

EFEITO DE NÃO LINEARIDADES NO CONTROLE AUTOMÁTICO  
DE GERAÇÃO EM SISTEMAS HIDROTÉRMICOS

DR. HELMUT ZÜRN

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
MORIANÓPOLIS - SC - BRASIL

JOSÉ ROBERTO CAMACHO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
UBERLÂNDIA - MG - BRASIL

RESUMO

Neste trabalho se faz uma análise do controle automático de geração sob o ponto de vista dos centros de operação do sistema. O modelamento é feito com base nas representações já consagradas pela bibliografia técnica especializada, utiliza-se o "programa de modelamento de sistemas contínuos" para integração pelo método de Runge-Kutta do sistema simulado.

A simulação é feita sobre um modelo com duas áreas, sendo uma delas hidráulica e a outra térmica, enfoca-se o efeito sobre o controle integral de não linearidades tais como: a falha morta dos reguladores de velocidade, limites de geração do sistema e a discretização do erro de controle de área através de um sustentador de ordem zero. Avalia-se o controle a partir de parâmetros como o intercâmbio involuntário e o erro de tempo nas áreas de controle do sistema interligado.

Este trabalho deve auxiliar o pessoal de operação na tomada de decisões sobre os aspectos do controle de sistemas hidrotérmicos. O objetivo deste trabalho é acompanhar a fase de crescimento do parque gerador térmico no Sul do Brasil, que poderá dentro de algum tempo apresentar problemas de operação sob controle automático em conjunto com o sistema brasileiro eminentemente hidráulico.

Os resultados de simulação apresentados e comparados com sistemas considerados ideais são bastante interessantes contribuindo assim para o aprendizado do tema dentro de um curso de pós-graduação.

INTRODUÇÃO

O sucesso da simulação deve-se, basicamente, ao modelo utilizado, onde cada uma das partes componentes do controle de geração é descrita por, no máximo, uma função de segundo grau, e o método de integração escolhido (Runge - Kutta) se torna eficiente pelo intervalo de tempo de integração (60 - 120 seg.) requerido. Análise semelhante já foi feita na referência [1]; duas áreas interligadas sendo uma hidráulica e outra térmica; mas outros aspectos não foram analisados, sendo que tais peculiaridades podem influir de maneira preponderante no desempenho do controle

A simulação foi feita em um computador IBM-370 modelo 4341 utilizando terminais e impressoras semi-gráficas a partir de "software"

da própria IBM, o CSMP para simulação e o GDDM para impressão dos gráficos.

Do modelo montado pode-se analisar os resultados a partir de gráficos no tempo do erro de controle de área, do desvio de frequência e do desvio de intercâmbio. A performance é analisada com base no intercâmbio inadvertido e no erro de tempo. Os desvios do regime permanente são simulados através de variação em degrau ou em rampa da carga em relação a geração.

O sinal de controle é proveniente do erro de controle de área, obtido do intercâmbio líquido e da frequência que unem as áreas de um sistema interligado, mostrando a dependência do intercâmbio com a frequência para cada uma das áreas independentemente [2]. É óbvio que isto é válido desde que não haja interhenção de áreas no sistema.

Faz-se necessário ressaltar que na montagem do modelo foram de grande valia as informações contidas nas referências [3] e [4]. No desenvolvimento deste fica claro o modelo utilizado e são apresentados alguns casos onde se observa o desempenho do controle.

As observações são muito úteis no ensino de Supervisão e Controle de Sistemas Elétricos na Universidade Federal de Uberlândia, bem como algumas conclusões podem ser utilizadas nos sistemas hidro-térmicos comerciais.

O MODELO E A SIMULAÇÃO

O modelo com duas áreas e dois geradores utilizados neste estudo é mostrado na figura a seguir. Este modelo já foi usado com bastante frequência por outros pesquisadores. Quando existe variação da carga em uma das áreas (térmica ou hidráulica) a variação da carga na outra área é nula, ou seja, não existe variação de carga simultaneamente nas duas áreas. Isto é feito com o objetivo de determinar a performance de áreas de controle com características distintas.

O Controle Automático de Geração de uma Área

A simulação é feita tomando-se por base o diagrama de blocos abaixo, onde pode-se observar os principais componentes do sistema de controle de geração com as malhas de regulação primária ( $M_1$ ) e secundária ( $M_2$ ).

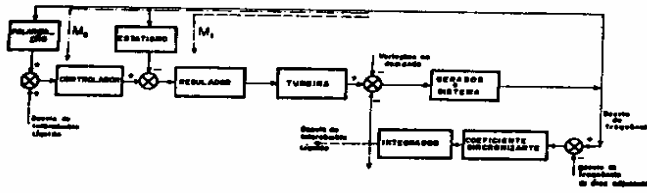


Fig. 1 - Diagrama de blocos do CAG (Controle Automático de Geração) de uma área com controle primário e secundário.

O sistema é composto de duas áreas, a área 1 é térmica e a área 2 é hidráulica, pode-se observar na figura 2 que no modelo as diferenças mais sensíveis no modelo são o regulador de velocidade e a turbina, a regulação secundária é executada por um controlador integral (K/S), enquanto a malha de regulação primária das duas áreas é mostrada abaixo.

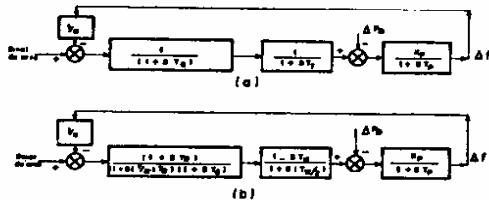


Fig. 2 - Diagrama de blocos comparativo entre uma área com máquinas a vapor (a) e hidráulica (b).

As variações na demanda são simuladas a partir de uma função em rampa ou uma função em degrau, o intervalo de simulação é 0,1 seg. e o tempo de simulação varia entre 30 e 60 segundos.

Os Dados do Sistema

Área Hidráulica	Área Térmica
K = 0,6	K = 0,6
T <sub>G</sub> = 0,080 seg.	T <sub>G</sub> = 0,08 seg.
T <sub>R</sub> = 0,20 seg.	T <sub>T</sub> = 0,3 seg.
(R/R') = 10	
T <sub>w</sub> = 0,50 seg.	
K <sub>p</sub> = 120 Hz/pu MW	K <sub>p</sub> = 120 Hz/pu MW
T <sub>p</sub> = 20,0 seg.	T <sub>p</sub> = 20,0 seg.
R = 2,4 Hz/pu MW	R' = 2,4 Hz/pu MW
B = Polarização = 0,425 pu MW/Hz	

T<sub>12</sub> = 0,0707 pu MW/Hz = coeficiente sincronizante da linha de interligação entre as duas áreas.

