

O USO DO OBSERVADOR NÃO-LINEAR SUJEITO A AÇÃO DO
RÚIDO E DA INCERTEZA SOBRE OS PARÂMETROS

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-Graduação.

Carlos Zanchin

Prof. Carlos Inácio Zanchin, MSc

Coordenador do curso de Pós-Graduação em Eng. Elétrica

Rajamani

Prof. Rajamani Doraiswami, Ph.D
-Orientador-

Banca Examinadora:

Hans Helmut Zurn

Prof. Hans Helmut Zurn, Ph.D.

Luiz Gonzaga de Souza Fonseca

Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.

Walter Celso de Lima

Prof. Walter Celso de Lima, Doc. Liv.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

"O USO DO OBSERVADOR NÃO-LINEAR SUJEITO A AÇÃO DO RUÍDO
E DA INCERTEZA SOBRE OS PARÂMETROS DO SISTEMA"

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do grau de MESTRE EM CIENCIAS.

NICOLAU VELOSO DA COSTA

JULHO - 1976

À Lia, minha esposa

Ao meu filho

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Rajamani Doraiswami, pelo inestimável apoio e entusiasmo com que orientou este trabalho.

À CAPES, BMDE e à FIMEP pela ajuda financeira.

SUMÁRIO

SIMBOLOGIA	vii
------------	-----

CAPITULO - I

INTRODUÇÃO	2
------------	---

CAPITULO II

OBSERVADOR COM A MESMA ESTRUTURA DO SISTEMA	6
---	---

2.1 - Comentário	6
------------------	---

2.2 - Sistema Linear	6
----------------------	---

2.2.1 - Malha Aberta	6
----------------------	---

2.2.1.1 - Sistema Perfeitamente Conhecido	7
---	---

2.2.1.2 - Incerteza nos Parâmetros do Sistema	9
---	---

2.2.1.3 - Influência do Ruído	10
-------------------------------	----

2.2.2-Malha Fechada	10
---------------------	----

2.2.2.1 - Sistema Perfeitamente conhecido	11
---	----

2.2.2.2 - Incerteza nos Parâmetros do Sistema	15
---	----

2.2.2.3 - Influência do Ruído	16
-------------------------------	----

2.3 - Aplicação	17
-----------------	----

CAPITULO III

OE NÃO- LINEAR PARA SISTEMA NÃO-LINEAR	23
--	----

3.1 - Argumentos da Não-Linearidade Não Mensurável	23
--	----

3.1.1 - Sistema Perfeitamente Conhecido	25
---	----

3.1.2 - Incerteza Quanto aos Parâmetros do Sistema	25
--	----

3.1.3 - Influência do Ruído	26
-----------------------------	----

3.1.4 - Aplicação	26
-------------------	----

3.1.5 - Comentário	30
--------------------	----

3.2 - Argumento da Não-Linearidade Mensurável	30
---	----

3.2.1 - Sistema Perfeitamente Conhecido	31
---	----

3.2.2 - Incerteza Quanto aos Parâmetros do Sistema_	32
3.2.3 - Influência do Ruído_	32
3.2.4 - Aplicação_	33

CAPITULO - IV

OBSERVADOR NÃO-LINEAR PARA O SISTEMA LINEAR SEM POLO NA ORIGEM_	40
4.1 - Comentário_	40
4.2 - Sistema Perfeitamente Conhecido_	44
4.3 - Incerteza Quanto aos Parâmetros do Sistema_	45
4.4 - Influência do Ruído_	45
4.5 - Aplicação_	46
4.6 - Observação sobre o Observador Não-Linear Para Sistema Linear Sem Polo na Origem_	50

CAPITULO V

CONCLUSÕES_	52
APÊNDICE - I - Programa Digital_	54
APÊNDICE - II - Equipamento Utilizado_	57
REFERÊNCIAS_	58

S I M B O L O G I A

- A - matriz de realimentação do sistema
- Ao - matriz cujos elementos são os valores nominais dos parâmetros do sistema
- b - matriz coluna cujos elementos dão a contribuição de entrada a cada variável de estado
- c - matriz que fornece a combinação dos estados para a saída do sistema
- D - amortecimento da máquina
- ΔA - diferença entre as matrizes dos parâmetros do sistema e do observador
- E - vetor coluna representando o erro entre os vetores estado real e estado estimado
- Ec - valor crítico de E
- E* - vetor coluna que representa o erro entre os vetores estados considerando o ruído
- e_i - componentes do vetor E
- f - matriz coluna que representa os ganhos dos estados estimados
- G - matriz de realimentação do observador
- G(jw) - função de transferência da parte linear do sistema
- H - matriz que fornece a ordem de prioridade com que cada estado deve convergir, em regime, para o valor desejado
- I - constante de inércia da máquina
- J - critério de desempenho
- j - unidade imaginária
- k - matriz coluna que fornece o ganho com o qual o erro é realimentado
- ki - elemento de k
- L - matriz solução da equação de Riccati

- P_1 - potencia máxima transmitida
- P_2 - potencia mecânica
- Q - matriz que fornece a ordem de prioridade do comportamento dos estados no transitório
- R - matriz que fornece os pêsos das retrições sobre o controle
- t_0 - instante inicial
- t_f - instante final
- T_1 - constante de tempo do governador
- T_2 - constante de tempo da turbina
- μ - controle
- μ^* - controle ótimo
- X - vetor coluna que representa os estados do sistema
- \hat{X} - vetor coluna que representa os estados do observador
- X_d - matriz coluna, representando os valores desejados para os estados do sistema em regime
- x_i - componentes do vetor X
- \hat{x}_i - componentes do vetor \hat{X}
- Y - variável observada do sistema
- ω - velocidade angular
- O - matriz zero
- $\phi()$ - função real satisfazendo a condição de setor
- $\psi()$ - função não-linear do tipo saturação
- η - variável aleatória representativa do ruído branco com distribuição uniforme

R E S U M O

A lei de controle ótimo exige o conhecimento de todas as variáveis de estado. Tal situação é dificilmente encontrada. Uma solução para o problema é a utilização do observador de estado.

Entretanto, quando o sistema é não-linear a abordagem frequentemente encontrada é a linearização do sistema e a utilização do observador não-linear de Luenberger.

Aqui, propõe-se a utilização de observadores não-lineares tanto para sistemas não-lineares como para sistemas lineares sem polos na origem.

As vantagens do uso de tais observadores tornam-se mais evidentes quando há incerteza quanto aos parâmetros do sistema ou quando a influência do ruído é considerada.

Sugere-se ainda a utilização do observador como alarme contra a instabilidade do sistema.

A B S T R A C T

In order to obtain the optimal control law, it's necessary the knowledge of all state variables.

One solution for the problem is the use of state observer.

When the system is nonlinear the approach often found, is the linearization of the system and the utilization of the Luenberger's linear observer.

The use of nonlinear observer for nonlinear system and linear system without pole in the origin is proposed.

The advantages of the use of such observer are more important when there is uncertainty related with the parameters of system or when the noise is considerable.

The use of observer as alarm is also suggested.

C A P I T U L O

P R I M E I R O

CAPITULO PRIMEIRO

INTRODUÇÃO

É bastante conhecido que a realimentação dos estados de um sistema pode deslocar seus polos da maneira que se deseje, desde que o sistema seja controlável (2) (10).

É também muito conhecido que a lei de controle ótimo é uma combinação linear de todos os estados do sistema e portanto exige o conhecimento destes estados (6), (7). Entretanto, o que ocorre na prática é o conhecimento de apenas alguns estados do sistema, enquanto outros permanecem imensuráveis ou por falta de equipamentos específicos ou pela própria natureza do estado. Isto faz com que a utilidade prática desta teoria, seja restrita (8).

A preocupação principal em grande número dos trabalhos hoje publicados, em especial na área de sistemas de potencia, é a obtenção de um controle o mais próximo possível do controle ótimo.

Rekasius (14), em 1967, sugeriu um controle sub-ótimo com o vetor estado parcialmente mensurável. Neste trabalho, a lei de controle ótimo é considerada como um objetivo ou ideal a ser alcançado e é tomada como uma medida de comparação. A lei de controle ótimo admissível é aquela que minimiza o máximo desvio do índice de desempenho em comparação com aquele obtido com a lei de controle ideal.

Entretanto, em 1968, Ramar & Ramaswami (13) mostraram que o problema do controle ótimo com realimentação incompleta dos estados como formulado e resolvido por Rekasius não tem muita utilidade prática devido a algumas dificuldades computacionais, em especial para sistemas de ordem superior a segunda.

Outra maneira bastante conhecida de se obter os estados não mensuráveis de um sistema de orden n , consiste em derivar sua saída $(n - 1)$ vezes e então combina-las adequadamente (19).

A desvantagem do procedimento citado acima é a necessidade do uso de diferenciadores.

Em 1964, Luenberger (9) propôs o uso do observador de estados com a finalidade de estimar aqueles não mensuráveis. Este processo tem a vantagem de não utilizar diferenciadores, no entanto, quando utilizado na presença de ruído não reconstrói os estados de uma maneira ótima.

O observador de ordem completa, como o que será tratado aqui, é um sistema com estrutura semelhante a daquele que é observado, excitado pela mesma entrada e corrigido por um sinal proporcional ao erro entre as saídas.

O emprego do observador tem o efeito de adicionar seus polos aos polos do sistema. Entretanto, desde que este seja observável os polos do observador podem ser escolhidos arbitrariamente (9). Assim, com o objetivo de causar a mínima deterioração da resposta do sistema os polos do observador são feitos muito mais negativos que os do sistema. Então, o efeito do observador decairá rapidamente (15).

Sarma & Deekshatulu (15) mostraram que o desempenho de um sistema linear com controlador ótimo utilizando um observador é muito próximo daquele obtido com o controlador ótimo ideal, isto é, com todos os estados mensuráveis.

Entretanto se o ruído for considerado, os polos do observador não poderão estar muito afastados da origem. Como consequência, o efeito do observador não desaparecerá tão rapidamente. Isto significa que se as condições iniciais do sistema e do observador não são as mesmas ou se há alguma perturbação na trajetória dos estados, os estados do observador não alcançam de imediato os do sistema. Então, é importante no projeto do observador assumir um compromisso entre os objetivos. É desejável que a sua dinâmica seja mais rápida que a do sistema que ele observa, mas não tão rápida ao ponto de apresentar a característica indesejável de um diferenciador.

A potencialidade do uso do observador tem aumentado bastante com o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos computadores digitais. Vários trabalhos na área de sistemas de potência (3) (12) , utilizaram o controle ótimo sem que nem todos os estados fossem mensuráveis, sugerindo para tal o uso do observador. Outras publicações na mesma área não apenas sugerem, mas utilizam o observador com

o propósito de obter os estados não acessíveis do sistema, como Ueda & Takata (18), em 1975.

Como já foi mencionado anteriormente, o observador tem seu desempenho prejudicado na presença do ruído. O mesmo acontece quando não se tem precisão quanto aos parâmetros do sistema. Além disto, quando o sistema é não-linear o procedimento que vem sendo adotado é o de linearizar o sistema e então utilizar um observador linear.

Assim, vem se tornando necessário que se façam estudos mais detalhados sobre os observadores.

Neste trabalho, apresenta-se tres observadores não lineares. Dois deles para sistemas não-lineares e o terceiro para sistemas lineares sem polos na origem. O objetivo é diminuir a sensibilidade com relação ao ruído e a falta de precisão sobre os parâmetros do sistema. Sugere-se, ainda, a utilização do observador como alarme contra a instabilidade do sistema, pois, como será mostrado, mesmo na instabilidade o erro entre os estados reais e os estimados converge para zero.

C A P I T U L O

S E G U N D O

CAPITULO SEGUNDO

OBSERVADOR COM A MESMA ESTRUTURA DO SISTEMA

2.1 - COMENTÁRIO

Este capítulo foi dividido em duas partes. Na primeira foi feita uma revisão da teoria do observador para sistemas lineares:

Foram consideradas duas situações:

- a - Malha aberta
- b - Malha fechada

Em ambas situações foram estudados os seguintes aspectos:

- a - Sistema perfeitamente conhecido.
- b - Incerteza quanto aos parâmetros do sistema.
- c - Influência do ruído.

Na segunda parte, foi feita a apresentação de um observador não-linear para um sistema não linear.

No final do capítulo foi feita uma aplicação deste observador sobre uma máquina síncrona (12).

2.2 - SISTEMA LINEAR

2.2.1-MALHA ABERTA

Aqui, será concentrada a atenção para o problema em que, necessita-se manter um conhecimento periódico sobre o comportamento dos estados de um sistema linear.

Suponha-se que alguns dos estados deste sistema não sejam mensuráveis.

Uma solução para o problema, é utilizar um observador em malha aberta e então medir os estados do observador.

Para isto, entretanto, precisa-se saber quão próximos estão os estados do observador daqueles do sistema.

Como será mostrado, se o sistema for perfeitamente conheci-

do e livre de ruído, a aproximação entre os estados pode ser feita arbitrariamente grande. Porém, se os parâmetros do sistema não são perfeitamente conhecidos ou se a presença do ruído é considerada, a aproximação entre os estados não é tão livre.

As situações mencionadas acima, serão considerada nos sub itens seguintes.

2.2.1.1 - SISTEMA PERFEITAMENTE CONHECIDO

O sistema n-dimensional é monovariável

$$\dot{\hat{X}} = G\hat{X} + ky + \mu \quad (2.1)$$

é um observador de ordem completa para o sistema n-dimensional e monovariável

$$\dot{X} = AX + bu \quad (2.2a)$$

$$y = c^T X \quad (2.2b)$$

Se $\hat{X}(t_0) = X(t_0)$ implica em $\hat{X}(t) = X(t)$ para todo $u(t)$, sendo $t \geq t_0$.

Subtraindo-se (2.1) de (2.2a), tem-se:

$$\dot{X} - \dot{\hat{X}} = AX - G\hat{X} - ky - \mu + bu$$

Usando (2.2b)

$$\dot{X} - \dot{\hat{X}} = (A - kc^T)X - G\hat{X} + (b - m)u \quad (2.3)$$

Se $X = \hat{X}$, implica em:

$$G = A - kc^T \quad (2.4)$$

$$m = b \quad (2.5)$$

Então, a equação (2.1), pode ser escrita:

$$\dot{\hat{X}} = (A - kc^T)\hat{X} + kc^T X + bu \quad (2.6a)$$

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + bu + kc^T (X - \hat{X}) \quad (2.6b)$$

Pela equação (2.6b), verifica-se que o observador possui o mesmo modelo do sistema, com uma entrada adicional, proporcional à diferença entre as saídas do sistema e o observador.

