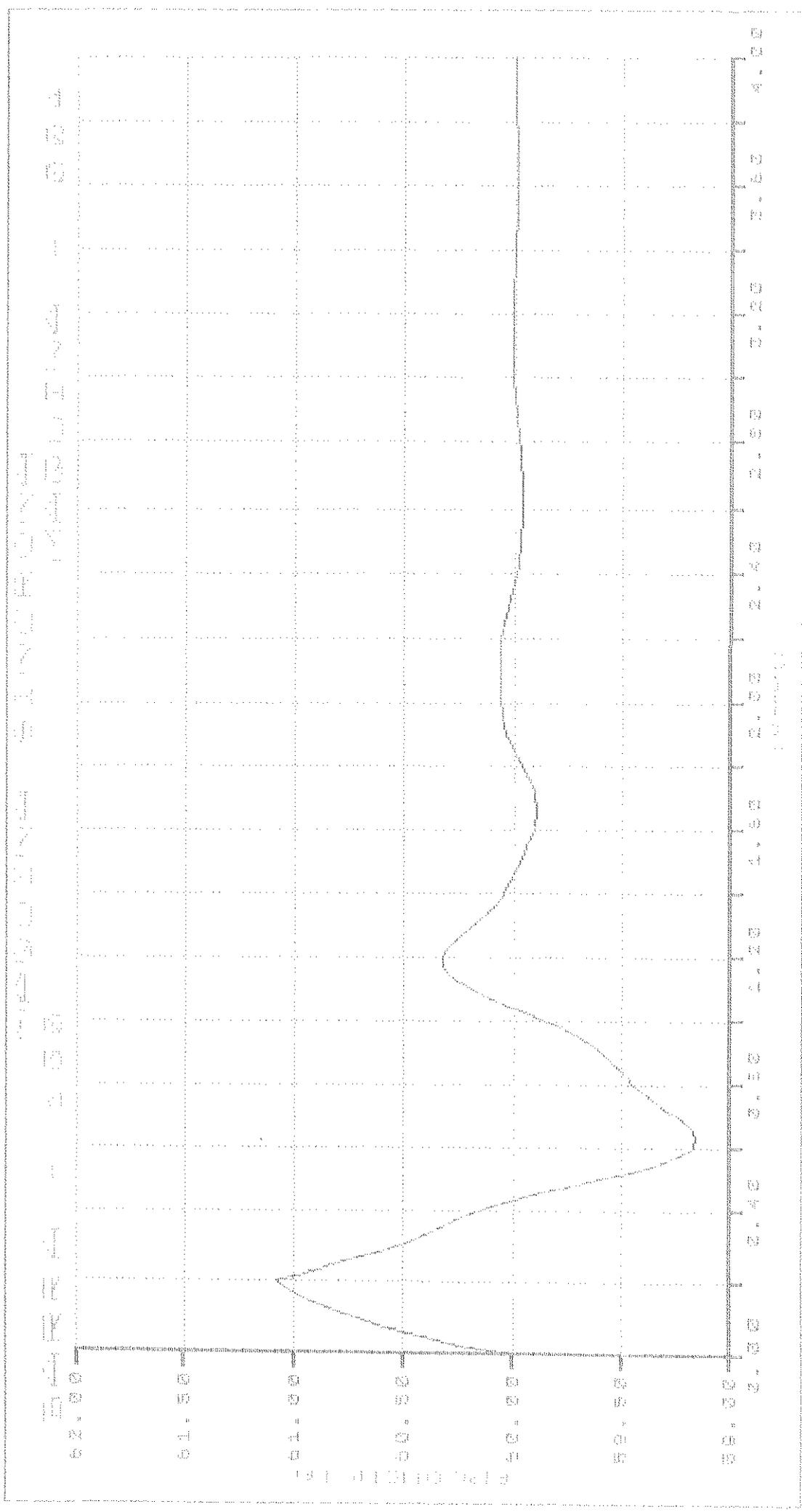


Gráfico 5.24 - Caso 6 - Modelo V - Controle de Freqüência.