A FAIXA MORTA DO REGULADOR DE VELOCIDADE

As características do regulador de velocidade de são essencialmente não lineares, mas podem ser aproximadas por características lineares nas análises a seguir. A faixa morta resulta de atrito mecânico, de folga entre partes mecânicas e de tempos de resposta do equipamento hidráulico. Como consequência disso, se o sinal de entrada variar, o regulador de velocidade não responde imediatamente até que a entrada atinja um valor par-

ticular.

A faixa morta introduz não linearidades no modelo do sistema e tem o efeito de alargamento na regulação do regulador de velocidade.

O efeito da faixa morta pode ser incluído no regulador de velocidade dentro do diagrama de blocos como apresentado na figura 3.

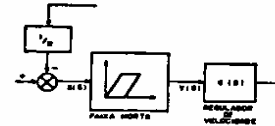


Fig. 3 - Introdução da faixa morta no diagrama de blocos.

A faixa morta pode ser modelada matematicamente usando as seguintes equações:

$$y^{(K+1)}(S) = x^{(K)}(S);$$

se  $x^{(K+1)}(S) - x^{(K)}(S) \leq \text{faixa morta}.$

$$y^{(K+1)}(S) = x^{(K+1)}(S) - \text{faixa morta};$$

se  $x^{(K+1)}(S) - x^{(K)}(S) > \text{faixa morta}.$

$$y^{(K+1)}(S) = x^{(K+1)}(S);$$

se  $x^{(K+1)}(S) - x^{(K)}(S) < 0.$

As equações acima são usadas com as equações do sistema onde K é o passo de cálculo.

Outra não linearidade estudada é o efeito do retardo produzido pelos computadores no processamento do sinal de erro de controle, chamado aqui de "sustentador de ordem zero".

O SUSTENTADOR DE ORDEM ZERO

O sustentador de ordem zero é introduzido no modelo com o objetivo de simular o efeito do controle secundário através de computadores, discretizando assim o erro de controle de área proveniente do controlador. Sua simulação é feita de acordo com o mostrado na figura 4 a seguir.

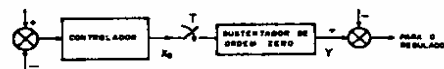


Fig. 4 - Inserção do sustentador de ordem zero no diagrama de blocos.

Observa-se que o sustentador de ordem zero é colocado na saída do controlador, onde T é o tempo para processar o sinal do erro de controle de área e emissão dos pulsos de controle secundário. Modelamento matemático para tal função:

$$y(t) = x_2; \text{ para } x_1 > 0.$$

$$y(t) = \text{último valor de } x_2; \text{ para } x_1 \leq 0.$$

$$y(t) \Big|_{t=t_0} = 0.$$

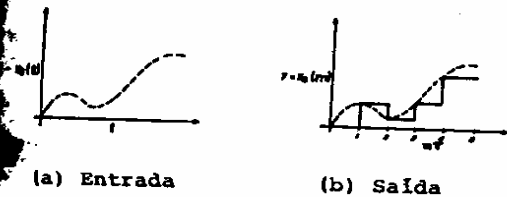


Fig. 5 - Exemplo de entrada e saída do sustentador.

O valor de  $x_1$  é dado por uma função impulso, e serve como sinal de gatilho para o sustentador de ordem zero.

### LIMITES DE GERAÇÃO

A limitação da geração é simulada por um modelo matemático à saída do regulador de velocidade, simulando assim os limites superior e inferior do regulador quando em operação, dados pela faixa de abertura da válvula da turbina para desempenho satisfatório das unidades geradoras. O modelo de simulação é mostrado na figura 6.

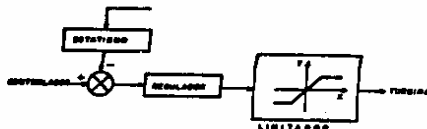


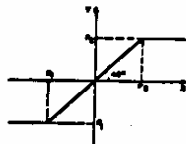
Fig. 6 - Posição do limitador no diagrama de blocos.

O modelamento matemático do limitador pode ser expresso da seguinte forma:

$$y = P_1; \text{ para } x < P_1$$

$$y = P_2; \text{ para } x > P_2$$

$$y = x; \text{ para } P_1 \leq x \leq P_2$$



onde  $x$  é o sinal de entrada e  $y$  é o sinal de saída.

### ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados analisados são obtidos a partir de distúrbios em rampa, que são definidos como variações na carga em relação à geração corrente. Faz-se análise do caso base, comparando-se com o sistema dotado de faixa morta, limites de geração e sustentador de ordem zero, cada um deles separadamente.

#### O Caso Base

O sistema ideal é aquele que não apresenta não linearidades, e é utilizado neste trabalho

como caso base para estudo da influência das mesmas sobre os parâmetros do sistema.

O distúrbio é uma rampa de carga de 4%, atingindo o valor máximo em 4 segundos a partir de  $t = 0$  na área térmica.

As figuras 7(a) a 7(f) no Apêndice apresentam a variação dos parâmetros de controle, sendo respectivamente o erro de controle de área, o desvio de frequência, a variação na potência gerada, o erro de tempo, o intercâmbio involuntário e o desvio no fluxo de potência na linha de interligação.

As figuras apresentam as variações nos parâmetros de controle para as áreas 1 (térmica) e 2 (hidráulica) em função do aumento de carga em rampa na área térmica. A seguir apresenta-se o comportamento dos mesmos parâmetros na presença das não linearidades.

### O SISTEMA COM O SUSTENTADOR DE ORDEM ZERO

O sustentador de ordem zero introduz um retardo que pode variar de 0,2 a 0,6 segundos, neste caso é 0,6 segundos, e simula o tempo de processamento, pelos computadores, do Erro de Controle de Área. Verificou-se que tempos maiores que 0,6 segundos, para o processamento do erro, podem levar o sistema à instabilidade.

As figuras 8(a) a 8(f), também no Apêndice, ilustram a introdução dessa não linearidade e a partir delas podem ser feitas algumas comparações.

Das figuras mencionadas anteriormente pode-se tirar algumas conclusões, quando comparada com o caso base (figura 7), o erro de controle de área discretizado fica mais oscilante dos instantes iniciais para apresentar um rápido amortecimento, o mesmo ocorre para o desvio de potência gerada, o desvio de frequência e todos os outros parâmetros analisados. Uma observação importante a ser feita é que tal discretização não afeta o erro de tempo e o intercâmbio involuntário, ambos em regime permanente, comparando-se as figuras 7(d) com 8(d) e 7(e) com 8(e).