A figura 2.1 mostra, em diagrama de blocos, um sistema com observador em malha aberta.

Subtraindo-se a equação (2.6b) da equação (2.2a) encontra-se:

$$\dot{X} - \dot{\hat{X}} = (A - kc^T)(X - \hat{X}) \quad (2.7)$$

Fazendo

$$E \triangleq X - \hat{X} \quad (2.8)$$

$$\text{obtem-se:} \quad \dot{E} = (A - kc^T)E \quad (2.9a)$$

Em geral, quanto maiores forem os elementos de k mais rapidamente o erro convergirá para zero.

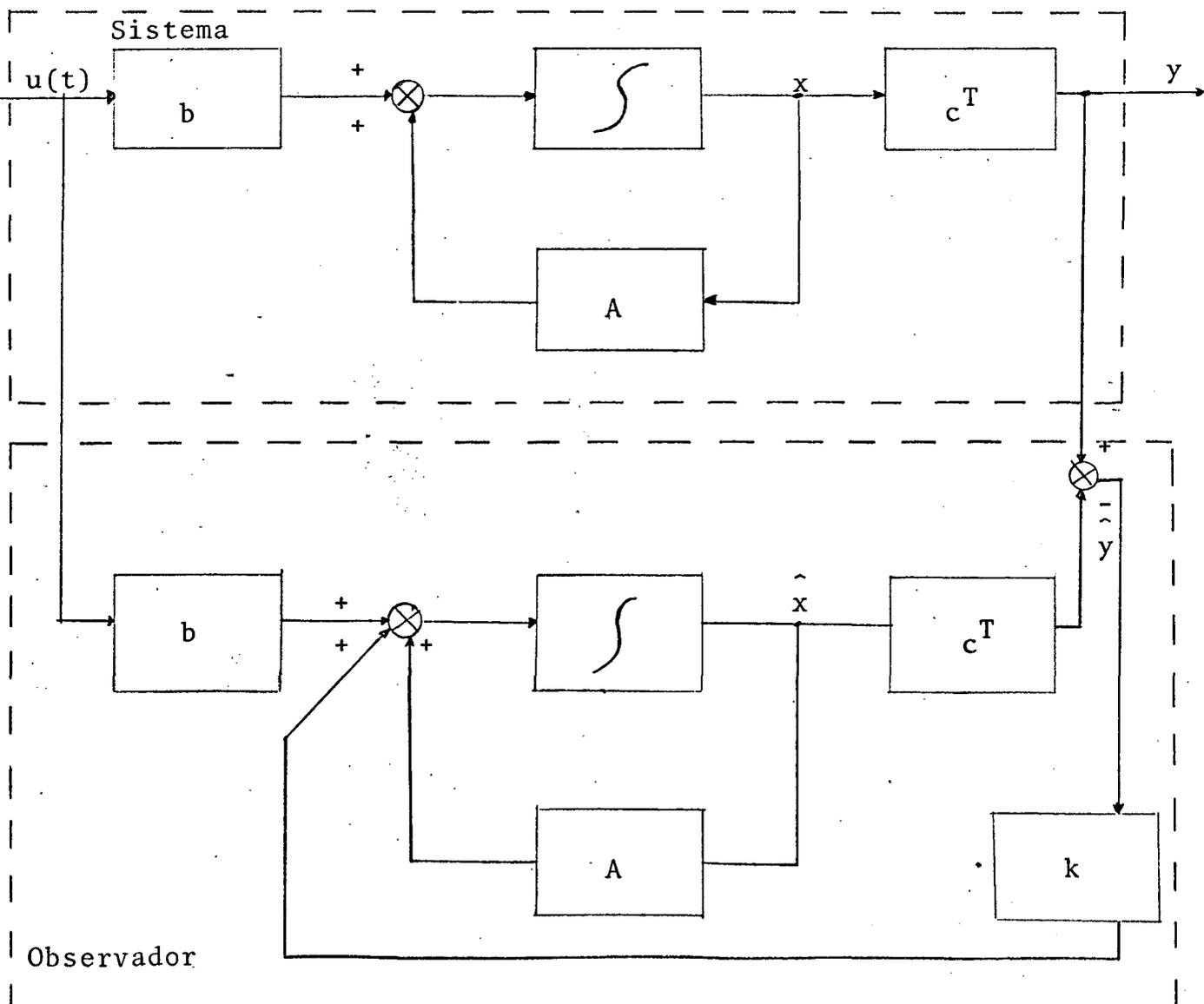


Fig. 2.1 - Observador em malha aberta

2.2.1.2 - INCERTEZA NOS PARÂMETROS DO SISTEMA

Uma situação que frequentemente ocorre na prática, é a falta de precisão no conhecimento dos parâmetros do sistema. Isto pode ser atribuído, principalmente, a dois fatores:

- a - Desgaste no equipamento.
- b - Falta de informações mais precisas sobre o sistema.

No primeiro caso, o engenheiro fará o projeto do observador, baseando-se nos valores nominais dos parâmetros do sistema.

No segundo caso, dependendo da experiência do engenheiro, o projeto do observador será feito baseado em valores assumidos para os parâmetros do sistema.

Em ambas situações haverá uma diferença entre os valores dos parâmetros do sistema e do observador.

Será verificado até que ponto a falta de precisão sobre o sistema, pode influir no uso do observador.

Seja A a matriz dos parâmetros do sistema e A_o a matriz dos parâmetros do observador.

$$\text{Assim: } A = A_o + \Delta A \quad (2.10)$$

onde ΔA representa a diferença entre os parâmetros do sistema e do observador.

Então, o sistema será descrito por:

$$\dot{X} = (A_o + \Delta A)X + bu \quad (2.11a)$$

$$y = c^T X \quad (2.11b)$$

e o observador:

$$\dot{\hat{X}} = A_o \hat{X} + bu + k_c^T E \quad (2.12)$$

Subtraindo-se (2.12) de (2.11):

$$\dot{E} = A_o E + \Delta A X - k_c^T E$$

$$\dot{E} = (A_o - k_c^T)E + \Delta A X \quad (2.13)$$

2.2.1.3-INFLUENCIA DO RUÍDO

Foi dito na seção 2.2.1.1. que, teoricamente, os elementos da matriz k deveriam tomar os maiores valores possíveis.

No entanto, quando o ruído é considerado, o que representa u ma situação mais real, o aumento dos elementos de k , torna o observador mais sensível às perturbações causadas pelo ruído.

Então, um compromisso deve ser assumido entre a rapidez de convergência e a sensibilidade em relação ao ruído.

A equação do observador, considerando o ruído (η) é dada por:

$$\dot{\hat{X}} = \hat{A}X + bu + kc^T (E + \eta) \quad (2.14)$$

Subtraindo (2.14) de (2.2a) e usando (2.2b):

$$\dot{E} = (A - kc^T)E - kc^T\eta \quad (2.15)$$

onde $\eta = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n]$

2.2.2 - MALHA FECHADA

Na seção 2.1.1. foi estudado o observador em malha aberta is to é, o observador utilizado para monitorar o sistema.

Agora, será feita a realimentação dos estados estimados, is to significa que o observador será utilizado no controlador.

Nestas circunstâncias tem-se dois problemas:

- a - O projeto do observador
- b - O projeto do controlador

Será mostrado nesta sub-seção que se o sistema for perfeitamente conhecido, o projeto do controlador e do observador poderão ser executados isoladamente, entretanto, se o sistema não for perfeitamente conhecido há um compromisso entre os dois projetos.

Aqui também será considerada as três situações levadas em conta na seção anterior:

- a - Sistema perfeitamente conhecido
- b - Incerteza quanto aos parâmetros do sistema
- c - Influência do ruído

2.2.2.1 - SISTEMA PERFEITAMENTE CONHECIDO

O objetivo agora é implementar a lei de controle utilizando o observador.

Considere-se o sistema invariante no tempo

$$\dot{X} = AX + bu \quad (2.16a)$$

$$y = c^T X \quad (2.16b)$$

e a lei de controle.

$$u = -f^T X \quad (2.17a)$$

onde é assumido que os estados X podem ser medidos. Se isto não acontece, uma solução é construir um observador da forma:

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + bu + k(y - c^T \hat{X}) \quad (2.18)$$

e então determinar a lei de controle em função dos estados reais mensuráveis e dos estados estimados correspondentes aos reais não mensuráveis.

Então
$$u = - f^T Z \quad (2.17b)$$

Onde:
$$Z \triangleq \begin{bmatrix} X_m \\ \hat{X}_{nm} \end{bmatrix}$$

Sendo X_m o vetor coluna dos estados mensuráveis do sistema, e \hat{X}_{nm} o vetor coluna dos estados estimados correspondentes aos estados reais não-mensuráveis.

Será assumido que $Z = \hat{X}$ o que representa o pior caso ou seja, o caso em que nenhum estado é mensurável.

Portanto, os resultados obtidos nestas circunstâncias, serão válidos, com muito mais razão, na hipótese de um ou mais estados serem mensuráveis.

Assim, a lei de controle torna-se:

$$u = - f^T \hat{x} \quad (2.19)$$

O sistema com observador e a implementação da lei de controle, são apresentados na figura 2.2.

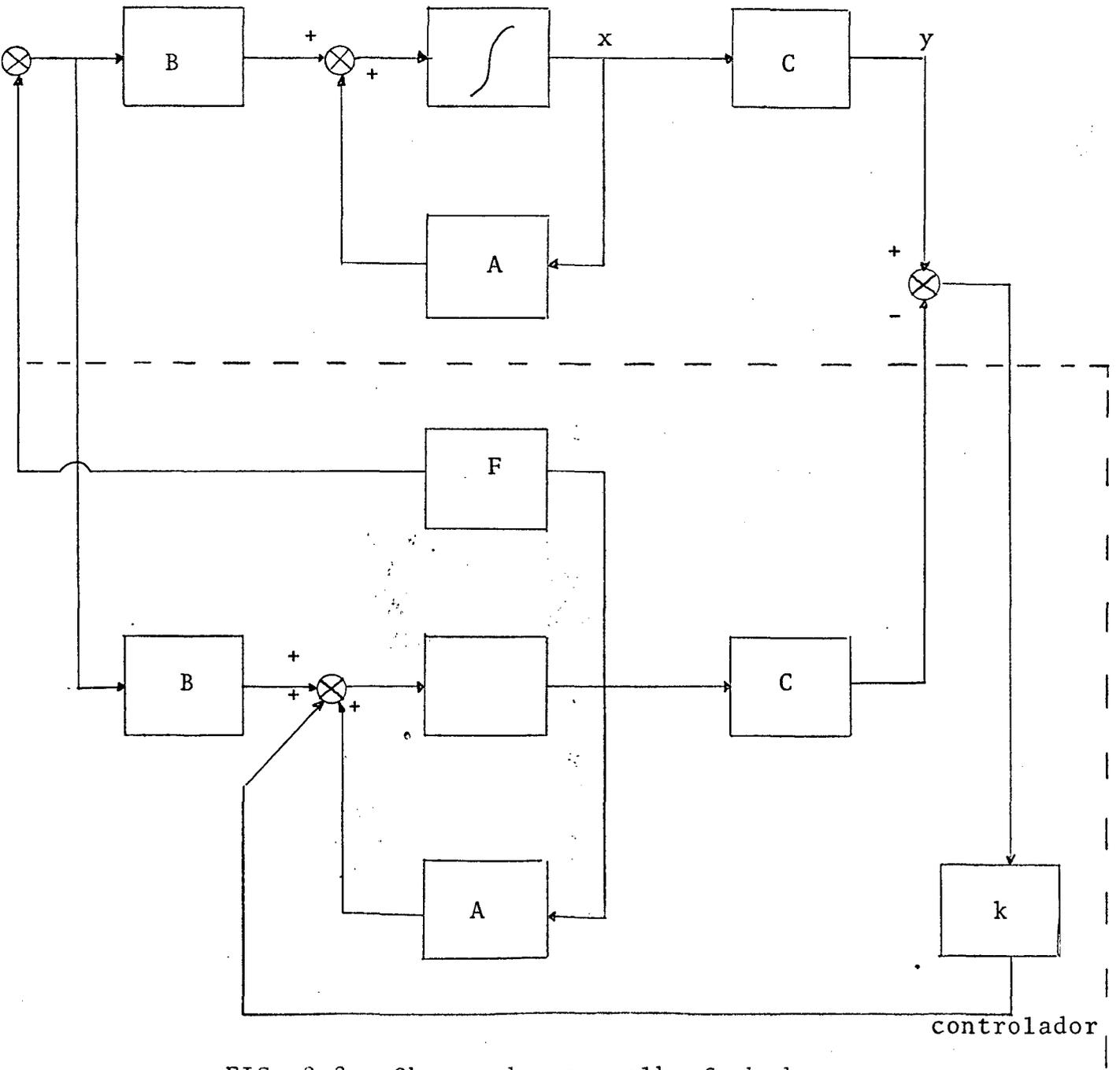


FIG. 2.2 - Observador em malha fechada

Substituindo a equação (2.19) na equação (2.18),obtem-se:

$$\dot{\hat{X}} = (A - bf^T - kc^T)\hat{X} + ky \quad (2.20)$$

Assim, o sistema de ordem $2n$ que resulta da interconexão da planta com o controlador, pode ser descrito por:

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{\hat{X}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & -Bf^T \\ kc^T & A - kc^T - bf^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ \hat{X} \end{pmatrix}$$

Subtraindo-se (2.18) de (2.16a), tem-se:

$$\dot{X} - \dot{\hat{X}} = AX - A\hat{X} - k (y - c^T\hat{X})$$

usando (2.8)

$$\dot{E} = (A - kc^T)E \quad (2.21)$$

Substituindo $\hat{X} = X - E$ em (2.19) e usando (2.16a) en contra-se:

$$\dot{X} = (A - bf^T)X + bf^TE \quad (2.22)$$

Combinando (2.21) e (2.22):

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{E} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A - bf^T & -bf^T \\ 0 & A - kc^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ E \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

Antes de encerrar esta seção, será dada alguma atenção ao projeto do controlador.

Será utilizada a abordagem do controle ótimo, pelos seguintes motivos:

- a - Deseja-se minimizar o consumo de energia. Este critério na abordagem clássica não é fácil de ser satisfeito.

- b - A descrição do sistema na abordagem clássica é feita através da função de transferência, o que não é fácil para sistemas multi-variáveis.
- c - O desenvolvimento atual da tecnologia, permite a implementação de controladores mais complexos.