| SIMUL.            | FV 1  | FV 2  | FV 3  | FV 4  | FV 5  | FV 6  | FV 7  | FV 8  |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K(°/PU)           | 236,4 | 236,4 | 236,4 | 236,4 | 236,4 | 236,4 | 236,4 | 236,4 |       |
| T1(SEG.)          | 0,20  | 0,30  | 0,40  | 0,50  | 0,20  | 0,30  | 0,40  | 0,50  |       |
| T2(SEG.)          | 0,60  | 0,60  | 0,60  | 0,60  | 0,80  | 0,80  | 0,80  | 0,80  |       |
| 1º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 87    | 87    | 89    | 90    | 89    | 89    | 90    | 91    |
|                   | FREQ. | 61,07 | 61,05 | 61,08 | 61,09 | 61,08 | 61,07 | 61,08 | 61,09 |
| 1º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -12   | -14   | -19   | -22   | -17   | -19   | -22   | -24   |
|                   | FREQ. | 59,21 | 59,23 | 59,15 | 59,13 | 59,17 | 59,19 | 59,15 | 59,13 |
| 2º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | 6     | 0     | 5     | 8     | 1     | 3     | 7     | 9     |
|                   | FREQ. | 60,14 | 60,17 | 60,31 | 60,37 | 60,24 | 60,26 | 60,34 | 60,38 |
| 2º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | 2     | -1    | -3    | -4    | -2    | 0     | -2    | -3    |
|                   | FREQ. | 59,9  | 59,98 | 59,88 | 59,85 | 59,94 | 59,93 | 59,89 | 59,86 |
| 3º<br>M<br>A<br>X | ANG.  | -     | 5     | 6     | 6     | 6     | 5     | 5     | 6     |
|                   | FREQ. | 60,08 | 60,05 | 60,08 | 60,09 | 60,07 | 60,04 | 60,06 | 60,08 |
| 3º<br>M<br>I<br>N | ANG.  | -     | 2     | 1     | 1     | 2     | 2     | 1     | 1     |
|                   | FREQ. | 59,97 | 59,98 | 59,96 | 59,95 | 59,96 | 59,97 | 59,97 | 59,96 |
| Test.(seg)        | 2,050 | 2,025 | 2,275 | 2,325 | 2,125 | 1,750 | 2,300 | 2,350 |       |

Tabela 5.20 - Parâmetros e resultados das simulações realizadas para o modelo V - Controle de Frequência.

A seguir foram realizadas várias simulações com a adição de sinais de amortecimento processados através das funções de transferência em estudo. Com o intuito de se evitar repetições desnecessárias, serão apresentados apenas os resultados obtidos com a utilização do modelo I. Constata-se, pela análise dos gráficos 5.27 e 5.28, que o efeito produzido sobre a máquina em questão, é o de fazer com que a mesma recupere o comportamento estável, após alguns segundos de oscilação.

Estes resultados vêm reforçar a importância da utilização de elos em corrente contínua, no amortecimento das oscilações dos sistemas em corrente alternada.