### O SISTEMA COM A FAIXA MORTA NOS REGULADORES

A faixa morta simula a insensibilidade dos reguladores de velocidade para variações de 0,002 pu MW (0,2%) na carga para as figuras 9(a) a 9(f) e de 0,005 pu MW (0,5%) na carga para as figuras 10(a) a 10(f).

A presença da faixa morta torna o comportamento do sistema mais oscilante, mas com amortecimento rápido quando comparados com o caso base. O alargamento na faixa morta produz aumentos em regime permanente após o aumento de carga, em parâmetros como o erro de tempo e o intercâmbio involuntário. Em outras palavras, aumenta-se a regulação de velocidade devido a uma faixa morta. Isto pode ser verificado comparando-se as figuras 9 com as 10.

### O SISTEMA COM LIMITES DE GERAÇÃO

As duas áreas, hidráulica e térmica, são consideradas de mesmo porte e analisa-se somente

o desvio de frequência e erro de controle de área para o mesmo distúrbio na área térmica e depois na área hidráulica. O aumento de carga é em rampa com limitação de geração em 0,02 pu MW, 50% do aumento de carga de 0,04 pu MW.

Os efeitos de aumento de carga em rampa com limitação de geração são mostrados nas figuras 11 e 12, respectivamente para a área térmica e hidráulica.

A comparação das figuras 11 e 12 mostra que o aumento de carga com tal limitação na área hidráulica, leva o sistema a um desvio de frequência e a um erro de controle de área, ambos em regime permanente. O mesmo distúrbio com a dita limitação na área térmica, mantendo-se os parâmetros dos sistemas fixos, podem levar o sistema a instabilidade. Observa-se então que, devido as características do sistema, um distúrbio na área térmica acompanhado de limitação de geração, produz uma resposta do sistema essencialmente diferente daquela produzida quando a mesma situação ocorre na área hidráulica.

#### CONCLUSÕES

A presença dos efeitos da faixa morta e do retardo no processamento do erro de controle (sustentador de ordem zero), tornam a resposta do sistema mais oscilante, embora superamortecida. Estas investigações mostram que estes efeitos não podem ser inteiramente eliminados, qualquer que seja a escolha dos ganhos dos controladores. A magnitude das oscilações devidas a estas duas não linearidades são levemente maiores que sem as mesmas.

A limitação de geração já é um problema que pode levar o sistema à instabilidade se os

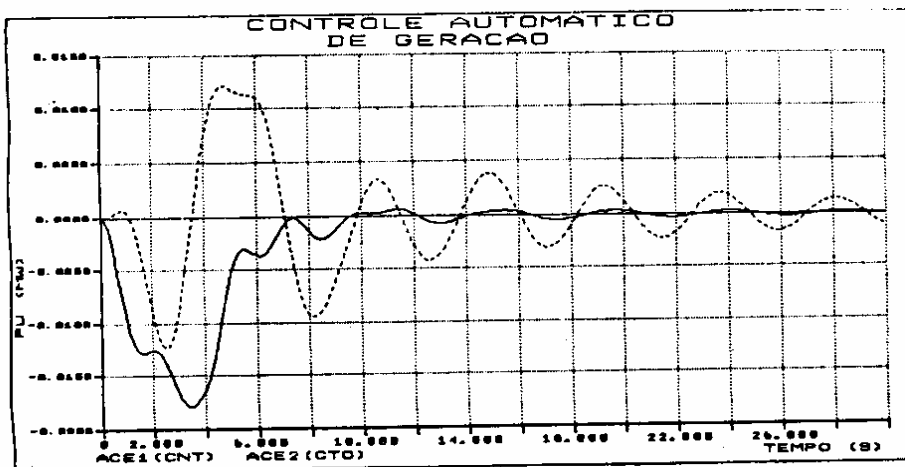
parâmetros do sistema não forem escolhidos de forma adequada para operação conjunta hidráulica e térmica.

Conclui-se finalmente que os três itens analisados neste trabalho refere-se à otimização do sistema de controle e devem fazer parte das preocupações dos operadores de sistemas hidrotérmicos.

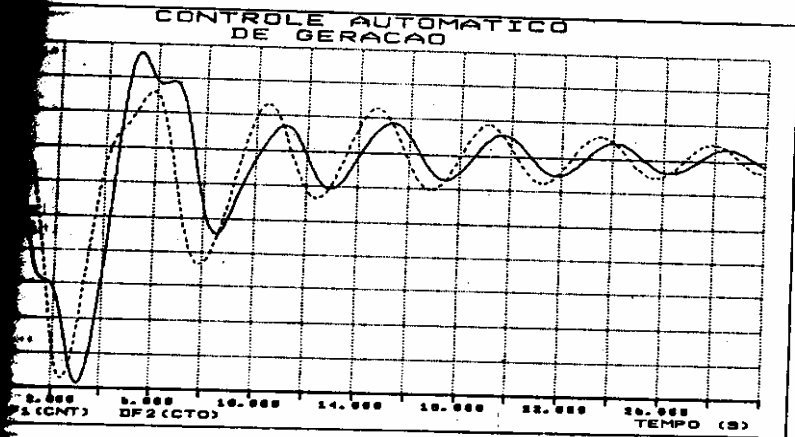
#### REFERÊNCIAS

- [1] KIRCHMAYER, L.K.; "Economic Control of Interconnected Systems"; John Wiley & Sons, Inc.; New York; 1959.
- [2] COHN, N.; "Control of Generation and Power Flow on Interconnected Power Systems"; John Wiley & Sons, Inc.; New York; 1971.
- [3] VIEIRA FILHO, X.; "Operação de Sistema de Potência com Controle Automático de Geração"; Editora Campus-Eletronics; Rio de Janeiro, 1984.
- [4] BOSE, A.; ATIYAH, I.; "Regulation Error in Load Frequency Control"; IEEE Transactions on PAS; Vol. 99; nº 2 march/april 1980.
- [5] MURTY, P.S.R.; "Power System Operation and Control"; Tata McGraw Hill, New Delhi, 1984.
- [6] SPECKHART, F.H. and GREEN, W.L.; "A Guide to Using CSMP - The Continuous System Modeling Program"; Prentice-Hall, Inc.; Englewood Cliffs, New Jersey, 1976.