De uma maneira geral, os objetivos desejados em um sistema, são:

- a - que em regime os estados convirjam para os valores desejados.
- b - Pouca oscilação dos estados no transitório.
- c - mínimo consumo de energia.

Naturalmente que, em geral, a convergência de certos estados para um valor desejado, tem maior importância que outros. Assim, é necessário que sejam atribuídos pesos de acordo com a prioridade de cada estado. Estes pesos são dados pelas matrizes H , Q e R .

Estas matrizes são determinadas iterativamente. A escolha dos valores ideais para os elementos destas matrizes, dependem muito da experiência do projetista.

Como para muitos problemas, é dada a mesma importância para erros positivos e negativos, o índice de desempenho deve ser quadrático.

Seja J o índice de desempenho. Então, de acordo com o que foi dito acima;

$$J = (X - X_d)^T H (X - X_d) + \int_{t_0}^{t_f} \left\{ (X - X_d)^T Q (X - X_d) + u^T R u \right\} dt$$

onde $[t_0, t_f]$ é o intervalo de tempo de interesse, X_d é o valor desejado para os estados, em regime.

Dentre um conjunto de controles admissíveis, aquele que minimiza o funcional J é chamado controle ótimo (U^*).

Este controle pode ser obtido pelo uso da programação dinâmica e para sistemas lineares é dado por:

$$U^* = -R^{-1}b^T L X$$

onde L é a solução da equação de Riccati

$$\dot{L} + Q - LbR^{-1}b^T L + LA + A^T L = 0$$

Nota-se que a lei de controle ótimo exige o conhecimento de todos os estados do sistema.

2.2.2.2-INCERTEZA NOS PARÂMETROS DO SISTEMA

Considera-se o sistema (2.11), o observador (2.12) e a lei de controle (2.17b).

Novamente será considerado o pior caso, isto é, a situação particular em que nenhum dos estados é mensurável.

Nestas circunstância, a lei de controle torna-se (2.19).

Substituindo-se (2.19) na equação (2.12):

$$\dot{\hat{X}} = A_0 \hat{X} - bf^T \hat{X} - kc^T E \quad (2.24)$$

Assim, o sistema que resulta da interconexão da planta com o controlador pode ser descrito por :

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{\hat{X}} \\ \dot{X} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_0 + \Delta A & -bf^T \\ kc^T & A_0 - kc^T - bf^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ \hat{X} \\ X \end{pmatrix}$$

Subtraindo-se (2.12) de (2.11), obtem-se:

$$\dot{E} = A_0 E + \Delta A X - kc^T E$$

$$\dot{E} = (A_0 - kc^T) E + \Delta A X \quad (2.25)$$

Substituindo $\hat{X} = X - E$ em (2.19) e usando (2.11a), encontra-se:

$$\dot{X} = (A_0 + \Delta A) X - bf^T X + bf^T E \quad (2.26)$$

combinando (2.25) e (2.26):

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 + \Delta A - bf^T & bf^T \\ \Delta A & A_0 - kc^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ E \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

2.2.2.3 - INFLUÊNCIA DO RUÍDO

Considere-se o sistema (2.2), o observador (2.14) e a lei de controle (2.19).

Substituindo (2.19) em (2.14):

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} - bf^T\hat{X} + kc^T(E + \eta)$$

Então, o conjunto resultante da interconexão do sistema com o controlador é descrito por:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{\hat{X}} \\ \dot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -bf^T \\ kc^T & A - bf^T - kc^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \hat{X} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ kc^T \end{bmatrix} \eta$$

Subtraindo-se (2.14) de (2.2), e usando (2.8), obtem-se:

$$\dot{E} = (A - kc^T)E - kc^T\eta \quad (2.28)$$

Substituindo-se $\hat{X} = X - E$ em (2.19) e usando (2.2a), encontra-se:

$$\dot{X} = (A - bf^T)X + bf^TE \quad (2.29)$$

Combinando (2.28) e (2.29):

Os valores nominais assumidos para os parâmetros do sistema foram:

- Constante de tempo do governador : $T_1 = 0,08 \text{ s}$
- Constante de tempo da turbina: $T_2 = 0,3 \text{ s}$
- Constante de inércia da máquina: $I = 3 \text{ s}$
- Amortecimento da máquina: $D = 0,2 \text{ puMw/rd/s}$
- Potência máxima transferida: $P_1 = 1,6 \text{ p.u.Mw}$
- Potência mecânica: $P_2 = 0,8 \text{ p.u.Mw}$

As variáveis de estado escolhidas, foram:

- x_1 - ângulo de Potência
- x_2 - Velocidade do eixo
- x_3 - Saída da turbina
- x_4 - Saída do goverbador.

O sistema (2.31) linearizado em torno do ponto de equilíbrio $(\pi/6, 0, 0, 0)^T$, tem a forma:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.32a)$$

$$\dot{x}_2 = -87x_1 - 2,5x_2 + 62,8x_3 + 150,72 \quad (2.32b)$$

$$\dot{x}_3 = -3,3x_3 + 3,3x_4 \quad (2.32c)$$

$$\dot{x}_4 = -12,5x_2 - 12,5x_4 \quad (2.32d)$$

O observador para o sistema (2.32) é descrito por:

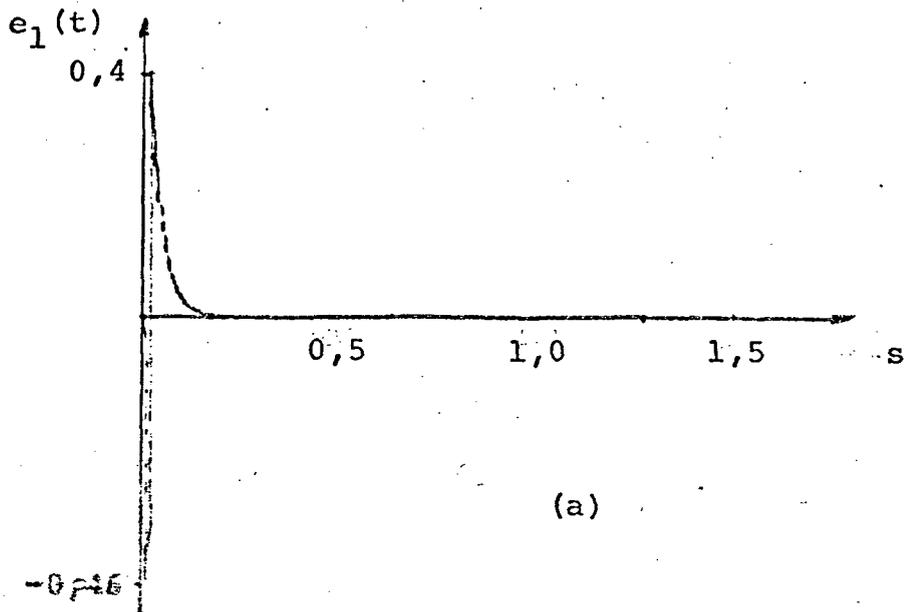
$$\dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + k_1(x_1 - \hat{x}_1) \quad (2.33a)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = -87\hat{x}_1 - 2,5\hat{x}_2 + 62,8\hat{x}_3 + 150,72 + k_2(x_1 - \hat{x}_1) \quad (2.33b)$$

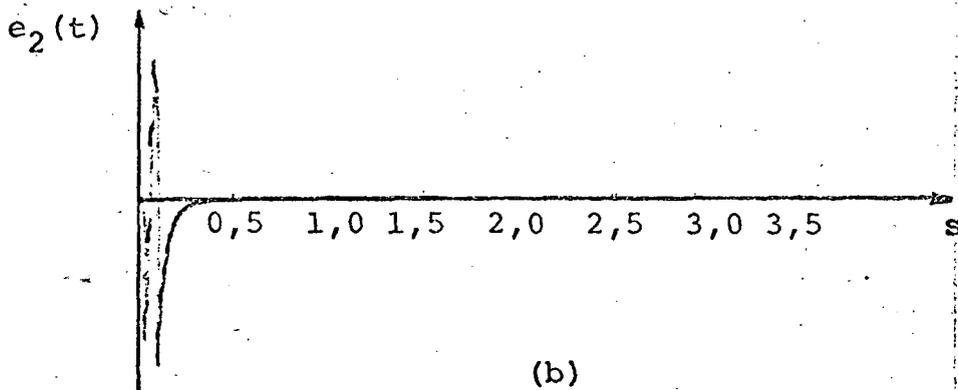
$$\dot{\hat{x}}_3 = -3,3\hat{x}_3 + 3,3\hat{x}_4 + k_3(x_1 - \hat{x}_1) \quad (2.33c)$$

$$\dot{\hat{x}}_4 = -12,5\hat{x}_2 - 12,5\hat{x}_4 + k_4(x_1 - \hat{x}_1) \quad (2.33d)$$

É assumida a pior situação, isto é, somente o estado x_1 é mensurável.



(a)



(b)

Fig. 2.4 - Comportamento dos erros entre os estados do sistema linear e do observador linear.

As curvas obtidas para os erros entre os estados reais e estimados são mostrados nas figuras 2.4a e 2.4b.

Supondo um erro entre os parâmetros do sistema e observador da ordem de 20%, foi obtida a curva mostrada na figura 2.5.

Nestas circunstâncias os parâmetros do sistema passaram a ter os seguintes valores:

- Constante de tempo do governador - 0,09 s
- Constante de tempo da turbina - 0,24 s
- Constante de inércia da máquina - 3,6 s
- Amortecimento da máquina - 0,14 p.u.Mw/rd/s
- Potência máxima transferida - $P_1 = 1,2$ p.u.Mw
- Potência mecânica - $P_2 = 0,96$ p.u.Mw

Considerando a influência do ruído branco com distribuição uniforme e o sistema (2.32), foi obtida a curva mostrada na figura 2.6.

Os valores dos elementos da matriz k^T , foram:

a - Sistema com parâmetros conhecidos

$$k^T = [40, 100, 20, 0] \quad \%$$

b - Parâmetros incertos

$$k^T = [40, 100, 20, 0]$$

c - Influência do ruído

$$k^T = [20, 50, 10, 0]$$

A listagem do programa utilizado encontra-se no apêndice - I.

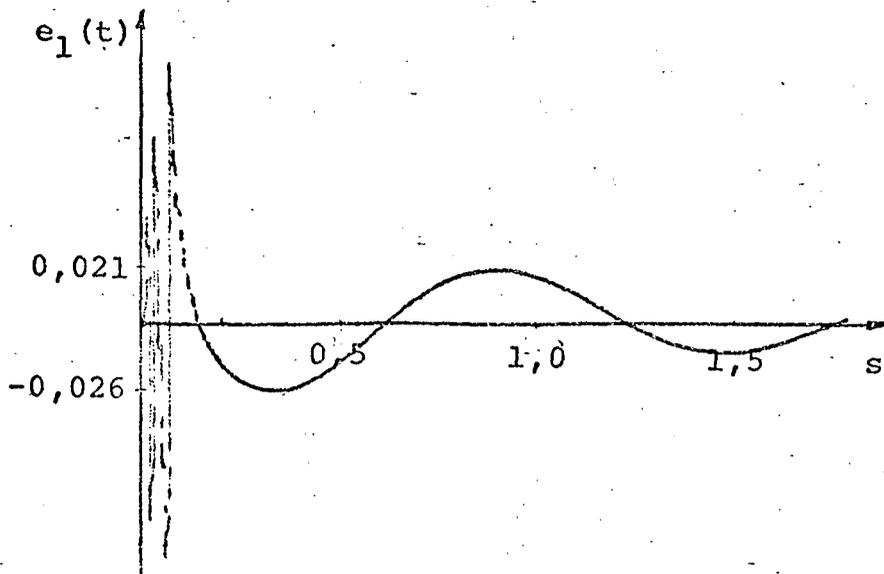


Fig. 2.5 - Sistema linear com observador linear. É assumido um erro de 20% entre os parâmetros.

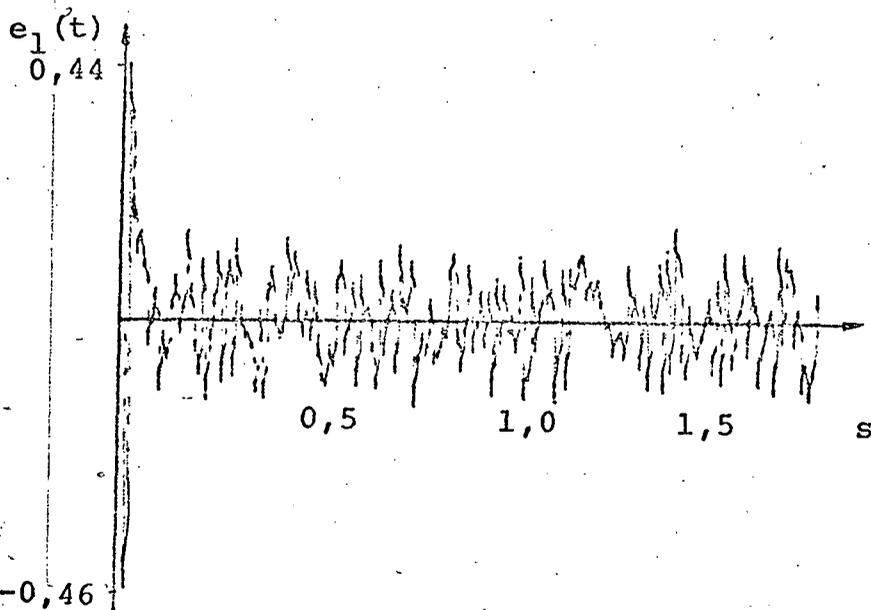


Fig. 2.6 - Sistema linear com observador linear; considerando a influência do ruído.

CAPITULO

TERCEIRO

CAPITULO TERCEIRO

OE NÃO- LINEAR PARA SISTEMA NÃO-LINEAR

3 . 1 - ARGUMENTOS DA NÃO-LINEARIDADE NÃO MENSURÁVEL

Os sistemas não-lineares, que serão considerados, são a queles que podem ser escritos na forma:

$$\dot{X} = AX + \Phi(X)$$

onde $\Phi^T(X) = [\mu_1(x_1) , 0, \dots, 0]$

é uma função vetorial arbitrária a qual é definida para todos os valores reais de X e é tal que:

$$0 \leq \frac{\mu_1(x_1)}{x_1} \leq q_1 \quad e \quad \mu_1(0) = 0$$

sendo q_1 um número positivo.

A não linearidade pode ser de qualquer tipo mas deve estar compreendida no setor hachurado na figura 3.1.