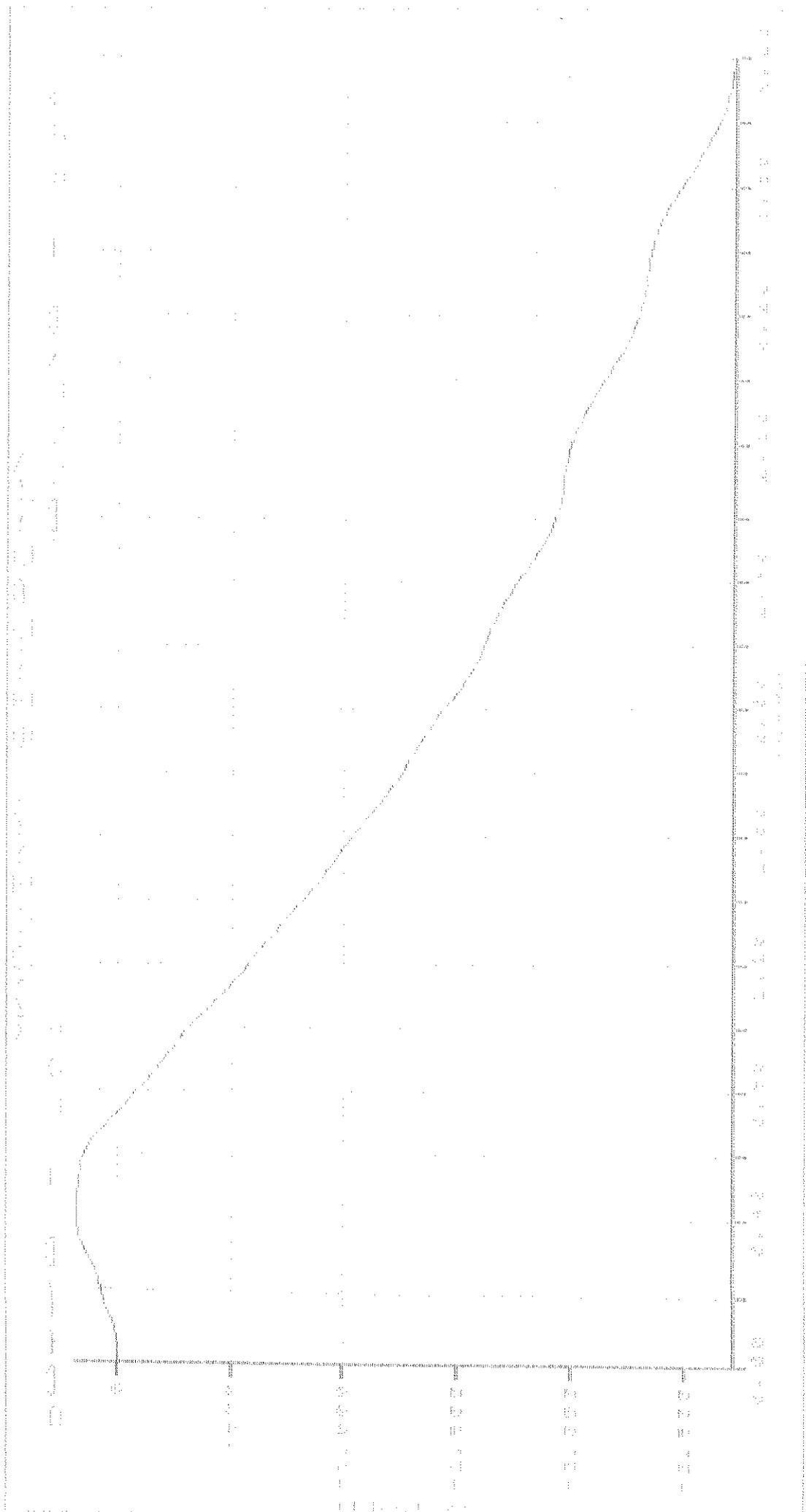


Gráfico 5.25 - Sem Amortecimento.