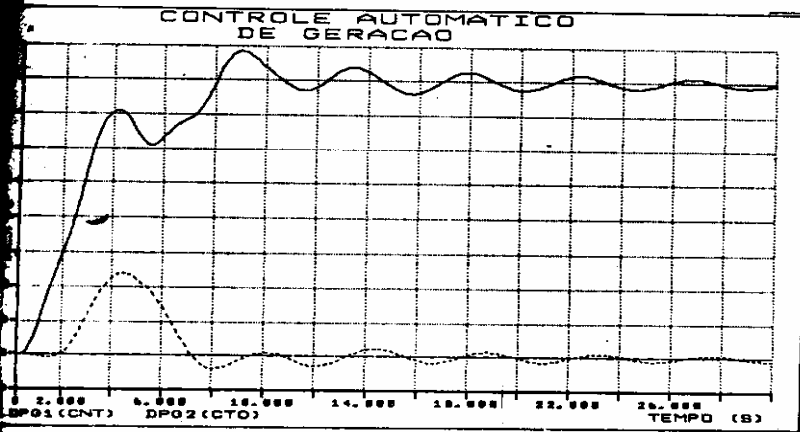
#### APENDICE



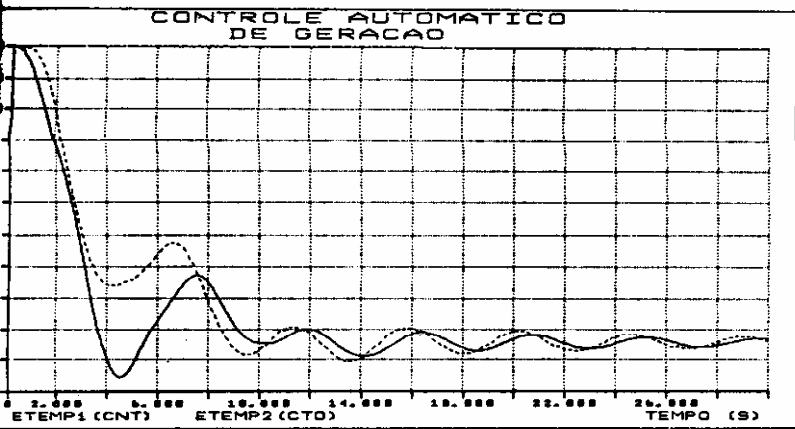
7(a) - Erro de controle de área.