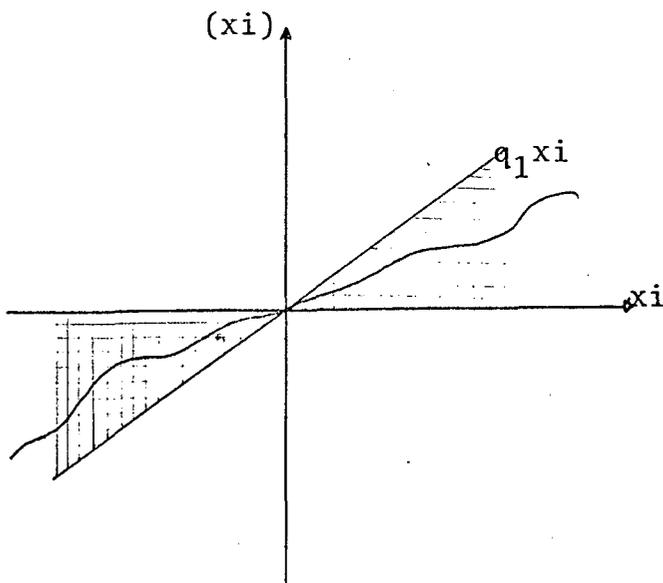


FIG. 3.1 - Não Linearidade Satisfazendo a condição de setor

O sistema (2.28) permite ser escrito na forma:

$$\dot{X} = AX + w$$

$$w = \phi(X)$$

como mostra o diagrama de blocos da figura 3.2.

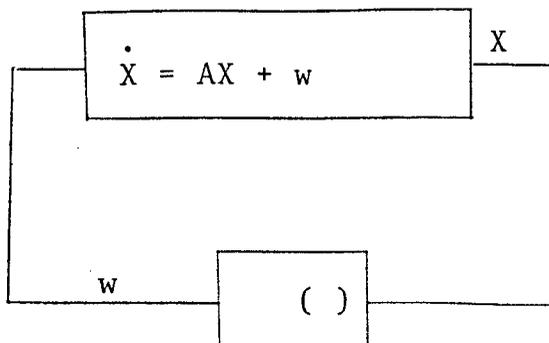


FIG. - 3.2

As preocupações principais no uso do observador em sistemas não lineares, são:

- a - Estabilidade assintótica do erro entre os estados, mesmo no caso de o sistema tornar-se instável.
- b - Domínio de estabilidade do erro.

Então, o interesse é verificar a estabilidade de um subespaço do espaço vetorial gerado por:

$$X_1, \dots, X_n, \hat{X}_1, \dots, \hat{X}_n,$$

nominalmente o espaço gerado por:

$$X_1 - \hat{X}_1, \dots, X_n - \hat{X}_n.$$

Isto sugere uma aplicação adicional para o observador, pode-se utilizá-lo como alarme contra a instabilidade do sistema, isto é, pode ser dada uma instrução ao computador no sentido de que quando os estados estimados alcancem um valor considerado como crítico, o sistema seja desligado e seja emitida uma mensagem.

Esta aplicação para o observador não foi encontrada em nenhum dos trabalhos referenciados.

Além de alarme, o observador pode ser utilizado para monitorar o sistema, isto é, dar informações sobre o comportamento dos estados inacessíveis.

3.1.1 - SISTEMA PERFEITAMENTE CONHECIDO

Considere-se o sistema descrito por:

$$\dot{X} = AX + w \quad (3.1a)$$

$$w = \phi(X) \quad (3.1b)$$

ou
$$\dot{X} = AX + \phi(X) \quad (3.2)$$

onde $\phi(X)$ satisfaz as condições mencionadas no início desta seção.

Seja
$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + \phi(\hat{X}) + kc^T (X - \hat{X}) \quad (3.3)$$

um observador para o sistema (3.2).

Verifica-se que o observador (3.3) possui o mesmo modelo que o sistema, com uma entrada adicional proporcional ao erro entre as saídas.

Subtraindo-se (3.3) de (3.2) e usando (2.8).

$$\dot{E} = (A - kc^T)E + (\phi(X) - \phi(\hat{X})) \quad (3.4a)$$

ou
$$\dot{E} = (A - kc^T)E + (\phi(X) - \phi(X - E)) \quad (3.4b)$$

3.1.2 - INCERTEZA QUANTO AOS PARÂMETROS DO SISTEMA

Considere-se o sistema (3.2) e o observador.

$$\dot{\hat{X}} = A_0\hat{X} + \phi(\hat{X}) + kc^T (X - \hat{X}) \quad (3.5)$$

Subtraindo-se (3.5) de (3.2)

$$\dot{E} = (A_0 - kc^T)E + \Delta AX + (\phi(X) - \phi(\hat{X})) \quad (3.6a)$$

ou

$$\dot{E} = (A_0 - kc^T)E + \Delta AX + \phi(X) - \phi(X - E) \quad (3.6b)$$

3.1.3 - INFLUÊNCIA DO RUÍDO

Considera-se o sistema (3.2) e o observador.

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + \phi(\hat{X}) + kc^T(X + \eta - \hat{X}) \quad (3.7)$$

Subtraindo (3.7) de (3.2)

$$\dot{E} = (A - kc^T)E + (\phi(X) - \phi(\hat{X})) - kc^T\eta \quad (3.8)$$

onde η representa o ruído branco com distribuição uniforme.

3.1.4. APLICAÇÃO

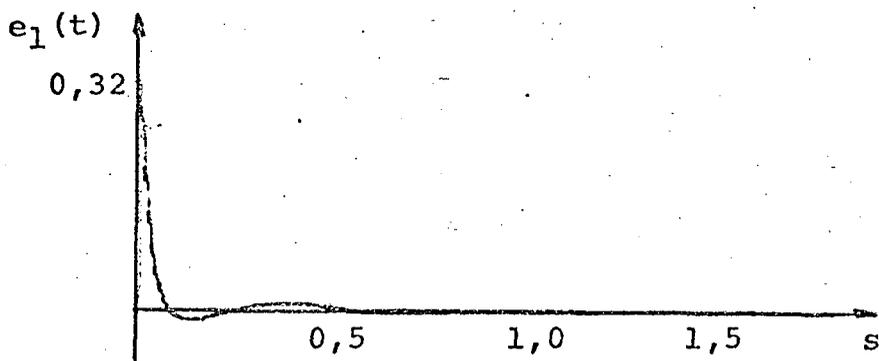
Considere-se o sistema de potência não linearizado tomado na seção 2.3.

Apesar deste sistema apresentar o estado x_1 , argumento da não linearidade, mensurável, este fato não será explorado na estrutura do observador.

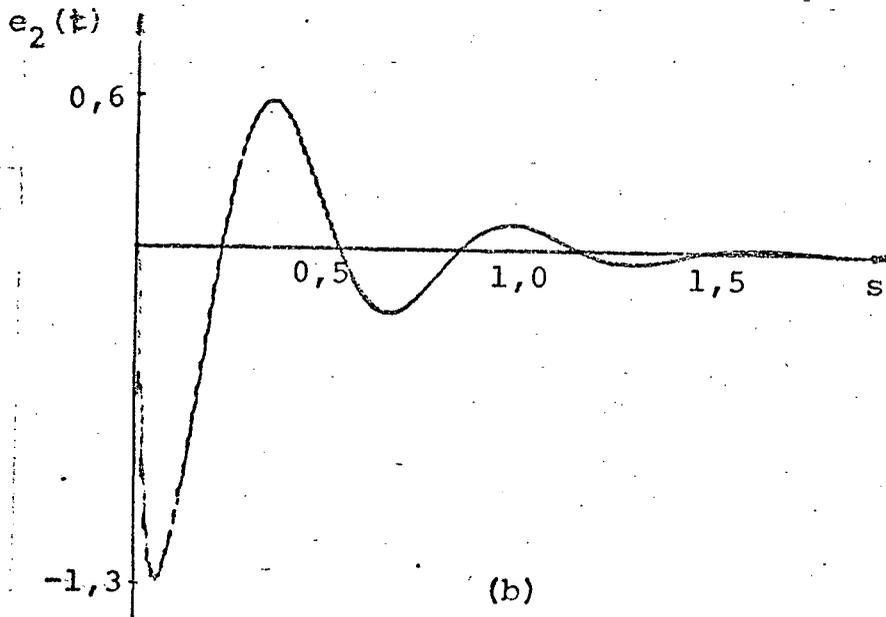
O conjunto sistema-observador é mostrado em diagrama de blocos na figura 3.3.

Considerando os parâmetros do sistema conhecidos, foram encontradas as curvas mostradas nas figuras 3.4a e 3.4b.

Supondo um erro de 20% entre os parâmetros do sistema e do observador, foram obtidas as curvas das figuras 3.5a e 3.5b.



(a)



(b)

Fig. 3.4 - Erro entre os estados do sistema não-linear e do observador com a mesma estrutura.

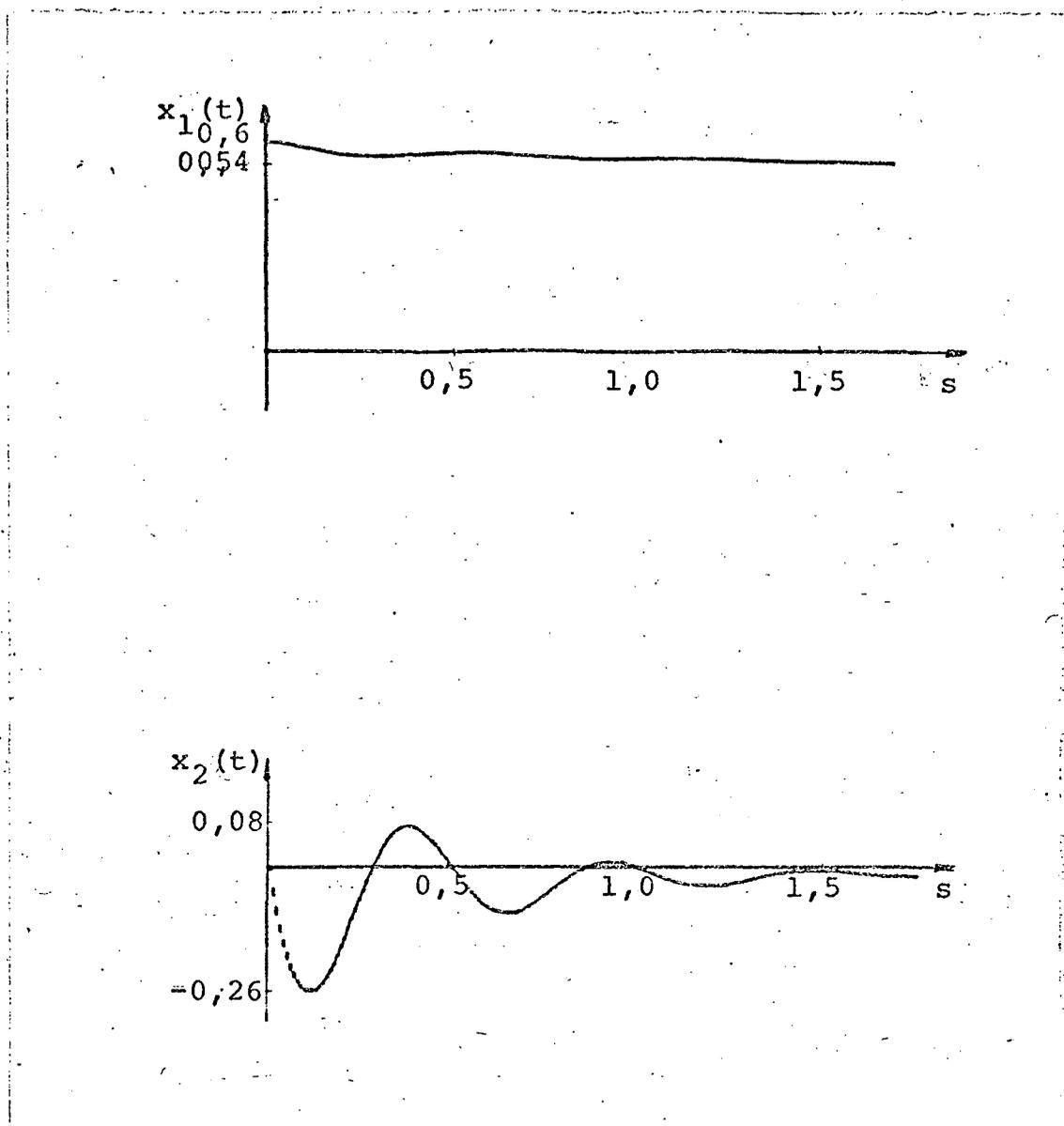


Fig. 3.5.a - Comportamento dos estados do sistema quando seus parâmetros diferem dos valores nominais em cerca de 20%.

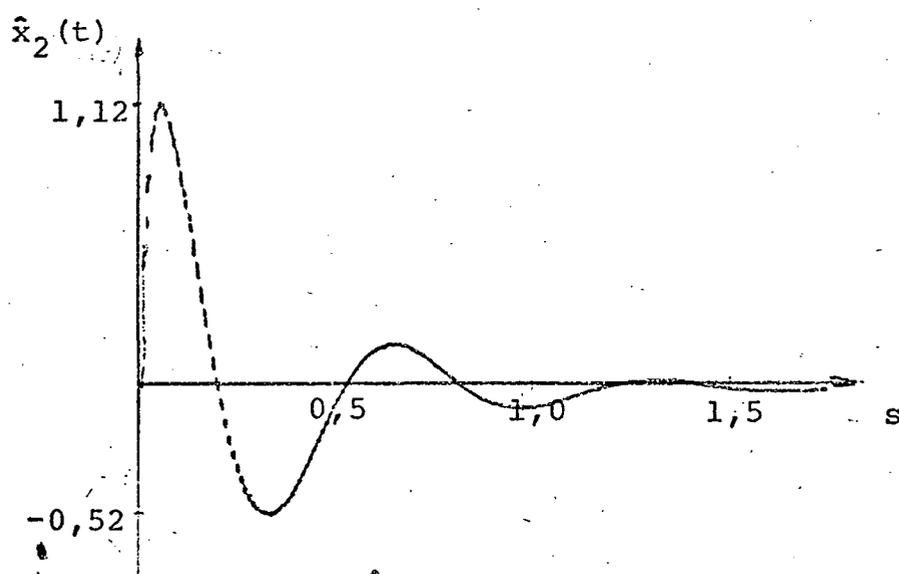
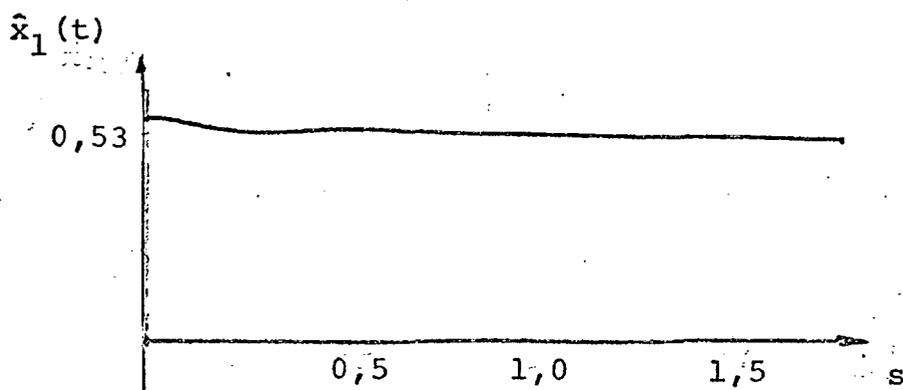


Fig. 3.5b - Comportamento dos estados estimados pelo observador não-linear com a mesma estrutura do sistema. É assumido um erro de 20% entre os parâmetros.