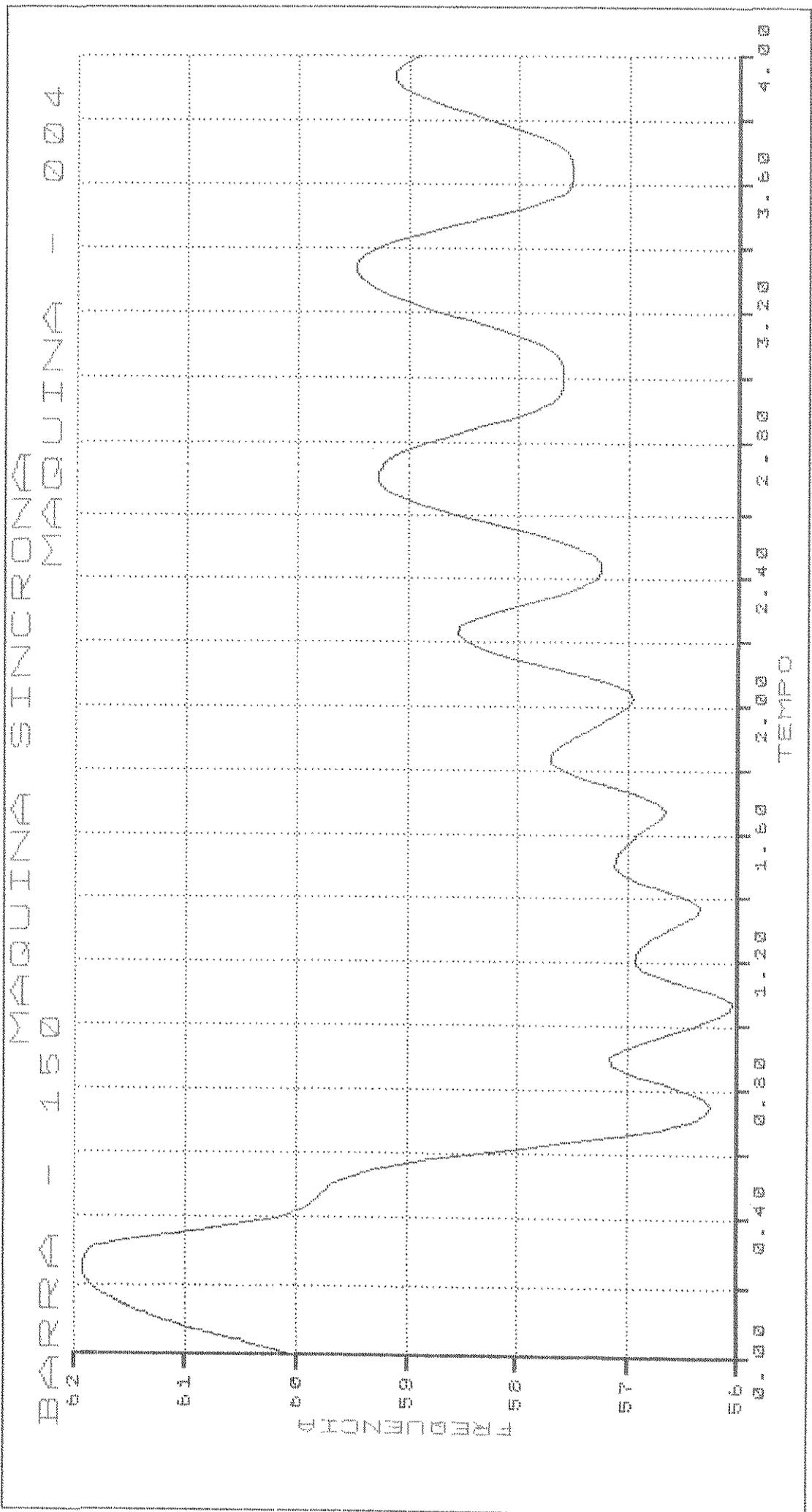


Gráfico 5.26 - Sem Amortecimento.

