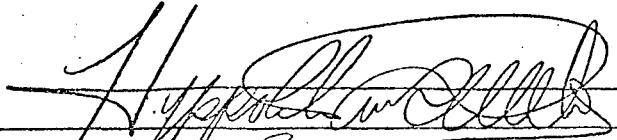


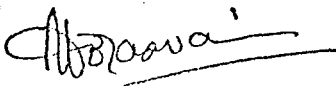
UMA ABORDAGEM PARA O PROJETO DO CONTROLE DE
FREQUÊNCIA E DE CARGA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção
do título de

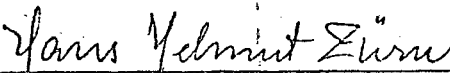
MESTRE EM CIÊNCIAS

Especialidade Engenharia Elétrica e aprovada
em sua forma final pelo Programa de Pós-Gradua
ção.


Prof. Hippólito do V. Pereira Filho, Ph.D.
Integrador dos Programas de
Pós-Graduação em Engenharia


Prof. Rajamani Doraiswami, Ph.D.
Orientador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.



Prof. Luiz G. Souza Fonseca, D.Sc.



Prof. Walter Celso de Lima, Doc.Liv.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UMA ABORDAGEM PARA O PROJETO DO CONTROLE DE
FREQUÊNCIA E DE CARGA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

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

ANTÔNIO SIMÕES PIRES

FLORIANÓPOLIS

SANTA CATARINA - BRASIL

JUNHO - 1976

À minha esposa

A meus pais

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Rajamani Doraiswami pelo inestimável apoio e entusiasmo prestados na realização deste trabalho.

À CAPES, BNDE e à FINEP pela ajuda financeira.

S U M Á R I O

SIMBOLOGIA	vii
 <u>CAPÍTULO I</u>	
INTRODUÇÃO	1
 <u>CAPÍTULO II</u>	
MODELAGEM MATEMÁTICA	4
2.1 - Modelo matemático de duas máquinas interligadas	4
2.2 - Modelo matemático da turbina e do Governador de velocidade	6
2.3 - Modelo matemático para o C.F.C. em um sistema de duas áreas	9
2.4 - Modelo de carga	14
2.5 - Parâmetros do modelo	16
2.5.1 - Máquinas e sistemas de interligação	16
2.5.2 - Governador de velocidade e turbina	17
2.5.3 - Carga aleatória	17
 <u>CAPÍTULO III</u>	
UM MÉTODO PARA O PROJETO DO CONTROLADOR	18
3.1 - Estrutura do controle	19
3.1.1 - Especificações do C.F.C.	19
3.1.2 - Linearização do modelo	20
3.1.3 - Critério de desempenho	21
3.1.4 - Determinação do controlador	22
3.2 - Determinação dos ganhos do controlador	24
 <u>CAPÍTULO IV</u>	
UM MÉTODO PARA ADAPTAÇÃO DO PROJETO DO CONTROLADOR LI NEAR E CONTROLE HIERÁRQUICO	25
4.1 - C.F.C. baseado na teoria do Controle Clássico	25
4.2 - Um método para adaptação do controlador para a não-linearidade	28

4.3 - Um método para adaptação do controlador com relação a aleatoriedade da carga	28
4.4 - Estudo da sensibilidade	29
4.5 - Introdução ao controle hierárquico	30
4.6 - Implementação do controle hierárquico	31

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1 - Resultados e discussão sobre o C.F.C. baseado na teoria do controle convencional	33
5.2 - Resultados e discussão do C.F.C. proposto, levando-se em conta o efeito da não-linearidade.	35
5.3 - Resultados e discussão do C.F.C. proposto, levando-se em conta o efeito da aleatoriedade da carga	37
5.4 - Resultados e discussão sobre a sensibilidade..	39
5.5 - Resultados e discussão do controle hierárquico	42

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES	44
APÊNDICE 1 - Programa Digital para o C.F.C. convencional	46
APÊNDICE 2 - Programa Digital para o C.F.C. moderno ...	48
APÊNDICE 3 - Programa Digital para o C.F.C. moderno com carga aleatória	50
APÊNDICE 4 - Programa Digital para o C.F.C. moderno com dois níveis	52
<u>REFERÊNCIAS</u>	54
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	57

SIMBOLOGIA

[A]	Notação genérica para matriz: Matriz A
[A _a]	Notação genérica para matriz aumentada: Matriz A _a
A ₇	Constante de proporcionalidade
B	Coefficiente atribuído a frequência ("Frequency bias")
D _i	Coefficiente de amortecimento do gerador i
E _i	Tensão do gerador i
f _i ⁰	Frequência nominal da área i
H _i	Constante de inércia do gerador i
K _i	Ganhos fixos
K _{G1}	Ganho do governador de velocidade da área 1
K _{G2}	Ganho do governador de velocidade da área 2
K _{T1}	Ganho da turbina da área 1
K _{T2}	Ganho da turbina da área 2
L ₆ , L ₇ , L ₈	Ganhos constantes
P _{M1}	Potência mecânica do gerador 1
P _{M2}	Potência mecânica do gerador 2
P _{E1}	Potência elétrica do gerador 1
P _{E2}	Potência elétrica do gerador 2
P _{INT}	Potência de interligação
P _I	Potência de intercâmbio
P _M	Potência máxima transmitida
P _{L1}	Carga local da área 1
P _{L2}	Carga local da área 2
R _{ef}	Referência
R _i	Regulação da área i
T _{T1}	Constante de tempo da turbina da área 1
T _{T2}	Constante de tempo da turbina da área 2
U _i	Sinal de controle da área i
X	Notação genérica para vetor; vetor X
X ₁₃	Ruído branco suavizado
X	Reatância da linha de transmissão
δ _i	Ângulo de torque do gerador i
δ̇ _i	Desvio de frequência da área i
δ̈ _i	Aceleração do rotor do gerador i
ΔP _{M1}	Variação da potência mecânica devido a ação do governador de velocidade da área 1.

ΔP_{M2}	Variação da potência mecânica devido a ação do governador de velocidade da área 2
ΔP_{C1}	Comando para o variador de velocidade da área 1
ΔP_{C2}	Comando para o variador de velocidade da área 2
α_i	Pesos
$\phi(X)$	Função escalar
ξ	Ruído branco
$\dot{\delta} = d\delta/dt$	
$\dot{X} = dx/dt$	

R E S U M O

Este trabalho tem por objetivo uma abordagem para o projeto do controle de frequência de carga (C.F.C.) de sistemas de potência.

Fêz-se o estudo deste projeto considerando-se duas máquinas interconectadas através de uma linha de interligação. O modelo da máquina síncrona utilizada é não-linear e considera-se a tensão atrás da reatância transitória constante. O projeto para o controle da frequência da carga é feito de uma maneira unificada. Utilizando-se a teoria do controle ótimo linear, a estrutura do controlador é obtida como combinação linear dos estados e da integral dos estados. Primeiramente desprezou-se a influência dos estados da outra área. Os valores dos ganhos do controlador são obtidos através da computação interativa, levando-se em consideração a não-linearidade, a aleatoriedade da carga e variações dos parâmetros. O desempenho com relação à não-linearidade é verificado observando-se o comportamento do ângulo de potência. Com relação à aleatoriedade da carga, os ganhos são ajustados para suavizar a ação do controle. Também se estudam variações de parâmetros, tais como: reatância da linha, amortecimento e inércia das máquinas. Finalmente, propõe-se um controle hierárquico considerando os estados da outra área, para melhorar o comportamento global do sistema.

A B S T R A C T

The objective of this work is to design a load frequency control (L.F.C.) for a power system.

The design of two machines interconnected by transmission line is considered. The nonlinear model of the synchronous machine is utilized assuming a constant transient reactance behind the e.m.f. The design of L.F.C. is done in a unified manner. Using optimal linear control theory, the control structure is obtained as a linear combination of states and the integral of those states. Initially, the influence of the states of the other area is neglected. The controller gains are obtained by interactive computation taking into consideration nonlinearity, randomness of the load and parameter variations. The performance with respect to nonlinearity is verified by observing the behaviour of the power angle. With regard to stochasticity of the load, the gains are adjusted to give a smooth control action. In addition parameter variations are studied such as: reactance of line, damping and inertia of the machines. Finally, a hierarchical control considering the states of the other area is proposed for improving the total dynamic behaviour of the system.

CAPÍTULO I
=====

INTRODUÇÃO

A carga total e a frequência em um sistema de potência, estão diretamente relacionados entre si. Se é suposto que todas as válvulas de controle das máquinas primárias que acionam os geradores do sistema permanecem em posições fixas, é evidente que as variações de carga no sistema afetarão diretamente as velocidades destas máquinas e, conseqüentemente, a frequência do sistema. Por exemplo, se com as condições acima a carga do sistema aumentar, os geradores não serão capazes de acompanhar o aumento porque as aberturas constantes das válvulas reguladoras permitem somente um valor limitado de potência de entrada para as máquinas primárias dos geradores. Conseqüentemente, as máquinas diminuirão suas velocidades, até que o decréscimo resultante na frequência e tensão do sistema reduza todas as cargas para uma condição em que elas outra vez se igualem à potência de entrada para a máquina primária, mais as perdas. Esta operação, obviamente, seria inaceitável.

Uma das funções principais do controle da frequência da carga (C.F.C.) em sistemas de potência é então o de variar as aberturas das válvulas de controle das máquinas primárias em função das variações de carga, a fim de manter a frequência do sistema constante.

Se dois ou mais geradores operam em paralelo surge o problema adicional de dividir a carga adequadamente entre eles. A distribuição de carga é inteiramente determinada pela potência de entrada para as várias máquinas primárias. Além disso, no caso de sistemas interligados a quantidade de potência transmitida através de linhas de transmissão, é determinada por acordos entre as diferentes companhias. Assim, a função do C.F.C. não é somente manter a frequência em um valor constante e dividir a carga adequadamente entre as máquinas: ela também deve manter a carga transmitida para uma interconexão específica em um valor predeterminado.

A maioria dos consumidores não é muito sensível a pequenas variações de frequência. Nos modernos sistemas de potência, a frequência é mantida pelo menos dentro de uma faixa de 0,05 Hz, o que é muito melhor do que realmente o consumidor comum precisa. Entretanto, este rigor é aconselhável para o bom funcionamento do sistema de potência, já que a frequência está diretamente ligada ao balanço de potência ativa do sistema.

Tanto turbinas a vapor, quanto turbinas hidráulicas, são equipadas com governadores de velocidade, que ajustam a abertura da válvula de controle para manter a velocidade constante.

O estudo do C.F.C. tornou-se importante devido à necessidade da interconexão de grandes sistemas de potência. Sabe-se que o desbalanço entre a potência gerada e a potência consumida em uma área, afeta as áreas interligadas, causando um desvio de frequência. Assim, o C.F.C. amorteceria oscilações causadas pela diferença entre estas potências. Além disso, devido às obrigações contratuais entre as companhias que formam este sistema de interconexão, existem certas regras quanto ao recebimento ou fornecimento de determinada quantidade de potência, chamada de potência de interligação. Desse modo, o C.F.C. também corrige o desvio da potência de interligação.

Para o estudo do C.F.C., o sistema interconectado é dividido em várias áreas, sendo que todas as máquinas que pertencem a mesma área oscilam juntas. Cada área é representada por uma máquina síncrona equivalente. Devido à complexidade no estudo de muitas áreas, consideram-se aqui somente duas áreas interligadas.

Fizeram-se vários estudos sobre o C.F.C. que empregavam modelo linearizado para a máquina^{1,8}. Elgerd e Fosha^{1,2} mostraram a vantagem do projeto do C.F.C. usando a abordagem do controle ótimo. Mas a aplicação desta abordagem necessita da realimentação de todos os estados do sistema. Como a carga e os estados da outra área são desconhecidos, alguns autores^{4,6,9} sugerem o emprego de observadores de estado. Outros autores^{6,8,10} levam em consideração a aleatoriedade da carga usando a abordagem do "Controle Estocástico Ótimo Linear". O C.F.C. assim obtido, corrige variações de baixas frequências, evitando desse

modo correções desnecessárias.

Recentemente alguns autores⁹ consideram a não-linearidade na modelagem para tratar o problema de sistemas interconectados. Nas referências^{15,18} a estabilidade de sistemas interligados é estudada pelo método de Lyapunov.

Neste trabalho propõe-se uma abordagem para o projeto do C.F.C. para sistemas interligados, levando em consideração a não linearidade, a aleatoriedade da carga e a sensibilidade. O projeto do controlador está baseado na "Teoria do Controle Ótimo Linear". Como o modelo empregado para o sistema é não-linear torna-se necessário a adaptação do controlador para levar em conta a não-linearidade. Isto é feito através de computação iterativa.

No Capítulo II, considera-se a modelagem de duas máquinas síncronas interligadas, supondo tensão constante atrás da reatância transitória. O modelo de carga utilizado é um sistema linear de primeira ordem, excitado através de ruído branco.

O Capítulo III, trata sobre o projeto do controlador, utilizando a teoria do controle ótimo.

No Capítulo IV, o projeto do controlador é adaptado ao modelo usado no Capítulo II. Estuda-se também o comportamento do sistema quando estados da outra área são realimentados.

Finalmente, no Capítulo V, são apresentados os resultados e discussão deste trabalho.

MODELAGEM MATEMÁTICA2.1 - Modelo Matemático de duas Máquinas Interligadas

A figura 2.1 mostra duas máquinas síncronas ligadas a través de uma linha de transmissão. No modelo adotado, tanto a máquina 1 como a máquina 2 funcionam como geradores. A linha de transmissão é puramente indutiva.

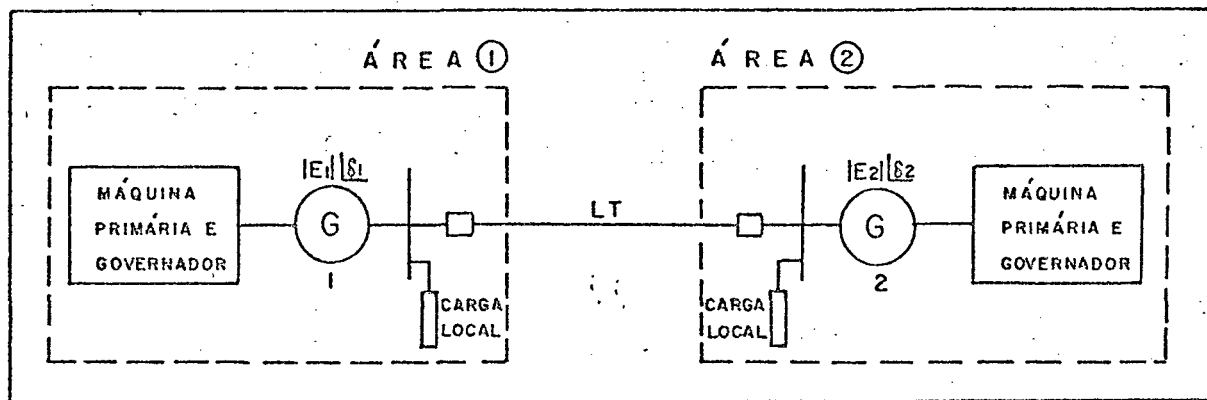


Figura 2.1

Com relação ao modelo apresentado, serão feitas as seguintes suposições:

- Uma máquina síncrona é representada por uma tensão constante atrás de sua reatância transitória. Isto implica a não inclusão do efeito do regulador de tensão neste modelo.
- A quantidade de movimento angular da máquina síncrona é constante. Isto possibilita considerar constante o coeficiente de aceleração nas equações de oscilações das máquinas.
- Consideram-se desprezíveis os efeitos dos desvios de frequência sobre a parte estática do sistema de potência considerado (linhas de transmissão). A consequência desta suposição resulta que o modelo matemático para linhas de transmissão será constituído por equações algébricas, que acoplarão as equações diferenciais que descrevem o modelo das máquinas.
- As resistências da linha e máquinas serão desprezadas.