3.1.5 - COMENTÁRIO

Na seção 3.1.1 foi encontrada a equação (3.4) que dá o comportamento do erro quando os parâmetros do sistema são conhecidos e não há a influência do ruído.

Mostrar analiticamente que o erro dado por esta equação converge para zero, não é uma tarefa fácil por causa das duas linearidades que aparecem com argumentos diferentes.

Como a equação (3.4) é não-linear, a estabilidade do erro depende de $E(t_0)$.

Se o erro inicial é tomado próximo a um ponto de equilíbrio de (3.4), o erro é estável.

Para o exemplo considerado foi tomado:

$$E(t_0) = [0,6 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

Quando o ruído é considerado, o erro passa a ser governado pela equação (3.8).

Verifica-se que esta equação é a mesma (3.4) com uma parcela adicional devido ao ruído.

Assim, para os mesmos valores dos elementos de k o erro dado por (3.8) comporta-se, em média como aquele dado por (3.4), já que o ruído considerado possui média zero.

No entanto surge o problema de que se os elementos de k forem relativamente grandes, o ruído pode deslocar a trajetória do erro afastando-a demasiadamente do ponto de equilíbrio e assim tornando-o instável.

3 . 2 - ARGUMENTO DE NÃO-LINEARIDADE MENSURÁVEL

Nesta seção pretende-se apresentar um observador de ordem completa para os sistemas não-lineares em que o argumento da não-linearidade é mensurável.

Para esta situação particular, é mostrado analiticamente que o erro é assintoticamente estável independentemente de $E(t_0)$ e da forma da não-linearidade.

Apesar dos sistemas que apresentam o argumento da não-linearidade mensurável, constituírem uma situação particular, são encontrados com alguma frequência na prática, como por exemplo nos sistemas de potência.

Portanto, o observador que será apresentado aqui, tem muitas aplicações práticas.

Será considerado o observador em malha aberta com o sistema nas situações em que:

- a - O sistema é perfeitamente conhecido
- b - Incerteza quanto aos parâmetros do sistema
- c - Influência do ruído,

3.2.1 - SISTEMA PERFEITAMENTE CONHECIDO

Considere-se o sistema:

$$\dot{X} = AX + \phi(X) \quad (3.9)$$

e o observador:

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + \phi(\hat{X}) + kc^T(X - \hat{X}) \quad (3.10)$$

Seja x_1 o argumento da não-linearidade e pré-suposto mensurável.

As equações (3.9) e (3.10), tornam-se:

$$\dot{X} = AX + b^T \phi(x_1) \quad (3.11)$$

$$\dot{\hat{X}} = AZ + b^T \phi(x_1) + kc^T(X - Z) \quad (3.12)$$

onde: $b^T = \{ 1 \ 0 \dots \ 0 \}$

e $Z(t) = \{ x_1(t), \hat{x}_2(t), \dots, \hat{x}_n(t) \}^T$

Considerando o pior caso, isto é, $Z(t) = \hat{X}(t)$ e subtraindo (3.4) de (3.3), tem-se:

$$\dot{E} = (A - kc^T)E \quad (3.13)$$

Esta equação mostra, que o erro é governado pelos auto valores de $(A - kc^T)$. Se os auto valores de $(A - kc^T)$ possuírem parte real negativa, o erro convergirá para zero, mesmo se o sistema tornar-se instável. Em outras palavras, os estados estimados convergem para os reais mesmo na instabilidade do sistema.

Isto sugere a aplicação do observador como alarme contra a instabilidade do sistema. Pode ser dada uma instrução ao computador no sentido de que o sistema seja desligado quando os estados atingirem certos valores considerados como crítico e que uma mensagem seja emitida.

3.2.2 - INCERTEZA QUANTO AOS PARÂMETROS DO SISTEMA

Seja o sistema:

$$\dot{X} = AX + b^T \phi(X_1) \quad (3.14)$$

e o observador:

$$\dot{\hat{X}} = A_o \hat{X} + b^T \phi(X_1) + kc^T (X - \hat{X}) \quad (3.15)$$

onde A e A_o são relacionados por (2.10).

De (3.14) e (3.15) obtem-se:

$$\dot{E} = (A_o - kc^T)E + \Delta AX \quad (3.16)$$

3.2.3 - INFLUÊNCIA DO RUÍDO

Seja o sistema.

$$\dot{X} = AX + b^T \phi(X_1) \quad (3.17)$$

e o observador:

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + b^T \phi(X_1) + kc^T (X - \hat{X} + \eta) \quad (3.18)$$

De (3.17) e (3.18) obtem-se:

$$\dot{E} = (A - kc^T)E + kc^T \eta \quad (3.19)$$

onde η representa o ruído branco com distribuição uniforme.

3.2.4 - APLICAÇÃO

Considere-se o mesmo sistema de potência, não-linearizado, tomado nas seções 2.3 e 3.1.4.

Como o argumento da não-linearidade do sistema é mensurável, pode-se utilizá-lo na não-linearidade do observador.

Em diagrama de blocos, o conjunto sistema-observador é mostrado na figura 3.6.

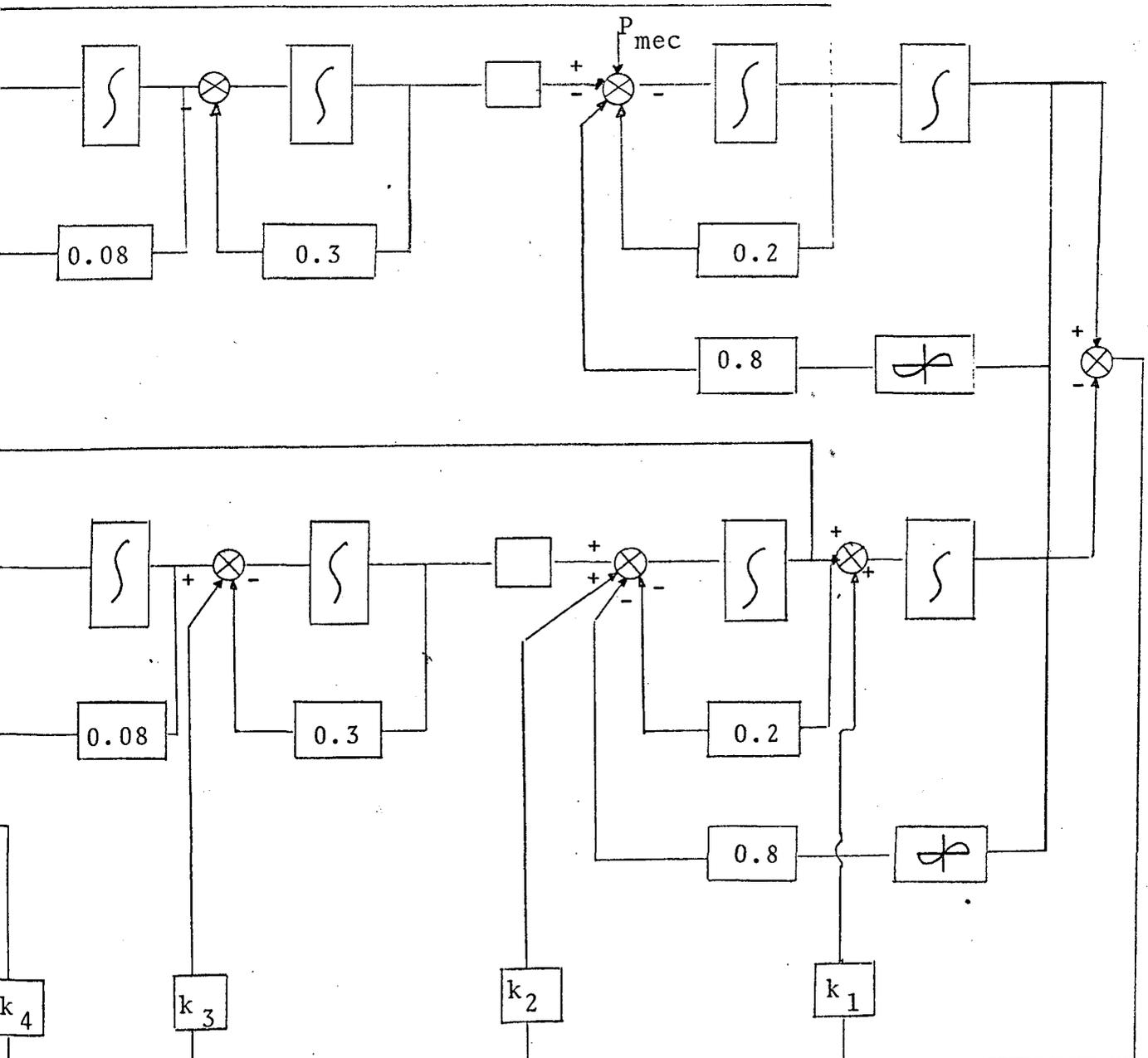


FIG. 3.6 - Conjunto Sistema Observador

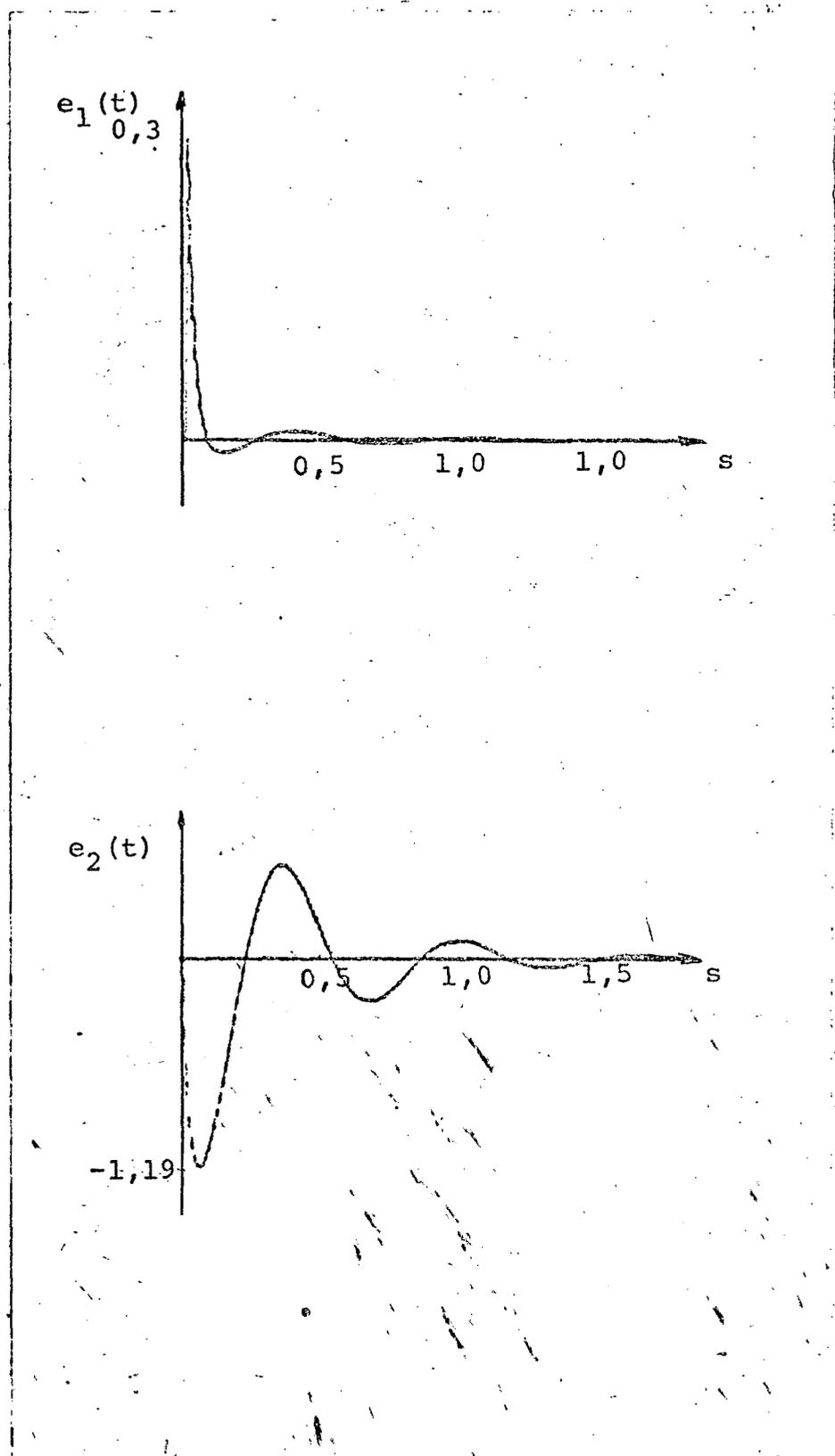


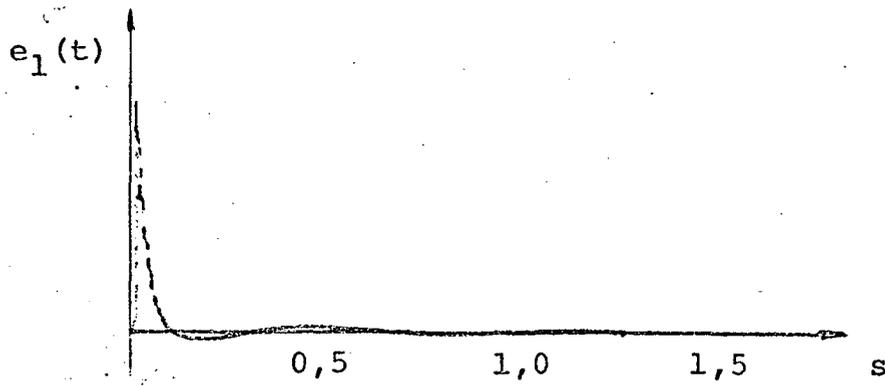
Fig. 3.7 - Comportamento dos erros para um sistema não-linear, perfeitamente conhecido, possuindo o argumento da não-linearidade mensurável.

Fazendo $k^T = \begin{bmatrix} 40 & 100 & 20 & 0 \end{bmatrix}$, foram encontradas as curvas mostradas na figura 3.7.

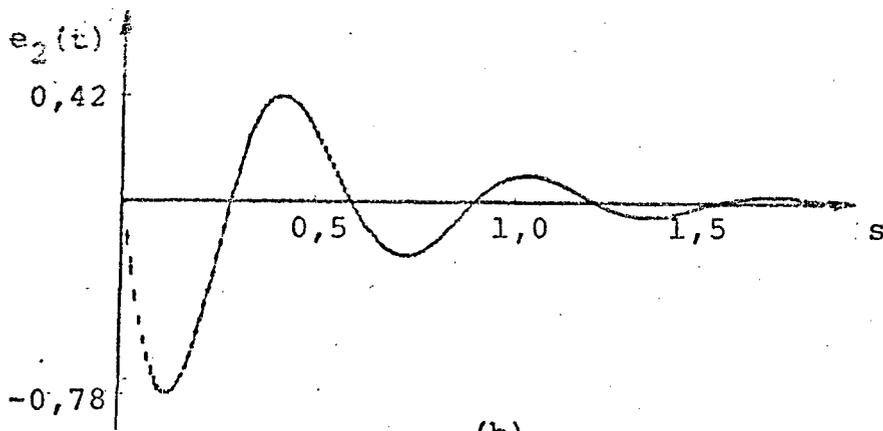
Assumindo um erro de 20% entre os parâmetros do sistema e observador, foram obtidas as curvas mostradas na fig. 3.8.

Considerando a influência do ruído, o comportamento do erro entre os estados da máquina e do observador são mostrados na figura 3.9.

Na figura 3.10, verifica-se o comportamento dos erros quando o sistema torna-se instável. Nota-se que mesmo na instabilidade os estados reais convergem para os estimados.

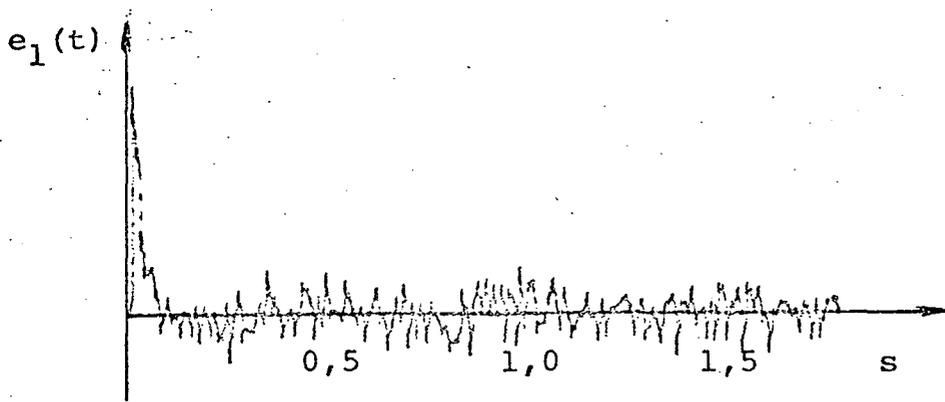


(a)

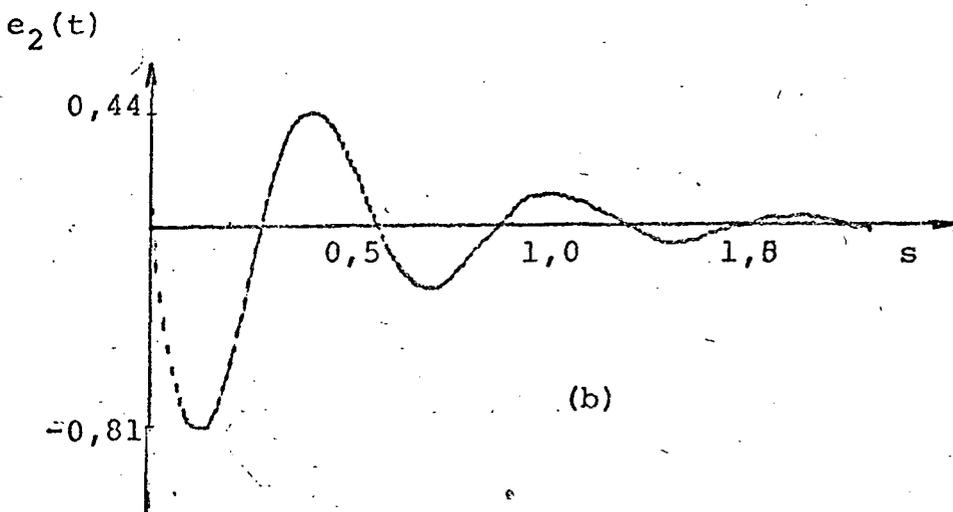


(b)

Fig. 3.8 - Comportamento dos erros para o sistema com o argumento da não-linearidade mensurável. E assumindo um erro entre os parâmetros de cerca de 20%.



(a)



(b)

Fig. 3 . 9 - Erro entre os estados do sistema não-linear com o *argu-* argumento da não-linearidade mensurável, considerando a influência do ruído.

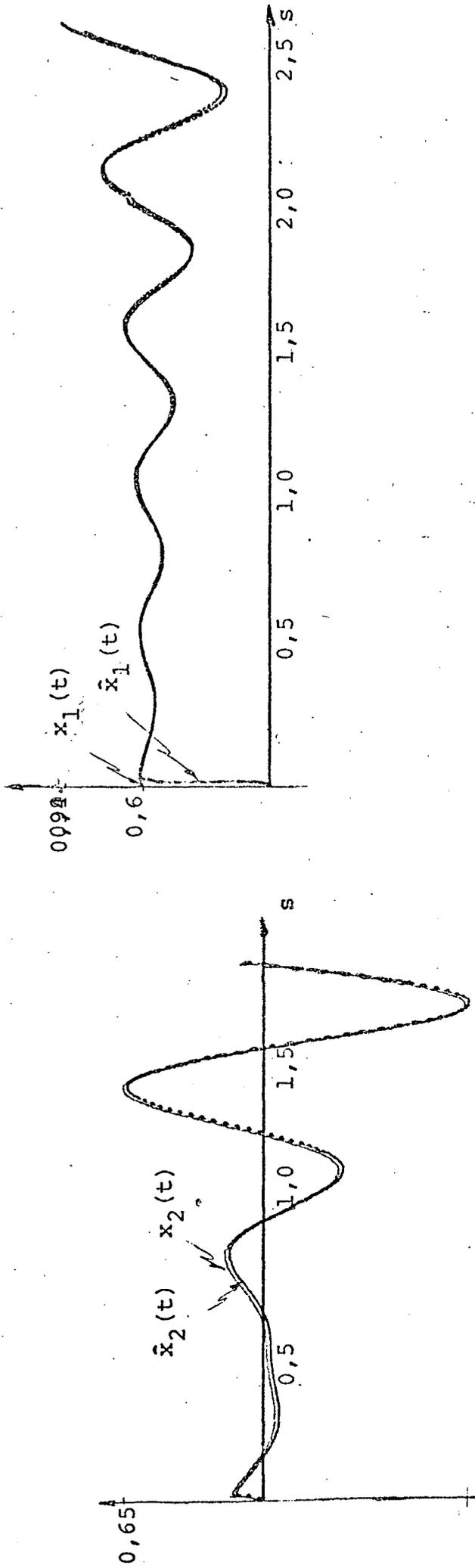


Fig.3.10 -- Comparação entre os estados reais e os estimados pelo OSUM, quando o sistema torna-se instável.

C A P I T U L O

Q U A R T O

CAPITULO QUARTOOBSERVADOR NÃO-LINEAR PARA O SISTEMA SEM POLO NA ORIGEM4 . 1 -COMENTÁRIO

É conhecido que para sistemas determinísticos com parâmetros perfeitamente conhecidos, o observador utilizando a realimentação do erro linearmente, produz resultados muito bons.

Entretanto, se existe a ação do ruído ou se não há um conhecimento rasoavelmente preciso sobre os parâmetros do sistema, o observador como mencionado acima não produz resultados muito satisfatórios, isto é, o erro entre os estados permanece durante muito tempo com valor considerável.

Um modo de aumentar a rapidez de convêrgência do erro é dar maiores valores aos elementos de k . Isto, no entanto, torna-se desastroso no caso do ruído existir (nos problemas práticos, sempre existe), pois o erro tomará valores bastante grandes.

Então, o problema a ser resolvido é o de aumentar-se os valores dos ganhos sem deixar que o erro assuma grandes proporções.

Surge então a idéia de realimentar o erro de uma forma não-linear, de tal maneira que sejam utilizados ganhos grandes mas, em seguida, o erro seja sustentado dentro de certa faixa.

No estado atual, tendo em vista as dificuldades matemáticas envolvidas, não há meios de se projetar um sistema não-linear com um certo grau de complexidade, mas, apenas de analisa-lo.

Assim, baseados naquilo que se deseja, propõe-se o uso de uma não-linearidade do tipo saturação como a mostrada na fig. 4.1.

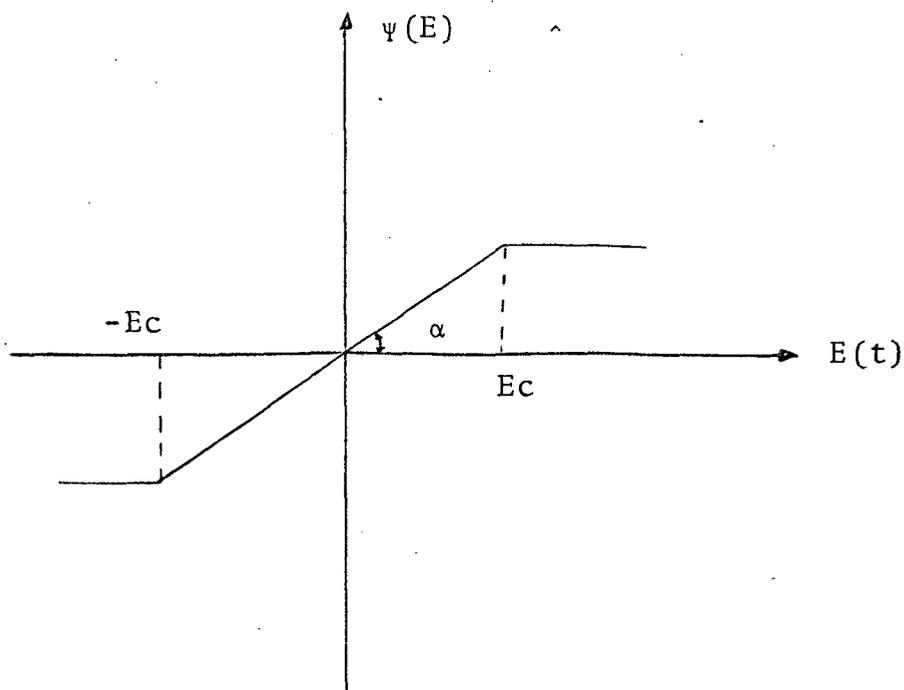


FIG. 4.1 - Não-linearidade considerada

O valor crítico para o erro (E_c), foi determinado experimentalmente, através de "computação interativa".

Deve-se verificar se a aplicação de um observador não-linear, produz um erro que permaneça estável:

Considere-se o sistema

$$\dot{X} = AX + bu \quad (4.1)$$

e o observador com o erro realimentado não-linearmente

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + bu + \psi(E) \quad (4.2)$$

onde $\psi(\)$ é uma função real arbitrária a qual é definida para todo valor real de $E(t)$ e satisfaz a condição de setor apresentada na seção 2.2.

Considerando (4.1) e (4.2), obtem-se

$$\dot{E}(t) = A E(t) - \psi(E) \quad (4.3)$$

Pelo critério do Popov (19), $E(t)$ será absolutamente estável no setor K_1 se existir um número real $q \geq 0$, tal que

$$\text{RE} (1 + qj\omega)G(j\omega) > 0$$

para todo $\omega > 0$ ou $X(\omega) - qy(\omega) \geq 0$, onde

$$X(\omega) = \operatorname{RE} G(j\omega)$$

e

$$y(\omega) = \omega \operatorname{Im} G(j\omega)$$

sendo $G(j\omega)$ a função de transferência da parte linear do sistema.

Foi considerado o critério de Popov, por causa das conveniências que este critério apresenta (19) como: •

- a - A ausência de qualquer restrição sobre a ordem do sistema
- b - Envolver apenas a função de transferência da parte linear do sistema, não sendo necessária uma expressão analítica da não-linearidade.

Em muitas situações práticas, a equação (4.3) satisfaz o critério de Popov.

Considere-se, por exemplo, o sistema da figura 4.2.

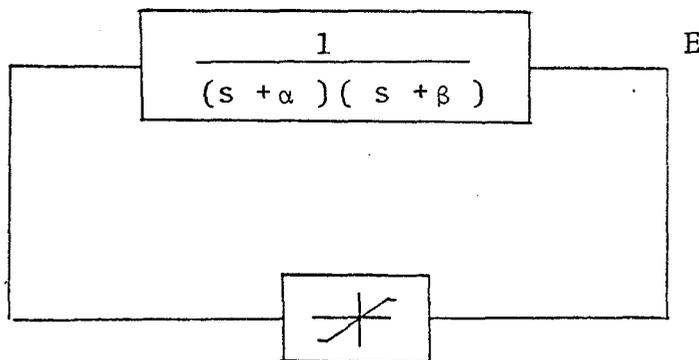


FIG. 4.2

Logo,

$$G(j\omega) = \frac{1}{(\alpha + j\omega)(\beta + j\omega)} = \frac{(\alpha - j\omega)(\beta - j\omega)}{(\alpha^2 + \omega^2)(\beta^2 + \omega^2)}$$

$$X(j\omega) = \text{RE } G(j\omega) = \frac{\alpha\beta + \omega^2}{(\alpha^2 + \omega^2)(\beta^2 + \omega^2)}$$

$$Y(j\omega) = \omega \cdot \text{Im } G(j\omega) = \frac{-\omega^2(\alpha + \beta)}{(\alpha^2 + \omega^2)(\beta^2 + \omega^2)}$$

Para que o critério de Popov seja satisfeito deve-se ter

$$X(\omega) - qY(\omega) > K$$

logo

$$q \geq \frac{K(\alpha^2 + \omega^2)(\beta^2 + \omega^2) - (\alpha\beta + \omega^2)}{\omega^2(\alpha + \beta)} \quad (4.4)$$

Verifica-se pela equação (4.4) que, dependendo dos parâmetros do sistema é possível obter-se $q \geq 0$ para algum setor K . Portanto, o critério de Popov pode ser satisfeito o que dá uma condição de suficiência para a estabilidade do erro.

A figura 4.3 mostra, em diagrama de blocos um conjunto sistema-observador em malha aberta com o erro realimentado através de uma não-linearidade.

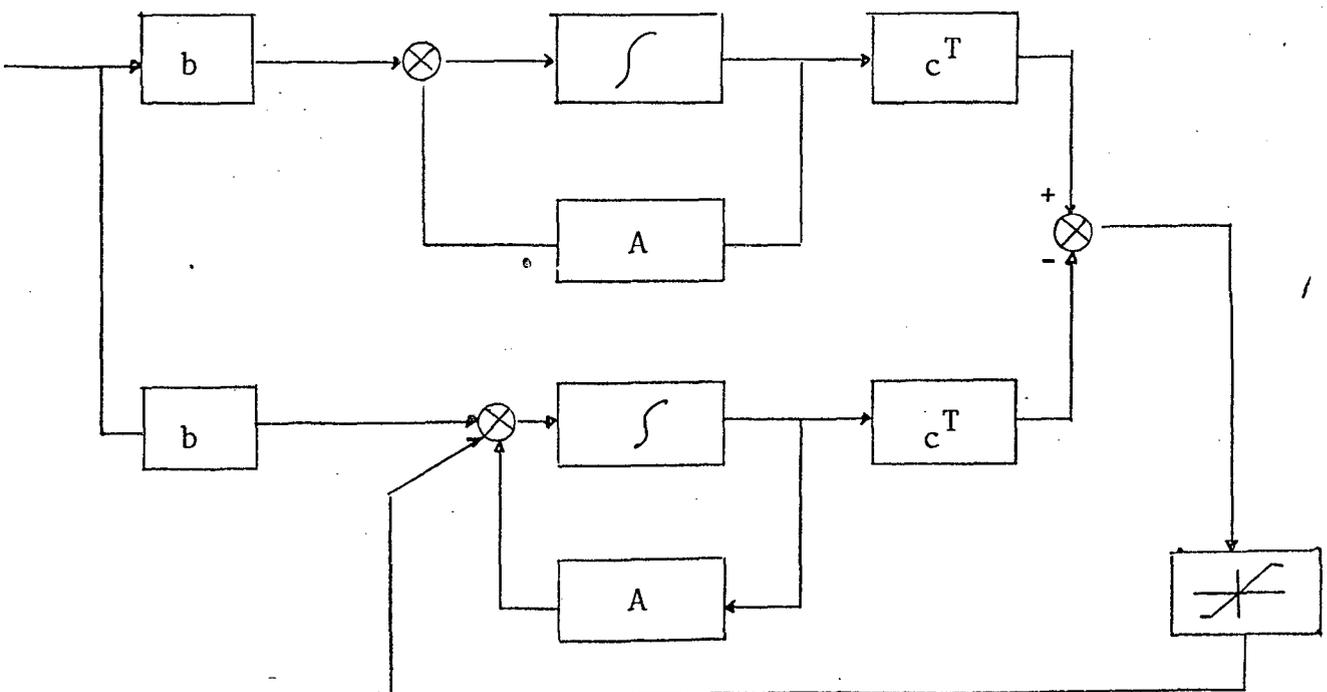


FIG. 4.3 - Conjunto sistema-observador em malha aberta

4 . 2 - SISTEMA PERFEITAMENTE CONHECIDO

Considere-se o sistema

$$\dot{X} = AX + bu \quad (4.5a)$$

$$y = c^T X \quad (4.5b)$$

e o observador

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + bu + \psi(E) \quad (4.6)$$

Sendo $\psi(E) \triangleq [\psi(e_1) \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ e $\psi(e_1)$ como mostra da na figura 4.4.

Subtraindo-se (4.6) de (4.5a), obtem-se

$$\dot{E}(t) = AE(t) - \psi(E) \quad (4.7)$$

ou

$$\dot{E} = (A - kc^T)E \quad p/ \quad -E_c \leq E \leq E_c \quad (4.8a)$$

$$\dot{E} = AE - Ec \quad p/ \quad E > E_c \quad (4.8b)$$

$$\dot{E} = AE + Ec \quad p/ \quad E < -E_c \quad (4.8c)$$

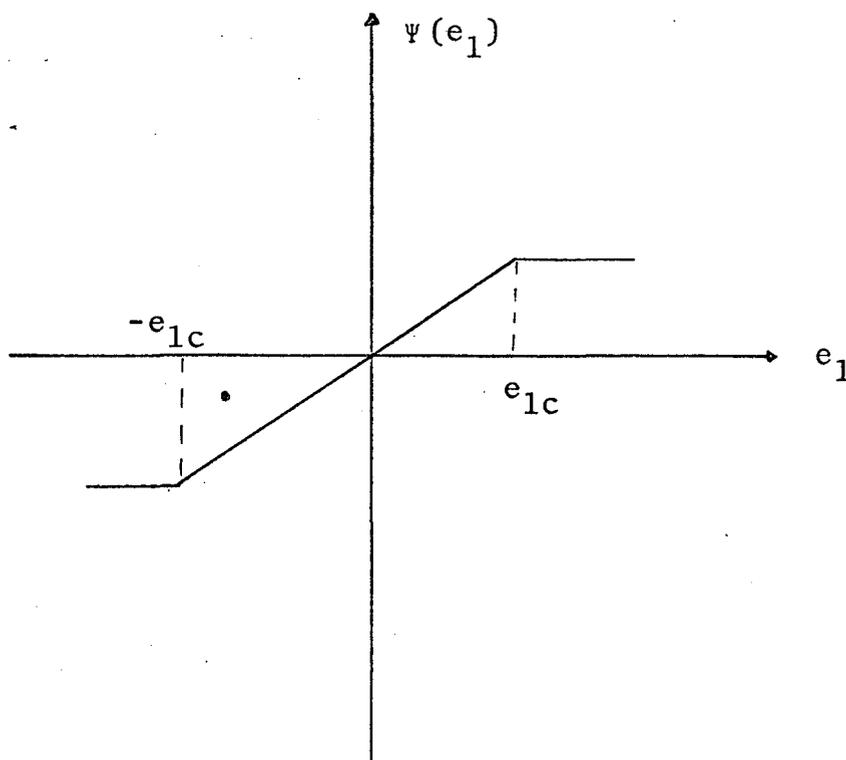


FIG. 4.4 - Não-linearidade considerada

4 . 3 - INCERTEZA QUANTO AOS PARÂMETROS DO SISTEMA

Considere-se o sistema

$$\dot{X} = AX + bu \quad (4.9)$$

e o observador

$$\dot{\hat{X}} = A_0\hat{X} + bu + \psi(E) \quad (4.10)$$

Utilizando (4.9) e (4.10), obtem-se:

$$\dot{E} = A_0E + \Delta AX - \psi(E) \quad (4.11)$$

A equação (4.11) pode ser desmembrada em:

$$\dot{E} = A_0E + \Delta AX - kc^T E \quad p/ \quad -E_c \leq E(t) \leq E_c \quad (4.12a)$$

$$\dot{E} = A_0E + \Delta AX - E_c \quad p/ \quad E_c < E(t) \quad (4.12b)$$

$$\dot{E} = A_0E + \Delta AX + E_c \quad p/ \quad -E_c > E(t) \quad (4.12c)$$

4 . 4 - INFLUÊNCIA DO RUÍDO

Considere-se o sistema (4.9) e o observador

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + bu + \psi(E^*) \quad (4.13)$$

onde

$$E^* = x_1 - \hat{x}_1 + \eta \quad (4.14)$$

subtraindo-se (4.13) de (4.9), encontra-se:

$$\dot{E} = (A - kc^T)E - kc^T \eta \quad p/ \quad -E_c \leq E^*(t) \leq E_c \quad (4.15a)$$

$$\dot{E} = AE - E_c \quad p/ \quad E_c < E^*(t) \quad (4.15b)$$

$$\dot{E} = AE + E_c \quad p/ \quad -E_c > E^*(t) \quad (4.15c)$$

4 . 5 - APLICAÇÃO

Considere-se o sistema (2.32) aqui reescrito para maior comodidade:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (4.16a)$$

$$\dot{x}_2 = 87x_1 - 2,5x_2 + 62,8x_3 + 150,72 \quad (4.16b)$$

$$\dot{x}_3 = - 3,3x_3 + 3,3x_4 \quad (4.16c)$$

$$\dot{x}_4 = - 12,5x_2 - 12,5x_4 \quad (4.16d)$$

e o observador

$$\dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + k_1(x_1 - \hat{x}_1) \quad (4.17a)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = - 87\hat{x}_1 - 2,5\hat{x}_2 + 62,8\hat{x}_3 + 150,72 + k_2(x_1 - \hat{x}_1) \quad (4.17b)$$

$$\dot{\hat{x}}_3 = - 3,3\hat{x}_3 + 3,3\hat{x}_4 + k_3(x_1 - \hat{x}_1) \quad (4.17c)$$

$$\dot{\hat{x}}_4 = - 12,5\hat{x}_2 - 12,5\hat{x}_4 + k_4(x_1 - \hat{x}_1) \quad (4.17d)$$

$$P/ \quad -Ec \leq E \leq Ec$$

$$\dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + ec_1 \quad (4.18a)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = - 87\hat{x}_1 - 2,5\hat{x}_2 + 62,8\hat{x}_3 + 150,72 + ec_1 \quad (4.18b)$$

$$\dot{\hat{x}}_3 = - 3,3\hat{x}_3 + 3,3\hat{x}_4 + ec_1 \quad (4.18c)$$

$$\dot{\hat{x}}_4 = - 12,5\hat{x}_2 - 12,5\hat{x}_4 + ec_1 \quad (4.18d)$$

$$p/ \quad -Ec > E$$

$$\dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 - ec_1 \quad (4.19a)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = - 87\hat{x}_1 - 2,5\hat{x}_2 + 62,8\hat{x}_3 + 150,72 - ec_1 \quad (4.19b)$$

$$\dot{\hat{x}}_3 = - 3,3\hat{x}_3 + 3,3\hat{x}_4 - ec_1 \quad (4.19c)$$

$$\dot{\hat{x}}_4 = - 12,5\hat{x}_2 - 12,5\hat{x}_4 - ec_1 \quad (4.19d)$$

$$p/ \quad Ec < E$$

As curvas que exibem o comportamento do erro, são mostradas na figura

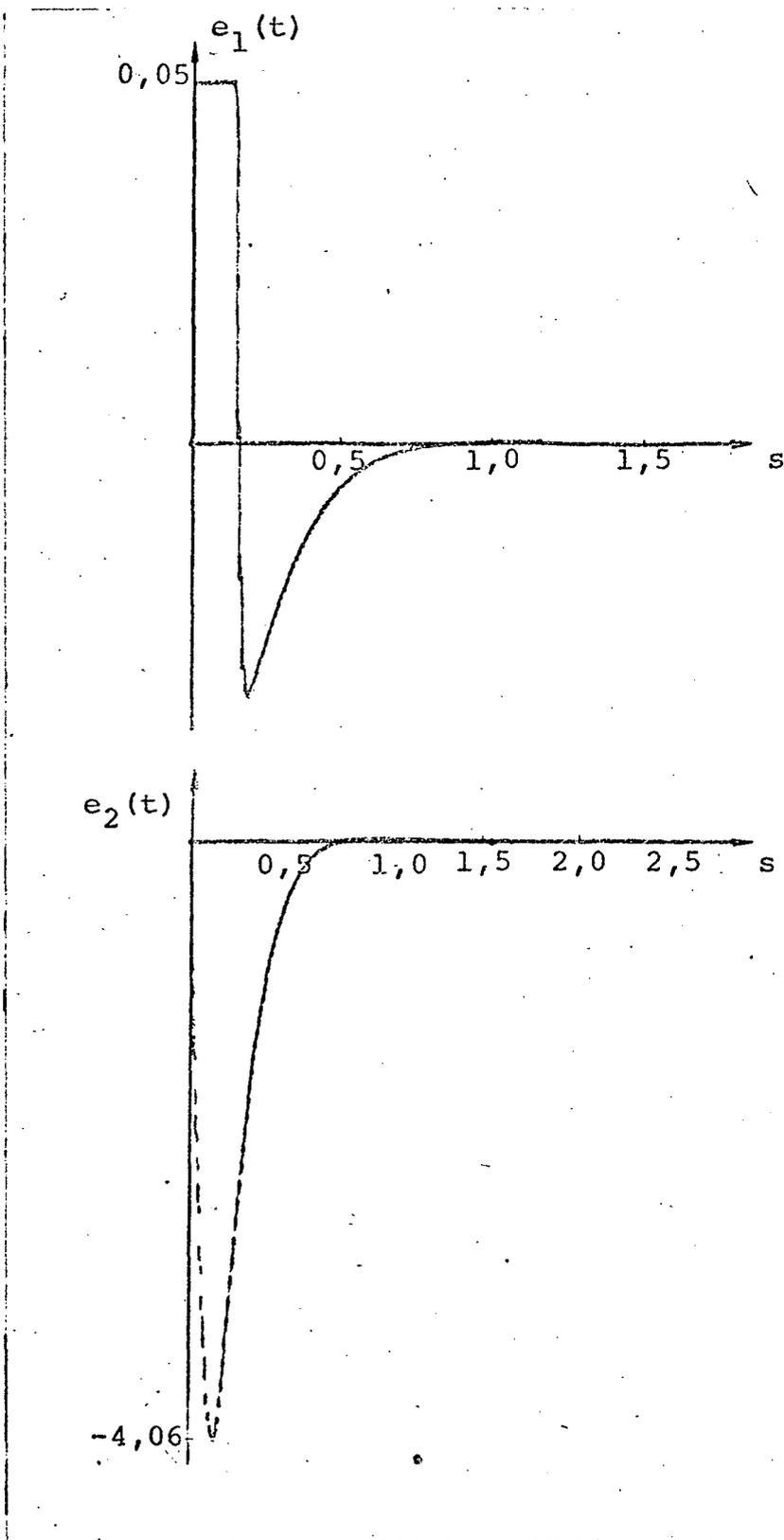


Fig. 4.5. - Erro entre os estados do sistema linear e do observador não-linear. Sistema perfeitamente conhecido.