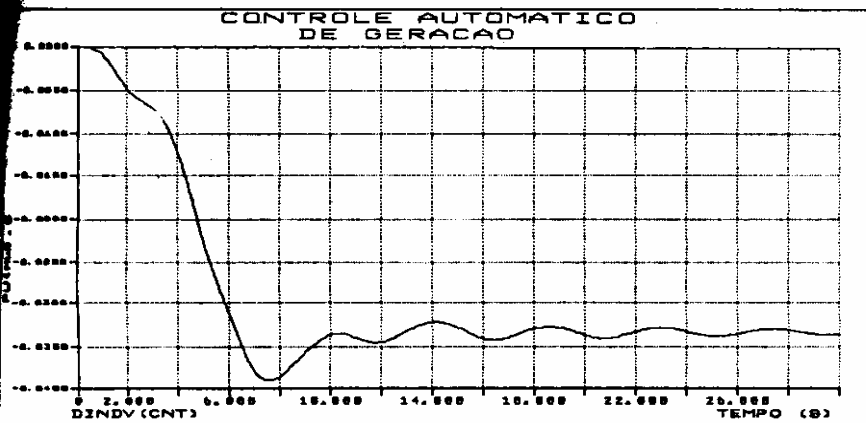
7(b) Desvio de Frequên  
cia



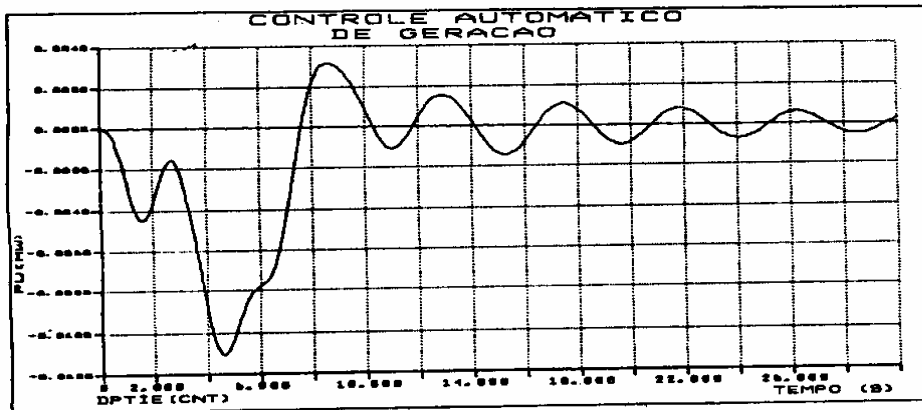
7(c) Variação na potên  
cia gerada



7(d) Erro de tempo

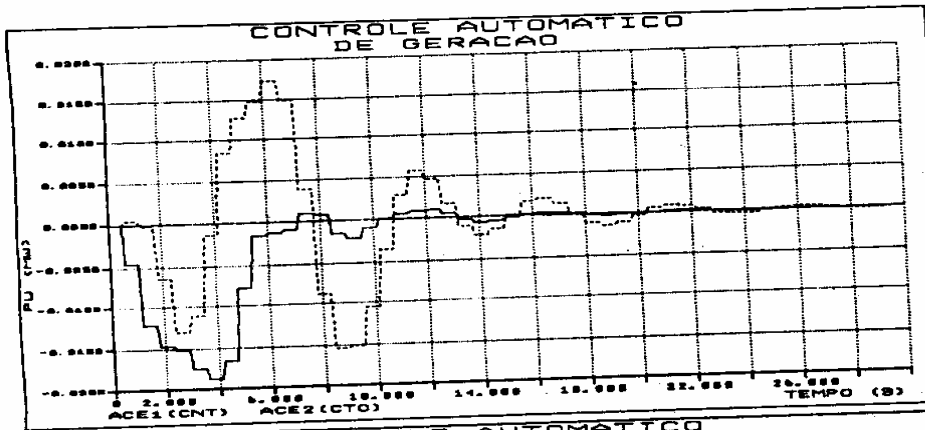


7(e) Intercâmbio invo  
luntário

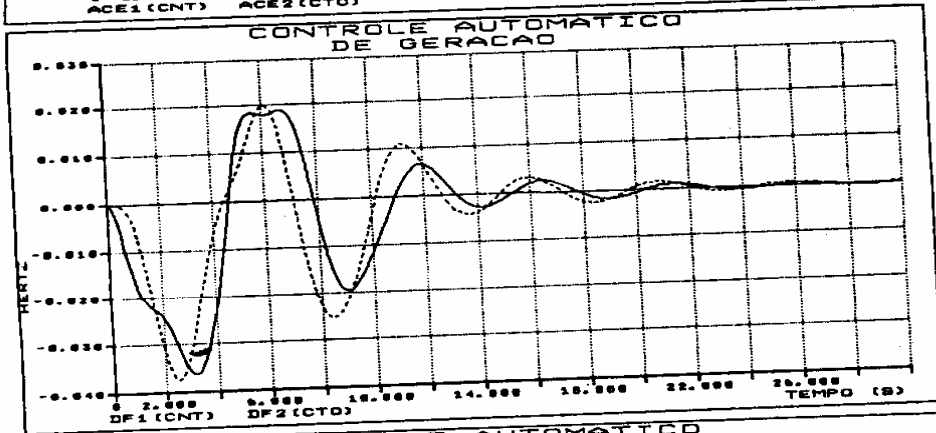


7(f) Desvio no de potência nha de interação

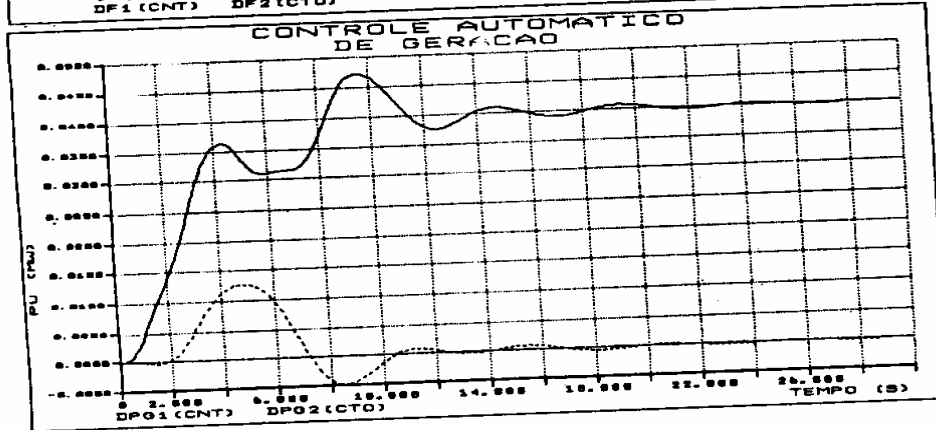
Fig. 7 - Caso base



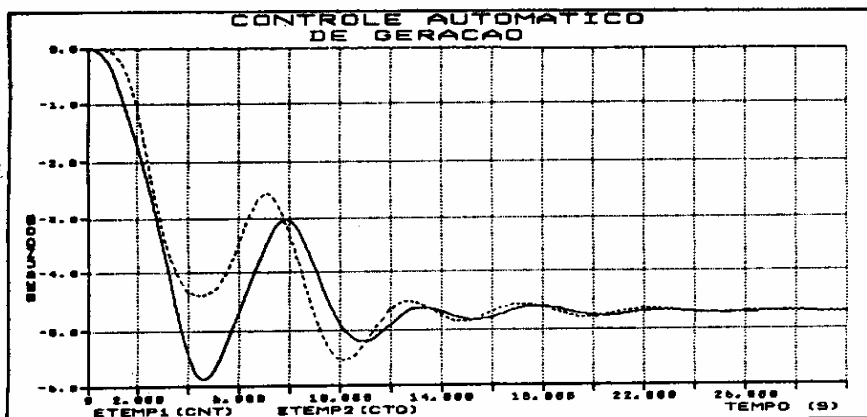
8(a) Erro de cont de área



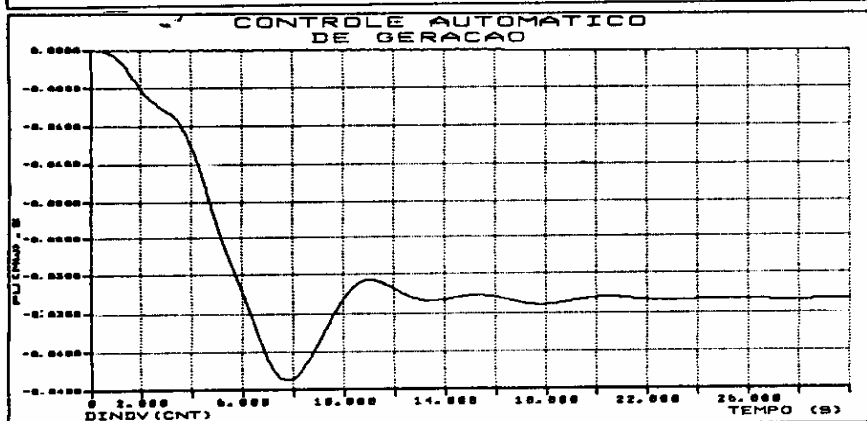
8(b) Desvio de quência