As equações de oscilação para o sistema apresentado na figura 2.1 em p.u. são dadas por:³

$$\frac{H_1}{\pi f_1^0} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} + D_1 \frac{d\delta_1}{dt} = P_{M1} - P_{E1} \quad \text{pu MW} \quad (2.1)$$

$$\frac{H_2}{\pi f_2^0} \frac{d^2 \delta_5}{dt^2} + D_2 \frac{d\delta_5}{dt} = P_{M2} - P_{E2} \quad \text{pu MW} \quad (2.2)$$

onde $P_{E1} = P_{L1} + P_{INT} \quad (2.3)$

$$P_{E2} = P_{L2} + P_{INT} \quad (2.4)$$

Para este trabalho, o modelo proposto é não-linear. A não-linearidade considerada aparece na potência de interligação que é dada por³

$$P_{INT} = \frac{E_1 E_2}{X} \text{sen} (\delta_1 - \delta_5) \quad (2.5)$$

A carga local (P_L) no modelo é representada por um grau. Contudo, ela geralmente não é constante, sendo função da frequência e da tensão na barra. No modelo, é suposto que a tensão e a frequência da barra são constantes, assim como a reatância da linha de transmissão. Em resumo, a parte do sistema interior ao retângulo tracejado da figura 2.2 considera-se tensão e frequência constantes.

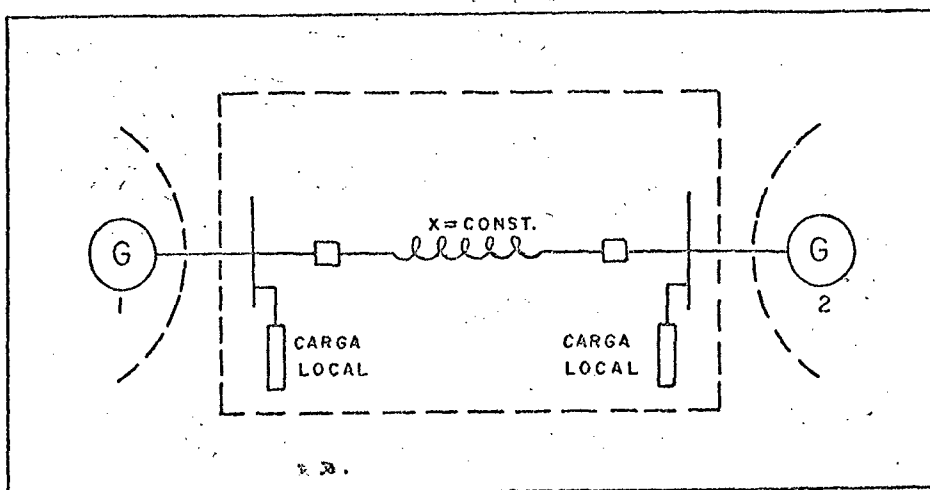


Figura 2.2

2.2 - Modelo Matemático da Turbina e do Governador de Velocidade.

Antes de apresentar o modelo matemático, serão abordados os aspectos físicos a respeito do governador de velocidade e da turbina.

O diagrama esquemático de um tipo de governador usado em turbinas a vapor é mostrado na figura 2.3 .

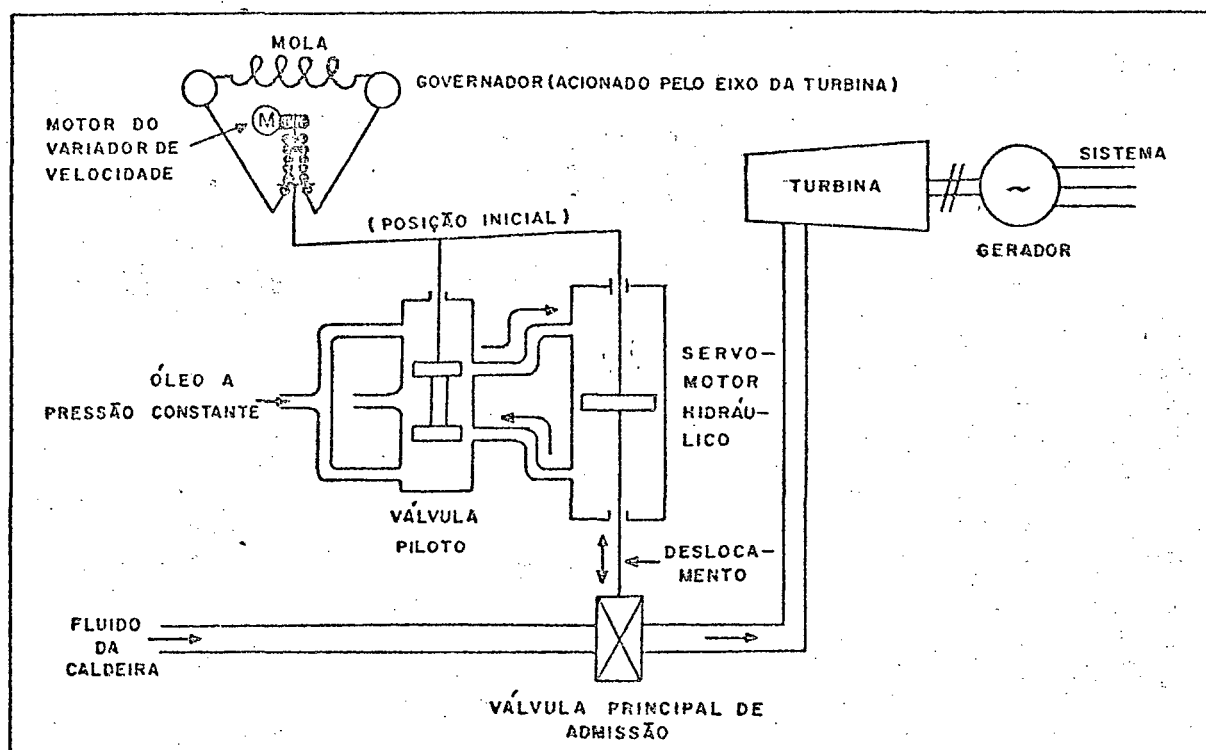


Figura 2.3

O elemento sensível às variações de velocidade (sensor) é o governador centrífugo de Watt¹¹, no qual duas massas deslocam-se radialmente para fora, à medida que a velocidade aumenta, acionando por meio de uma alavanca, uma agulha central. Esse movimento é transmitido através de um sistema de alavancas ao pistão de uma válvula piloto, que comanda o acionamento do servomotor. Neste sistema existe uma zona morta, isto é, enquanto a velocidade não sofrer um certo acréscimo mínimo, a válvula não entra em operação não somente devido ao atrito, mas também por razões de fechamento e abertura da válvula. O tempo necessário para que a válvula principal se desloque é apreciável, da ordem de 0,2 a 0,3 s., devido aos retardos do sistema hidráulico de controle e do servomotor. As características de um

governador de um turboalternador estão apresentadas na figura 2.4, na qual se nota uma diminuição de 4 por cento na velocidade entre as condições de vazio e plena carga.

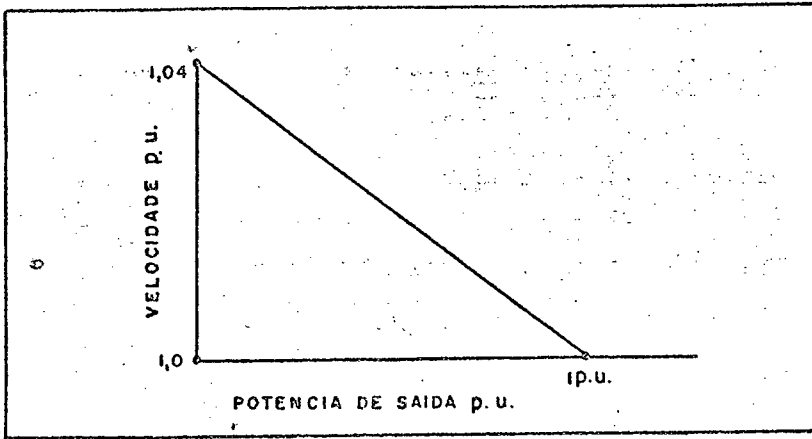


Figura 2.4

Os governadores centrífugos são utilizados atualmente na grande maioria das instalações. Existem, no entanto, outros dois tipos de governadores, que são os elétricos e os hidráulicos¹².

Uma característica importante dos governadores é o mecanismo pelo qual se pode alterar a posição inicial do braço do governador; portanto, a abertura da válvula principal pode ser ajustada independentemente de variações da velocidade. Esta função é realizada por meio de um variador de velocidade. O efeito deste ajuste cria uma família de retas paralelas (figura 2.5). Por

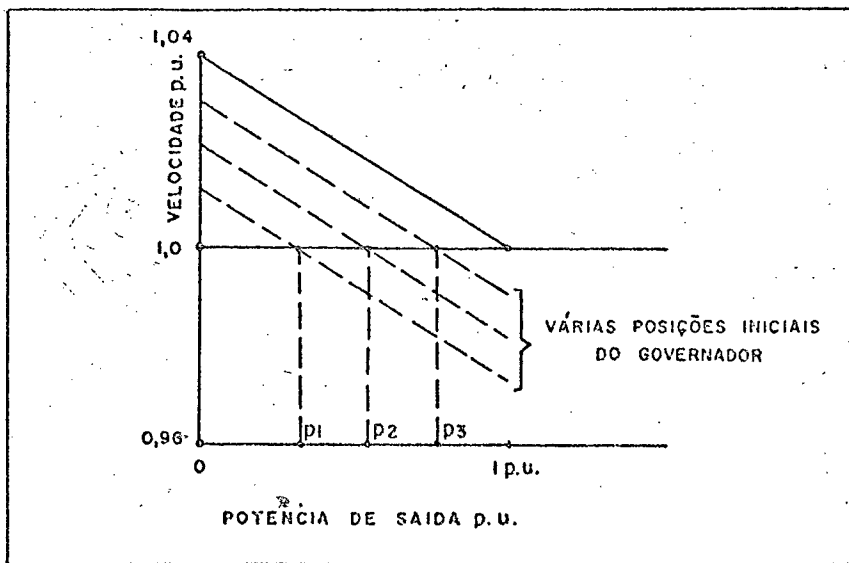


Figura 2.5

tanto, a potência fornecida pelo gerador, a uma dada velocidade pode ser ajustada arbitrariamente dentro de certos limites, sendo esta possibilidade extremamente importante para o controle econômico do sistema.

A seguir será abordado o modelo matemático da turbina e do governador de velocidade.

A potência mecânica de saída da turbina é considerada em duas parcelas: a primeira parcela, P_{Mi} , que fixa a potência gerada em regime permanente, e a segunda parcela, ΔP_{Mi} , proveniente da ação do governador de velocidade, que tende a manter a potência gerada igual a potência consumida durante perturbações.

O diagrama de bloco mostrado na figura 2.6³, mostra o balanço de potência para a máquina síncrona 1 do modelo apresentado na figura 2.1. Neste modelo, não será levada em conta, por enquanto, a parcela referente ao variador de velocidade.

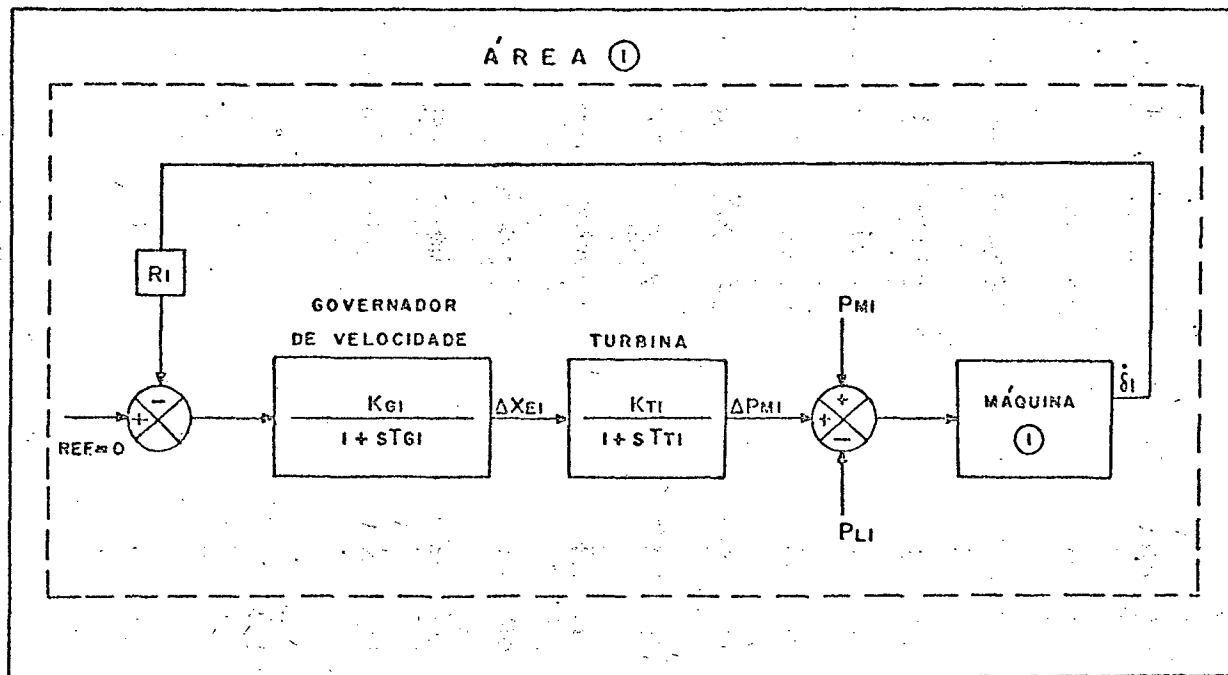


Figura 2.6

O diagrama de bloco da figura 2.7 mostra o balanço de potência para a máquina síncrona 2.

A representação da turbina é a mais simples possível. Ele representa uma turbina a vapor sem reaquecimento. Esta representação não leva em conta a dinâmica da caldeira³.

As equações diferenciais relacionando o governador de velocidade e a turbina para a área 1 são:

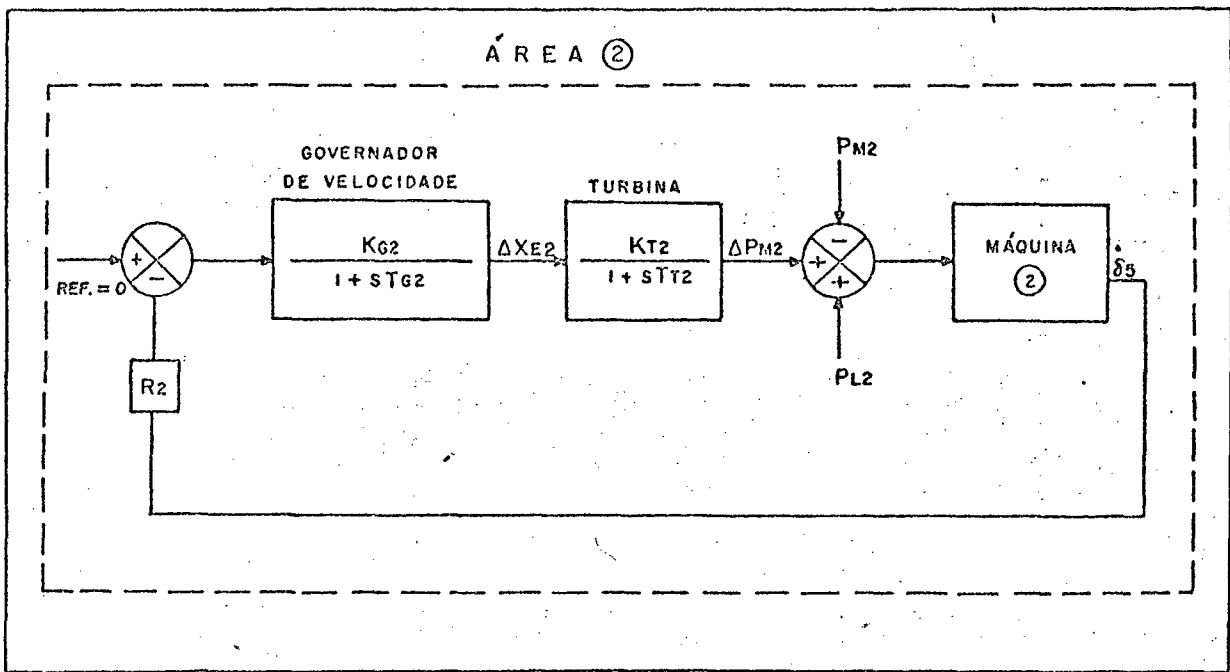


Figura 2.7

$$\Delta \dot{X}_{E1} = \frac{1}{T_{G1}} (-\Delta X_{E1} - R_1 K_{G1} \delta_1) \quad (2.5)$$

$$\Delta \dot{P}_{M1} = \frac{1}{T_{T1}} (-\Delta P_{M1} + K_{T1} \Delta X_{E1}) \quad (2.6)$$

Para a área 2 tem-se:

$$\Delta \dot{X}_{E2} = \frac{1}{T_{G2}} (-\Delta X_{E2} - R_2 K_{G2} \delta_5) \quad (2.7)$$

$$\Delta \dot{P}_{M2} = \frac{1}{T_{T2}} (-\Delta P_{M2} + K_{T2} \Delta X_{E2}) \quad (2.8)$$

2.3 - Modelo matemático para o C.F.C. em um sistema de duas áreas.