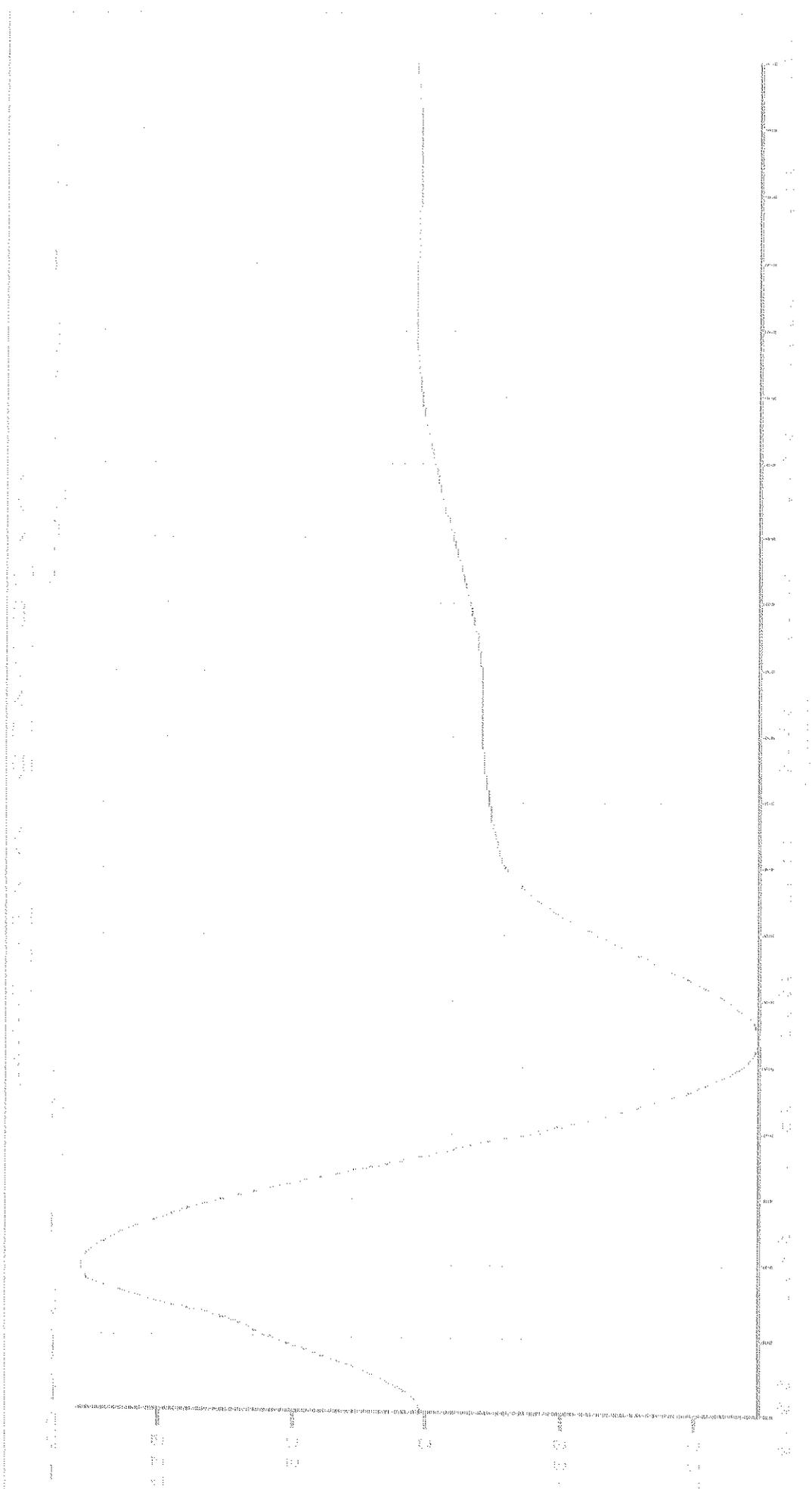


Gráfico 5.27 - Com Amortecimento.