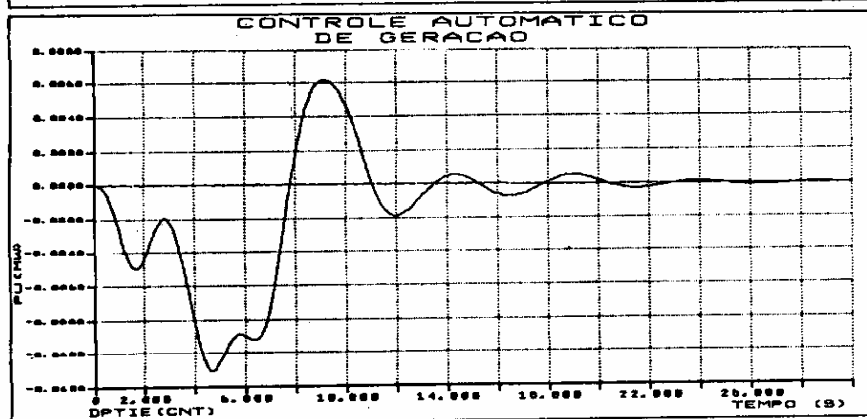
8(c) Variação na tência gema



8(d) Erro de tempo

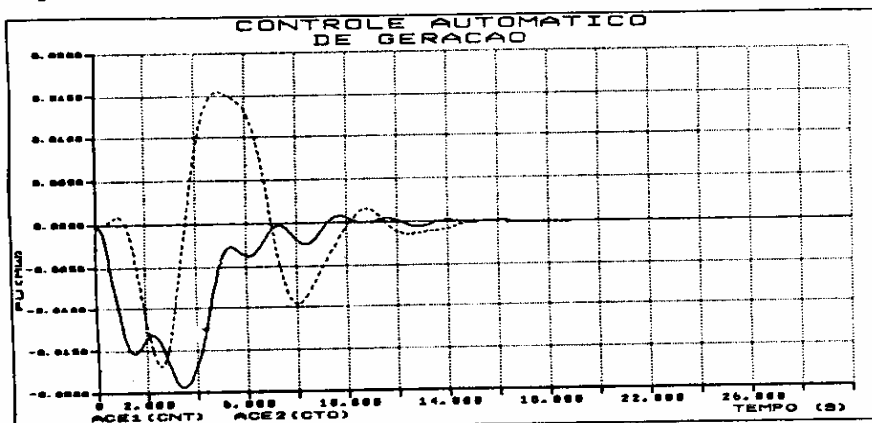


8(e) Intercâmbio involun\_ tário

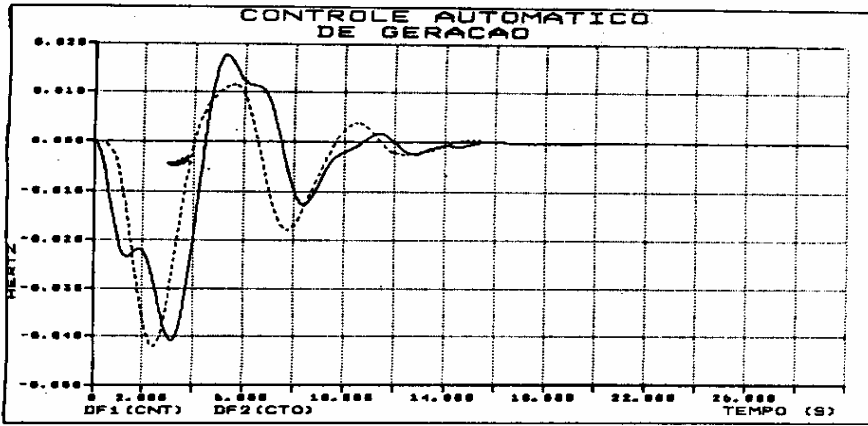


8(f) Desvio no fluxo de potência na linha de interligação

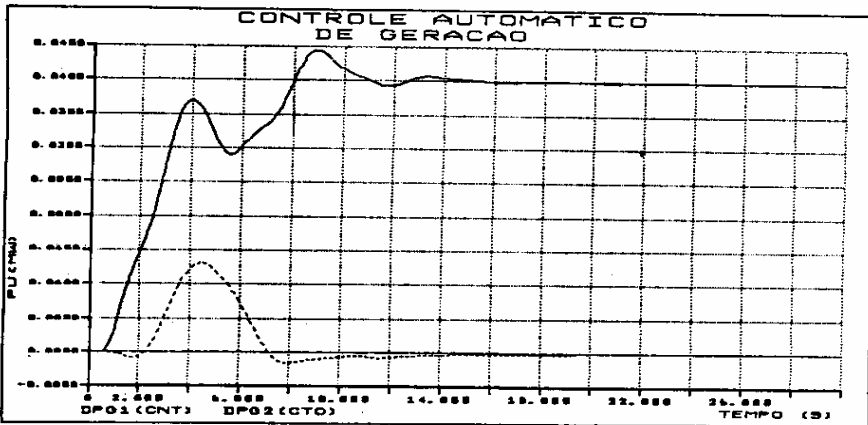
Fig. 8 - Com sustentador de ordem zero



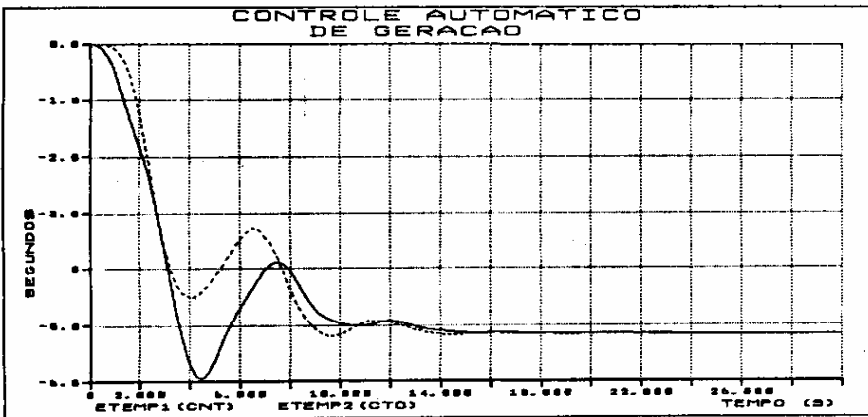
9(a) Erro de controle de área



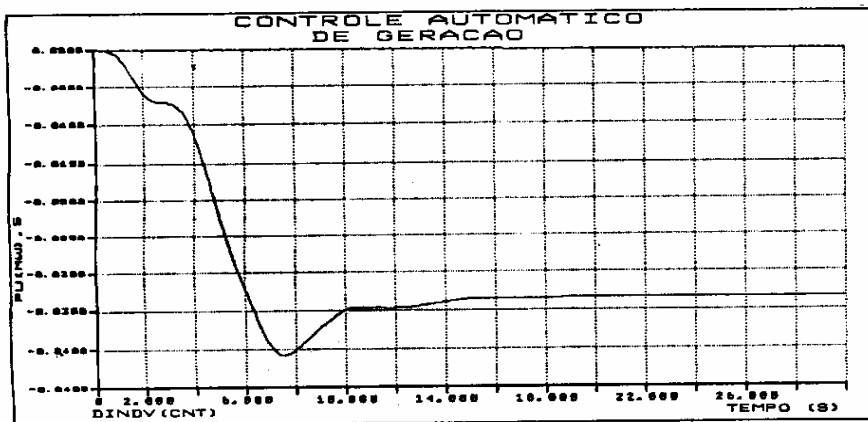
9 (b) Desvio de Frequência



9 (c) Variação da potência gerada