Antes de propor o modelo, é necessário expor algumas características dos sistemas de potência. Estas características podem ser verificadas através da análise de sensibilidade³.

- Um desbalanço de potência real afeta primariamente a frequência do sistema, mas não afeta a tensão da barra.
- Um desbalanço de potência reativa afeta primariamen

te a tensão da barra, mas não afeta a frequência do sistema.

Deve ser ressaltado que estas considerações só se aplicam quando as variações envolvem somente pequenas percentagens, isto é, são de primeira ordem no sentido matemático.

Em vista destes fatos, o problema do controle no regime permanente pode ser dividido em dois problemas de controle independentes ou desacoplados:

1. "O problema do controle megawatt-frequência ou controle P-f". O objetivo deste problema é controlar a frequência e, simultaneamente, a troca de potência real através das linhas de interconexão. Por meio de um sensor, o erro da frequência é detectado e comandos "elevadores" ou "abaixadores" são enviados à máquina primária, resultando em um acréscimo da potência ativa gerada.
2. "O problema do controle megavar-tensão ou Controle Q-V". O objetivo é controlar a tensão $|V|$. Por meio de sensores, os desvios do módulo da tensão são detectados e comandos "crescentes" ou "decrescentes" são enviados às fontes de potência reativa.

Neste trabalho será considerado que haverá um desacoplamento entre o controle P-f e o controle Q-V. Na verdade, o controle da potência ativa e da frequência está de certo modo ligado ao da potência reativa e da tensão, porém, para o estudo proposto, é conveniente considerar o controle da potência ativa e da frequência independente do da tensão e do reativo. Por este motivo, considerou-se a suposição de tensão constante atrás da reatância, para representar os geradores.

O diagrama de bloco, mostrado na figura 2.8, representa o controle da frequência da carga (C.F.C) de duas áreas interconectadas.

Para montar o diagrama de bloco da figura 2.8, utilizou-se os modelos do governador de velocidade e da turbina apresentados nas figuras 2.6 e 2.7 e a interconexão das duas áreas foi feita com o auxílio da equação (2.5). U_1 e U_2 são os sinais que controlam os reguladores de velocidade.

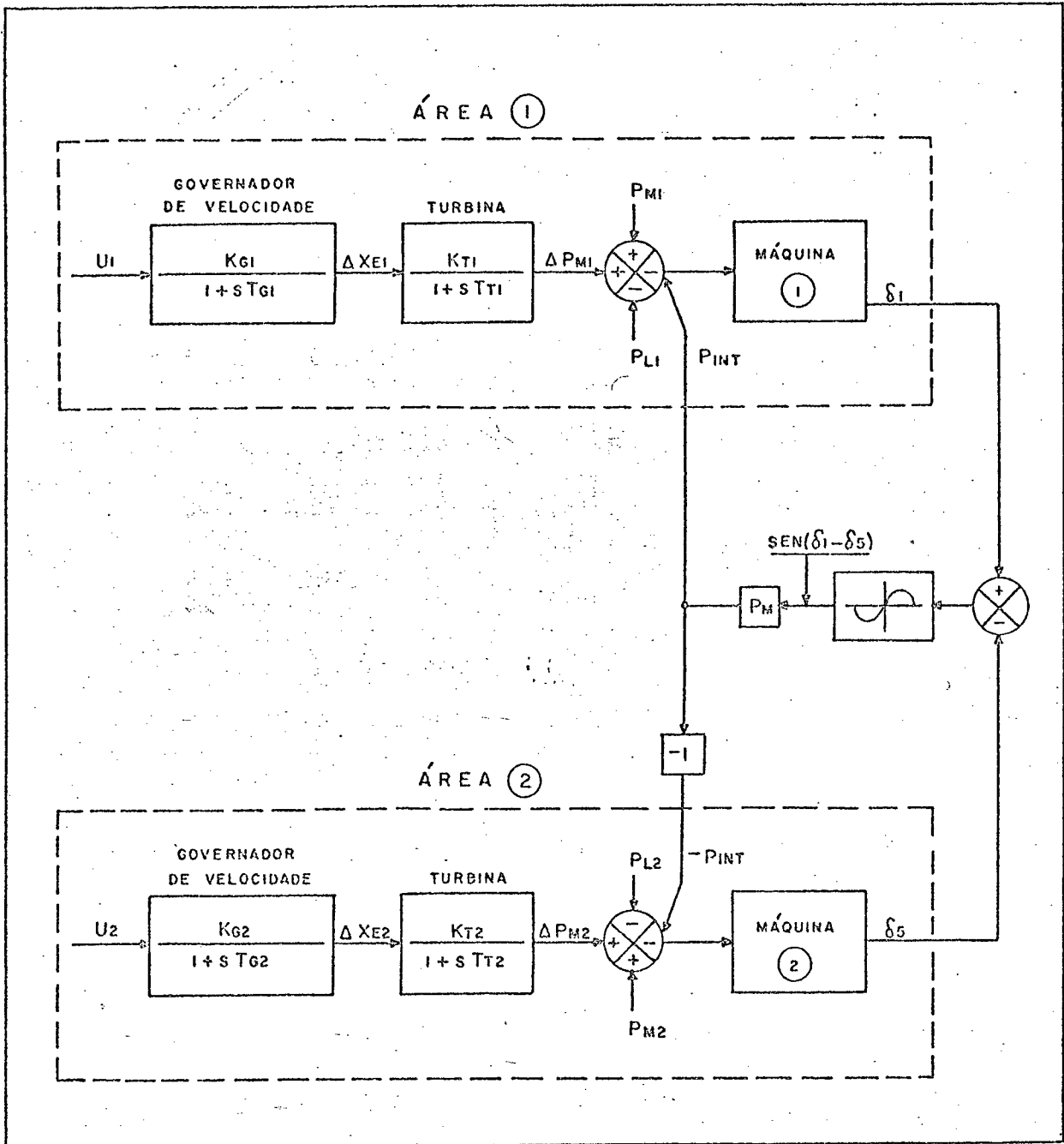


Figura 2.8

Para este sistema de duas áreas, os estados considerados são:

$$X_1 = \delta_1$$

$$X_2 = \dot{\delta}_1$$

$$X_3 = \Delta X_{E1}$$

$$X_4 = \Delta P_{M1}$$

$$X_5 = \delta_2$$

$$X_6 = \dot{\delta}_2$$

$$X_7 = \Delta X_{E2}$$

$$X_8 = \Delta P_{M2}$$

As equações diferenciais que regem o sistema são:

$$\dot{X}_1 = X_2 \quad (2.9)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{f_1^0 \pi}{H_1} (P_{M1} + X_4 - D_1 X_2 - P_{L1} - P_{INT}) \quad (2.10)$$

$$\dot{X}_3 = \frac{1}{T_{G1}} (-X_3 + K_{G1} U_1) \quad (2.11)$$

$$\dot{X}_4 = \frac{1}{T_{T1}} (-X_4 + K_{T1} X_3) \quad (2.12)$$

$$\dot{X}_5 = X_6 \quad (2.13)$$

$$\dot{X}_6 = \frac{f_2^0 \pi}{H_2} (P_{M2} + X_8 - D_2 X_6 - P_{L2} + P_{INT}) \quad (2.14)$$

$$\dot{X}_7 = \frac{1}{T_{G2}} (-X_7 + K_{G2} U_2) \quad (2.15)$$

$$\dot{X}_8 = \frac{1}{T_{T2}} (-X_8 + K_{T2} X_7) \quad (2.16)$$

Além das equações diferenciais, este sistema apresenta uma equação algébrica,

$$P_{INT} = P_M \text{ sen } (X_1 - X_5), \quad (2.17)$$

onde

$$P_M = |E_1| \cdot |E_2| / X \quad (2.18)$$

Todas estas equações podem ser colocadas na seguinte forma:

$$\dot{\underline{X}} = \underline{A} \underline{X} + \phi(\underline{x}) \underline{D} + \underline{B} \underline{U} + \underline{C} \underline{W} \quad (2.19)$$

onde

$$\underline{X} \triangleq |X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8|^T$$

$$\underline{D} \triangleq |0, -\frac{f_1^0}{H_1} P_M, 0, 0, 0, -\frac{f_2^0}{H_2} P_M, 0, 0|^T$$

$$\underline{U} \triangleq |U_1, U_2|^T$$

$$\underline{W} \triangleq |P_{M1} - P_{L1}, P_{M2} - P_{L2}|^T$$

$|A| \triangleq$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-f_1^0 \pi D_1}{H_1} & 0 & \frac{f_1^0 \pi}{H_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_{G1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{T1}}{T_{T1}} & \frac{-1}{T_{T1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-f_2^0 \pi D_2}{H_2} & 0 & \frac{f_2^0 \pi}{H_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{G2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{T2}}{T_{T2}} & \frac{-1}{T_{T2}} \end{bmatrix}$$

 $|B| \triangleq$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{K_{G1}}{T_{G1}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{G2}}{T_{G2}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

 $|C| \triangleq$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{f_1^0 \pi}{H_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{f_2^0 \pi}{H_2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\phi(X) \triangleq \text{sen}(X_1 - X_5)$$

Como pode ser visto pela equação (2.19) e definições que a seguem, o modelo representa um sistema multivariável não-linear.

2.4 - Modelo de Carga.

O modelo de carga utilizado neste trabalho é o de um sistema linear de primeira ordem, excitado através de um "Ruído Branco"^{19,20}. A figura 2.9 mostra o modelo de carga aleatória utilizada neste trabalho.

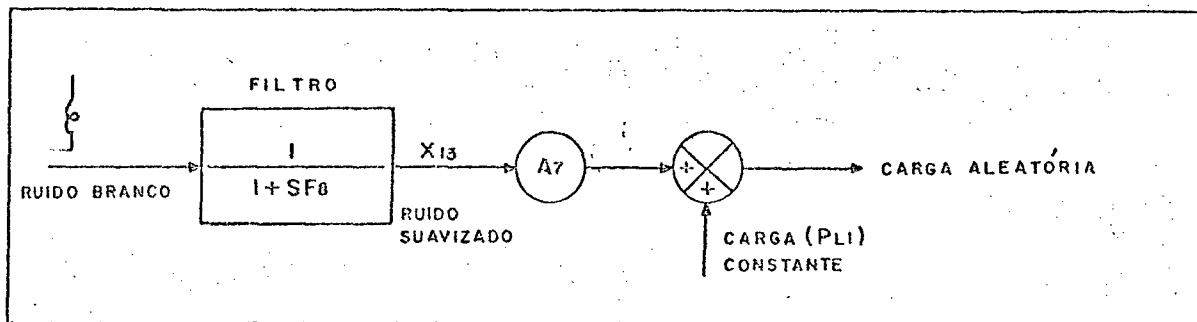


Figura 2.9

O "Ruído Branco" uniforme tem uma distribuição de potência constante no espectro de frequência e uma amplitude variando com o tempo, de acordo com a distribuição de probabilidade uniforme. Além disso, apresenta um comportamento bastante aleatório. Em qualquer instante, ele gera um valor entre 0 e 1 com a mesma probabilidade: o valor gerado no futuro é independente do passado. Este fato é explicado através do seguinte exemplo: considere-se a geração do ruído branco uniforme nos tempos discretos 0, 1, 2, 3, 4, ... seg; em $t = 0$, qualquer valor entre 0 e 1 pode ser gerado. No tempo $t = 1$ também qualquer valor pode ser gerado entre $[0, 1]$ e independe do valor gerado em $t = 0$. Em $t = 2$ qualquer valor é gerado entre $[0, 1]$ independente dos que foram gerados em $t = 0$ e $t = 1$, e assim por diante.

O sistema linear atua como um filtro para suavizar o ruído branco. Esta suavização do ruído branco é necessária, pois se não fosse feita representaria uma variação de carga excessiva, o que não está de acordo com a realidade. Como é sabido, nos

sistemas de potência a carga, em geral, varia lentamente com o tempo.

A geração de carga aleatória é dada pelas seguintes equações:

$$\dot{X}_{13} = \frac{1}{F_8} (-X_{13} + \xi) \quad (2.20)$$

$$CA = P_{L1} + A_7 X_{13} \quad (2.21)$$

Incluindo o modelo de carga aleatória na equação (2.19), o sistema passa a ser multivariável, não linear e estocástico, sendo representado por:

$$\dot{\underline{X}}_a = [A_a] \underline{X}_a + \phi(X_a) \underline{D}_a + [B_a] \underline{U} + [C_a] \underline{W} + \underline{G}\xi \quad (2.21)$$

onde:

$$\underline{X}_a \triangleq [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_{13}]^T$$

$$\underline{D}_a \triangleq \left[0, \frac{-f_1^0 \pi}{H_1} P_{M1}, 0, 0, 0, \frac{-f_2^0 \pi}{H_2} P_{M2}, 0, 0, 0 \right]^T$$

$$\underline{G} \triangleq \left[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -\frac{1}{F_8} \right]^T$$

ξ = Ruído Branco

$$B_a \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_{G1}}{T_{G1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{G2}}{T_{G2}} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$|C_a| \triangleq \begin{bmatrix} 0 & \frac{f_1^0 \pi}{H_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{f_2^0 \pi}{H_2} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$|A_a| \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-f_1^0 \pi D_1}{H_1} & 0 & \frac{f_1^0 \pi}{H_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_{G2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{T1}}{T_{T1}} & \frac{-1}{T_{T1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-f_2^0 \pi D_2}{H_2} & 0 & \frac{f_2^0 \pi}{H_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{G2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{T2}}{T_{T2}} & \frac{-1}{T_{T2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{F_8} \end{bmatrix}$$

2.5 - Parâmetros do modelo

2.5.1 - Máquinas e sistemas de interligação.

A tabela 2.A fornece os dados das máquinas e do sistema de interligação usados neste trabalho³.

2.3.

TABELA 2.A

Valores nominais das máquinas	200 MW; 60 Hz
Amortecimento, D_1, D_2	0,04 pu/MW/rd/seg
Potência de intercâmbio, P_I	0,2 pu MW
Potência mecânica de entrada da máq. 1, P_{M1} ...	0,7 pu MW
Potência mecânica de entrada da máq. 2, P_{M2} ...	0,6 pu MW
Carga local da máquina 1, P_{L1}	0,5 pu MW
Carga local da máquina 2, P_{L2}	0,8 pu MW
Potência máxima transmitida, P_M	0,4 pu MW
Constante de inércia da máquina, H_1, H_2	3 seg.

2.5.2 - Governador de Velocidade e Turbina

A Tabela 2.B, fornece os valores dos parâmetros do governador de velocidade e turbina apresentados nas figuras 2.6 e 2.7 .

TABELA 2.B

Ganho do Governador de Velocidade, K_{G1}, K_{G2} ..	1
Ganho da turbina, K_{T1}, K_{T2}	1
Constante de tempo do governador, T_{G1}, T_{G2} ...	0,08 seg.
Constante de tempo da turbina, T_{T1}, T_{T2}	0,3 seg.
Regulação de velocidade, R_1, R_2	$\frac{0,416}{2 \pi}$ Hz/puMW

2.5.3 - Carga Aleatória

A Tabela 2.C fornece os valores dos parâmetros do diagrama de bloco na figura 2.9 .

TABELA 2.C

Constante de tempo do filtro, F_8	10 seg.
Constante de proporcionalidade, A_7	1,5

CAPÍTULO III

=====

UM MÉTODO PARA O PROJETO DO CONTROLADOR

Há atualmente duas maneiras para abordar o problema do C.F.C. Uma delas é o método clássico e a outra será baseada na teoria do controle ótimo.