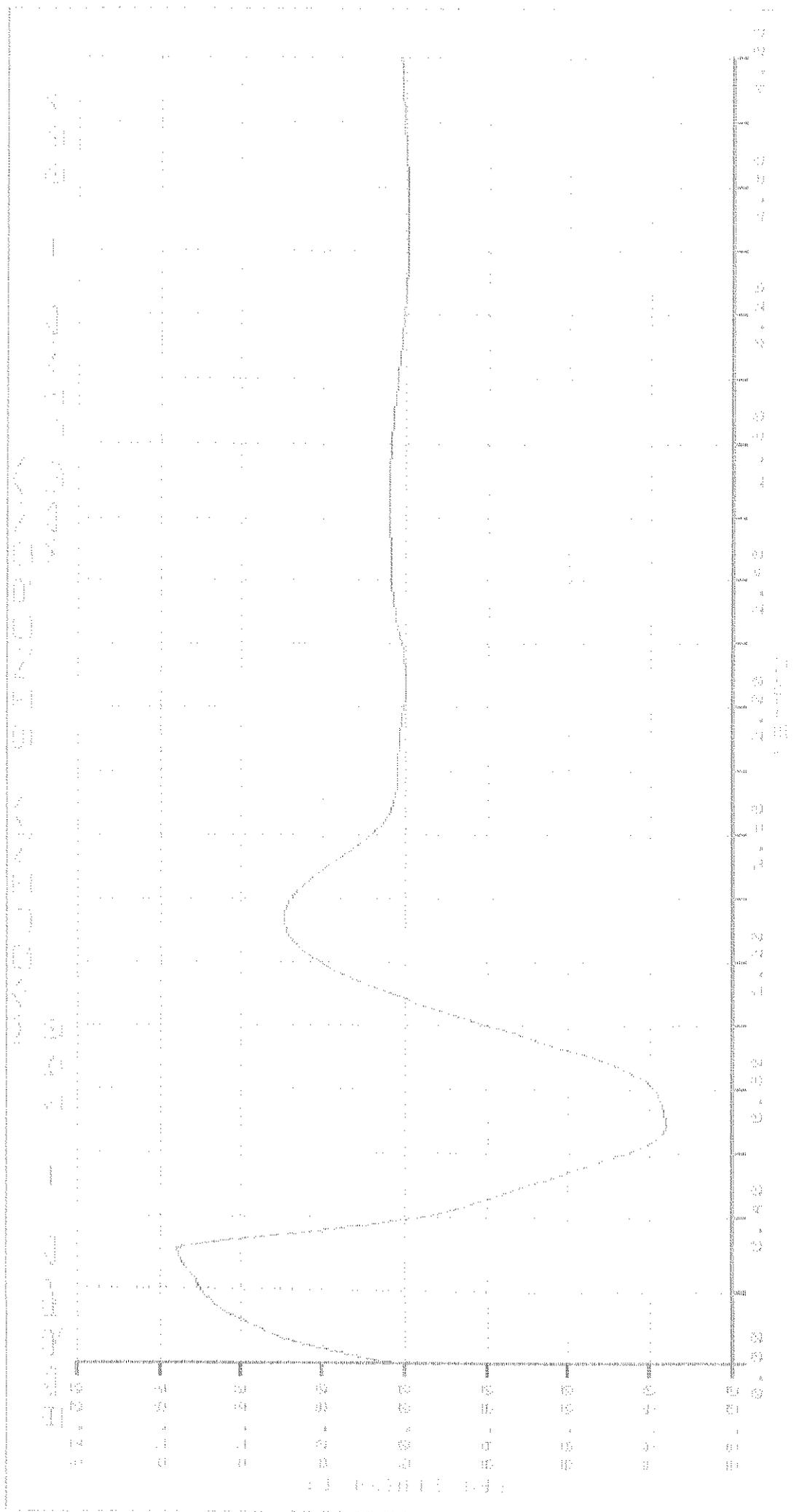


Gráfico 5.28 - Com Amortecimento.

## CAPITULO 6.

### CONCLUSÕES

No decorrer do texto, sempre que o momento se mostrou oportuno, foram discutidos e concluídos vários aspectos específicos das diversas unidades que se encontram na composição deste trabalho. Não obstante, existem comentários mais abrangentes sobre os principais pontos enfocados na pesquisa realizada, os quais constituirão a essência deste capítulo. Além das conquistas atingidas, naturalmente existiram obstáculos que só foram vencidos parcialmente e as dificuldades enfrentadas trouxeram à luz algumas limitações do trabalho desenvolvido e por conseguinte, surgiram idéias para futuras investigações que serão mencionadas posteriormente.

Iniciando por comentar a respeito dos resultados obtidos quanto ao efeito da reatância equivalente da rede elétrica de alimentação, sobre as diversas grandezas que definem a operação do elo cc, pode-se constatar, através de casos práticos simulados, a ocorrência de erros significativos para as potências reativas e um efeito quase nulo com relação às potências ativas. Quanto às faixas de erros verificadas para o caso em estudo, chegou-se a valores da ordem de 25% a 40% para as potências reativas e cerca de 0,5% para as potências ativas. Estes resultados, embora bastante elucidativos para o sistema simulado, não devem constituir, por si só, bases gerais para todo e qualquer outro caso prático. Além das variações verificadas nas potências, erros da ordem de 40% a 60% foram registrados para alguns importantes parâmetros que regem a operação do elo, tais como o ângulo de disparo, o ângulo de comutação e o ângulo de extinção. Como consequência de se utilizar condições iniciais diferentes para o elo cc, pelo fato de se adotar o modelo simplificado ou o completo da reatância de comutação, também foram verificadas variações marcantes entre os limites dos ângulos de

oscilação das máquinas síncronas quando da ocorrência de um mesmo distúrbio no sistema.

Após esta primeira fase, procedeu-se a uma análise da operação básica de um sistema de corrente contínua, com ênfase ao seu controle e possibilidades de seu uso visando a estabilização e controle de frequência das áreas ca. O material desenvolvido e apresentado no texto constituiu-se numa base didática para aqueles que, já possuindo um certo grau de conhecimento do assunto, possam melhor compreender a operação dinâmica do sistema de corrente contínua e, portanto, concluir sobre a sua flexibilidade e rapidez do controle que lhe permitirão atuar em tempo hábil, no sentido de compensar distúrbios nas redes ca. Desta forma, procurou-se integrar o elo cc ao sistema, de modo que sua função de controle opere concomitantemente às necessidades da área como um todo. As equações fundamentais que regem o funcionamento do elo cc são apresentadas e através delas deriva-se as características gráficas de operação e formas de controle do elo. Finalmente, foram apresentadas as funções de transferência para os controles acima mencionados, objetivando a sua implementação digital no programa existente.

Uma vez implementadas as funções de amortecimento e controle de frequência, foram realizados inúmeros estudos, variando-se, inclusive, a topologia da rede, com o propósito da verificação da eficiência dos modelos sugeridos. Após analisar vários casos, infelizmente não se pode estabelecer uma regra geral de comportamento efetivo no que diz respeito à estabilização ou ao controle de frequência, que permitisse afirmar sobre um melhor desempenho de uma ou outra função, com relação a todos os aspectos almejados. Em outras palavras, a indicação de uma função de amortecimento ou de controle de frequência como melhor opção, só poderá ser feita após exaustivos estudos que devem envolver não apenas o tipo e localização da falta, mas também a própria escolha dos parâmetros da função, quais sejam, ganhos e constantes de tempo. Não obstante estes aspectos, pode-se, de um modo

geral, para os casos testados, concluir sobre uma pequena vantagem do controle do ângulo gama para a estabilização de oscilações causadas por grandes distúrbios. Quanto aos efeitos mais marcantes da ação de controle das funções implementadas, várias situações foram analisadas, das quais se concluiu positivamente sobre casos em que a ausência do amortecimento promovido pelo elo cc, levou o sistema à instabilidade, enquanto que com a sua inclusão o sistema veio a se estabilizar.

No que tange a sugestões para futuros desenvolvimentos, são os seguintes os pontos detectados :

- a) - Reavaliar a reatância de comutação de forma dinâmica, durante o processamento de estudos transitórios, de forma a adequá-la à nova topologia da rede.
- b) - Efetuar um estudo de sensibilidade de forma a concluir sobre as barras mais afetadas por um distúrbio específico e, com isto, estabelecer uma estratégia de geração do sinal de controle a partir destas barras. Desta forma, espera-se uma maior eficiência na estabilização da rede como um todo.
- c) - Realizar um estudo completo sobre os modelos propostos, sob o ponto de vista da teoria de controle, visando a otimização de seus parâmetros.
- d) - Analisar a melhoria do desempenho do elo cc com equipamentos estabilizadores das tensões de alimentação dos retificadores e inversores, através de compensadores estáticos de reativos ou de compensadores síncronos. Acredita-se que com tais equipamentos o elo conseguirá atender melhor as funções de amortecimento e de controle a serem desempenhadas.

Finalmente, é conveniente ressaltar que, embora se tenha procurado implementar todas as funções usualmente empregadas para a estabilização e controle de frequência, conforme descrito pela literatura, o método é geral e outras funções poderão ser facilmente incorporadas ao programa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1 - Arrillaga, J., Arnold, C. P. - Computer Modelling of Electrical Power Systems. New Delhi, John Wiley & Sons, 1983.
- 2 - Uhlmann, E. - Power Transmission by Direct Current. New York, Springer - Verlag Berlin Herdelberg New York, 1975.
- 3 - Arnold, C.P., Turner, K. S., Arrillaga, J. - Modelling Rectifier Loads for a Multi-Machine Transient - Stability Programme. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, New York, Vol. Pas-99, nº 1, 78-85, Jan./Feb., 1980.
- 4 - Monticelli, A. - Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1983.
- 5 - Kimbark, E. W. - Direct Current Transmission. New York, John Wiley & Sons, 1971.
- 6 - Oliveira, J. C., Cogo, J. R. - Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Contínua. Itajubá, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1981.
- 7 - Ainsworth, J. D. - Comentários da Referência 9.
- 8 - Figueiredo, A. G., et alii - Master Control the Itaipu HVDC Stations. International Symposium on HVDC Technology, Rio de Janeiro, Paper 1-7, March, 1983.
- 9 - Carter, G. K., et alii - The Dynamics of AC/DC Systems wit Controlled Multiterminal HVDC Transmission. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, New York, Vol. Pas -96, nº 2, March/April, 1977

- 10 - Grund, C. E., et alii - Dynamic Performance Characteristics of North American HVDC Systems for Transient and Dynamic Stability Evaluations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, New York, Vol. Pas - 100, nº 7, 3.356 - 3.364, July, 1981.
- 11 - Peixoto, C. A. O., et alii - Engineering Studies for Itaipu Converter Station Design. IEE Proceedings. London, Vol.130, nº 1, Jan., 1983.
- 12 - Arnold, C. P. - Solutions of the Multi - Machine Power System Stability Problem. Manchester, Victoria University of Manchester, 1976. Tese, Doutorado.
- 13 - Junior, S. V. F. - Modelagem e Simulação de Elos de Transmissão de Corrente Contínua em Estudos de Estabilidade Transitória. Belo Horizonte, Universidade Federal de Belo Horizonte, 1983. Dissertação Mestrado.
- 14 - Szechtman, M., et alii - Programa de Estabilidade Eletromecânica com Inclusão de Elos de Transmissão em Corrente Contínua. V SNPTEE, Recife, GSP / 07, 1979.
- 15 - Figueiredo, E. F., et alii - Sistema de Transmissão de Itaipu em Corrente Contínua - Transitórios Eletromecânicos e Estabilidade. VI SNPTEE, Balneário Camboriú, GSP / 28, 1981.
- 16 - Jötten, R., et alii - Control in HVDC Systems - The State of de Art. Part I : Two Terminal Systems. CIGRE, Paris, 14-10, 1978.
- 17 - Clifford, J. F., Jr., A. H. S. - Digital Representation of a DC Transmission System and Its Controls. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, New York, Vol. Pas-89, nº 1, January, 1970.

- 18 - Cresap, R. L., et alii - Damping of Pacific AC Intertie Oscillations Via Modulation of the Parallel Pacific HVDC Intertie. CIGRE, Paris, 14-05, 1978.
- 19 - Hingorani, N. G. and Chadwick, P. - A New Constant Extinction Angle Control for AC/DC/AC Static Convertors. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, New York, Vol. Pas-87, n<sup>o</sup> 3, March, 1968.
- 20 - Uhlmann, E. - AC Network Stabilisation by DC Links. CIGRE, Paris, 32-01, 1970.