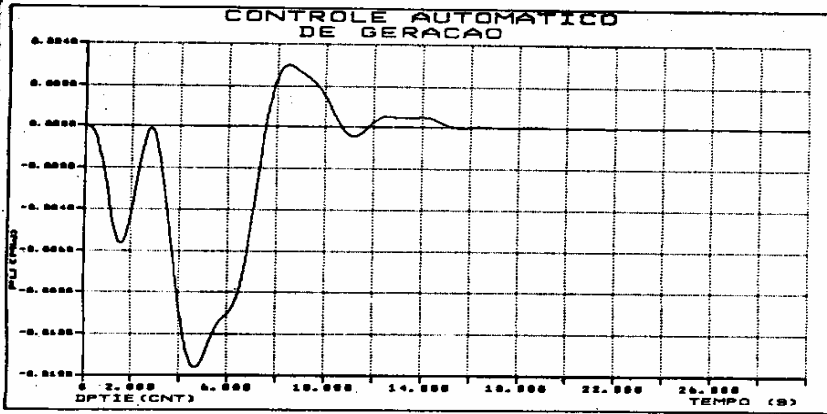


9 (d) Erro de tempo



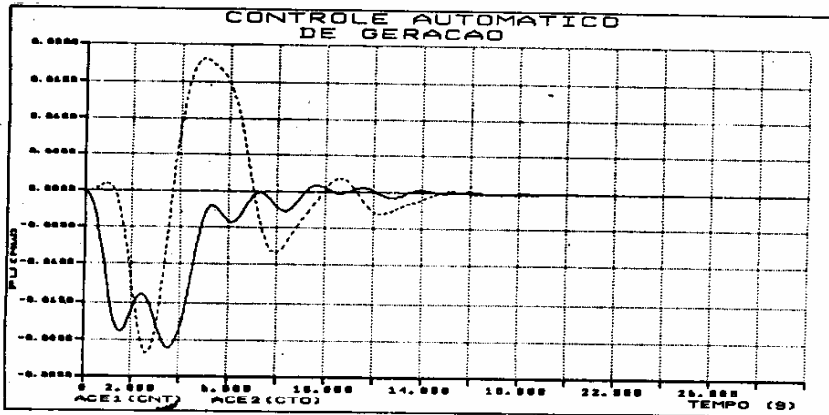
9 (e) Intercâmbio involuntário



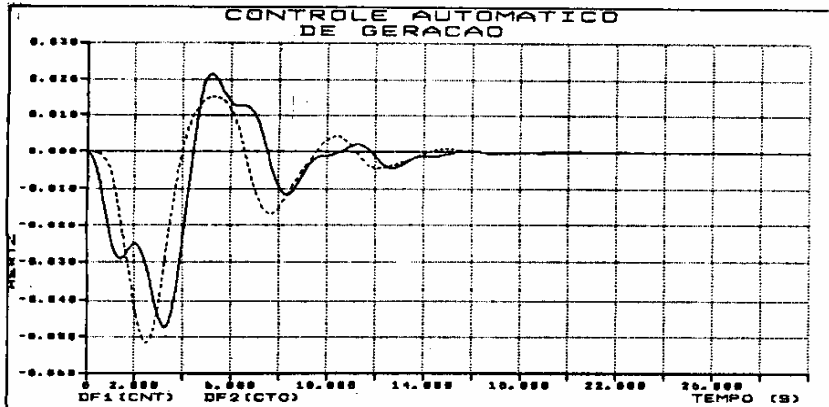


9(f) Desvio no fluxo de potência na linha de interligação

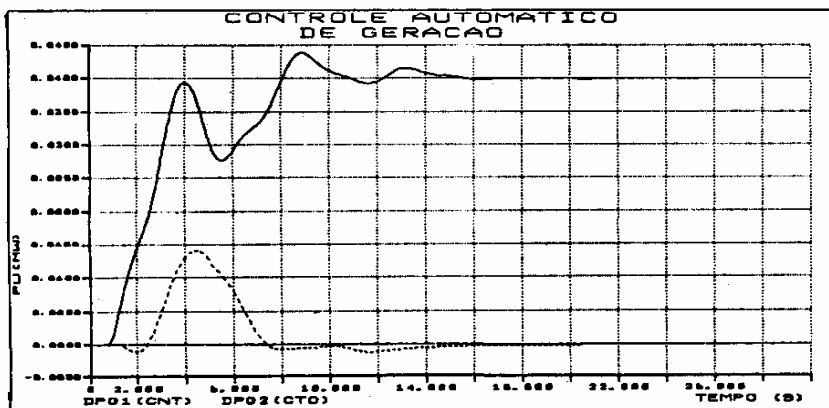
Fig. 9 - Faixa morta de 0,2%



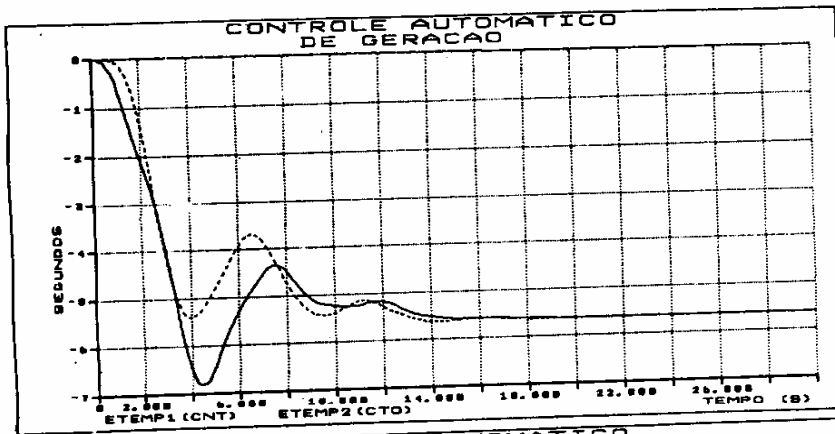
10(a) Erro de controle de área



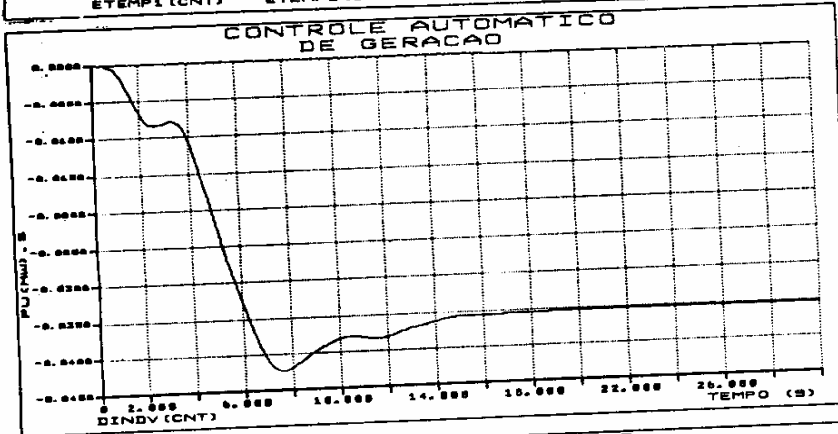
10(b) Desvio de frequência



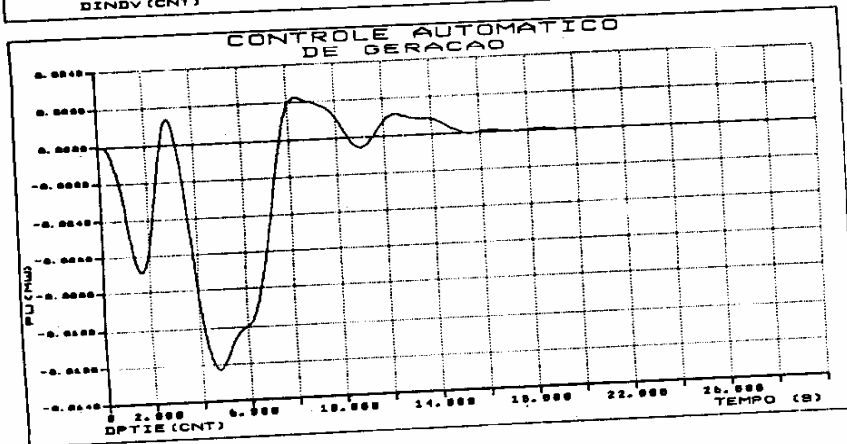
10(c) Variação da potência gerada