O método clássico é baseado na representação do sistema usando função de transferência. As especificações a que o sistema deve satisfazer são: tempo de subida, margem de ganho, ultrapassagem ("overshoot"), etc.. O projeto do controlador é obtido realimentando sinais proporcionais ao erro, derivada do erro e integral do erro. Em alguns casos, também se utilizam compensadores. Os valores do ganho do controlador são conseguidos através de tentativas, a fim de satisfazer as especificações dadas.

O sistema de C.F.C. é multivariável, não linear e estocástico. Desse modo, não pode ser modelado como função de transferência. Se o sistema for linearizado, ainda assim é difícil projetar o controlador utilizando a abordagem clássica, em vista do sistema ser multivariável.

O Controle Ótimo é adequado para tratar o projeto do C.F.C. O modelo do sistema é obtido na forma de variáveis de estado. Os critérios de desempenho dos sistemas são funcionais dos estados e do controle. Dessa maneira, o controle é obtido por minimização do critério de desempenho usando programação dinâmica ou o princípio do máximo¹⁴. A abordagem utilizando controle ótimo baseia-se no método analítico e não por tentativas, mas apesar disso, necessita-se de experiência na escolha do funcional que representa o critério de desempenho. Como o sistema apresentado no Capítulo II é não linear, utilizou-se o controle ótimo usando modelo linearizado. Isto torna a solução sub-ótima. O critério de desempenho foi escolhido de maneira a incluir especificações tanto no regime transitório, como no regime permanente. Em consequência, considera-se maior número de estados do sistema. Os novos estados são a integral do desvio da frequência e a integral do desvio da potência de interligação. Esta abordagem unifica o projeto do C.F.C. Os ganhos do controlador

são obtidos interativamente por simulação do modelo no computador digital.

3.1 - Estrutura do Controle

3.1.1 - Especificações do C.F.C.

Para o C.F.C. de sistemas de potência interligados, as seguintes especificações devem ser consideradas:

1. Cada área deve contribuir para o controle da frequência ; o erro da frequência no regime permanente devido a uma variação de carga deve ser zero, se a área onde a variação ocorrer puder acomodar a variação. Além disso, os erros de frequência no transitório e de tempo devem ser pequenos; ou seja,

Δf (desvio de frequência 0)

$\int_0^t \Delta f dt$ (erro de tempo) tem que ser pequeno

2. Cada área deve contribuir para o controle da potência de interligação programada; o desvio da potência de interligação deve ser minimizada no regime permanente.

ΔP_{INT} deve ser minimizada no regime permanente.

De acordo com a especificação (1), o desvio de frequência tem que ser zero no regime permanente. Uma forte razão para que esta especificação seja satisfeita é que os desvios de frequência indicam que alguma coisa vai mal com o sistema de potência, pois como se sabe, a frequência está diretamente ligada ao balanço de potência ativa do sistema. Há outras razões para se desejar que o desvio de frequência seja zero. Uma delas é que existe um grande número de equipamentos elétricos que funcionam com motores síncronos e é indispensável que a frequência permaneça em seu valor nominal.

Com relação à especificação (2), o desvio da potência de interligação tem que ser zero no regime permanente. A necessidade para que esta especificação seja satisfeita é puramente

por razões contratuais entre as companhias interligadas.

3.1.2 - Linearização do modelo.

A estrutura de controle usada neste trabalho está baseada na teoria do controle ótimo linear, apesar do sistema ser não-linear. O controle ótimo linear foi usado a fim de que a implementação do controlador seja praticável. A estrutura do controlador é simplesmente a realimentação de todos os estados e da integral desses estados. Se o controle ótimo baseado no modelo não-linear fosse usado, o controlador seria complexo, necessitando o uso de um computador em tempo real¹³. O modelo representado no capítulo II é não-linear e, para utilizar a teoria do controle ótimo linear, é necessário linearizá-lo. Usando a série de Taylor e considerando somente termos de primeira ordem a equação (2.19) será linearizada a seguir.

Tomando-se:

$$\underline{X} = \underline{X}_0 + \Delta\underline{X}$$

$$\underline{D} = \underline{D}_0 + \Delta\underline{D}$$

$$\underline{U} = \underline{U}_0 + \Delta\underline{U}$$

$$\underline{W} = \underline{W}_0 + \Delta\underline{W}$$

$$\phi(\underline{X}_0 + \Delta\underline{X}) \cong \phi(\underline{X}_0) + \left. \frac{\partial \phi}{\partial \underline{X}} \right|_{\underline{X} = \underline{X}_0} \Delta\underline{X}$$

e substituindo-se em (2.18) tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (\underline{X}_0 + \Delta\underline{X}) = & [A] (\underline{X}_0 + \Delta\underline{X}) + \left[\phi(\underline{X}_0) + \left. \frac{\partial \phi}{\partial \underline{X}} \right|_{\underline{X} = \underline{X}_0} \right] (\underline{D}_0 + \Delta\underline{D}) + \\ & + [B] (\underline{U}_0 + \Delta\underline{U}) + [C] (\underline{W}_0 + \Delta\underline{W}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Rearranjando-se os termos dessa equação, e considerando que $\Delta\underline{D}$ igual a zero, em virtude do vetor D ser constante, obtém-se:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\underline{X}} = & [A] \underline{X}_0 + \phi(\underline{X}_0) \underline{D}_0 + [B] \underline{U}_0 + [C] \underline{W}_0 + [A] \Delta \underline{X} + \\ & + \left\{ \left(\frac{\partial \phi}{\partial \underline{X}} \right)^T \right\}_{\underline{X}=\underline{X}_0} \Delta \underline{X} \} \underline{D}_0 + [B] \Delta \underline{U} + [C] \Delta \underline{W} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Como,

$$\dot{\underline{X}} \Big|_{\underline{X}=\underline{X}_0} = [A] \underline{X}_0 + \phi(\underline{X}_0) \underline{D}_0 + [B] \underline{U}_0 + [C] \underline{W}_0,$$

substituindo-se em (3.2) tem-se que:

$$\Delta \dot{\underline{X}} = \dot{\underline{X}} \Big|_{\underline{X}=\underline{X}_0} + [A] \Delta \underline{X} + \left\{ \left(\frac{\partial \phi}{\partial \underline{X}} \right)^T \right\}_{\underline{X}=\underline{X}_0} \Delta \underline{X} \} \underline{D}_0 + [B] \Delta \underline{U} + [C] \Delta \underline{W} \quad \dots (3.3)$$

Supondo-se que o sistema antes da perturbação se encontrava em regime permanente, a equação (3.3) passa a ter a seguinte forma:

$$\Delta \dot{\underline{X}} = [A] \Delta \underline{X} + \left\{ \left(\frac{\partial \phi}{\partial \underline{X}} \right)^T \right\}_{\underline{X}=\underline{X}_0} \Delta \underline{X} \} \underline{D}_0 + [B] \Delta \underline{U} + [C] \Delta \underline{W} \quad (3.4)$$

3.1.3 - Critério de desempenho.

Como já foi mencionado no item 3.1.1, o objetivo do C.F.C. é minimizar o desvio da frequência, integral do desvio da frequência e integral do desvio da potência de interligação. Além disso, é necessário manter a estabilidade do sistema, sem uso excessivo da energia para controlá-lo. Para manter a estabilidade do sistema é necessário que estados como ângulo de potência e aceleração da máquina, não se afastem da referência.

Levando-se em conta os fatos citados, o critério de desempenho pode ser representado matematicamente como um funcional da soma ponderada do quadrado dos estados, quadrado da integral do desvio da potência de interligação, quadrado da integral do desvio da frequência e quadrado dos sinais de controle. Como cada área toma conta de seu controle, o critério de desem

penho para a área 1 pode ser representado da seguinte maneira:

$$\int_0^{\infty} \{ \alpha_1 (\Delta X_2)^2 + \alpha_2 (\Delta X_3)^2 + \alpha_3 (\Delta X_4)^2 + \alpha_4 \left(\int_0^t \Delta X_2 dt \right)^2 + \alpha_5 (\Delta \dot{X}_2)^2 + \\ + \alpha_6 \left[\int_0^t (P_I - P_{INT}) dt \right]^2 + (\Delta U_1)^2 \} dt \quad (3.5)$$

e para a área 2:

$$\int_0^{\infty} \{ \alpha_7 (\Delta X_6)^2 + \alpha_8 (\Delta X_7)^2 + \alpha_9 (\Delta X_8)^2 + \alpha_{10} \left(\int_0^t \Delta X_6 dt \right)^2 + \alpha_{11} (\Delta \dot{X}_6)^2 + \\ + \alpha_{12} \left[- \int_0^t (P_I - P_{INT}) dt \right]^2 + (\Delta U_2)^2 \} dt \quad (3.6)$$

Os pesos $\{\alpha_i\}$ são determinados de acordo com a importância das variáveis de estado no comportamento dinâmico do sistema.

3.1.4 - Determinação do controlador.

Este critério de desempenho, devido a presença da integral de alguns estados, não se apresenta na forma comumente usada no controle ótimo, isto é, critério de desempenho quadrático. Para colocar na forma quadrática, introduz-se novas variáveis, ΔZ_1 , ΔZ_2 , ΔZ_3 e ΔZ_4 , definidas como:

$$\Delta Z_1 = \int_0^t \Delta X_2 dt$$

$$\Delta Z_2 = \int_0^t (P_I - P_{INT}) dt$$

$$\Delta Z_3 = \int_0^t \Delta X_6 dt$$

$$\Delta Z_4 = - \int_0^t (P_I - P_{INT}) dt$$

Usando estas novas variáveis de estado, o critério de desempenho adquire a seguinte forma:

$$\int_0^{\infty} \{ \alpha_1 (\Delta X_2)^2 + \alpha_2 (\Delta X_3)^2 + \alpha_3 (\Delta X_4)^2 + \alpha_4 (\Delta Z_1)^2 + \alpha_5 (\Delta \dot{X}_2)^2 + \alpha_6 (\Delta Z_2)^2 + (\Delta U_1)^2 \} dt \quad (3.7)$$

$$e \int_0^{\infty} \{ \alpha_7 (\Delta X_6)^2 + \alpha_8 (\Delta X_7)^2 + \alpha_9 (\Delta X_8)^2 + \alpha_{10} (\Delta Z_3)^2 + \alpha_{11} (\Delta \dot{X}_6)^2 + \alpha_{12} (\Delta Z_4)^2 + (\Delta U_2)^2 \} dt \quad (3.8)$$

Com a introdução destas novas variáveis, a dimensão do modelo é aumentada. A representação deste modelo é dada pela equação (3.9).

$$\begin{cases} \Delta \dot{X} = [A] \Delta X + \left\{ \left(\frac{\partial \phi}{\partial X} \right)^T \Delta X \right\}_{X=X_0} \underline{D} + [B] \Delta U + [C] \Delta W \\ \Delta \dot{Z}_1 = \Delta X_2 \\ \Delta \dot{Z}_2 = P_I - P_{INT} \\ \Delta \dot{Z}_3 = \Delta X_6 \\ \Delta \dot{Z}_4 = -(P_I - P_{INT}) \end{cases} \quad (3.9)$$

Os controles ΔU_1 e ΔU_2 são obtidos pela minimização de (3.7) e (3.8), tal que (3.9) seja satisfeita. Este é o conhecido controle ótimo linear cuja solução é,¹⁴

$$\Delta U_1 = K_1 \Delta X_2 + K_2 \Delta X_3 + K_3 \Delta X_4 \int_0^t \Delta X_2 dt + K_5 \Delta \dot{X}_2 + K_6 \int_0^t (P_I - P_{INT}) dt \quad (3.10)$$

para a área 1 e,

$$\Delta U_2 = K_7 \Delta X_6 + K_8 \Delta X_7 + K_9 \Delta X_8 + K_{10} \int_0^t \Delta X_6 dt + K_{11} \Delta \dot{X}_6 + K_{12} \int_0^t (P_I - P_{INT}) dt \quad (3.11)$$

para a área 2.

No caso convencional, usa-se somente a realimentação do desvio da frequência, integral do desvio da frequência e integral do desvio da potência de interligação. Com base nas equações (3.10) e (3.11), pode-se concluir que o controlador convencional é um caso particular do controlador ótimo linear.

Tomando-se como base as especificações abordadas no item 3.1.1, realimentaram-se os seguintes estados: o desvio da frequência, a fim de que esta não sofra grandes oscilações no regime transitório; a aceleração do rotor, devido ao fato de que ela controla o desvio da frequência e do ângulo de potência; a saída do governador de velocidade, a fim de reduzir o tempo de resposta do governador; e finalmente a integral do desvio da frequência e da potência de interligação, com o objetivo de adquirirem seus valores nominais no regime permanente.

3.2 - Determinação dos ganhos do controlador

Os valores dos ganhos dependem da escolha dos pesos, λ , no critério de desempenho e do ponto de operação do sistema. Como os pesos λ são escolhidos por tentativas e, além disso, o ponto de operação varia com a variação da carga, torna-se difícil a determinação dos ganhos analiticamente.

Como ponto de partida para o projeto do controlador proposto neste trabalho, determinou-se um ponto de operação a partir do qual os ganhos foram determinados através de computação interativa, ou seja, variam-se os ganhos do controlador até obter resposta desejada, observando-se o componente do sistema através de um mostrador ("display").

CAPÍTULO IV

=====

MÉTODO PARA ADAPTAÇÃO DO PROJETO DO CONTROLADOR
LINEAR E CONTROLE HIERÁRQUICO

O modelo usado neste trabalho é não-linear e estocástico, mas o controlador proposto está baseado no modelo linear determinístico. Este fato necessita de adaptação do controlador ao modelo descrito no Capítulo II. Incluiu-se no presente capítulo o C.F.C. convencional para comparação com o C.F.C. proposto. Estudou-se o comportamento do sistema com relação à não-linearidade. Para cada ponto de operação variaram-se as condições iniciais, observando o desvio da frequência, ângulo de potência e potência de interligação. Depois incluiu-se a aleatoriedade da carga e observou-se a ação do controle, potência de interligação, carga e desvio da frequência. Finalmente, fez-se o estudo paramétrico, variando-se parâmetros tais como P_M , H e D . A partir destas análises, modificaram-se os ganhos do controlador. Assim, o controlador é obtido com relação à estrutura proposta.

4.1 - C.F.C. baseado na teoria do Controle Clássico

A inclusão do C.F.C. baseado na teoria do controle clássico foi necessária a fim de fazer análises comparativas com o C.F.C. proposto neste trabalho.

No controle clássico o projeto do controlador baseia-se na realimentação de sinais proporcionais ao erro, derivada do erro e integral do erro. Para satisfazer as especificações do C.F.C. apresentadas no Capítulo III, usa-se o controle da integral, pois como é conhecido da teoria do controle clássico, o controle da integral tem grande influência no regime permanente. Além disso, usa-se o controle proporcional, para que a frequência não sofra grandes oscilações no regime transitório.

A fim de implementar o controle da integral e o controle proporcional no modelo do Capítulo II, para um sistema de duas áreas, há necessidade de duas variáveis de estados. Estas novas variáveis de estado são

$$X_9 = \Delta P_{C1}$$

para a área 1, e

$$X_{10} = \Delta P_{C2}$$

para a área 2, onde ΔP_{C1} e ΔP_{C2} são os comandos para o variador de velocidade e são dados por:

$$\Delta P_{C1} = X_9 = -K_1 \int_0^t [B X_2 + (P_I - P_{INT})] dt, \quad (4.1)$$

$$\Delta P_{C2} = X_{10} = -K_1 \int_0^t [B X_6 - (P_I - P_{INT})] dt \quad (4.2)$$

Assim, os sinais de comando U_1 e U_2 que comandam o governador de velocidade são,

$$U_1 = -R_1 X_2 - K_1 \int_0^t [B X_2 + (P_I - P_{INT})] dt \quad (4.3)$$

$$U_2 = -R_2 X_6 - K_1 \int_0^t [B X_6 - (P_I - P_{INT})] dt \quad (4.4)$$

Com a inclusão do controle da integral, o número de equações diferenciais aumentou para 10. As novas equações são:

$$\dot{X}_9 = -K_1 [B X_2 + (P_I - P_{INT})] \quad (4.5)$$

$$\dot{X}_{10} = -K_1 [B X_6 - (P_I - P_{INT})] \quad (4.6)$$

Com as equações (4.3), (4.4), (4.5) e (4.6) o controle da integral e proporcional é implementado no diagrama de bloco da figura 2.8. Dessa maneira, o diagrama de bloco da figura 4.1 representa o C.F.C. convencional para um sistema de duas áreas, com potências nominais iguais.