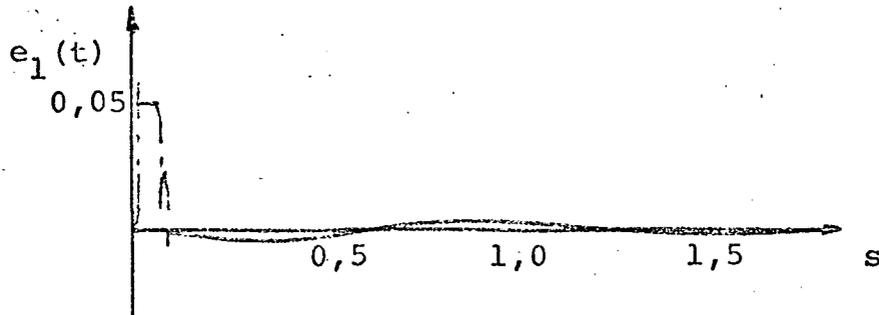


Fig. 4.6 - Comportamento de $e_1(t)$ para um observador não-linear como sugerido. É assumido um erro de 20% entre os parâmetros.

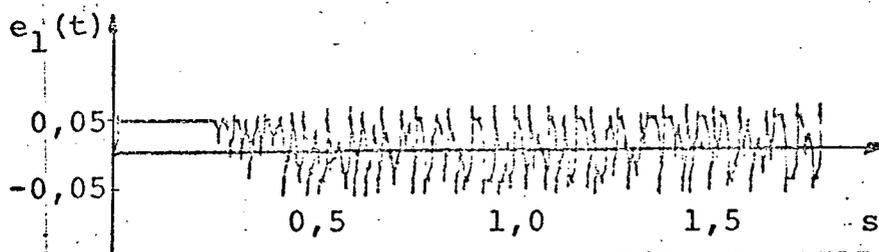


Fig. 4.7 - Comportamento de $e_1(t)$ para um observador não-linear, como sugerido, considerando a influência do ruído.

Assumindo um erro entre os parâmetros do sistema e do observador, da ordem de 20%, como já citado no capítulo II, a curva obtida para o erro entre os estados é mostrada na figura 4.6.

Se o ruído é considerado, o erro comporta-se como mostra a figura 4.7.

4 . 6 - OBSERVAÇÃO SOBRE O OBSERVADOR NÃO-LINEAR PARA SISTEMA LINEAR

SEM POLO NA ORIGEM

Na seção 4.2 foram encontradas as equações:

$$\dot{E} = (A - kc^T)E \quad p/ \quad -E_c \leq E \leq E_c \quad (4.20a)$$

$$\dot{E} = AE - E_c \quad p/ \quad E > E_c \quad (4.20b)$$

$$\dot{E} = AE + E_c \quad p/ \quad E < -E_c \quad (4.20c)$$

Pelas equações (4.20), verifica-se que se o erro é pequeno ($|E| < E_c$), o seu comportamento é determinado pelos autovalores de matriz ($A - kc^T$).

Se esses autovalores possuem parte real negativa, o erro de cairá para zero.

Por outro lado, se o erro é grande em valor absoluto ($E > E_c$ ou $E < -E_c$), o erro será dado por

$$E = A^{-1}E_c \quad (4.21)$$

Dai conclui-se que o sistema não deverá possuir polo na origem a fim de que A^{-1} exista.

CAPITULO QUINTO

CAPITULO QUINTOCONCLUSÕES

Da teoria do controle ótimo sabe-se que a lei de controle ideal exige o conhecimento de todas as variáveis de estado do sistema. Um dos meios mais eficazes de se obter os estados não mensuráveis é a utilização do observador de estados.

Para os sistemas lineares, determinísticos e com parâmetros conhecidos, os resultados obtidos com o uso do observador são bastante satisfatórios.

Para os sistemas não-lineares, a técnica que vem sendo adotada é a de linearizar o sistema e então utilizar o observador linear. A desvantagem principal de tal procedimento é o fato de que os estados gerados pelo observador são confiáveis apenas se o sistema trabalhar nas vizinhanças do seu ponto de operação.

Além disto, existem certos fatores que comprometem a utilização do observador, como:

- a - a influência do ruído
- b - a falta de precisão sobre os parâmetros do sistema.

Neste trabalho inicialmente, foi feita uma análise da influência destes fatores sobre os observadores lineares. Verificou-se que existe um compromisso entre a rapidez de convergência e a sensibilidade dos estados estimados com relação ao ruído.

Em seguida, foram apresentados dois observadores de estados não-lineares, para sistemas também não-lineares com apenas uma não-linearidade. Um para sistemas que apresentam o argumento da não-linearidade mensurável, como ocorre com os sistemas de potência em geral. Outro para sistemas em que o argumento da não-linearidade não é mensurável.

Foram feitas aplicações destes observadores em um sistema constituído de um governador de velocidade, uma turbina e uma máquina síncrona. Os resultados foram comparados com aqueles obtidos pe

la linearização do sistema e a utilização do observador linear.

Verificou-se que mesmo na instabilidade, os estados estimados convergem para os reais. Isto sugere a utilização do observador como alarme contra a instabilidade do sistema, além de demonstrar que os estados assim estimados são muito mais confiáveis que aqueles obtidos com a utilização do observador linear nos sistemas linearizados.

Finalmente, foi apresentado um observador não linear para sistemas lineares que não apresentem polo na origem. A vantagem de tal observador é que ele fornece altos ganhos para o erro enquanto este permanece pequeno e um ganho baixo quando o erro atinge valores maiores. O desempenho deste observador é melhor apreciado nos sistemas em que existe a influência do ruído ou naqueles em que o conhecimento dos parâmetros do sistema não é perfeito.

Foi feita uma aplicação deste observador no sistema já citado e verificou-se que mesmo sob a ação do ruído o ganho na realimentação do erro pode ser feito bem maior que aquele utilizado no observador linear.

Os observadores apresentados neste trabalho estão baseados em uma idéia bastante simples, o que representa mais um fator favorável a sua utilização, mas mostraram, através das aplicações feitas, dar resultados bem melhores que aqueles obtidos com a linearização do sistema ou com a utilização do observador linear nos sistemas lineares em que a ação do ruído e o desconhecimento dos parâmetros do sistema for papel relevante.

Além das aplicações práticas imediatas, este trabalho fornece aberturas para novas pesquisas, como por exemplo a sofisticação dos observadores apresentados, tal como a substituição da não-linearidade utilizada a qual não possui derivada nos pontos críticos, por uma não-linearidade do tipo cúbica.

Além disto pode-se fazer um estudo da utilização destes observadores em um sistema constituído de várias máquinas ao invés de apenas uma como feito aqui.

APÊNDICE

```

1 IST
2 REM "OBSERVADORES NAO-LINEAR"
3 REM SISTEMA DE POTENCIA LINEARIZADO COM ERRO REALIMENTADO NAO-LINEARMENTE
4 REM COM ERRO REALIMENTADO NAO-LINEARMENTE, OS VALORES DOS GANHOS SAO:
5 REM K1=200, K2=200, K3=200, K4=200
6 DIM X(8), C1(8), C2(8), C3(8), C4(8), Z(8), N(8)
7 H=.01
8 B1=-.4
9 B2=-.5
10 B3=-.2
11 B4=-.8
12 H=0
13 G6=20
14 K1=100
15 K2=100
16 K3=100
17 K4=100
18 K5=0
19 X(1)=.6
20 X(2)=0
21 X(3)=0
22 X(4)=0
23 X(5)=0
24 X(6)=0
25 X(7)=0
26 X(8)=0
27 H2=100.4
28 S=.03
29 J=3
30 D=.2
31 P1=.8
32 P2=1.6
33 T1=.08
34 T2=.3
35 J0=3
36 D0=.2
37 Q1=.8
38 Q2=1.6
39 R1=.08
40 R2=.3
41 E=1
42 F=1
43 H1=500
44 H2=10000
45 H3=200
46 H4=1500
47 H5=200
48 H6=10000
49 H7=500
50 H8=5000

```

```

60 FOR I=1 TO 900
70 CALL "PLOT"(I, X0)
71 GO TO 209
80 CALL "PLOT"(I, Y0)
81 GO TO 209
90 CALL "PLOT"(I, Z0)
91 GO TO 209
00 CALL "PLOT"(I, W0)
09 NEXT I
10 FOR I=900 TO 1 STEP -1
12 CALL "PLOT"(I, X0)
13 GO TO 220
15 CALL "PLOT"(I, Y0)
16 GO TO 220
17 CALL "PLOT"(I, Z0)
18 GO TO 220
19 CALL "PLOT"(I, W0)
20 NEXT I
21 STOP
25 T=T0
26 GO TO 292
28 CALL "PLOT"(N1*T, X0+N2*X(1))
29 GO TO 295
30 CALL "PLOT"(N1*T, X0+N2*X(5))
31 GO TO 295
40 CALL "PLOT"(N3*T, Y0+N4*X(2))
41 GO TO 295
50 CALL "PLOT"(N3*T, Y0+N4*X(6))
51 GO TO 295
60 CALL "PLOT"(N5*T, Z0+N6*X(3))
61 GO TO 295
70 CALL "PLOT"(N5*T, Z0+N6*X(7))
71 GO TO 295
80 CALL "PLOT"(N7*T, W0+N8*X(4))
81 GO TO 295
90 CALL "PLOT"(N7*T, W0+N8*X(8))
92 CALL "PLOT"(N1*T, X0+N2*H3)
95 FOR I=1 TO N
98 N(I)=X(I)
00 NEXT I
05 K=1
06 H1=X(1)
07 H3=X(1)+K5*(RND(0)-1/2)-X(5)
08 IF H3>=5 THEN 661
09 IF H3<=-5 THEN 663
10 Z(1)=X(2)
11 U=H2*P1/J
12 Z(2)=(-H2*P2*(.866)/J*X(1)-(H2*0)/J*X(2)+H2/J*X(3))+U
13 Z(3)=-1/T2*X(3)+1/T2*X(4)
14 Z(4)=-1/T1*X(2)-1/T1*X(4)
15 Z(5)=X(6)+K1*H3
16 Z(6)=(-H2*Q2*(.866)/J0*X(5)-(H2*00)/J0*X(6)+H2/J0*X(7)+K2*H3+U
17 Z(7)=1/R2*(X(8)-X(7))+K3*H3
18 Z(8)=-1/R1*(X(6)+X(8))
19 RANDOMIZE
20 IF K=1 THEN 390
21 IF K=2 THEN 460
22 IF K=3 THEN 520
23 IF K=4 THEN 590
24 FOR I=1 TO N
25 C(I)=Z(I)
26 X(I)=N(I)+C1(I)*H/2
27 NEXT I

```

```
0 FOR I=1 TO N
0 C2(I)=Z(I)
0 X(I)=N(I)+C2(I)*H/2
0 NEXT I
0 K=3
0 GO TO 316
0 FOR I=1 TO N
0 C3(I)=Z(I)
0 X(I)=N(I)+C3(I)*H
0 NEXT I
0 T=T0+H
0 K=4
0 GO TO 316
0 FOR I=1 TO N
0 C4(I)=Z(I)
0 N(I)=N(I)+H*(C1(I)+2*(C2(I)+C3(I))+C4(I))/6
0 X(I)=N(I)
0 NEXT I
0 T0=T
0 GO TO 225
0 STOP
1 A3=A6*5
2 GO TO 320
3 A3=-A6*5
4 GO TO 320
0 END
49 X(1)=
```

RDY

A P Ê N D I C E IIEQUIPAMENTO UTILIZADO

Computador Analógico Telefunken RA-770

Registrador Gráfico Hewlett Pachard 7004B X-Y

Multímetro Digital System Donner modelo 7000 A.

Computador Digital D.E.C. PDP - 11/40 , com os seguintes pe
riféricos:

- Leitora / Perfuradora de fita de papel D.E.C. PC 05
- Teletipo D.E.C. writer La30 - PB
- "Display" Tektronix VT01A.

- (9) - LUENBERGER, D. G. (1966)
 "Observers for Multivariable Systems"
 IEEE - Trans. Aut. Control
 AC-11(2): 190-197, Mar/Abr, 1966
- (10) - ORSINI L.Q. (1975)
 "Realimentação De Estados "
 I Semana de Conferência - S.B.A.
 S. Paulo, Dez, 1975.
- (11) - PAGUREK, B. (1972)
 "Sensitivity of The Performance of Opti-
 mal Linear Control Systems to Parameter'
 Variations"
 Int. J. Control 15(1): 129-141, Jan,
 1972
- (12) - PIRES, A. S. (1976)
 "Uma Abordagem para o problema do contro
 le de frequência de carga"
 Florianópolis, UFSC. 1976.
- (13) - RAMAR, K. B. RAMASWAMI (1968)
 "A Note On Optimal Linear Regulator With
 Incomplete State Feedback"
 IEEE - Trans. Aut. Control
 AC - 13(2): 443-444, Abr, 1968
- (14) - REKASIUS, Z.V. (1967)
 "Optimal Linear Regulator With Incomple-
 te State Feedback"
 IEEE - Trans. Aut. Control
 AC - 12(3): 296-299, Jun., 1967 /
- (15) - SARMA, V.V.S. B.L. DEEKSHATULU (1968)
 "Optimal Control When Some of The State Va-
 riable Are Not Mensurable"
 Int. J. Control, 7(3): 251-256., Mar.
 1968.

(16) - SOBRAL Jr. M. (1968)

"Sensitivity In Optimal Control Systems"

IEEE - Proc.

(56) - 10: 1644-1652, Oct. 1968

(17) - THALER, G. J. B.E. BROWN (1960)

"Feedback Control Systems"

Tório, Mac Grow-Hill, 1960

(18) - UEDA, R. S. TAKATA (1975)

"On The Estimation of Transient State of
Power Systems by Discrete Nonlinear Ob-
server"

IEEE - Trans. Power App.

Pas - 94(6): 2135-2140, Nov/D.z, 1975

(19) - WIBERG, D. M. (1971)

"State Space and Linear Systems"

N. Y. Mac Grow-Hill, 1971

(20) - WILLEMS, J. L. (1970)

"Stability Theory of Dinamical Systems"

Londres, William Gowes, 1970.