10(d) Erro de tempo

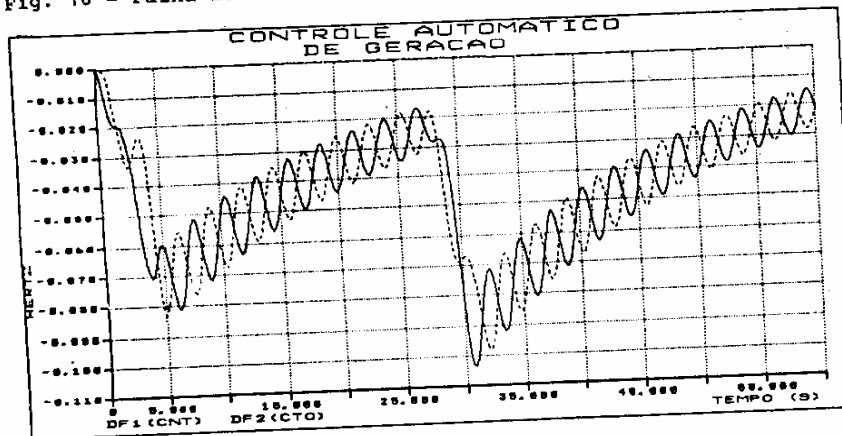


10(e) Intercâmbio involuntário

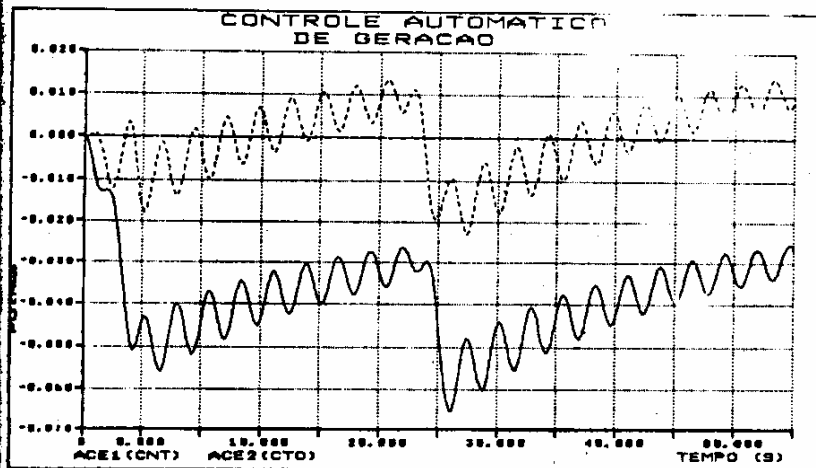


10(f) Desvio no fluxo de potência na linha de interligação

Fig. 10 - Faixa morta de 0,5%

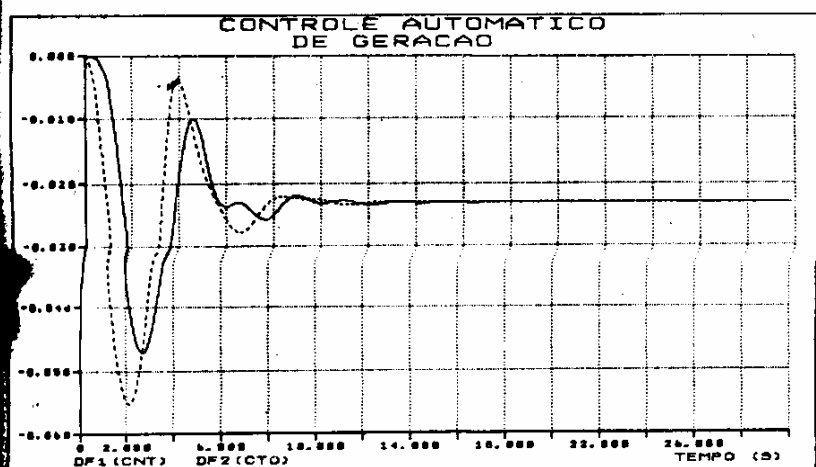


11(a) Desvio de frequência

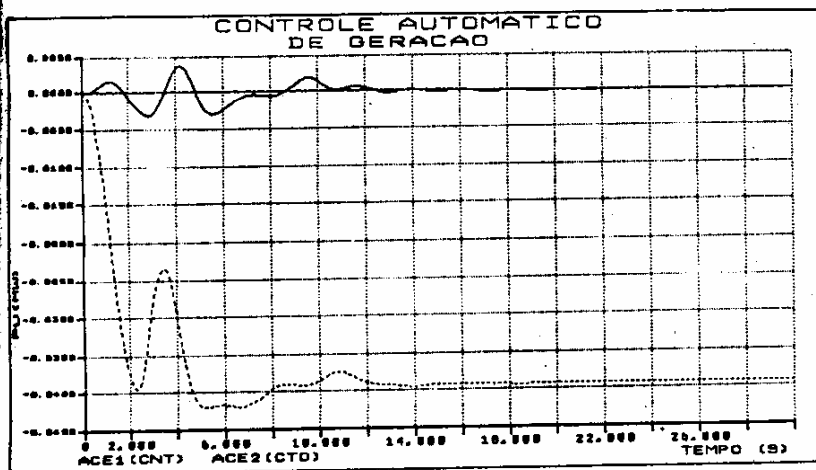


11(b) Erro de controle de área

Fig. 11 - Limitação de geração na área técnica



12(a) Desvio de frequência



12(b) Erro de controle de área

Fig. 12 - Limitação de geração na área hidráulica