O ganho constante K_1 controla a taxa de integração e portanto a velocidade de resposta da malha. A integração na prática é realizada em integradores eletrônicos do mesmo tipo que aqueles usados em computadores analógicos. Os sinais negativos, devem ser incluídos já que cada área deve aumentar sua geração se o erro de frequência ou o desvio de potência de interligação

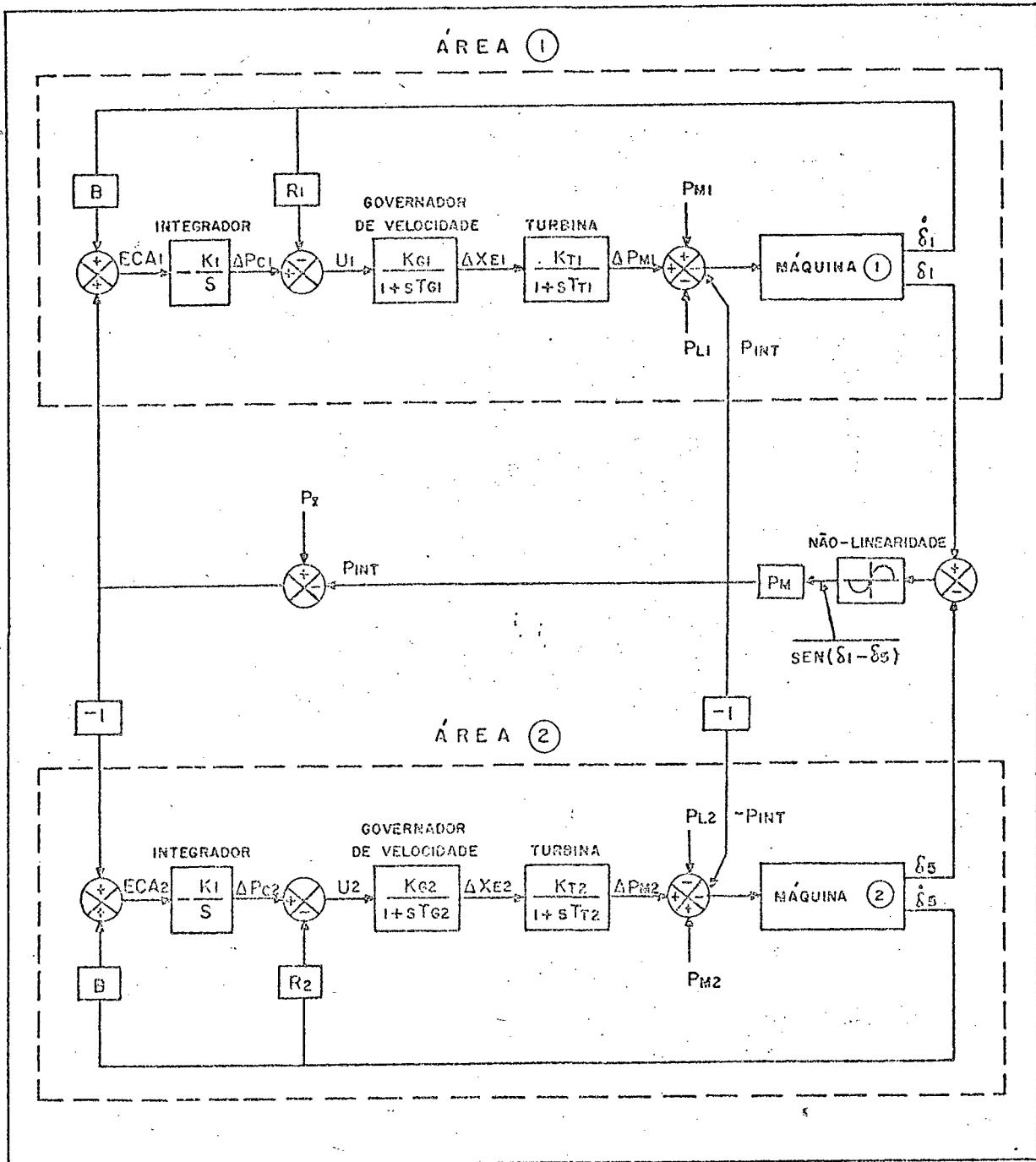


Figura 4.1

é negativo. O ganho B é um coeficiente atribuído à frequência. O sinal da entrada do integrador é conhecido como erro de controle da área (E.C.A.).

4.2 - Método para adaptação do controlador para a não-linearidade.

A estrutura de controle encontrada no capítulo anterior foi baseada na linearização do modelo. Os ganhos do controlador são diferentes para cada ponto de operação do sistema. Para satisfazer esta condição, há necessidade de se ter como controlador, um computador em tempo real⁹. Contudo, neste trabalho, propõe-se uma solução econômica apesar de ser sub-ótima. Através da computação interativa, encontrou-se valores de ganho do controlador que servem para vários pontos de operação. Para cada ponto de operação observou-se o ângulo de potência para várias condições iniciais, a fim de determinar o domínio de estabilidade. A partir desta simulação, encontrou-se os ganhos que apresentam maior domínio de estabilidade.

A estrutura do controlador encontrada no Capítulo III é implementada no diagrama de bloco da figura 2.8. O diagrama de bloco da figura 4.2 mostra o C.F.C. proposto para um sistema de duas áreas, com potências nominais iguais.

4.3 - Adaptação do controlador com relação à aleatoriedade da carga.

Os ganhos do controlador quando se leva em conta a aleatoriedade da carga não devem ser muito grandes, evitando assim a correção desnecessária para grandes desvios de frequência. Os ganhos devem ter valores tais que corrijam a média do erro, desse modo evitando atuação brusca da turbina e gerador. Uma solução será o uso de um filtro na entrada do gerador para suavizar o sinal do erro. Neste trabalho, empregou-se uma solução simplificada, escolhendo-se os ganhos por observação do comportamento do sinal de controle.

mente estudou-se o efeito do parâmetro P_M , que representa a máxima potência transmitida através da linha de interligação. Nos itens anteriores, o valor de P_M era 0,4 pu MW. Variou-se o valor de P_M para 0,2 e depois para 0,6 pu MW, sendo que, para cada P_M , mudaram-se as condições iniciais em torno do ponto de operação. Utilizou-se o mesmo procedimento com o parâmetro D (amortecimento). Tomando-se como base o valor usado nos itens anteriores, $D = 0,04$ pu MW/rd/seg., atribuiu-se outros valores para D , ou seja, 0,02 e 0,06 pu MW/rd/seg.. Finalmente, estudou-se o efeito da constante de inércia H . Anteriormente as áreas 1 e 2 apresentavam o mesmo valor de H_i , ou seja, $H_1 = H_2 = 3$ seg. Agora considera-se o valor de H_1 igual ao valor anterior e faz-se $H_2 = 10$ seg.

Os resultados sobre o estudo da sensibilidade são mostrados no Capítulo V.

4.5. - Introdução ao Controle Hierárquico

O projeto do C.F.C. foi feito levando-se em consideração que cada área "tomava conta de si", isto é, não existe uma coordenação para poder controlar o sistema como um todo. Desde que há um desacoplamento entre as áreas, não se pode garantir que o sistema interligado tenha um grau de estabilidade muito alto. Geralmente, este controle independente de cada área é necessário, devido à dificuldade da transmissão de informação entre as áreas por causa das distâncias serem muito grandes. Além desta fato, o fator econômico pesa bastante para que se use o controle desacoplado entre as áreas. Com o decorrer do tempo os sistemas de potência estão ficando cada vez mais complexos e, para maior confiabilidade, necessita-se de um controle mútuo entre as áreas que o compõem. Teoricamente, para um bom controle mútuo entre as áreas, seria necessário a realimentação de todos os estados de uma para outra área. Portanto, propõe-se neste trabalho, por razões físicas e econômicas, somente a realimentação da segunda derivada do ângulo de carga entre as áreas.

4.6 - Implementação do Controle Hierárquico

Para implementar o controle hierárquico, ou controle com dois níveis, utilizou-se o diagrama de bloco da figura 4.2 e realimentou-se a segunda derivada do ângulo de carga da área 1 para a área 2 e vice-versa. O diagrama de bloco da figura 4.3 mostra o C.F.C. proposto com controle mútuo entre as áreas 1 e 2.

Analisando-se as equações (2.10) e (2.14), verifica-se que a aceleração em cada uma das áreas é função da potência mecânica de entrada, da carga local, da parcela de potência relativa à ação do governador de velocidade, do amortecimento, do desvio de frequência, da constante de inércia e da potência de interligação. Nota-se dessa maneira a importância física da aceleração. Quanto ao aspecto econômico, pode-se ver que, com uma única realimentação, o objetivo de melhorar o comportamento total do sistema é conseguido, em vista da dependência da aceleração com relação à carga.

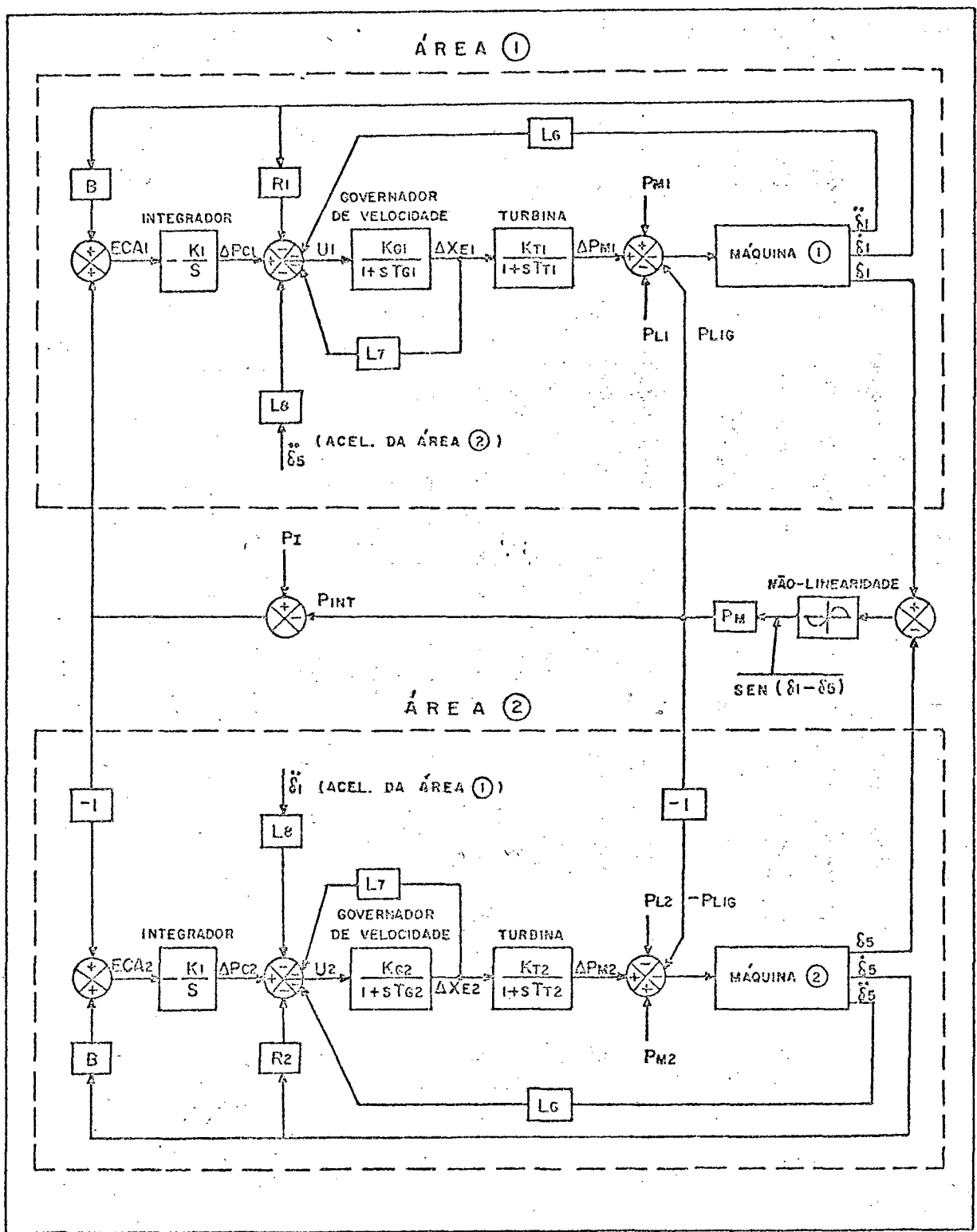


Figura 4.3

CAPÍTULO V
 =====

RESULTADOS E DISCUSSÃO

 5.1 - Resultados e discussão do C.F.C. baseado na teoria do controle convencional.

Para o estudo do C.F.C. convencional foi desenvolvido um programa digital apresentado no Apêndice 1. A linguagem do computador utilizado é o "Basic/PTS". O algoritmo usado tem solução das equações diferenciais que descrevem o modelo é o método de Runge - Ruth de 4a. ordem.

O comportamento do sistema foi observado mudando - se as condições iniciais e verificando o desvio de frequência de cada área, a potência de interligação entre elas e o ângulo de potência para vários pontos de operação.

Os valores dos ganhos do controlador são mostrados na Tabela A.5.

TABELA A.5

$$R_1 = 0,416/2\pi$$

$$B = 0,25/2\pi$$

$$K_I = 1$$

$$R_2 = 0,416/2\pi$$

A figura 5.1, mostra os resultados para uma variação do ângulo de $34,5^\circ$ para 30° . As figuras 5.1a e 5.1b, mostram os desvios de frequência ocorridos nas áreas 1 e 2 devido a esta perturbação. A figura 5.1c, mostra o comportamento da potência de interligação durante a perturbação. Finalmente, a figura 5.1d mostra o comportamento do ângulo de potência.

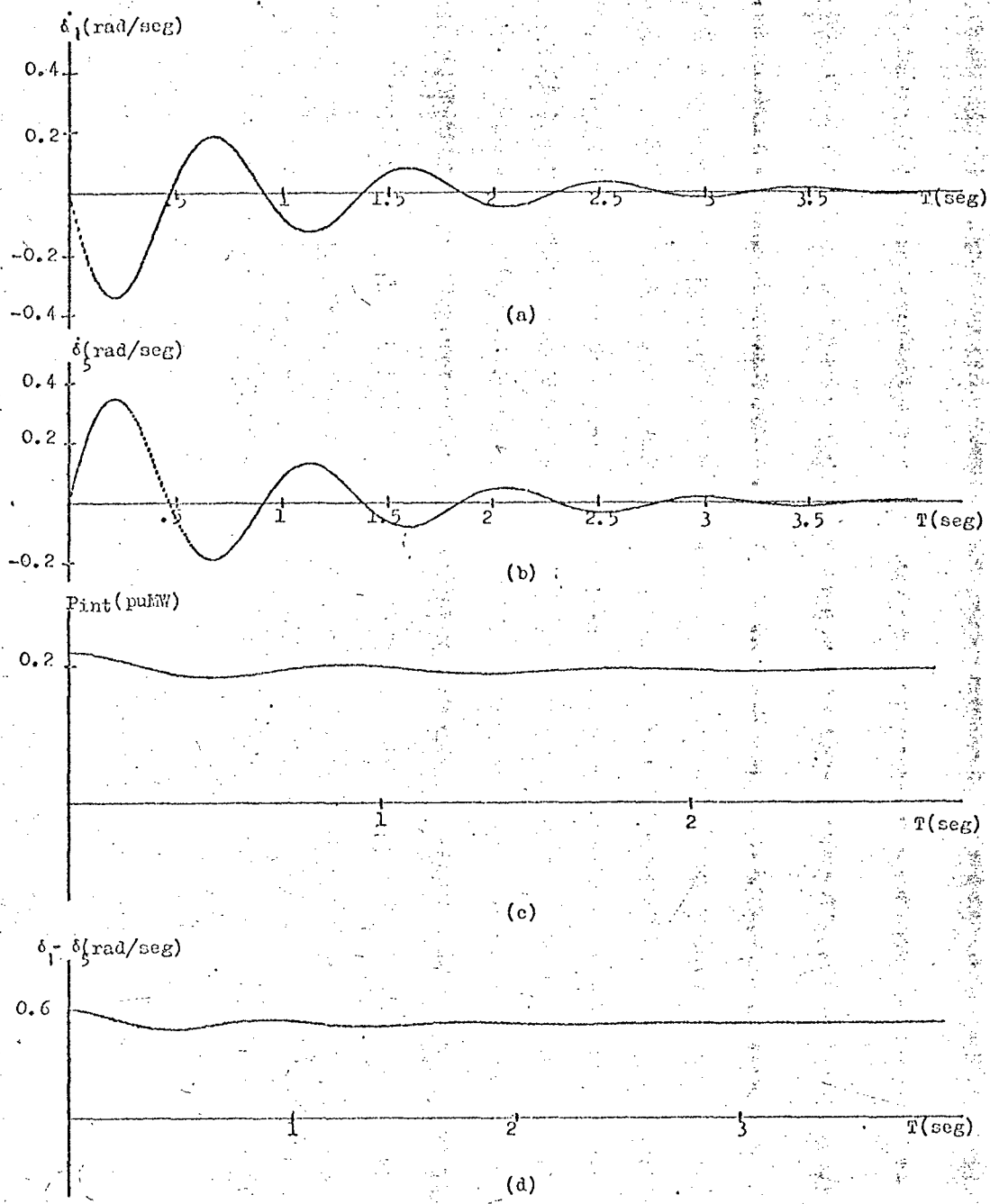


Figura 5.1

- (a) desvio de frequência da área 1
- (b) desvio de frequência da área 2
- (c) potência de interligação
- (d) ângulo de potência

5.2 - Resultados e discussão do C.F.C. proposto considerando o efeito da não-linearidade.

Para o C.F.C. proposto, levando-se em conta o efeito da não-linearidade, desenvolveu-se um programa digital apresentado no Apêndice 2.

Observa-se o comportamento do sistema para vários pontos de operação verificando o desvio da frequência de cada área, da potência de interligação e do ângulo de potência. Com este procedimento os ganhos do controlador foram ajustados.

Os valores dos ganhos do controlador são mostrados na Tabela B.5 .

TABELA B.5

R_1	=	$0,416/2\pi$
B	=	$0,25/2\pi$
K_I	=	1
R_2	=	$0,416/2\pi$
L_6	=	.8
L_7	=	1

As curvas apresentadas na figura 5.2, mostram os resultados para uma variação do ângulo de potência semelhante ao do item anterior, ou seja, de $34,5^\circ$ para 30° . As figuras 5.2.a e 5.2.b, mostram os desvios de frequência ocorridos nas áreas 1 e 2 . A figura 5.2.c, mostra a potência de interligação durante a perturbação e, finalmente, na figura 5.2.d, mostra-se o ângulo de potência durante a perturbação.

Para comparar o C.F.C. convencional com o C.F.C. proposto, foram utilizados o mesmo ponto de operação e a mesma perturbação do item anterior.

Comparando-se as curvas do desvio da frequência da área 1 e 2 , figuras 5.1 e 5.2, nota-se uma melhora substancial no comportamento do sistema. Analisando os dois controladores ,

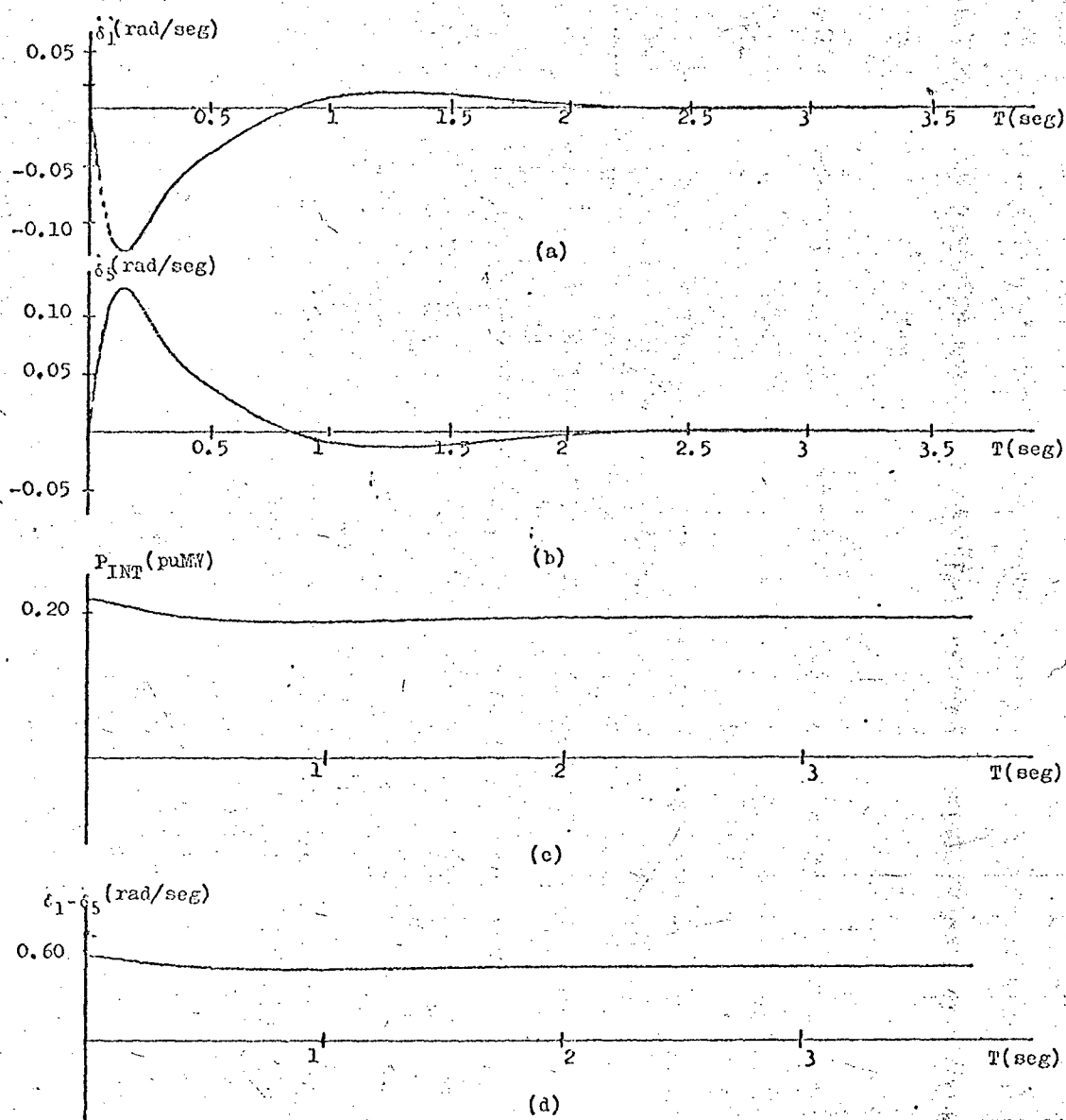


Figura 5.2

- (a) desvio de frequência da área 1
- (b) desvio de frequência da área 2
- (c) potência de aceleração
- (d) ângulo de potência

o convencional e o proposto, nota-se que o controlador proposto apresenta duas entradas a mais que o controlador convencional. Uma dessas entradas é a aceleração a qual desempenha um papel importante no comportamento do sistema.

O ângulo de potência foi observado com o sistema operando inicialmente em 30° para várias condições iniciais. Este procedimento foi utilizado para vários pontos de operação a fim de determinar o limite de estabilidade do sistema. Na figura 5.2.d, como já foi mencionado, mostra o ângulo de potência para o sistema operando em 30° .

5.3 - Resultados e discussão do C.F.C. proposto considerando o efeito da aleatoriedade da carga.

Desenvolveu-se um programa digital para o estudo do C.F.C., levando-se em conta a aleatoriedade da carga. Este programa é mostrado no apêndice 3.

O comportamento do sistema foi observado analisando as curvas do desvio da frequência, do sinal de controle e da carga. Como nos itens anteriores, foram considerados vários pontos de operação e em cada ponto de operação, variaram-se as condições iniciais.

A figura 5.3, mostra os resultados para uma variação do ângulo de $34,5^\circ$ para 30° . As figuras 5.3.a e 5.3.b, mostram os desvios de frequência para as áreas 1 e 2 durante a perturbação. A figura 5.3.c, mostra o sinal de controle da área 2. Finalmente, a curva 5.3.d mostra a variação de carga na área 2.

Através da figura 5.3.d, verifica-se que pequenas variações na carga introduzem grandes variações na frequência e no controle. Para reduzir este efeito que implica em uma atuação exagerada do governador de velocidade, utiliza-se um filtro para suavizar o sinal de entrada do controlador, como já foi ressaltado.

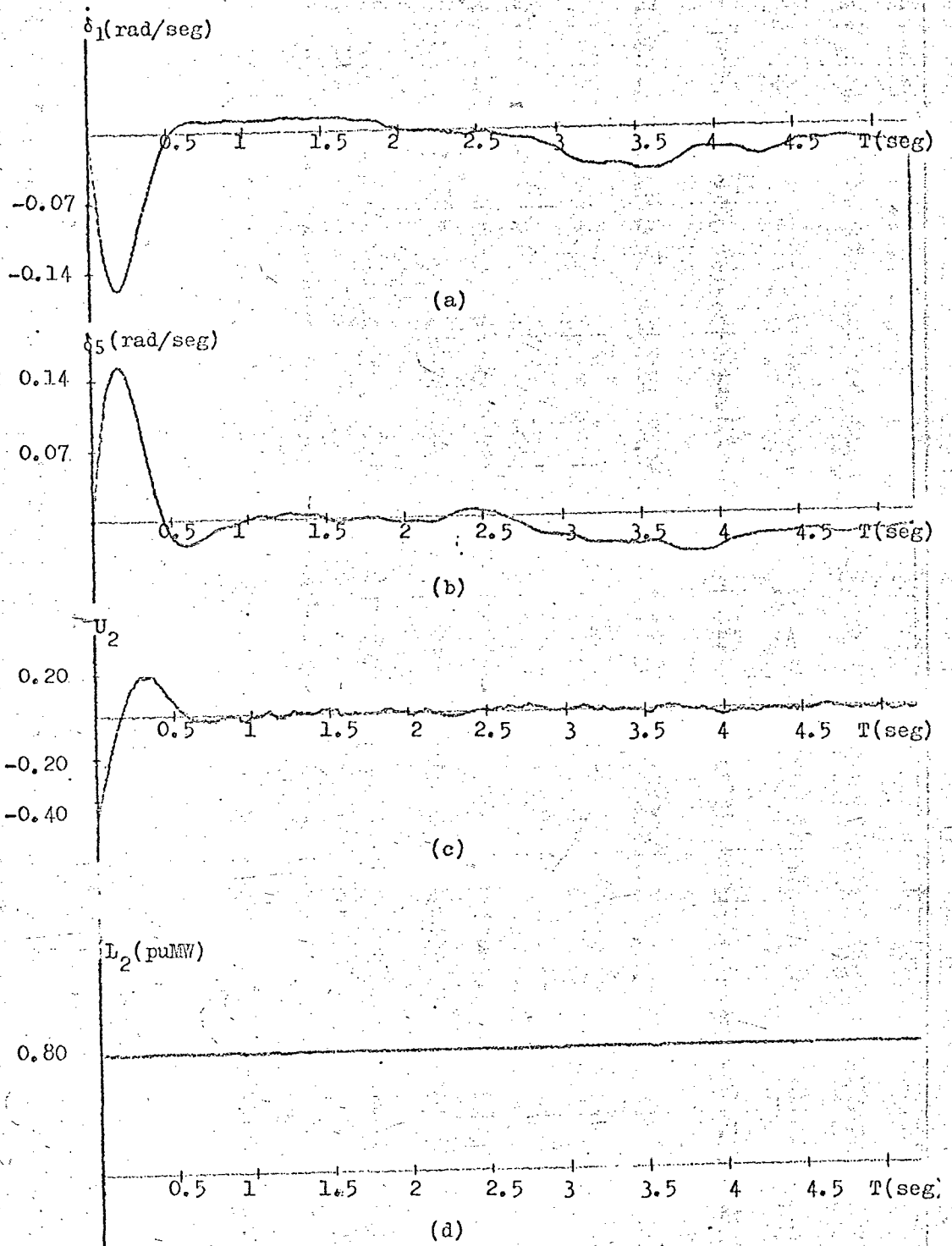


Figura 5.3

- (a) desvio de frequência da área 1
- (b) desvio de frequência da área 2
- (c) sinal de controle da área 2
- (d) carga aleatória da área 2

5.4 - Resultados e discussão sobre a sensibilidade

5.4.1 - O parâmetro P_M

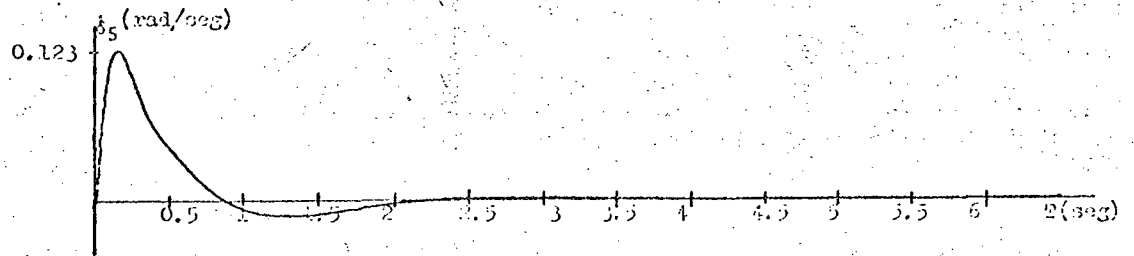
Observando-se o comportamento do ângulo de potência, notou-se que, para o maior valor de P_M , ou seja, 0,6 pu MW, o sistema apresentou uma grande região de estabilidade. Conclui-se que para uma estabilidade maior do sistema convém aumentar a capacidade de interligação, P_M , o que de acordo com a equação (2-18), implica em diminuir a reatância da linha.

5.4.2 - O parâmetro D

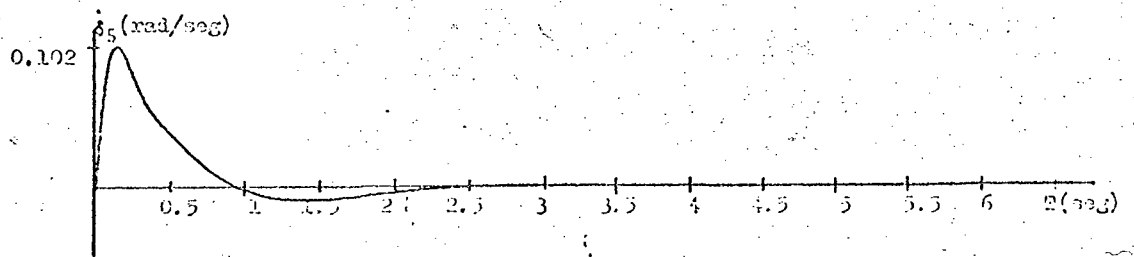
Para o estudo do comportamento do sistema com relação ao parâmetro D, observou-se o comportamento do desvio da frequência da área 2 através da figura 5.4.2. Verifica-se que, para o maior valor de D (0,06 pu MW/rd/seg), as oscilações são mais amortecidas que para os outros dois valores atribuídos a D, ou seja, 0,04 pu MW/rd/seg e 0,02 pu MW/rd/seg.

5.4.3 - O parâmetro H

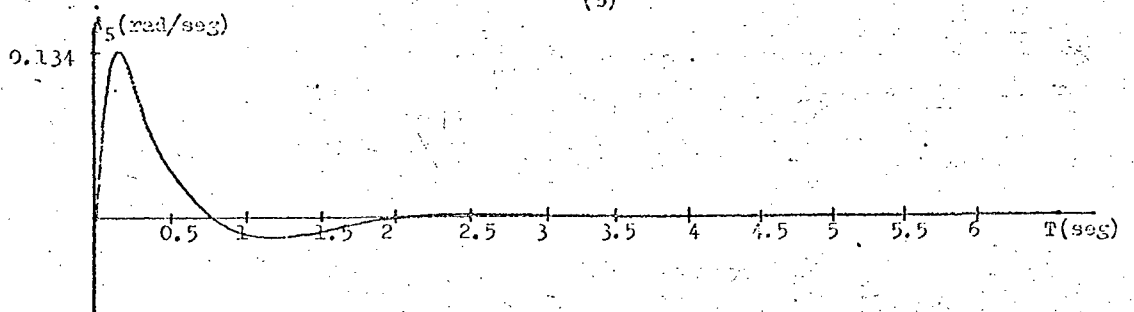
Para se estudar a influência do parâmetro H, observou-se o comportamento do sistema através das curvas do desvio de frequência das áreas 1 e 2. As figuras 5.4.3.a e 5.4.3.b apresentam os desvios de frequência para as áreas 1 e 2 com o mesmo valor de H, ou seja, $H_1 = H_2 = 3$ seg. As figuras 5.4.3.c e 5.4.3.d apresentam os desvios de frequência das áreas 1 e 2 com $H_1 = 3$ seg. e $H_2 = 10$ seg. Analisando as curvas, nota-se um aumento das oscilações de δ_1 , enquanto que δ_5 tornou-se menos oscilante. Conclui-se que quanto maior for a constante de inércia da área, maior será sua capacidade de absorver variações de carga.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.4.2

- (a) desvio de frequência da área 2 com $D = 0.04$
- (b) desvio de frequência da área 2 com $D = 0.06$
- (c) desvio de frequência da área 2 com $D = 0.02$

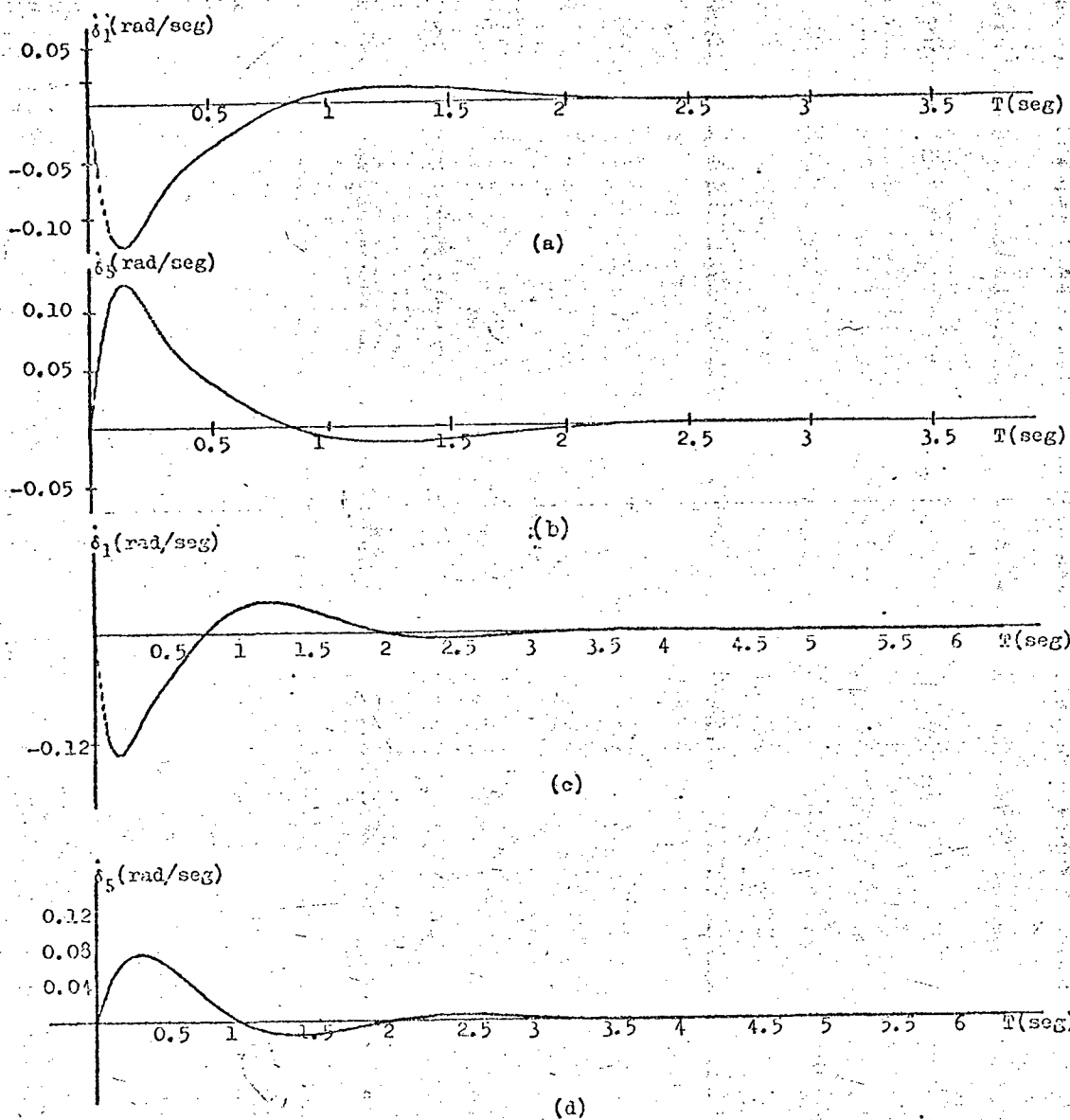


Figura 5.4.3

- (a) desvio de frequência na área 1 com $H_1 = H_2 = 3$ seg.
 (b) desvio de frequência na área 2 com $H_1 = H_2 = 3$ seg.
 (c) desvio de frequência na área 1 com $H_1 = 3$ e $H_2 = 10$ seg
 (d) desvio de frequência na área 2 com $H_1 = 3$ e $H_2 = 10$ seg

5.5 - Resultados e discussão do Controle Hierárquico

Para o estudo do C.F.C. proposto com dois níveis foi desenvolvido um programa digital apresentado no Apêndice 4. Usando as condições de operação como nos itens anteriores, observou-se o comportamento dos desvios de frequência com a realimentação mútua das acelerações.

As figuras 5.5.a e 5.5.b, mostram os desvios de frequência para as áreas 1 e 2, sem a realimentação mútua das acelerações, usando as condições de operação dos itens 5.2 e 5.3.

As figuras 5.5.c e 5.5.d, mostram os desvios de frequência das áreas 1 e 2, com a realimentação recíproca das acelerações, usando as mesmas condições de operação dos itens 5.2 e 5.3.

Comparando as figuras 5.5.a e 5.5.c, nota-se uma melhora do desvio de frequência da área 1 quando há realimentação mútua da aceleração. Isto é consequência da diminuição da ultrapassagem ("overshoot") e da maior rapidez com que o desvio de frequência desaparece.

Finalmente, comparando as figuras 5.5.b e 5.5.c, nota-se, usando realimentação mútua da aceleração, um pequeno aumento na ultrapassagem ("overshoot") do desvio de frequência da área 2 e maior tempo para atingir seu valor de regime permanente.

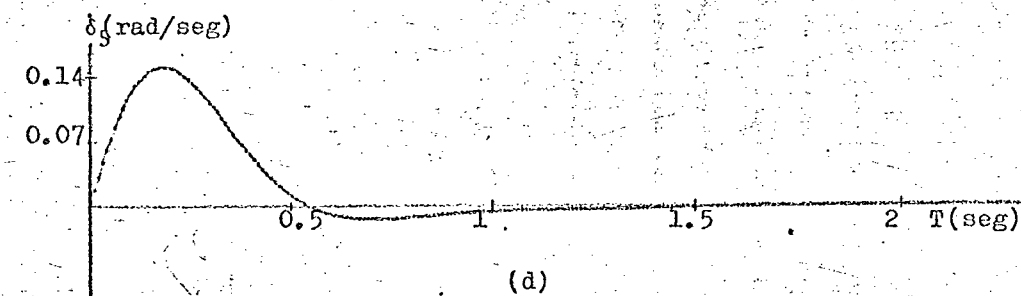
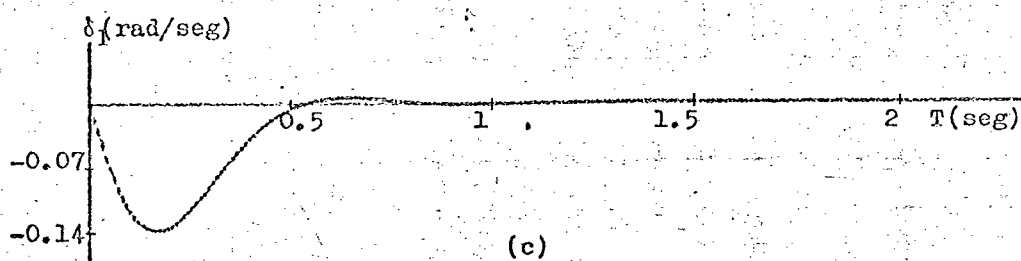
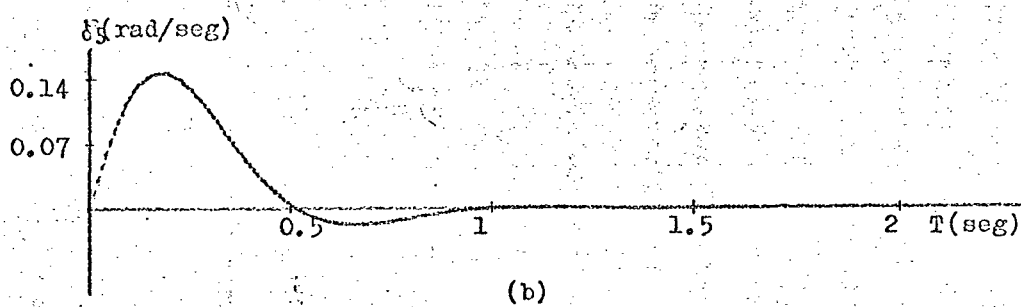
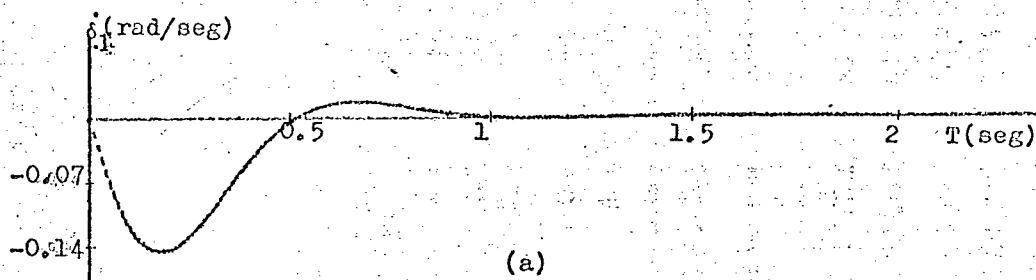


Figura 5.5

- (a) desvio de freqüência da área 1
- (b) desvio de freqüência da área 2
- (c) desvio de freqüência da área 1 com realimentação mútua da aceleração
- (d) desvio de freqüência da área 2 com realimentação mútua da aceleração

CAPÍTULO VIC O N C L U S Õ E S

O modelo matemático para o estudo do C.F.C. é multivariável, não-linear e estocástico.

Usou-se neste trabalho a estrutura do controle ótimo linear, utilizando-se também uma abordagem unificada na determinação da estrutura do controlador. A estrutura do controlador obtida desta maneira é facilmente implementável na prática, pois obtém-se o sinal do controle através da multiplicação dos estados e integral de alguns desses estados por ganhos fixos. Os ganhos são conseguidos por computação iterativa, levando-se em conta a não-linearidade e aleatoriedade da carga.

Comparando-se o projeto proposto neste trabalho com o projeto baseado no C.F.C. convencional, nota-se uma melhora muito grande no comportamento do sistema. Conclui-se também que o controle clássico não é adequado para projetar o C.F.C. , em vista do sistema ser multivariável, não linear e estocástico.

Ao contrário dos sistemas lineares, em que a região de estabilidade é infinita, nos sistemas não-lineares , existe uma região finita de estabilidade. Observou-se que, para grandes perturbações, o sistema perde a estabilidade.

A aleatoriedade da carga provoca uma atuação exagerada do governador de velocidade, desde que não haja uma suavização do sinal de controle por inclusão de um filtro ou redução dos ganhos do controlador.

Concluiu-se, através da sensibilidade, que a reatância da linha de transmissão influi sensivelmente na estabilidade, assim como no amortecimento.

Através do uso do controle hierárquico, notou-se um melhor desempenho no sentido do comportamento dinâmico do sistema.

A implementação do projeto proposto neste trabalho necessita a disponibilidade dos estados, como a aceleração, sinal

do governador, etc. Contudo, nem todos os estados são mensuráveis, desse modo havendo necessidade da utilização do observador de estado²².

O modelo de turbina apresentado neste trabalho representa uma unidade térmica. Entretanto, ele pode ser facilmente estendido de modo a representar uma unidade hidráulica. Para turbinas hidráulicas seria necessário no mínimo mais um bloco, representando a função de transferência que caracteriza a inércia da água.

Neste trabalho desprezou-se a influência do regulador de tensão. O regulador de tensão desempenha um grande papel no amortecimento de oscilações para uma máquina ligada a uma barra infinita. O estudo da influência do regulador de tensão sobre o comportamento dinâmico de sistemas interconectados ainda não está muito desenvolvido. De acordo com Simões Costa²¹, pode-se esperar um melhoramento no comportamento dinâmico para sistemas interconectados. Uma maneira de se levar em conta o efeito do regulador de tensão é escrever as equações da máquina síncrona de acordo com a transformada de Park.

APENDICE 1

LIST

```

1  REM -CONTROLE DE FREQUENCIA E CARGA- C.F.C. CONVENCIONAL
2  DIM X(12), C1(12), C2(12), C3(12), C4(12), Z(12), N(12)
5  H=.01
10  H1=3\H2=3
15  I1=.3
16  L1=.5
17  L2=.8
20  T2=.08
30  F1=.7
40  F2=.6
70  K=1
80  K1=1
90  K1=.2
100  K9=.4
110  B=.25
111  B=B/6.28
115  D=.04
120  R=172.4
121  R=R/6.28
125  H=10
130  X(1)=.6
135  X(2)=0\X(3)=0\X(4)=0
140  X(5)=0
145  X(6)=0\X(7)=0\X(8)=0\X(9)=0\X(10)=0
146  X(11)=0
147  X(12)=0
150  T0=0
155  N0=2500
160  Y0=2500
165  Z0=1600
166  H0=500
170  N1=300
175  H2=2000
176  N3=2000
177  H4=150
180  FOR I=1 TO 4095\CALL "PLOT"(I, X0)\CALL "PLOT"(I, Y0)
185  CALL "PLOT"(I, Z0)\CALL "PLOT"(I, H0)\NEXT I
186  T=T0
192  I1=K9*5*IN(X(1)-X(5))
193  F1=R1-T1\F1=-F1
198  CALL "PLOT"(H1*T, H0+H2*X(2))
200  CALL "PLOT"(H1*T, Y0+H2*X(6))
205  CALL "PLOT"(H1*T, Z0+H3*I1)
206  CALL "PLOT"(H1*T, H0+H4*(X(1)-X(5)))
209  FOR I=1 TO N
210  N(I)=X(I)
220  NEXT I
230  J=1
240  Z(1)=X(2)
250  Z(2)=188.495*(F1+X(4))-D*X(2)-(L1-I1)/H1
260  Z(3)=(-X(3)+X(9)-R*X(2))/T2
270  Z(4)=(-X(4)+K*X(3))/T1
280  Z(5)=X(6)

```



```

290 Z(6)=18B.495*(P2+K(B)-D*K(6)-L2+I1)/H2
300 Z(7)=(-K(7)+K(10)-R*K(6))/T2
310 Z(8)=(-K(8)+K*K(7))/T1
320 Z(9)=-K1*(F1+B*K(2))
330 Z(10)=-K1*(-F1+B*K(6))
340 IF J=1 THEN 380
350 IF J=2 THEN 450
360 IF J=3 THEN 510
370 IF J=4 THEN 580
380 FOR I=1 TO N
390 C1(I)=Z(I)
400 X(I)=N(I)+C1(I)*H/2
410 NEXT I
420 T=T0+H/2
430 J=2
440 GO TO 240
450 FOR I=1 TO N
460 C2(I)=Z(I)
470 X(I)=N(I)+C2(I)*H/2
480 NEXT I
490 J=3
500 GO TO 240
510 FOR I=1 TO N
520 C3(I)=Z(I)
530 X(I)=N(I)+C3(I)*H
540 NEXT I
550 T=T0+H
560 J=4
570 GO TO 240
580 FOR I=1 TO N
590 C4(I)=Z(I)
600 N(I)=N(I)+H*(C1(I)+2*C2(I)+2*C3(I)+C4(I))/5
610 X(I)=N(I)
620 NEXT I
630 T0=T
640 GO TO 180
650 STOP
700 END
800 STOP

```

READY

APÊNDICE 2

LISP

```

1  REM -CONTROLE DE FREQUENCIA E CARGA - C.F.C. PROPOSTO
2  DIM X(12), C1(12), C2(12), C3(12), C4(12), Z(12), W(12)
5  H=.01
10  H1=3\H2=3
11  L7=1
12  L4=.3
15  I1=.3
16  L1=.5
17  L2=.8
20  T2=.08
30  P1=.7
40  P2=.6
70  K=1
80  K1=1
90  R1=.2
100 K9=.4
110 B=.25
111 B=B/6.28
115 D=.04
120 R=1/2.4
121 R=R/6.28
125 H=10
130 X(1)=.5
135 X(2)=0\X(3)=0\X(4)=0
140 X(5)=0
145 X(6)=0\X(7)=0\X(8)=0\X(9)=0\X(10)=0
146 X(11)=0
147 X(12)=0
150 T0=0
155 X0=2500
160 Y0=3500
165 Z0=1600
166 N0=500
170 H1=300
175 H2=2000
176 H3=2000
177 H4=150
180 FOR I=1 TO 4095\CALL "PLOT"(I,X0)\CALL "PLOT"(I,Y0)
185 CALL "PLOT"(I,Z0)\CALL "PLOT"(I,N0)\NEXT I
186 T=T0
192 I1=K9*SIN(X(1)-X(5))
193 F1=R1-I1\F1=-F1
194 H5=188.495*(P1+X(4)-D*X(2)-L1-I1)/H1
195 H6=188.495*(P2+X(8)-D*X(6)-L2+I1)/H2
196 U2=-L4*H6-R*X(6)-L7*X(7)-X(10)
198 CALL "PLOT"(H1*T, X0+H2*X(2))
200 CALL "PLOT"(H1*T, Y0+H2*X(6))
205 CALL "PLOT"(H1*T, Z0+H3*I1)
206 CALL "PLOT"(H1*T, N0+H4*(X(1)-X(5)))

```

```

209 FOR I=1 TO N
210 N(I)=X(I)
220 NEXT I
230 J=1
240 Z(1)=X(2)
250 Z(2)=188.495*(P1+X(4)-D*X(2)-L1-I1)/H1
260 Z(3)=(-X(3)+X(9)-R*X(2))/T2
265 Z(3)=Z(3)-L7*X(3)-L4*H5
270 Z(4)=(-X(4)+K*X(3))/T1
280 Z(5)=X(6)
290 Z(6)=188.495*(P2+X(8)-D*X(6)-L2+I1)/H2
300 Z(7)=(-X(7)+X(10)-R*X(6))/T2
305 Z(7)=Z(7)-L7*X(7)-L4*H5
310 Z(8)=(-X(8)+K*X(7))/T1
320 Z(9)=-K1*(F1+B*X(2))
330 Z(10)=-K1*(-F1+B*X(6))
340 IF J=1 THEN 380
350 IF J=2 THEN 450
360 IF J=3 THEN 510
370 IF J=4 THEN 580
380 FOR I=1 TO N
390 C1(I)=Z(1)
400 X(I)=N(I)+C1(I)*H/2
410 NEXT I
420 T=T0+H/2
430 J=2
440 GO TO 240
450 FOR I=1 TO N
460 C2(I)=Z(1)
470 X(I)=N(I)+C2(I)*H/2
480 NEXT I
490 J=3
500 GO TO 240
510 FOR I=1 TO N
520 C3(I)=Z(1)
530 X(I)=N(I)+C3(I)*H
540 NEXT I
550 T=T0+H
560 J=4
570 GO TO 240
580 FOR I=1 TO N
590 C4(I)=Z(1)
600 N(I)=N(I)+H*(C1(I)+2*C2(I)+2*C3(I)+C4(I))/6
610 X(I)=N(I)
620 NEXT I
630 T0=T
640 GO TO 186
650 STOP
700 END
800 STOP

```

READY

APENDICE 3

```

LIST
1  PEM -CONTROLE DE FREQUENCIA E DE CARGA- ALEATORIEDADE DA CARGA-
2  DIM X(12), C1(12), C2(12), C3(12), C4(12), Z(12), N(12)
5  H=.01
6  FB=10
7  F2=10
8  A7=1.5
9  A8=1.5
10 H1=3\H2=3
11 L7=1
12 L4=.3
15 I1=.3
20 T2=.08
30 P1=.7
40 P2=.6
70 K=1
80 K1=1
90 K1=.2
100 K9=.4
110 B=.25
111 D=B/6.28
115 D=.04
120 R=1/2.4
121 R=R/6.28
125 H=12
130 X(1)=.6
135 X(2)=0\X(3)=0\X(4)=0
140 X(5)=0
145 X(6)=0\X(7)=0\X(8)=0\X(9)=0\X(10)=0
146 X(11)=0
147 X(12)=0
150 T0=0
155 N0=2500
160 V0=3500
165 Z0=1600
166 N0=500
170 H1=300
175 H2=2000
176 H3=2000
177 H4=150
180 FOR I=1 TO 4095\CALL "PLOT"(I, X0)\CALL "PLOT"(I, Y0)
185 CALL "PLOT"(I, Z0)\CALL "PLOT"(I, N0)\NEXT I
186 T=T0
190 L1=.5+A7*X(11)
191 L2=.8+A8*X(12)
192 I1=K9*SIN(X(1)-X(5))
193 F1=P1-I1\F1=-F1
194 A5=180.495*(P1+X(4)-D*X(2)-L1-I1)/H1
195 A6=180.495*(P2+X(8)-D*X(6)-L2+I1)/H2
196 U2=-L4*A6-R*X(6)-L7*X(7)-X(10)
198 CALL "PLOT"(N1*J, X0+H2*X(2))
200 CALL "PLOT"(N1*I, Y0+H2*X(6))
205 CALL "PLOT"(N1*T, Z0+H3*U2)
206 CALL "PLOT"(N1*T, H0+H4*L2)
209 FOR I=1 TO N
210 N(I)=X(I)

```

```

220 NEXT I
230 J=1
240 Z(1)=X(2)
250 Z(2)=188.495*(P1+X(4))-D*X(2)-L1-I1)/H1
260 Z(3)=(-X(3)+X(9)-R*X(2))/T2
265 Z(3)=Z(3)-L7*X(3)-L4*A5
270 Z(4)=(-X(4)+K*X(3))/T1
280 Z(5)=X(6)
290 Z(6)=188.495*(P2+X(8))-D*X(6)-L2+I1)/H2
300 Z(7)=(-X(7)+X(10)-R*X(6))/T2
305 Z(7)=Z(7)-L7*X(7)-L4*A6
310 Z(8)=(-X(8)+K*X(7))/T1
320 Z(9)=-K1*(F1+B*X(2))
330 Z(10)=-K1*(-F1+B*X(6))
332 Z(11)=(RND(0)-.5-X(11))/F8
334 Z(12)=(RND(0)-.5-X(12))/F2
340 IF J=1 THEN 380
350 IF J=2 THEN 450
360 IF J=3 THEN 510
370 IF J=4 THEN 580
380 FOR I=1 TO N
390 C1(I)=Z(1)
400 X(I)=N(I)+C1(I)*H/2
410 NEXT I
420 T=T0+H/2
430 J=2
440 GO TO 240
450 FOR I=1 TO N
460 C2(I)=Z(1)
470 X(I)=N(I)+C2(I)*H/2
480 NEXT I
490 J=3
500 GO TO 240
510 FOR I=1 TO N
520 C3(I)=Z(1)
530 X(I)=N(I)+C3(I)*H
540 NEXT I
550 T=T0+H
560 J=4
570 GO TO 240
580 FOR I=1 TO N
590 C4(I)=Z(1)
600 N(I)=N(I)+H*(C1(I)+2*C2(I)+2*C3(I)+C4(I))/6
610 X(I)=N(I)
620 NEXT I
630 T0=T
640 GO TO 186
650 STOP
700 END
800 STOP

```

READY

APÊNDICE 4

LIST

```

1  REM -CONTROLE DE FREQUENCIA E CARGA- CONTROLE HIERARQUICO
2  DIM X(12), C1(12), C2(12), C3(12), C4(12), Z(12), N(12)
5  H=.01
10  H1=3\H2=3
11  L7=1
12  L4=.3
15  I1=.3
20  I2=.08
21  L1=.5
22  L2=.8
30  P1=.7
31  R1=-.1
32  R2=.01
40  P2=.6
70  K=1
80  K1=.5
90  R1=.2
100  K9=.4
110  D=.25
111  D=D/6.28
115  D=.04
120  R=1/2.4
121  R=R/6.28
125  H=10
130  X(1)=.6
135  X(2)=0\X(3)=0\X(4)=0
140  X(5)=0
145  X(6)=0\X(7)=0\X(8)=0\X(9)=0\X(10)=0
146  X(11)=0
147  X(12)=0
150  Y0=0
155  X0=2500
160  Y0=3000
165  Z0=1500
166  H0=500
170  N1=700
175  H2=3000
176  H3=2000
177  H4=150
180  FOR I=1 TO 4095\CALL "PLOT"(I, X0)\CALL "PLOT"(I, Y0)
185  I=1.01*I\NEXT I
186  T=T0
192  I1=K9*SIN(X(1)-X(5))
193  F1=R1-I1\F1=-F1
194  R5=188.495*(P1+X(4)-D*X(2)-L1-I1)/H1
195  R6=188.495*(P2+X(8)-D*X(6)-L2+I1)/H2
198  CALL "PLOT"(N1*T, X0+H2*X(2))
200  CALL "PLOT"(N1*T, Y0+H2*X(6))
209  FOR I=1 TO N *
210  N(I)=X(I)
220  NEXT I
230  J=1
240  Z(1)=X(2)
250  Z(2)=188.495*(P1+X(4)-D*X(2)-L1-I1)/H1

```

```

260 Z(3)=(-X(3)+X(9)-R*X(2))/T2
265 Z(3)=Z(3)-L7*X(3)-L4*A5
266 Z(3)=Z(3)-R6*A1
270 Z(4)=(-X(4)+K*X(3))/T1
280 Z(5)=X(5)
290 Z(6)=188.495*(P2+X(8)-D*X(6)-L2+I1)/H2
300 Z(7)=(-X(7)+X(10)-R*X(6))/T2
305 Z(7)=Z(7)-L7*X(7)-L4*A6
306 Z(7)=Z(7)-R5*A2
310 Z(8)=(-X(8)+K*X(7))/T1
320 Z(9)=-K1*(F1+B*X(2))
330 Z(10)=-K1*(-F1+B*X(6))
340 IF J=1 THEN 380
350 IF J=2 THEN 450
360 IF J=3 THEN 510
370 IF J=4 THEN 580
380 FOR I=1 TO N
390 C1(I)=Z(1)
400 X(I)=N(I)+C1(I)*H/2
410 NEXT I
420 T=T0+H/2
430 J=2
440 GO TO 240
450 FOR I=1 TO N
460 C2(I)=Z(1)
470 X(I)=N(I)+C2(I)*H/2
480 NEXT I
490 J=3
500 GO TO 240
510 FOR I=1 TO N
520 C3(I)=Z(1)
530 X(I)=N(I)+C3(I)*H
540 NEXT I
550 T=T0+H
560 J=4
570 GO TO 240
580 FOR I=1 TO N
590 C4(I)=Z(1)
600 N(I)=N(I)+H*(C1(I)+2*C2(I)+2*C3(I)+C4(I))/6
610 X(I)=N(I)
620 NEXT I
630 T0=T
640 GO TO 186
650 STOP
700 END
800 STOP

```

READY

REFERÊNCIAS

1. ELGERD, O.I. e FOSHA, C.E., JR. - Optimum Megawatt Frequency Control of Multiarea Electric Energy Systems". Trans. IEEE-PAS, 4(89):556-563, 1970.
2. FOSHA, C.E., JR. e ELGERD, O.I. - "The Megawatt - Frequency Control Problem : A New Approach Via Optimal Control Theory". Trans. IEEE-PAS, 4(89):563-577, 1970.
3. ELGERD, O.I. - "Electric Energy Systems Theory : An Introduction". New York, McGraw - Hill Book Company, 1971.
4. CAVIN III, R.K., BUDGE, M.C. e RASMUSSEN, P. - "An Optimal Linear Systems Approach to Load - Frequency Control". Trans. IEEE-PAS, 6(90):2472-2482, 1971.
5. CALOVIC, M.S. - "Linear Regulator Design for a Load and Frequency Control". Trans. IEEE-PAS, 6(91):2271-2285, 1972.
6. MINISEY, S.M. e BOHN, E.V. - "Optimum Load - Frequency Continuous Control With Un Known Deterministic Power Demand". Trans. IEEE-PAS, 5(91):1910-1915, 1972.
7. GLOVER, J.D. e SCHWEPPE, F.C. - "Advanced Load Frequency Control". Trans. IEEE-PAS, 5(91):2095-2103, 1972.
8. KWATNY, H.G., Kalnitsky, K.C. e BHATT, A. - "An Optimal Tracking Approach To Load - Frequency Control". Trans. IEEE-PAS, 5(94):1635-1643, 1975.
9. HANDSCHIN, E. - "Real - Time Control of Electric Power Systems". Amsterdam, Elsevier Publishing Company, 1972.
10. DEMELO, F.P., MILLS, R.J. e B'RELLS, W.F. - "Automatic Generation Control, Part I. Process Modeling". Trans. IEEE-PAS, 2(92):710-715, 1973.

11. ZABORSKY, J. e RITTENHOUSE, J.W. - "Electric Power Transmission". Volume 2, New York, The Rensselaer Bookstore 1969.
12. SHERY, A. - "Modern Power Station Practice". Oxford, Pergamon - Press 1971
13. ROSEN, G.H., WISMER, D.A. - "A sub-optimal feedback controller for on-line computer applications". Int.J. Control, 1(15):115-128, 1972.
14. GLESS, G.E. - "Direct Method of Liapunov Applied to Transient Power Systems Stability". Trans. IEEE-PAS, 2(85):159-168, 1966.
15. EL-ABIAD, A.H. e NAGAPPAN, K. - "Transient Stability Region for Multimachine Power Systems". Trans. IEEE-PAS, 2(85):169-179, 1966.
16. WILLEMS, J.L. - "Optimum Lyapunov Functions and Stability Regions for Multimachine Power Systems". Proc. IEE, 3(90):23-36, 1971.
17. LUDERS, G.A. - "Transient Stability of Multimachine Power Systems Via The Direct Method of Lyapunov". Trans. IEEE-PAS, 1(90):23-36, 1971.
18. SCOTT, R.E. e-ESSIGMANN, M.W. - "Linear Circuits - Part 2 Frequency - Domain Analysis". Addison - Wesley Publishing Company, Inc., Tokyo, 1964.
19. PHILIP, P.F. - "Communication Systems Design : Line-of-Sight and Trop - Scatter Systems". McGraw - Hill Book Company, 1972.
20. SIMÕES COSTA, A.J.A. - "Uma Abordagem para o Projeto de Sistemas de Excitação". Florianópolis, 1975 (Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina).

21. SOARES DA COSTA, N.V. - "Análise da Influência do Ruido, Variação de Parâmetros e Não-Linearidade sobre os Observadores de Estado". Florianópolis, 1976 (Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina).

BIBLIOGRAFIA

RODRIGUES, A.P. - "Simulação Analógica de um Gerador Síncrono", Florianópolis, 1975. (Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina).

MARTINS, D.A. - "Interface entre um Minicomputador PDP 11/40 em um Computador Analógico RA 770", Florianópolis, 1975. (Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina).

MENEZES FILHO, S. - "Confiabilidade no Planejamento e Operação de Sistemas de Potência", Florianópolis, em elaboração. (Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina).