

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE DE CONTROLE PRIMÁRIO DE
CARGA-FREQÜÊNCIA EM AMBIENTE
ESTOCÁSTICO E DETERMINÍSTICO.

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

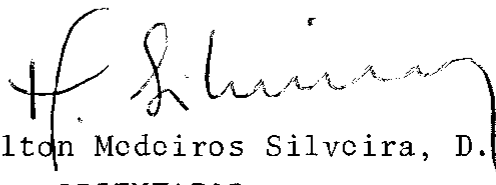
JOSÉ ROBERTO PINTO DA SILVA

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO - 1986

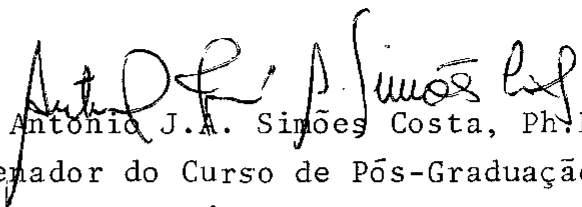
ANÁLISE DE CONTROLE PRIMÁRIO DE
CARGA-FREQUÊNCIA EM AMBIENTE
ESTOCÁSTICO E DETERMINÍSTICO

JOSÉ ROBERTO PINTO DA SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA, ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM
SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.

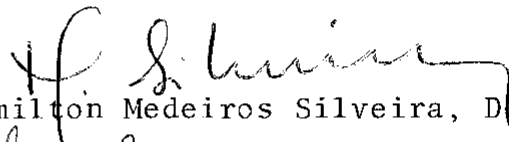


Prof. Hamilton Medeiros Silveira, D.Et.
ORIENTADOR



Prof. Antonio J.A. Sinões Costa, Ph.D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

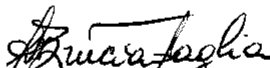
BANCA EXAMINADORA



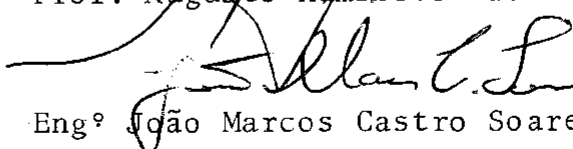
Prof. Hamilton Medeiros Silveira, D.Et.



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.



Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia, D.Ing.



Engº João Marcos Castro Soares, M.Sc.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Hamilton Medeiros Silveira, cuja orientação e apoio foram decisivos na execução deste trabalho.

A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho chegasse ao seu final.

RESUMO

Este trabalho propõe um controlador do tipo variância mínima para os processos sujeitos a perturbações estocásticas e determinísticas.

O seguidor estudado foi aplicado em um processo convencional de regulação primária carga-freqüência, para geradores térmicos, como uma malha de controle suplementar.

A comparação entre o regulador convencional e o proposto, realizada através de simulação digital, mostrou que o regulador estudado elimina o efeito de perturbações determinísticas e atenua o efeito de perturbações estocásticas.

ABSTRACT

The purpose of this work is to present a minimal variance controller for a process subject to stochastic and deterministic disturbances.

The studied controller was applied to a classical process of load-frequency primary regulation of thermal generator units, as a loop of supplementary regulation.

Comparison between the classical and the proposed regulator, made by means of digital simulation, showed that the proposed regulator eliminates the effects of deterministic disturbances and attenuates the stochastic disturbance effects.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Considerações iniciais	1
1.2 - Desenvolvimento do trabalho	2
CAPÍTULO 2 - DETERMINAÇÃO DE UM SEGUIDOR A VARIÂNCIA MÍNIMA QUANDO O PROCESSO É SUJEITO A PERTURBAÇÕES ES- TOCÁSTICAS E DETERMINÍSTICAS	3
2.1 - Introdução	3
2.2 - Definição do processo e do problema a ser resolvido..	3
2.3 - A solução do problema - estimador da perturbação es- tocástica	5
2.4 - Cálculo do seguidor	7
2.5 - Determinação do polinômio $[1 + F(q^{-1})]$	10
2.5.1 - Perturbação determinística $W(k)$ do tipo cons- tante	10
2.5.2 - Perturbação determinística $W(k)$ do tipo cons- tante/rampa	13
2.6 - Diagrama de blocos do seguidor	15
CAPÍTULO 3 - CONCEITUAÇÃO E MODELAGEM PARA ESTUDO DA MALHA DE REGULAÇÃO PRIMÁRIA DE SISTEMAS ELÉTRICOS...	17
3.1 - Introdução	17
3.2 - Conceituação geral da regulação primária	18
3.3 - Modelagem do regulador de velocidade e turbina	19
3.4 - Aspectos gerais de desempenho de um sistema elétrico de potência frente a distúrbios	20
3.5 - Simplificações válidas para o estudo da regulação pri- mária	23
3.6 - Modelagem do sistema elétrico e do gerador	24
3.7 - Aspectos gerais de desempenho da malha de regulação primária	25
3.8 - Conclusão	29

CAPÍTULO 4 - A DISCRETIZAÇÃO DO PROCESSO	30
4.1 - Introdução	30
4.2 - Metodologia adotada para discretizar o processo	30
4.3 - Função de transferência em discreto do processo e se- guidor	37
CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS	40
5.1 - Introdução	40
5.2 - Casos simulados - análise	40
5.3 - Observação geral	57
5.4 - Conclusões	58
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A idéia de desenvolver este trabalho nasceu da observação do comportamento do processo convencional de regulação primária de carga-freqüência em sistemas elétricos de potência.

Esse processo convencional caracteriza-se por ter um regulador calculado de modo tal que leva em conta apenas a ocorrência de perturbações determinísticas no processo de regulação [1], [2], [3], perturbações estas definidas como as variações de carga no sistema elétrico de potência. Acontece que na operação real deste sistema ocorrem também perturbações do tipo estocástico. Quando ocorrem perturbações determinísticas no processo de regulação primária, surge um erro não constante entre a referência do processo e a saída deste, tanto em regime transitório como em regime permanente. Neste trabalho, esse erro é chamado de erro de seguimento. Por outro lado, quando ocorrem perturbações estocásticas no processo, existe ainda o erro de seguimento, que neste caso apresenta características estocásticas.

Com base nestes aspectos, neste trabalho é proposto um esquema de controle (um seguidor) que, aplicado ao processo de regulação primária, rejeita as perturbações determinísticas, bem como minimiza a influência das perturbações estocásticas sobre o processo de regulação. Dessa maneira, o esquema apresentado pretende minimizar o erro de seguimento citado anteriormente.

Em outras palavras, é proposto um seguidor a variância mínima, aplicável a processos sujeitos à perturbações estocásticas e determinísticas, cuja operação caracteriza-se por fazer com que a variância do erro entre a saída do processo e a referência seja mínima, sendo a perturbação determinística rejeitada neste novo processo de controle [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13].

Ainda neste trabalho, apresentam-se simulações do seguidor proposto aplicado sobre o regulador convencional do controle primário carga-frequência, que passa a ser o processo para a aplicação do seguidor.

Dessa maneira é verificado que o seguidor proposto atende os objetivos a que se destina, ou seja, rejeita as perturbações determinísticas bem como minimiza a variância do erro entre a saída do processo e a referência deste.

1.2. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Este trabalho apresenta no Capítulo 2 o desenvolvimento de um seguidor a variância mínima para ser aplicado em processos sujeitos a perturbações estocásticas e determinísticas.

Na sequência, no Capítulo 3, é apresentada a conceitualização geral da regulação primária carga-frequência em sistemas elétricos de potência. Além disso, neste capítulo apresenta-se os modelos necessários para a simulação da atuação do seguidor desenvolvido no Capítulo 2.

No Capítulo 4 apresentam-se a metodologia de discretização do processo para a simulação da ação digital do seguidor.

No Capítulo 5 apresenta-se o conjunto de simulações efetuadas, bem como a análise de cada uma delas.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões de destaque deste trabalho, bem como as perspectivas para outros.

CAPITULO 2

DETERMINAÇÃO DE UM SEGUIDOR A VARIÂNCIA MÍNIMA QUANDO O PROCESSO É SUJEITO A PERTURBAÇÕES ESTOCÁSTICAS E DETERMINÍSTICAS.

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a teoria e o desenvolvimento de um seguidor discreto a variância mínima aplicável a um processo submetido a perturbações estocásticas e determinísticas.

Para isso, inicialmente é definida uma classe de processos, submetida a perturbações estocásticas e determinísticas, é definida a equação do erro de seguimento e é desenvolvido o cálculo do seguidor.

No final é apresentado o diagrama em blocos do seguidor a variância mínima estudado.

O seguidor determinado neste capítulo será aplicado em um processo de controle primário de carga-freqüência, objetos dos capítulos a seguir.

2.2. DEFINIÇÃO DO PROCESSO E DO PROBLEMA A SER RESOLVIDO

Seja um processo, de ordem n , linear discreto, invariante no tempo, com uma entrada e uma saída, sujeito a distúrbios, descrito pela expressão:

$$[1+A(q^{-1})]Y(k) = B(q^{-1})u(k) + W(k) + [1+C(q^{-1})]\xi(k) \quad (2.2-1)$$

onde $u(k)$ e $y(k)$ são respectivamente a entrada e saída e

$$A(q^{-1}) = a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n} \quad (2.2-1a)$$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + \dots + b_nq^{-n} \quad (2.2-1b)$$

$$C(q^{-1}) = c_1q^{-1} + \dots + c_nq^{-n} \quad (2.2-1c)$$

O polinômio $B(q^{-1})$ tem suas raízes dentro do círculo unitário.

Nesse processo, admita-se que os distúrbios (ou perturbações) são do tipo determinístico e estocástico, e representam imperfeições na modelagem dos ruídos provenientes do sistema de medição ou variações estocásticas de parâmetros.

Neste trabalho a perturbação determinística $W(k)$ é solução de um sistema linear autônomo dado por:

$$[1 + D_1(q^{-1})]W(k) = 0 \quad (2.2-2)$$

onde o polinômio $D_1(q^{-1})$ é dado por

$$1 + D_1(q^{-1}) = 1 + d_{11}q^{-1} + d_{12}q^{-2} + \dots + d_{1m_1}q^{-m_1}, \quad (2.2-2a)$$

cujas raízes estão sobre ou fora do círculo unitário do plano z .

A perturbação estocástica $\xi(k)$ é um ruído branco, com as propriedades [6]

$$E\{\xi(k)\} = 0 \quad (2.2-3a)$$

$$E\{\xi^2(k)\} = \sigma^2 \quad (2.2-3b)$$

$$E\{\xi(i) \cdot \xi(j)\} = 0, \text{ para qualquer } i \neq j \quad (2.2-3c)$$

Admita-se também que o polinômio $1 + C(q^{-1})$, cuja estrutura pode ser identificada, possui todas as suas raízes contidas no círculo unitário do plano z .

Pode-se então representar a equação 2.2-1 através do diagrama em blocos mostrado na Figura 2.1.

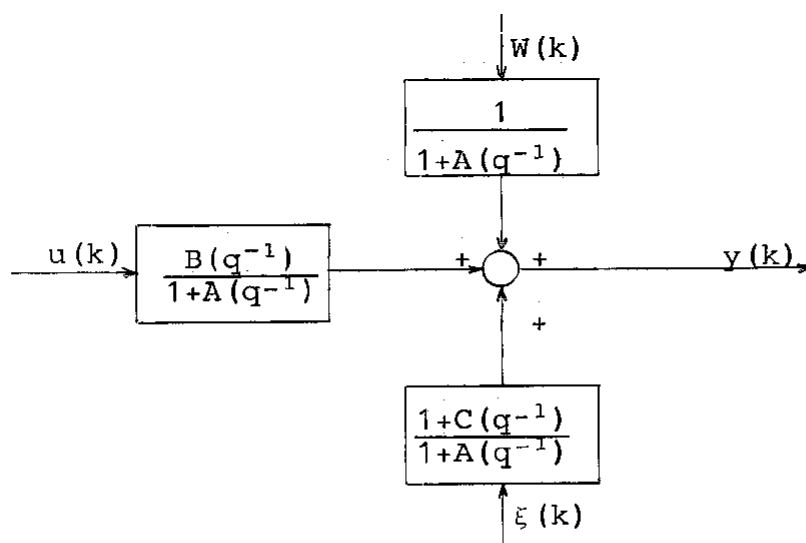


FIGURA 2.1 - Representação da equação 2.2-1.

Admita-se agora que a saída $y(k)$ do processo anteriormente descrito tenha que seguir um sinal de referência $R(k)$, que satisfaz a restrição de ser solução de um sistema linear autônomo e invariante dado por

$$[1+D_2(q^{-1})]R(k) = 0, \quad (2.2-4)$$

onde

$$[1+D_2(q^{-1})] = 1+d_{21}q^{-1} + \dots + d_{2m_2}q^{-m_2} \quad (2.2-4a)$$

cujas raízes podem ter qualquer valor.

Devido à perturbação estocástica, é impossível esperar que a saída $y(k)$ siga exatamente a referência $R(k)$. Assim, procura-se encontrar um seguidor de modo que a variância do erro de seguimento

$$\varepsilon(k) = y(k) - R(k) \quad (2.2-5)$$

seja mínima.

Em outras palavras, o problema consiste em determinar um seguidor para o processo descrito por 2.2-1 tal que a variância do erro de seguimento seja mínima.

2.3. A SOLUÇÃO DO PROBLEMA - ESTIMADOR DA PERTURBAÇÃO ESTOCÁSTICA

Para resolver o problema proposto no item anterior adota-se um estimador da perturbação estocástica, juntamente com a teoria de servomecanismo robusto [7],[8],[9],[10], cujo desenvolvimento é apresentado a seguir.

Aplicando-se $[1+D_1(q^{-1})]$ na equação dinâmica do processo, equação 2.2-1, tem-se:

$$[1+D_1(q^{-1})][1+A(q^{-1})]y(k) = [1+D_1(q^{-1})]B(q^{-1})u(k) + [1+D_1(q^{-1})]W(k) + [1+D_1(q^{-1})][1+C(q^{-1})]\xi(k) \quad (2.3-1)$$

Definindo-se o sinal $w(k)$ por

$$w(k) = [1+D_1(q^{-1})]\xi(k) \quad (2.3-2)$$

e aplicando-se em 2.3-1, junto com 2.2-2, chega-se a:

$$[1+D_1(q^{-1})][1+A(q^{-1})]y(k) = [1+D_1(q^{-1})]B(q^{-1})u(k) + [1+C(q^{-1})]\omega(k) \quad (2.3-3)$$

Em representação por diagramas de blocos, a expressão 2.3-3 pode ser apresentada na forma da figura 2.2 a seguir:

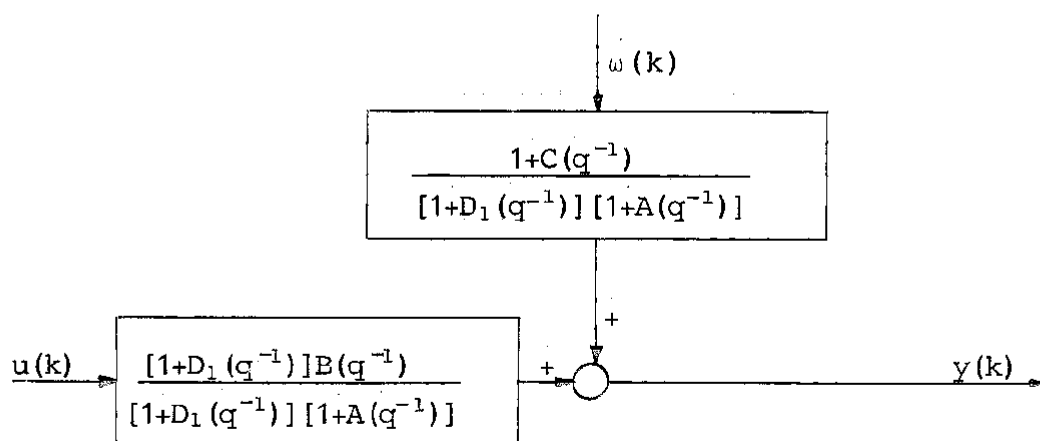


FIGURA 2.2- Representação da equação 2.3-3.

Pode-se agora definir um estimador da perturbação $\omega(k)$ por:

$$[1+C(q^{-1})]\hat{\omega}(k) = [1+D_1(q^{-1})][1+A(q^{-1})]y(k) - [1+D_1(q^{-1})]B(q^{-1})u(k) \quad (2.3-4)$$

Para mostrar que 2.3-4 é um estimador da perturbação $\omega(k)$, substitui-se esta em 2.3-3 e obtém-se:

$$[1+C(q^{-1})][\hat{\omega}(k) - \omega(k)] = 0 \quad (2.3-5)$$

Como o polinômio $[1+C(q^{-1})]$ possui, por hipótese, todas as suas raízes contidas dentro do círculo unitário do plano z , tem-se que:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} [\hat{\omega}(k) - \omega(k)] = 0 \quad (2.3-6)$$

Usando a equação 2.3-4, fica assim demonstrado que se pode adotar um estimador da perturbação $\omega(k)$ como sendo $\hat{\omega}(k)$ da por:

$$\hat{\omega}(k) = \frac{[1+D_1(q^{-1})][1+A(q^{-1})]}{1+C(q^{-1})} y(k) - \frac{[1+D_1(q^{-1})]B(q^{-1})}{1+C(q^{-1})} u(k) \quad (2.3-7)$$

Convém citar que adotou-se um estimador de $\omega(k)$, e não de $\xi(k)$, porque no processo existe também uma perturbação determinística não conhecida $W(k)$.

2.4. CÁLCULO DO SEGUIDOR.

O próximo passo agora é determinar um seguidor que, aplicado ao processo e perturbações, permite que se consiga a estratégia adotada, qual seja a de minimizar a variância do erro de seguimento.

Seja o erro do seguimento definido por:

$$\varepsilon(k) = y(k) - R(k) \quad (2.4-1)$$

Seja o polinômio:

$$1+D(q^{-1}) = 1+d_1q^{-1}+d_2q^{-2}+ \dots + d_mq^{-m} \quad (2.4-2)$$

tal que:

$$[1+D(q^{-1})]R(k) = 0 \text{ e} \quad (2.4-3a)$$

$$[1+D(q^{-1})]W(k) = 0 \quad (2.4-3b)$$

Para que o polinômio $1+D(q^{-1})$ atenda o proposto em 2.4-3a e 2.4-3b, basta que seja o mínimo múltiplo comum entre $1+D_1(q^{-1})$ e $1+D_2(q^{-1})$.

Aplicando-se o polinômio definido em 2.4-2 na equação geral do processo, 2.2-1, tem-se:

$$[1+D(q^{-1})][1+A(q^{-1})]y(k) = [1+D(q^{-1})]B(q^{-1})u(k) + [1+D(q^{-1})]W(k) + [1+D(q^{-1})][1+C(q^{-1})]\xi(k) \quad (2.4-4)$$

Tendo em vista 2.4-3b, a equação 2.4-4 assume a forma:

$$[1+D(q^{-1})][1+A(q^{-1})]y(k) = [1+D(q^{-1})]B(q^{-1})u(k) + [1+D(q^{-1})][1+C(q^{-1})]\xi(k) \quad (2.4-5)$$

Observe-se aqui a eliminação da perturbação determinística.

Define-se agora o sinal $v(k)$ dado por:

$$v(k) = [1 + D(q^{-1})] u(k), \quad (2.4-6)$$

que substituído em 2.4-5 fornece:

$$[1+D(q^{-1})][1+A(q^{-1})]y(k) = B(q^{-1})v(k) + [1+D(q^{-1})][1+C(q^{-1})]\xi(k) \quad (2.4-7)$$

Por outro lado, pode-se aplicar o polinômio $1+D(q^{-1})$ na equação 2.4-1 do erro do seguimento $\varepsilon(k)$, donde obtêm-se:

$$[1+D(q^{-1})]\varepsilon(k) = -[1+D(q^{-1})]R(k) + [1+D(q^{-1})]y(k), \quad (2.4-8)$$

e tendo em vista 2.4-3a, a equação 2.4-8 assume a forma:

$$[1+D(q^{-1})]\varepsilon(k) = [1+D(q^{-1})]y(k) \quad (2.4-9)$$

Substituindo 2.4-9 em 2.4-7 tem-se:

$$[1+A(q^{-1})][1+D(q^{-1})]\varepsilon(k) = B(q^{-1})v(k) + [1+D(q^{-1})][1+C(q^{-1})]\xi(k) \quad (2.4-10)$$

O polinômio $1+D(q^{-1})$ pode ser decomposto na forma:

$$1 + D(q^{-1}) = [1 + D_3(q^{-1})][1 + D_1(q^{-1})] \quad (2.4.11)$$

que aplicado em 2.4-10, fornece a expressão:

$$[1+A(q^{-1})][1+D(q^{-1})]\varepsilon(k) = B(q^{-1})v(k) + [1+D_3(q^{-1})][1+C(q^{-1})][1+D_1(q^{-1})]\xi(k) \quad (2.4-12)$$

Tendo em vista 2.3-2, a equação 2.4-12 assume a forma:

$$[1+A(q^{-1})][1+D(q^{-1})]\varepsilon(k) = B(q^{-1})v(k) + [1+D_3(q^{-1})][1+C(q^{-1})]\omega(k) \quad (2.4-13)$$

A expressão 2.4-13 pode ser reescrita na forma

$$[1+S(q^{-1})]\varepsilon(k) = B(q^{-1})v(k) + [1+P(q^{-1})]\omega(k) \quad (2.4-14)$$

onde:

$$1+S(q^{-1}) = [1+A(q^{-1})][1+D(q^{-1})] = 1+s_1q^{-1} + \dots + s_{ns}q^{-ns} \quad (2.4-15a)$$

$$1+P(q^{-1}) = [1+D_3(q^{-1})][1+C(q^{-1})] = 1+p_1q^{-1} + \dots + p_{np}q^{-np} \quad (2.4-15b)$$

Define-se agora o controlador através da expressão:

$$B(q^{-1})v(k) = S(q^{-1})\varepsilon(k) - [P(q^{-1}) - F(q^{-1})]\hat{w}(k) \quad (2.4-16)$$

onde:

$$F(q^{-1}) = f_1q^{-1} + f_2q^{-2} + \dots + f_rq^{-r} \quad (2.4-17)$$

Substituindo-se 2.4-16 na equação 2.4-14 chega-se a:

$$[1 + S(q^{-1})]\varepsilon(k) = S(q^{-1})\varepsilon(k) - [P(q^{-1}) - F(q^{-1})]\hat{w}(k) + [1 + P(q^{-1})]\omega(k) \quad (2.4-18)$$

que reescrevendo transforma-se em:

$$\varepsilon(k) + S(q^{-1})\varepsilon(k) = S(q^{-1})\varepsilon(k) - P(q^{-1})\hat{w}(k) + F(q^{-1})\hat{w}(k) + \omega(k) + P(q^{-1})\omega(k) \quad (2.4-19)$$

e que assume a forma final:

$$\varepsilon(k) = -P(q^{-1})[\hat{w}(k) - \omega(k)] + F(q^{-1})\hat{w}(k) + \omega(k) \quad (2.4-20)$$

Observe-se que quando k tende para infinito o valor de $\hat{w}(k)$ tende para $\omega(k)$. Como o polinômio $1 + C(q^{-1})$ possui suas raízes dentro do círculo unitário do plano z , o erro entre $\hat{w}(k)$ e $\omega(k)$ tende para zero, donde a expressão 2.4-20 assume, em regime permanente, a forma:

$$\varepsilon(k) = [1 + F(q^{-1})]\omega(k) \quad (2.4-21)$$

Através das manipulações anteriores, chegou-se então a uma equação dinâmica para o erro do seguimento $\varepsilon(k)$, dada pela equação 2.4-21 anterior.

Analisando-se novamente o problema, deve-se ter em mente que o objetivo é encontrar um seguidor que torne mínima a variância do erro de seguimento.

O seguidor foi definido nos passos anteriores, e expresso pela equação 2.4-16, a seguir reproduzida:

$$B(q^{-1})v(k) = S(q^{-1})\varepsilon(k) - [P(q^{-1}) - F(q^{-1})]\hat{w}(k) \quad (2.4-22)$$

Por outro lado, nesta expressão o polinômio $F(q^{-1})$ não é conhecido. Pode-se no entanto determiná-lo através da aplicação da estratégia de mínima variância do erro de seguimento na equação dinâmica deste erro, dada pela expressão 2.4-21 a seguir reproduzida:

$$\varepsilon(k) = [1 + F(q^{-1})]\omega(k) \quad (2.4-23)$$

O problema final agora é então encontrar o polinô-

mio $[1+F(q^{-1})]$ tal que o controlador definido por 2.4-22 leve o erro de seguimento, dado por:

$$\varepsilon(k) = -R(k) + y(k) = [1+F(q^{-1})] \omega(k) = [1+F(q^{-1})][1+D_1(q^{-1})] \xi(k) \quad (2.4-24)$$

a ter o menor valor possível para sua variância.

Esse problema é resolvido no item a seguir.

2.5. DETERMINAÇÃO DO POLINÔMIO $1+F(q^{-1})$

De acordo com o que foi apresentado no item 2.4, faz-se agora necessária a determinação do polinômio $[1+F(q^{-1})]$ de modo que a variância do erro de seguimento dado pela expressão:

$$\varepsilon(k) = [1+F(q^{-1})][1+D_1(q^{-1})] \xi(k) \quad (2.5-1)$$

seja mínima.

Nesse sentido, apresentam-se a seguir dois exemplos de determinação de $[1+F(q^{-1})]$.

O primeiro deles mostra a análise de três estruturas para o polinômio $[1+F(q^{-1})]$, quando a perturbação determinística $W(k)$ é um sinal do tipo constante. O segundo exemplo mostra a análise de três estruturas para o polinômio $[1+F(q^{-1})]$, quando a perturbação determinística $W(k)$ é um sinal do tipo constante/rampa.

2.5.1. PERTURBAÇÃO DETERMINÍSTICA $W(k)$ DO TIPO CONSTANTE

Como já apresentado no item 2.2, a perturbação determinística $W(k)$ tem que ser saída de um sistema linear autônomo invariante, situação que pode ser expressa por:

$$[1+D_1(q^{-1})]W(k) = 0 \quad (2.5-2)$$

Neste caso, a estrutura do polinômio $[1+D_1(q^{-1})]$ é dada por:

$$1 + D_1(q^{-1}) = 1 - q^{-1} \quad (2.5-3)$$

Admitindo-se inicialmente que o polinômio $[1+F(q^{-1})]$ tenha a forma

$$1 + F(q^{-1}) = 1 \quad (2.5-4)$$

tem-se que:

$$1 + D_1(q^{-1}) = 1 - q^{-1} \quad (2.5-4a)$$

$$1 + F(q^{-1}) = 1 \quad (2.5-4b)$$

Aplicando 2.5-4a e 2.5-4b na expressão 2.5-1 do erro de seguimento tem-se:

$$\varepsilon(k) = (1)(1 - q^{-1})\xi(k) = \quad (2.5-5)$$

$$= \xi(k) - \xi(k-1) \quad (2.5-6)$$

A variância de $\varepsilon(k)$ é definida por:

$$\text{var}\{\varepsilon(k)\} = E\{\varepsilon^2(k)\} - E^2\{\varepsilon(k)\} \quad (2.5-7)$$

Substituindo-se 2.5-6 em 2.5-7, tem-se:

$$\text{var}\{\varepsilon(k)\} = E\{[\xi(k) - \xi(k-1)]^2\} - E^2\{[\xi(k) - \xi(k-1)]\} \quad (2.5-8)$$

Por outro lado tendo em vista que o sinal $\xi(k)$ é um ruído branco, com as propriedades citadas em 2.2-3a, 2.2-3b e 2.2-3c, o segundo termo de 2.5-8 é zero, ou seja, a média de seguimento é zero, conceito que será automaticamente aplicado daqui para frente. Tem-se então:

$$\text{var}\{\varepsilon(k)\} = E\{[\xi(k) - \xi(k-1)]^2\} = \quad (2.5-9)$$

$$= E\{\xi^2(k) + \xi^2(k-1) - 2\xi(k) \cdot \xi(k-1)\} \quad (2.5-10)$$

Pelas mesmas propriedades do ruído branco, citadas anteriormente, a expressão 2.5-10 assume a forma:

$$\text{var}\{\varepsilon(k)\} = \sigma^2 + \sigma^2 - 0 = 2\sigma^2, \quad (2.5-11)$$

donde se conclui que, para a estrutura de $[1 + F(q^{-1})]$ dada por 2.5-4b, a variância de $\varepsilon(k)$ é constante, com um valor dado por $2\sigma^2$, onde σ^2 é a variância do ruído branco.

Admitindo-se agora que o polinômio $[1 + F(q^{-1})]$ tem a forma:

$$1 + F(q^{-1}) = 1 - f_1 q^{-1} \quad (2.5-12)$$

tem-se que:

$$1 + D_1(q^{-1}) = 1 - q^{-1} \quad (2.5-12a)$$

$$1 + F(q^{-1}) = 1 - f_1 q^{-1} \quad (2.5-12b)$$

Aplicando 2.5-12a e 2.5-12b em 2.5-1 tem-se:

$$\varepsilon(k) = (1-f_1 q^{-1})(1-q^{-1})\xi(k) \quad (2.5-13)$$

ou então:

$$\varepsilon(k) = \xi(k) - \xi(k-1) - f_1 \xi(k-1) + f_1 \xi(k-2) \quad (2.5-14)$$

A variância de $\varepsilon(k)$ é dada por:

$$\begin{aligned} \text{var}\{\varepsilon(k)\} &= E\{\varepsilon^2(k)\} = E\{[\xi(k) - \xi(k-1)(1+f_1) + \\ &+ f_1 \xi(k-2)]^2\} \end{aligned} \quad (2.5-15)$$

Tendo em vista as propriedades do ruído branco citadas anteriormente, a expressão 2.5-15 assume a forma:

$$\text{var}\{\varepsilon(k)\} = (2+2f_1+2f_1^2)\sigma^2 \quad (2.5-16)$$

Determinando-se agora o valor de f_1 que torna mínimo o valor da variância de $\varepsilon(k)$, chega-se a $f_1 = -0,5$, de modo que o valor da variância de $\varepsilon(k)$ assume o valor $1,5\sigma^2$.

Conclui-se daí que, para a estrutura de $1+F(q^{-1})$ proposta em 2.5-12b, o menor valor possível para a variância de $\varepsilon(k)$ é dado por $1,5\sigma^2$.

Admitindo-se agora que o polinômio $[1+F(q^{-1})]$ tenha a forma:

$$1 + F(q^{-1}) = 1 - f_1 q^{-1} - f_2 q^{-2} \quad (2.5-17)$$

tem-se que:

$$1 + D_1(q^{-1}) = 1 - q^{-1} \quad (2.5-17a)$$

$$1 + F(q^{-1}) = 1 - f_1 q^{-1} - f_2 q^{-2} \quad (2.5-17b)$$

Aplicando 2.5-17a e 2.5-17b em 2.5-1 tem-se que:

$$\varepsilon(k) = (1-f_1 q^{-1}-f_2 q^{-2})(1-q^{-1})\xi(k) \quad (2.5-18)$$

donde chega-se a:

$$\varepsilon(k) = \xi(k) - \xi(k-1)(1+f_1) - \xi(k-2)(-f_1+f_2) + f_2 \xi(k-3) \quad (2.5-19)$$

Aplicando em 2.5-19 a definição de variância dada por 2.5-7, bem como aplicando as propriedades do ruído branco citadas anteriormente chega-se a:

$$\text{var}\{\varepsilon(k)\} = [1+(1+f_1)^2+(f_2-f_1)^2+f_2^2]\sigma^2 \quad (2.5-20)$$

Pode-se agora determinar o mínimo de 2.5-20, que conduz aos valores de f_1 e f_2 que tornam mínima a variância de $\varepsilon(k)$

dados por $f_1 = -\frac{2}{3}$ e $f_2 = -\frac{1}{3}$.

Substituindo esses valores de f_1 e f_2 em 2.5-20, tem-se que, para a estrutura de $1+F(q^{-1})$ proposta em 2.5-17b, o menor valor de variância de $\varepsilon(k)$ é dada por $1,33\sigma^2$.

Dessas análises pode-se notar que quanto maior o número de termos adotados para o polinômio $[1+F(q^{-1})]$ menor é o valor da variância do erro de seguimento $\varepsilon(k)$.

2.5.2. PERTURBAÇÃO DETERMINÍSTICA $W(k)$ DO TIPO CONSTANTE/RAMPA

Neste caso o polinômio $[1+D_1(q^{-1})]$ da expressão 2.5-2 tem a forma:

$$1 + D_1(q^{-1}) = 1 - 2q^{-1} + q^{-2} \quad (2.5-21)$$

Admitindo-se inicialmente que o polinômio $[1+F(q^{-1})]$ tenha a forma

$$1 + F(q^{-1}) = 1 \quad (2.5-22)$$

tem-se que:

$$1 + D_1(q^{-1}) = 1 - 2q^{-1} + q^{-2} \quad (2.5-22a)$$

$$1 + F(q^{-1}) = 1 \quad (2.5-22b)$$

Aplicando 2.5-22a e 2.5-22b em 2.5-1 tem-se:

$$\varepsilon(k) = \xi(k) - 2\xi(k-1) + \xi(k-2) \quad (2.5-23)$$

Aplicando em 2.5-23 a definição de variância dada por 2.5-7, bem como aplicando as propriedades do ruído branco já citadas nos passos anteriores, chega-se à variância do $\varepsilon(k)$, dada por $6\sigma^2$, donde se conclui que, para a estrutura proposta para $[1+F(q^{-1})]$ dada por 2.5-22b, a variância de $\varepsilon(k)$ é constante, com um valor dado por $6\sigma^2$.

Admitindo-se agora que o polinômio $[1+F(q^{-1})]$ tem a forma:

$$1 + F(q^{-1}) = 1 - f_1 q^{-1} \quad (2.5-24)$$

tem-se:

$$1 + D_1(q^{-1}) = 1 - 2q^{-1} + q^{-2} \quad (2.5-24a)$$

$$1 + F(q^{-1}) = 1 - f_1 q^{-1} \quad (2.5-24b)$$

Aplicando 2.5-24a e 2.5-24b em 2.5-1 tem-se que:

$$\varepsilon(k) = (1-f_1 q^{-1})(1-2q^{-1}+q^{-2}) \xi(k) \quad (2.5-25)$$

donde chega-se a:

$$\varepsilon(k) = \xi(k) - \xi(k-1)(2+f_1) + \xi(k-2)(1+2f_1) - \xi(k-3)f_1 \quad (2.5-26)$$

Aplicando em 2.5-26 a definição de variância e as propriedades do ruído branco chega-se a:

$$\text{var}\{\varepsilon(k)\} = [1 + (2+f_1)^2 + (1+2f_1)^2 + f_1^2] \sigma^2 \quad (2.5-27)$$

Pode-se agora determinar o mínimo de 2.5-27, que fornece o valor $f_1 = -\frac{8}{12}$, que substituído em 2.5-27 resulta em que, para a estrutura do polinômio $[1+F(q^{-1})]$ proposta em 2.5-24b, o menor valor da variância de $\varepsilon(k)$ é $3,33\sigma^2$.

Admitindo-se agora que o polinômio $1+F(q^{-1})$ tenha a forma

$$1 + F(q^{-1}) = 1 - f_1 q^{-1} - f_2 q^{-2} \quad (2.5-28)$$

tem-se que:

$$1 + D_1(q^{-1}) = 1 - 2q^{-1} + q^{-2} \quad (2.5-28a)$$

$$1 + F(q^{-1}) = 1 - f_1 q^{-1} - f_2 q^{-2} \quad (2.5-28b)$$

Aplicando 2.5-28a e 2.5-28b, em 2.5-1 tem-se que:

$$\varepsilon(k) = (1-f_1 q^{-1}-f_2 q^{-2})(1-2q^{-1}+q^{-2}) \xi(k) \quad (2.5-29)$$

donde chega-se a:

$$\begin{aligned} \varepsilon(k) = & \xi(k) - \xi(k-1)(2+f_1) + \xi(k-2)(1+2f_1-f_2) - \xi(k-3) \cdot \\ & \cdot (f_1-2f_2) - \xi(k-4)f_2 \end{aligned} \quad (2.5-30)$$

Aplicando agora em 2.5-30 a definição de variância e as propriedades do ruído branco chega-se a:

$$\text{var}\{\varepsilon(k)\} = (6+8f_1-2f_2-8f_1f_2+6f_1^2+6f_2^2) \sigma^2 \quad (2.5-31)$$

Pode-se agora calcular o mínimo de 2.5-31 e chegar aos valores de $f_1 = -1,0$ e $f_2 = -0,5$ que tornam mínima a variância de $\varepsilon(k)$.

Substituindo-se esses valores em 2.5-31 conclui-se que, para a estrutura do polinômio $[1+F(q^{-1})]$ proposta em 2.5-28b, o menor valor da variância de $\varepsilon(k)$ é $2,5\sigma^2$.

Das análises apresentadas neste item verifica-se que a variância do erro de seguimento $\varepsilon(k)$ é tanto menor quanto maior for o número de termos adotados para o polinômio $[1+F(q^{-1})]$.

Verifica-se que, no caso de perturbação determinística do tipo constante/rampa, o valor da variância do erro de seguimento assume valores bem maiores do que no caso onde a perturbação determinística é do tipo constante.

2.6. DIAGRAMA DE BLOCOS DO SEGUIDOR

Neste estágio do desenvolvimento do seguidor pode-se determinar um diagrama de blocos que apresente a estrutura de todas as entidades envolvidas no problema, quais sejam, o processo, o estimador da perturbação estocástica, o seguidor e o sinal de referência $R(k)$.

A seguir apresentam-se as equações que permitem a montagem desse diagrama de blocos:

$$[1+A(q^{-1})]y(k) = B(q^{-1})u(k) + W(k) + [1+C(q^{-1})]\varepsilon(k) \quad (2.6-1)$$

$$\hat{w}(k) = \frac{[1+D_1(q^{-1})][1+A(q^{-1})]}{1+C(q^{-1})} y(k) - \frac{[1+D_1(q^{-1})]B(q^{-1})}{1+C(q^{-1})} u(k) \quad (2.6-2)$$

$$u(k) = \frac{v(k)}{1+D(q^{-1})} \quad (2.6-3)$$

$$B(q^{-1})v(k) = S(q^{-1})\varepsilon(k) - [P(q^{-1})-F(q^{-1})]\hat{w}(k) \quad (2.6-4)$$

$$\varepsilon(k) = y(k) - R(k) \quad (2.6-5)$$

Note-se que essas expressões foram todas determinadas nos itens anteriores.

Finalmente, na figura 2.3 a seguir apresenta-se o diagrama de blocos do seguidor a variância mínima, quando o processo é submetido a perturbações estocásticas e determinísticas.

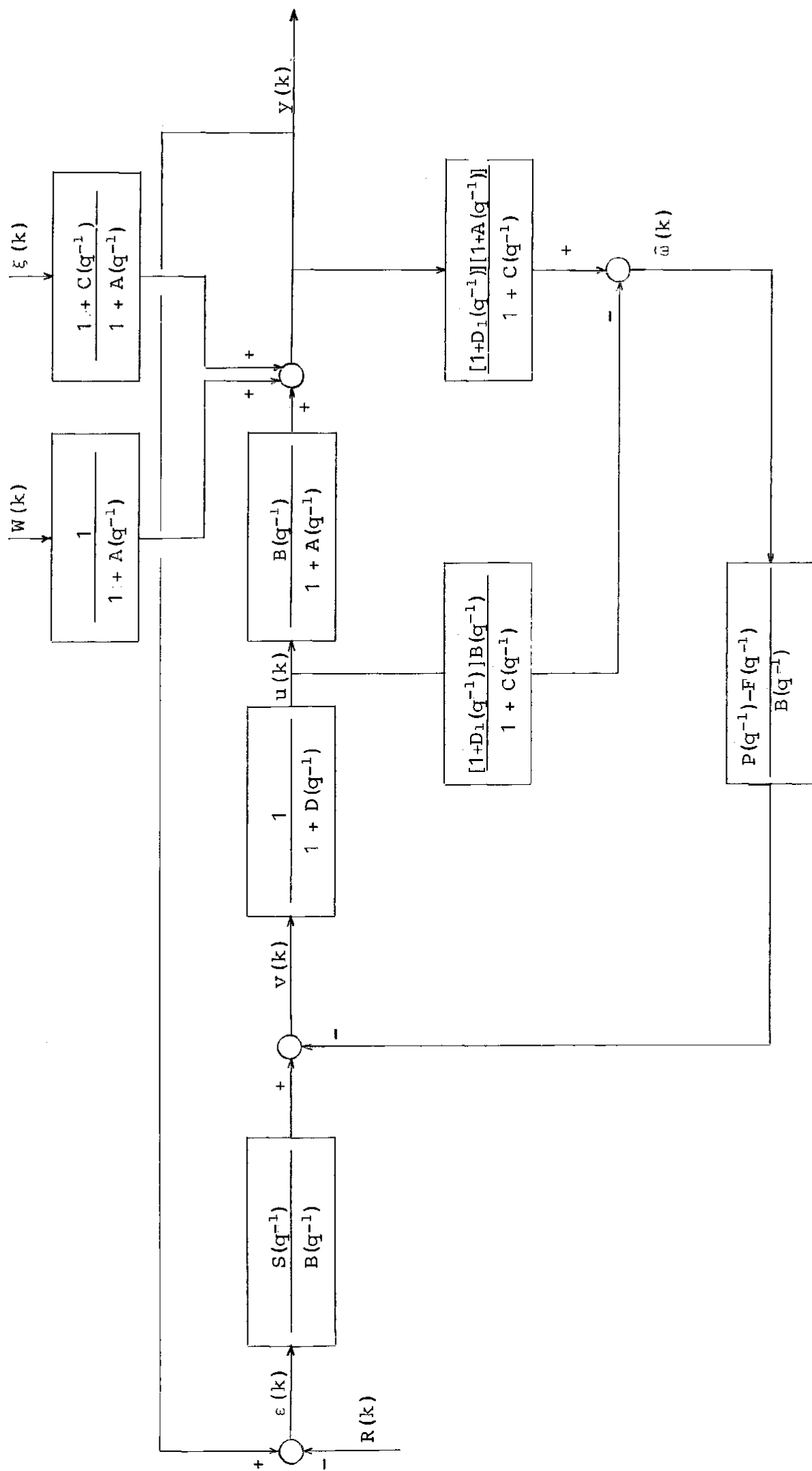


FIGURA 2.3 - Diagrama de blocos do seguidor a variância mínima para processos sujeitos a perturbações estocásticas e determinísticas.

CAPITULO 3

CONCEITUAÇÃO E MODELAGEM PARA ESTUDO DA MALHA DE REGULAÇÃO PRIMÁRIA DE SISTEMAS ELÉTRICOS

3.1. INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foi desenvolvido um seguidor a variância mínima, aplicável a processos sujeitos a perturbações estocásticas e determinísticas.

A partir desse desenvolvimento aplicar-se-á esse seguidor em um controle primário carga-frequência de sistemas elétricos de potência.

Para atender esse objetivo, neste capítulo é inicialmente conceituado o problema geral do controle primário carga-frequência de sistemas elétricos de potência. A seguir trata-se da modelagem simplificada do regulador de velocidade e turbina.

Na sequência são abordados os principais aspectos relativos ao desempenho de um sistema elétrico de potência frente a distúrbios, análise esta que busca a compreensão dos principais eventos envolvidos de modo que se possa modelá-los convenientemente. Feito isso, apresentam-se algumas simplificações que podem ser efetuadas na análise do problema em pauta e segue-se uma proposição de modelo para o conjunto gerador e sistema elétrico de potência, respeitadas as simplificações anteriores. Na sequência apresenta-se o modelo completo da malha de regulação primária carga-frequência escolhida para as simulações deste trabalho.

Finaliza-se o capítulo mostrando-se que, na operação real de um sistema elétrico de potência, o comportamento do controle primário carga-frequência é tal que este está perfeitamente enquadrado dentro dos processos em que é vantajoso aplicar o seguidor a variância mínima proposta no Capítulo 2.

3.2. CONCEITUAÇÃO GERAL DA REGULAÇÃO PRIMÁRIA

Admita-se que em um sistema elétrico de potência ocorra uma determinada variação de carga. Neste instante verifica-se, nos terminais dos geradores, uma alteração no valor da potência elétrica. Nos instantes iniciais após esse evento não há variação da potência mecânica de entrada nos geradores, conseqüentemente surge nestes uma potência acelerante, que implica na alteração da velocidade de giro das máquinas, e daí decorre uma alteração na frequência do sistema elétrico.

Naturalmente que se não houver atuação nos órgãos primários dos geradores, a velocidade destes continuará diferente da nominal.

Neste quadro tem-se então dois problemas definidos:

- Com a variação da carga tem-se um desequilíbrio entre a geração do sistema e sua carga.
- A frequência do sistema assume valores diferentes do nominal.

A solução desses problemas inicia-se pela ação classicamente conhecida como Regulação Primária ou Controle Primário Carga-Frequência [1],[2],[3], que pode ser entendido como um processo de controle que atende dois objetivos básicos [3]:

- Equilibrar a carga e a geração do sistema.
- Recuperar a frequência da rede a valores próximos aos nominais.

Para isso, a malha de controle da regulação primária é composta das seguintes partes:

- Dispositivo de controle que realmente processa a correção da frequência, o regulador de velocidade.
- O órgão primário ou turbina.
- O gerador.
- O sistema elétrico de potência, que dentro dessa classificação deve ser entendido como uma rede elétrica composta de transformadores, linhas de transmissão, cargas, etc.

3.3. MODELAGEM DO REGULADOR DE VELOCIDADE E TURBINA

Dentro da idéia de modelagem do regulador de velocidade e turbina, a literatura [1] apresenta e justifica modelos adequados (que são adotados neste trabalho), de onde transcrevem-se a seguir dois tipos:

- Turbinas térmicas sem reaquecimento

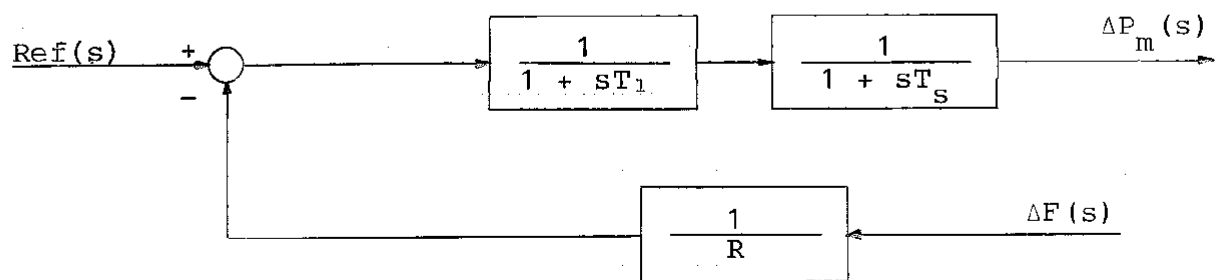


FIGURA 3.1 - Modelo de regulador e turbina térmica sem reaquecimento.

- Turbinas hidráulicas

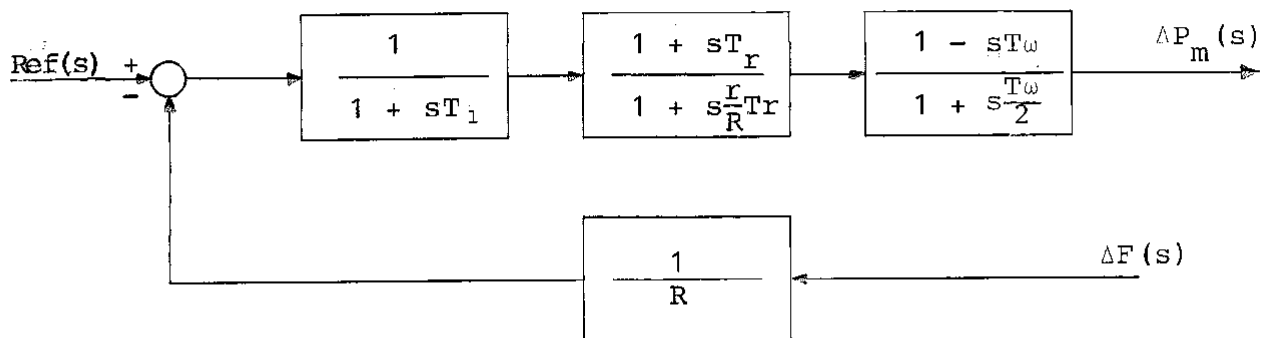


FIGURA 3.2 - Modelo de regulador e turbina hidráulica.

onde: R = estatismo em regime permanente.

T_1 = constante de tempo do regulador.

T_r = constante de tempo do compensador para turbinas hidráulicas.

r = estatismo transitório.

- T_S = constante de tempo da turbina sem reaquecimento.
 T_w = constante de tempo da água.
 $\Delta P_m(s)$ = variação da potência mecânica.
 $R(s)$ = referência.
 $\Delta F(s)$ = variação da frequência da rede.

Observe-se que a turbina hidráulica tem uma função de transferência de fase não-mínima. Isto implica em que a função de transferência da regulação primária (para turbinas hidráulicas), discretizada, apresente o polinômio $B(q^{-1})$ com raízes fora do círculo unitário do plano z , o que contraria a restrição imposta no item 2.2 anterior.

3.4. ASPECTOS GERAIS DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA FRENTE A DISTÚRBIOS

A toda variação na demanda ou geração de um sistema elétrico, existem associadas variações nas potências ativa e reativa, tensões e frequência.

Como a teoria de sistemas elétricos de potência de mostra que existe uma íntima relação entre potência ativa e frequência bem como entre potência reativa e tensão [2], pode-se analisar separadamente os aspectos relacionados com variação das tensões e frequência.

Para isso, inicialmente admita-se que em um sistema ocorra um distúrbio qualquer que tenha o efeito de uma súbita elevação da demanda desse. Sob o ponto de vista de variação das tensões, pode-se apontar cinco aspectos, descritos a seguir.

Um primeiro é relativo ao comportamento da carga do sistema com a variação das tensões. Esse problema é atacado por inúmeros pesquisadores e ainda constitui-se em um grande trabalho para a teorização e modelagem do desempenho dos sistemas elétricos de potência [14]. A questão é determinar, quantitativamente, como a carga de um sistema varia frente à variação das tensões. Para essa avaliação tem-se seguido diversos caminhos, [14],[15],[16],[17],[18], [19] embora ainda não exista, particularmente no Brasil, um resultado definitivo. Aliás, existe no Brasil um subgrupo de trabalho do Grupo Coordenador para Operação Interligada - GCOI, que está

tratando do assunto a nível nacional. De qualquer modo, o que se sabe com certeza é que a variação da carga com a tensão é um fenômeno considerável, e a literatura propõe vários modelos de representação desse [14],[15],[16],[17],[18],[19].

Um segundo aspecto a ser considerado é referente às respostas dos equipamentos de controle de tensão existentes no sistema, a exemplo de capacitores e reatores em derivação. Pode-se citar que, para efeito de modelagem, estes podem ser tratados como dispositivos cuja potência reativa gerada ou absorvida varia com o quadrado do módulo da tensão sobre eles aplicada.

O terceiro aspecto é que, dependendo da amplitude da variação das tensões, existem rejeições de carga de consumidores, a exemplo de certos consumidores industriais. Esse fato é de difícil modelagem pois é função dos ajustes das proteções dos consumidores, características das cargas desses, etc., de modo que quantitativamente, esse aspecto não pode ser levado em conta nos estudos, especialmente quando isso conduz a resultados conservativos.

Um quarto aspecto a ser considerado é o relativo aos sistemas de excitação dos geradores. A toda variação das tensões no sistema elétrico existe um efeito magnetizante ou desmagnetizante de campo nos geradores, fato que implica em variação das suas tensões internas e conseqüente ação dos equipamentos de regulação de tensão que podem ser modelados a partir de sua identificação e através de um dos modelos propostos pelo IEEE [20].

Quanto aos geradores, nos estudos de sistemas de potência, a algum tempo tem-se adotado um dos quatro modelos de máquinas propostos por C.C. Young [21], que diferem entre si pela complexidade e nível de detalhamento dos componentes desses geradores.

Um quinto aspecto é referente a uma entidade classicamente conhecida como coeficiente de torque sincronizante, que pode ser conceituado como uma grandeza que expressa o nível de ligação elétrica que existe entre duas barras, entre um gerador e um sistema ou entre dois sistemas de potência[2]. Analiticamente, o coeficiente de torque sincronizante é definido como a derivada par

cial da potência ativa elétrica transmitida entre barras em relação à diferença entre os ângulos dos fasores das tensões nessas duas barras. Entende-se daí que existe uma relação direta entre os níveis de tensão e esse coeficiente, que quanto menor, mais compromete o nível de estabilidade de um sistema elétrico. A modelagem desse coeficiente é dada por sua própria expressão definidora[1].

Vistos os aspectos relacionados com a variação das tensões, passa-se a analisar os relacionados com a alteração da frequência. Associados à variação da frequência, pode-se analisar cinco aspectos relevantes.

Um primeiro diz respeito à variação da carga do sistema elétrico com a variação da frequência, que é objeto de inúmeros trabalhos [14],[15],[16],[18].

Uma modelagem desse evento, que nos parece é o mais utilizado no Brasil, é referido classicamente como amortecimento natural da carga, que expressa quantitativamente o valor da redução da potência de demanda ativa em um sistema com a alteração no valor da frequência. No sistema elétrico brasileiro esse valor ainda não foi precisamente determinado, mas é comum, nos estudos, utilizar-se o valor 1,0 puMW/puHz.

Quanto à redução da demanda reativa com relação à variação da frequência, a literatura propõe modelos adequados [14],[15],[16],[18].

Um segundo aspecto a ser considerado é relativo à variação dos parâmetros dos dispositivos de um sistema elétrico (impedâncias) com a alteração da frequência.

Para levar em conta esse fato, basta calcular os parâmetros do sistema elétrico a cada valor da frequência.

Um terceiro aspecto é referente à saída proposital de operação de consumidores que não toleram certos níveis de variação de frequência na rede elétrica, a exemplo de certas indústrias. Analogamente aos aspectos referentes à variação das tensões, esse aspecto nem sempre é modelado.

Um quarto aspecto diz respeito ao comportamento dos geradores. Na verdade, a equação que norteia o desempenho da velocidade dos geradores frente a variações de potência é dada por:

$$M \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (3.4-1)$$

onde: M = constante de inércia do gerador
 ω = velocidade angular do gerador
 P_m = potência mecânica de entrada no gerador
 P_e = potência elétrica de saída do gerador

Essa expressão pode ser adequadamente modelada [1], e no item 3.6, a seguir, um modelo é apresentado.

Um quinto aspecto a ser considerado é relativo ao desempenho dos sistemas de regulação de velocidade. Para modelar tais dispositivos a literatura apresenta procedimentos adequados [1], e algumas proposições já foram apresentadas no item 3.3 anterior.

3.5. SIMPLIFICAÇÕES VÁLIDAS PARA O ESTUDO DA REGULAÇÃO PRIMÁRIA

Como mostrado anteriormente, na análise do desempenho de um sistema elétrico de potência têm-se dois aspectos característicos, quais sejam, aspectos relacionados com alteração da tensão e com alteração da frequência.

Deve-se pensar então no controle da tensão e no controle da frequência. Acontece que o controle da tensão tem algumas características particulares em relação ao controle da frequência.

Uma delas é relativo ao tempo de atuação desses controles, fato que leva a ser tolerável a hipótese de que as ações relativas aos controles da tensão e frequência são separáveis [2].

Um outro ponto é que a teoria analítica de sistemas elétricos de potência mostra [2],[22] que as variações de tensão e frequência provocam alterações em proporções diferentes nas potências ativa e reativa de um sistema elétrico.

Com base sobretudo nesses dois fatores pode-se fazer uma simplificação para a análise do desempenho dos controles de tensão e frequência em sistemas elétricos de potência, que consiste em considerar dois canais de ação e controle independentes (e com um fraco acoplamento), um canal de controle de tensão e outro de frequência,

simplificação esta adotada neste trabalho. Assim, tendo em vista que neste trabalho o processo a ser simulado é de controle de frequência, os aspectos relativos ao controle da tensão serão desconsiderados.

3.6. MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO E DO GERADOR

Em termos de modelagem dos geradores e sistema de potência frente a variações de frequência, pode-se tratar do assunto levando em conta o gerador alimentando uma carga isolada, dois sistemas interconectados ou um gerador conectado a uma barra infinita.

Neste trabalho, por razões de simplificação das simulações, foi adotado o modelo carga e gerador isolados, apresentado a seguir[1].

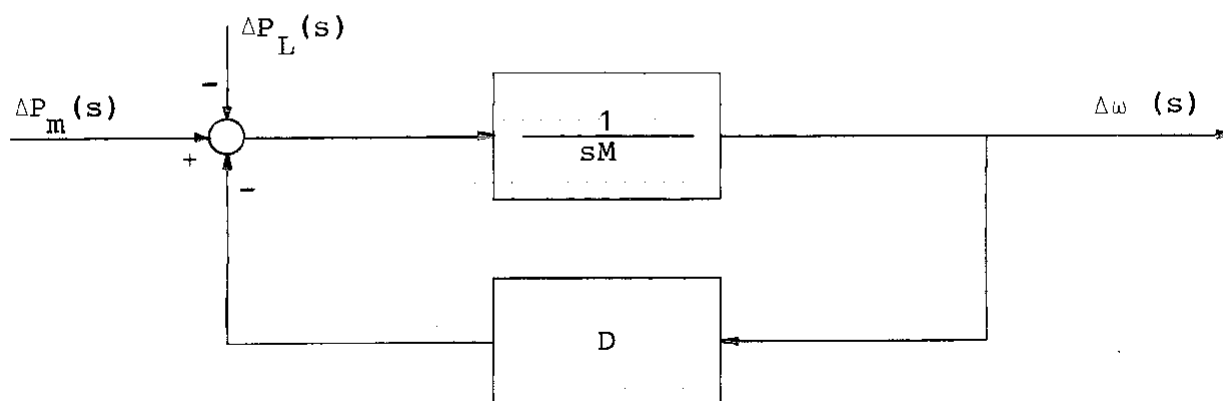


FIGURA 3.3 - Modelo adotado do gerador e sistema elétrico.

onde: $\Delta P_m(s)$ = variação da potência mecânica.

$\Delta P_L(s)$ = variação da potência no sistema elétrico.

M = inércia do rotor do gerador e turbina.

D = coeficiente de amortecimento da carga com a frequência.

$\Delta \omega(s)$ = desvio de frequência.

Convém citar que o modelo do gerador é originário da expressão 3.4-1 anterior.

3.7. ASPECTOS GERAIS DE DESEMPENHO DA MALHA DE REGULAÇÃO PRIMÁRIA

De posse da modelagem dos componentes de interesse da malha de regulação primária, pode-se apresentar a figura 3.4-a a seguir, que mostra o modelo da malha de regulação primária adotado (para controle) no trabalho em pauta, onde foi considerado uma turbina térmica, tendo em vista que a turbina hidráulica possui uma função de transferência de fase não mínima, fato que torna inaplicável o seguidor desenvolvido no Capítulo 2.

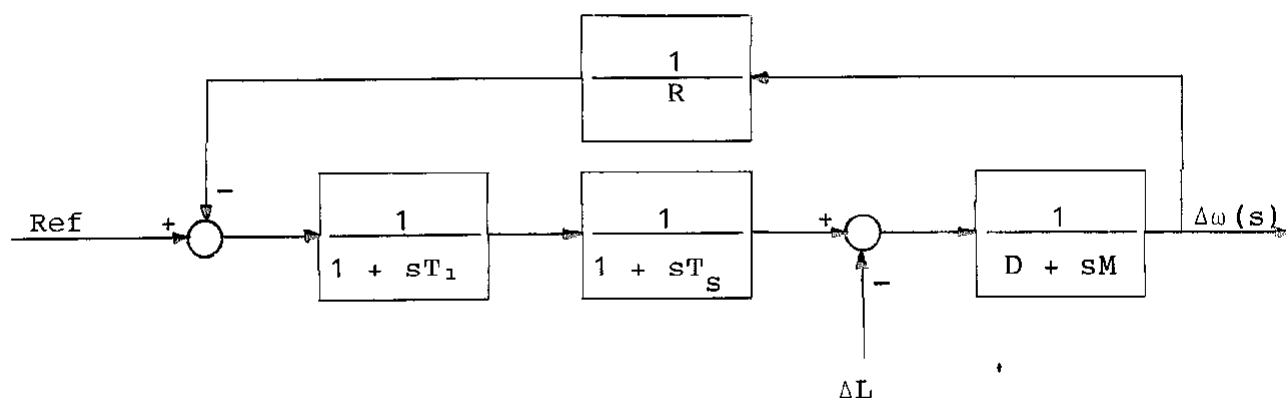


FIGURA 3.4-a - Modelo da malha de regulação primária para turbinas térmicas sem reaquecimento.

O modelo correspondente para turbinas hidráulicas é apresentado na figura 3.4-b.

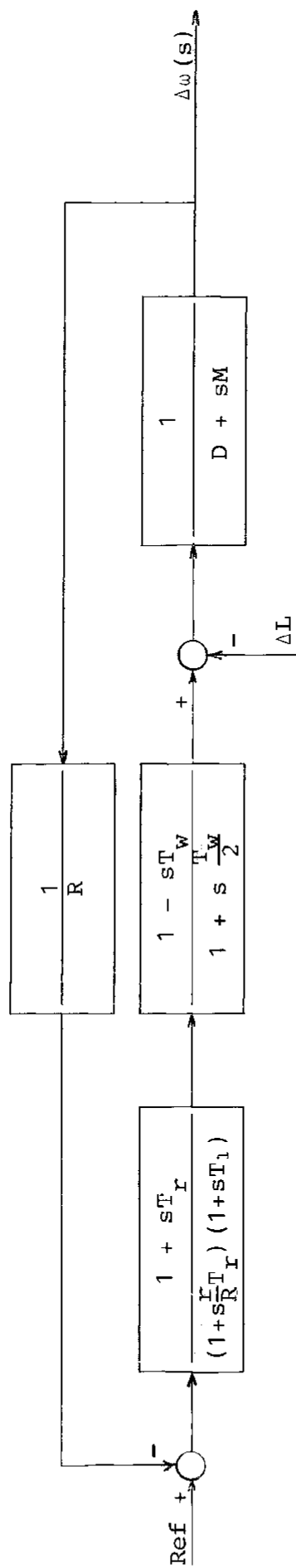


FIGURA 3.4-b - Modelo da malha de regulação primária para turbinas hidráulicas.

Durante a operação de um sistema elétrico a sua carga está variando instante a instante, devido às constantes entradas/saídas de carga, variações das cargas consumidas com as variações da tensão, variação das cargas consumidas com a variação da frequência, etc. Essas variações podem ser entendidas como variações de pequena amplitude, decorrentes de um processo natural e dinâmico do comportamento da carga de um sistema elétrico.

É compreensível que estas variações de pequena amplitude na carga do sistema façam com que a frequência deste não seja perfeitamente constante ao longo do tempo. Isso se deve ao fato de que cada variação de pequena amplitude da carga do sistema provoca neste um pequeno desequilíbrio entre a carga consumida e a sua geração, surgindo então nos geradores uma potência acelerante que provoca a variação na velocidade desses e conseqüentemente um desvio na frequência do sistema.

Essas variações na frequência do sistema sensibilizam o sistema de controle de velocidade dos geradores que, através da ação sobre os respectivos órgãos primários, atuam no sentido de restabelecer o equilíbrio entre a carga e a geração desse sistema, bem como atuam no sentido de reduzir ao máximo o desvio de frequência ocorrido.

Através da observação desse comportamento da frequência, qual seja, pequenas variações em torno do ponto de equilíbrio, o qual corresponde à frequência nominal do sistema, pode-se admitir que tal comportamento tem uma característica estocástica, ou seja, é um sinal cuja amplitude depende do tempo e que em cada instante é uma variável aleatória.

Detalhando mais esta idéia pode-se dizer que essas variações contínuas e de pequena amplitude da carga, são perturbações estocásticas no processo de controle de carga-frequência de um sistema elétrico, as quais provocam neste um desvio de frequência de característica estocástica.

Por outro lado, em um sistema elétrico pode-se ter variações de carga não de pequenas amplitudes, e sim, variações grandes, abruptas e com amplitude constante, decorrentes de:

- entrada ou saída de grandes blocos de carga,

- variações grandes no fluxo das linhas de interligação desse sistema com outros,
- perda de blocos de geração que, sob o aspecto geral de variação de carga, tem um efeito semelhante à entrada de um bloco de carga,
- defeitos, cargas cíclicas (fornos, grandes frezas, etc).
- etc.

Pode-se entender que esses tipos de variações têm características determinísticas, ou melhor, são perturbações persistentes determinísticas.

Com um raciocínio análogo ao usado para as variações de pequena amplitude, pode-se entender que essas variações de carga implicam em variações também na frequência do sistema.

Assim sendo, pode-se dizer que o comportamento da frequência do sistema associado a essas variações abruptas de carga é um comportamento determinístico, e mais, nesse caso a carga é uma perturbação determinística no processo de controle carga-frequência do sistema, e conseqüentemente gera um desvio de característica determinística na frequência.

Dessa forma, pode-se dizer que os dispositivos de controle de velocidade dos geradores atuam segundo dois tipos de perturbações. Um que pode ser chamado de perturbação determinística e outro chamado perturbação estocástica.

Com essas considerações o modelo apresentado na figura 3.4-a pode ser colocado na forma final da figura 3.5 a seguir onde ΔL representa a soma das perturbações estocásticas e determinísticas discutidas anteriormente.

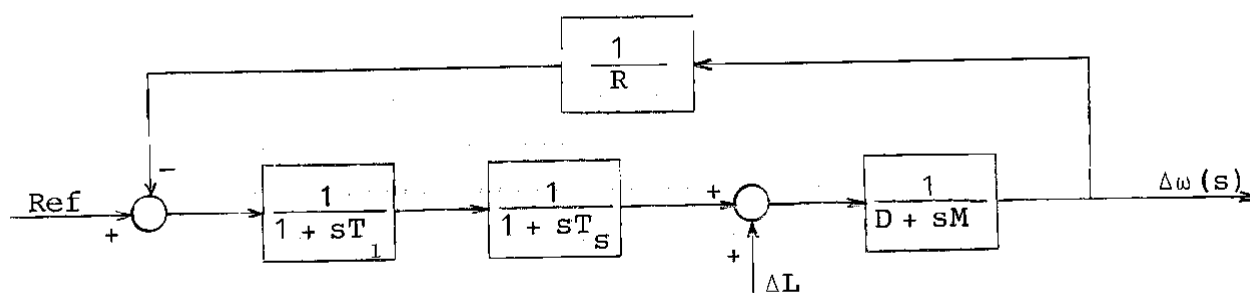


FIGURA 3.5 - Modelo adotado de malha de regulação primária.

Como apresentado e justificado na literatura [1], durante o processo de correção da frequência pela regulação primária convencional, apresentada na figura 3.4, existe sempre um erro entre a referência e a frequência em correção, aqui chamado de erro de seguimento.

Deste fato surge a idéia de reduzir ao máximo esse erro. Em outras palavras, pode-se pensar em fazer com que a frequência do sistema elétrico seja corrigida pela ação da regulação primária, de modo tal que o erro entre a referência e a frequência deste apresente o menor valor possível.

Isto pode ser conseguido com a utilização do seguidor a variância mínima desenvolvido no Capítulo 2.

Como citado no desenvolvimento teórico desse seguidor, este rejeita as perturbações determinísticas. Dessa maneira, um subproduto relevante da aplicação do seguidor proposto é a redução do desvio da frequência em regime permanente devido à perturbação determinística.

3.8. CONCLUSÃO

Neste capítulo ficou então definido que o processo de regulação primária convencional carga-frequência em sistemas elétricos é um processo adequado à aplicação do seguidor a variância mínima desenvolvido no Capítulo 2, bem como foi apresentado o modelo do processo escolhido para a aplicação deste seguidor.

CAPITULO 4

A DISCRETIZAÇÃO DO PROCESSO

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a seqüência de idéias adotadas na discretização do processo, bem como o diagrama de blocos, em discreto, do seguidor aplicado ao processo escolhido.

4.2. METODOLOGIA ADOTADA PARA DISCRETIZAR O PROCESSO

Como citado no Capítulo 3, neste trabalho pretende-se aplicar o seguidor a variância mínima, desenvolvido no Capítulo 2, em um processo convencional de regulação primária carga-freqüência de um sistema elétrico de potência com usinas térmicas. No mesmo Capítulo 3 foi apresentado, como aparece na figura 3.5, o modelo da malha de regulação primária a ser adotado no trabalho em questão.

Por outro lado, como a implementação do seguidor deve ser através da utilização de um processador digital, para a simulação da ação digital desse sobre o processo, faz-se necessário trabalhar com o processo em discreto [24]. Deve-se então desenvolver o modelo de estado discreto para o processo de natureza contínua, modelo esse que será, como citado anteriormente, controlado por um dispositivo digital.

Por outro lado, antes de discretizar o processo, este pode ser trabalhado de uma maneira tal que no final tenha um aspecto mais adequado a esta discretização. Apresenta-se a seguir o caminho adotado neste sentido.

Inicialmente represente-se o diagrama de blocos da figura 3.5 na forma simplificada mostrada na figura 4.1 a seguir.

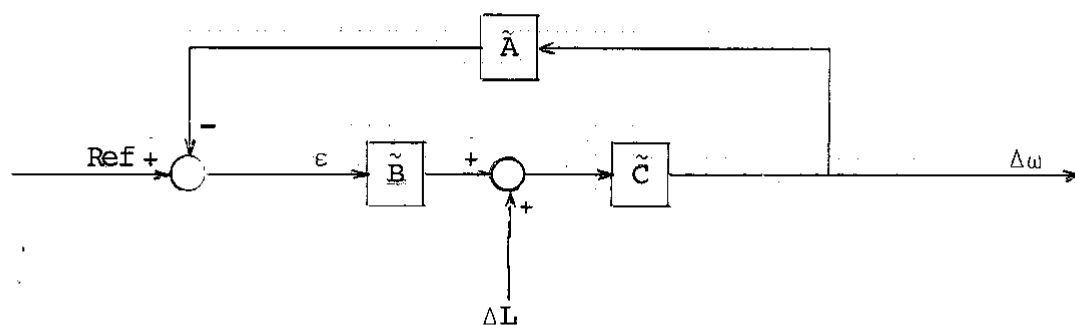


FIGURA 4.1 - Forma simplificada do processo escolhido.

Na figura 4.1 tem-se que:

$$\tilde{A} = \frac{1}{R}$$

$$\tilde{B} = \frac{1}{(1 + sT_1)(1 + sT_S)}$$

$$\tilde{C} = \frac{1}{D + sM}$$

e mais, Ref = referência, ε = erro de seguimento, $\Delta\omega$ o desvio de frequência e ΔL as perturbações.

Do diagrama da figura 4.1 pode-se deduzir que:

$$\Delta\omega = \frac{\tilde{C}\tilde{B}}{1 + \tilde{C}\tilde{B}\tilde{A}} Ref + \frac{\tilde{C}}{1 + \tilde{C}\tilde{B}\tilde{A}} \Delta L \quad (4.2-1)$$

A expressão 4.2-1 anterior pode ser colocada na forma de diagrama de blocos como mostrado na figura 4.2 a seguir.

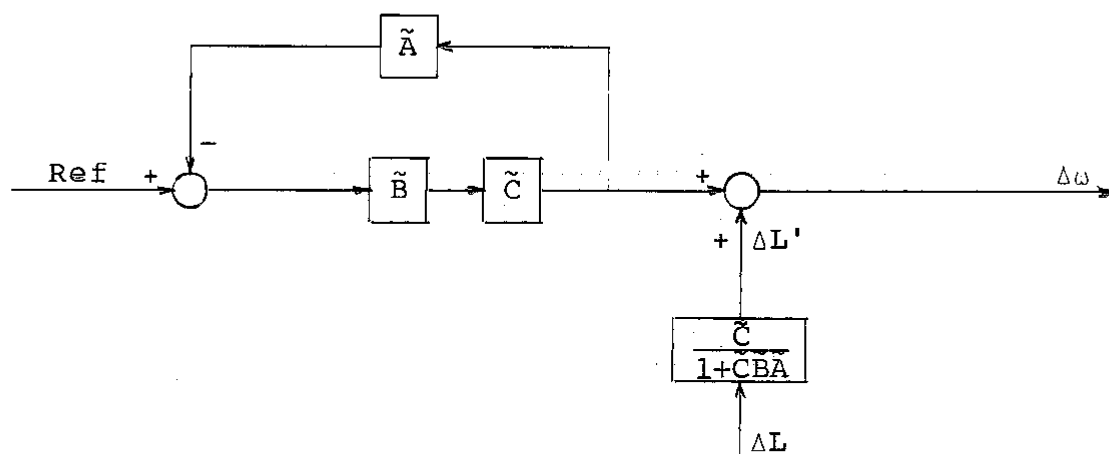


FIGURA 4.2 - Representação da equação 4.2-1.

Tendo em vista as definições de \tilde{A} , \tilde{B} e \tilde{C} apresentadas anteriormente, o diagrama de blocos do processo escolhido é apresentado na figura 4.3 a seguir, onde a desconsideração do sistema $\frac{\tilde{C}}{1 + \tilde{C}\tilde{B}\tilde{A}}$ é justificada mais à frente.

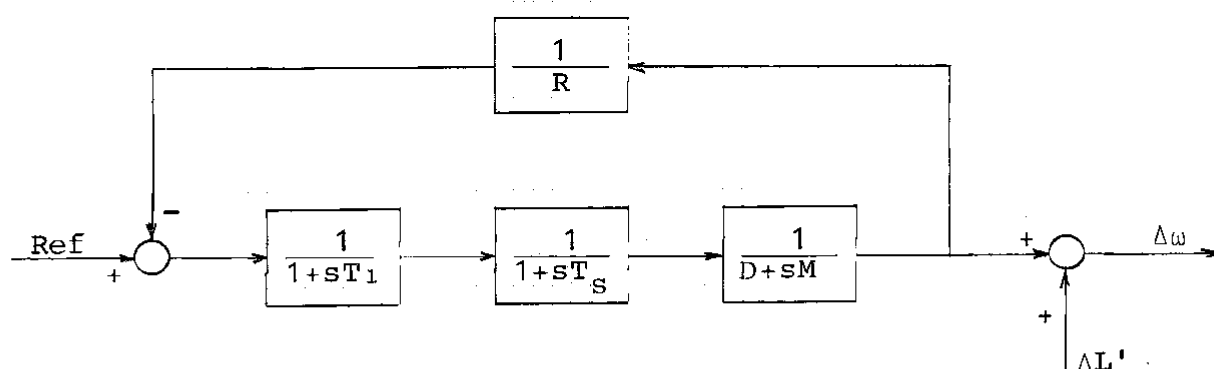


FIGURA 4.3 - Modelo para a discretização do processo escolhido.

E é justamente sobre esta última representação da malha de controle, apresentada na figura 4.3, que se efetua a discretização.

Para a simulação foram considerados os seguintes valores numéricos no modelo representado na figura 4.3:

$$T_1 = 0,25 \text{ s}$$

$$T_S = 0,35 \text{ s}$$

$$D = 1,0 \text{ puMW/puHz}$$

$$M = 10 \text{ s}$$

$$R = 0,05$$

Substituindo-se esses valores numéricos, a função de transferência em contínuo do modelo apresentado na figura 4.3 assume a forma:

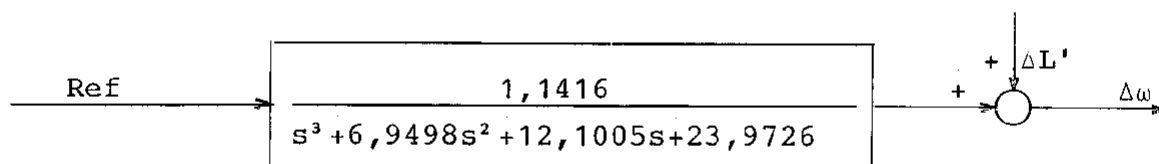


FIGURA 4.4 - Função de transferência em contínuo do processo escolhido.

Para simular a ação de um computador digital para controlar o processo contínuo apresentado anteriormente, faz-se necessário discretizá-lo. Devido à natureza do conversor digital/analógico a ser aplicado entre o processador e o processo, durante o período de amostragem os sinais de controle são constantes.

Tudo se passa então como se o computador gerasse um trem de impulsos modulados, os quais passam através de um sustentador de ordem zero (S.O.Z.), e alimentam o processo. Pode-se representar o esquema para discretização através da figura 4.5 a seguir:

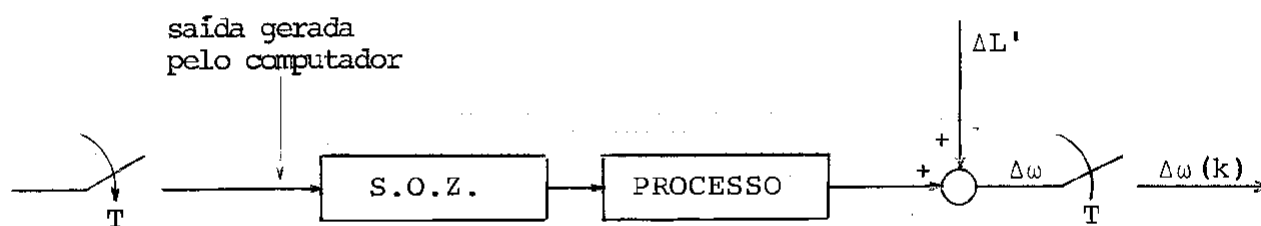


FIGURA 4.5 - Esquema simplificado referente à discretização do processo.

O modelo da figura 4.5 pode ser equivalentemente descrito pelo apresentado na figura 4.6 a seguir:

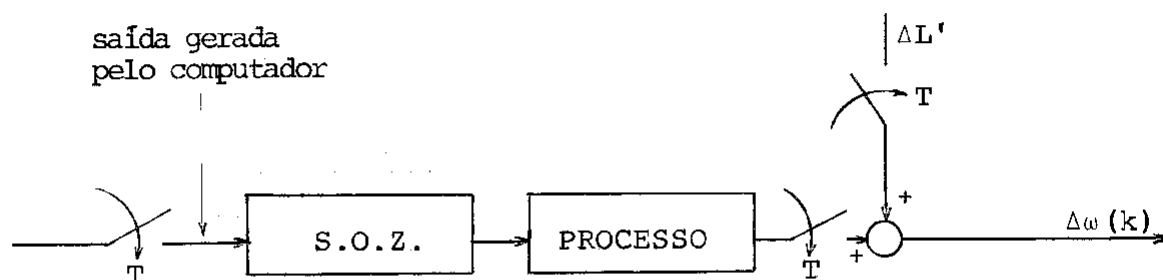


FIGURA 4.6 - Modelo equivalente ao modelo da figura 4.5.

Fazendo-se uma realização do processo contínuo e utilizando-se o método de discretização proposto por Chen [23], com um período de discretização de 1s, obtém-se uma realização discreta, cuja função de transferência é apresentada na figura 4.7 a seguir:

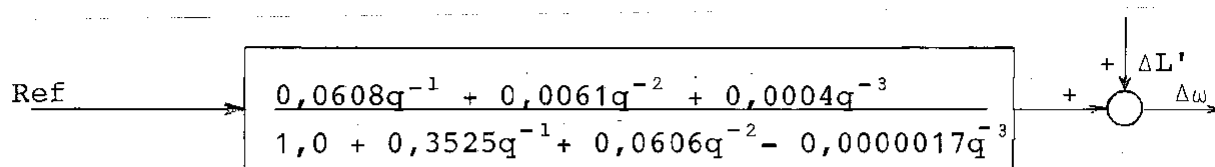


FIGURA 4.7 - Modelo em discreto do processo escolhido.

O tempo de discretização de 1,0s foi adotado com base em aspectos práticos. Esse tempo é maior que a menor constante de tempo do processo, o que contraria os procedimentos clássicos de discretização, porém evita-se o excesso de operação dos atuadores do sistema de controle de velocidade, evitando-se assim desgastes cumulativos, sobretudo das partes mecânicas deste.

Vamos descrever a seguir o modelo para a perturbação $\Delta L'$.

Define-se

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 \quad (4.2-2)$$

onde ΔL_1 e ΔL_2 correspondem respectivamente às partes determinística e estocástica de $\Delta L'$.

Da figura 4.2 pode-se escrever que

$$\Delta L' = \Delta L_1' + \Delta L_2' \quad (4.2-3)$$

onde

$$\Delta L_1' = \frac{\tilde{C}}{1 + \tilde{C}\tilde{B}\tilde{A}} \Delta L_1 \quad (4.2-4-a)$$

$$\Delta L_2' = \frac{\tilde{C}}{1 + \tilde{C}\tilde{B}\tilde{A}} \Delta L_2 \quad (4.2-4-b)$$

Os sinais $\Delta L_1'$ e $\Delta L_2'$ vão corresponder respectivamente às partes determinística (devido a perturbação determinística L_1) e estocástica (devido a perturbação estocástica L_2) de $\Delta L'$.

Quanto à modelagem da perturbação determinística, inicialmente deve-se observar que o sistema $\tilde{C}/(1+\tilde{C}\tilde{B}\tilde{A})$ é linear e estável, donde se pode concluir que os modos de ΔL_1 referentes à perturbação determinística (devidos a polos sobre ou fora do círculo unitário), aparecem em $\Delta L_1'$. Assim, se ΔL_1 é um sinal constante, em regime permanente $\Delta L_1'$ também o será. O que interessa no projeto do controlador é a parte persistente de $\Delta L_1'$, ou seja, seu comportamento em regime permanente. Para o projeto do seguidor apresentado neste trabalho, adotou-se o seguinte modelo para $\Delta L_1'$:

$$\Delta L_1'(k) = \frac{1}{1,0 + 0,3525q^{-1} + 0,0606q^{-2} - 0,0000017q^{-3}} W(k)$$

(4.2-5)

onde $W(k)$ é um sinal constante. Este sinal é tal que a resposta em regime do sistema 4.2-5 é igual a parte persistente de $\Delta L'_1$. Assim, o modelo apresentado em 4.2-5 simula $\Delta L'_1$ em regime permanente. É justamente o modelo apresentado na expressão 4.2-5 que foi adotado para a simulação da perturbação determinística em regime permanente.

A análise da perturbação ΔL_2 (perturbação estocástica) é de-veras complexa, e foge do escopo do presente trabalho. Assim sendo, para a simulação da perturbação estocástica adotou-se o modelo

$$\Delta L'_2(k) = \frac{1+C(q^{-1})}{1+A(q^{-1})} \xi(k) = \frac{1,0-1,5q^{-1}+0,75q^{-2}-0,125q^{-3}}{1,0+0,3525q^{-1}+0,0606q^{-2}-0,0000017q^{-3}} \xi(k)$$

onde $\xi(k)$ é um ruído branco. (4.2-6)

A partir dessas considerações, apresenta-se finalmente o modelo de $\Delta L'$ adotado neste trabalho:

$$\begin{aligned} \Delta L' &= \frac{1}{1+A(q^{-1})} W(k) + \frac{1+C(q^{-1})}{1+A(q^{-1})} \xi(k) = \\ &= \frac{1}{1,0+0,3525q^{-1}+0,0606q^{-2}-0,0000017q^{-3}} W(k) + \\ &+ \frac{1,0-1,5q^{-1}+0,75q^{-2}-0,125q^{-3}}{1,0+0,3525q^{-1}+0,0606q^{-2}-0,0000017q^{-3}} \xi(k) \end{aligned} \quad (4.2-7)$$

É importante salientar que a razão mais forte para a adoção do modelo apresentado na expressão 4.2-7 anterior reside no fato de que esse modelo é identificável. Se isso não acontecer, não se pode pensar na implementação do seguidor estudado, pois o polinômio $1+C(q^{-1})$ que entra na síntese do seguidor, dificilmente pode ser determinado fisicamente, mas pode ser facilmente obtido por um processo de identificação.

4.3. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA EM DISCRETO DO PROCESSO E SEGUIDOR

De posse da função de transferência em discreto do processo, pode-se finalmente, utilizando as expressões do seguidor desenvolvidas no Capítulo 2, determinar a função de transferência em discreto do seguidor e processo.

A figura 4.8 apresenta o resultado dessa determinação, onde os polinômios $1 + D_1(q^{-1})$, $1 + D_2(q^{-1})$, $1 + D_3(q^{-1})$ e $1 + D(q^{-1})$ adotados foram tais que permitem a referência ser do tipo constante/rampa (vide Capítulo 2). Observe-se que o seguidor (e processo) apresentado na figura 4.8 foi desenvolvido adotando-se o polinômio $1 + F(q^{-1})$ como sendo:

$$1 + F(q^{-1}) = 1,0 + 0,5q^{-1}$$

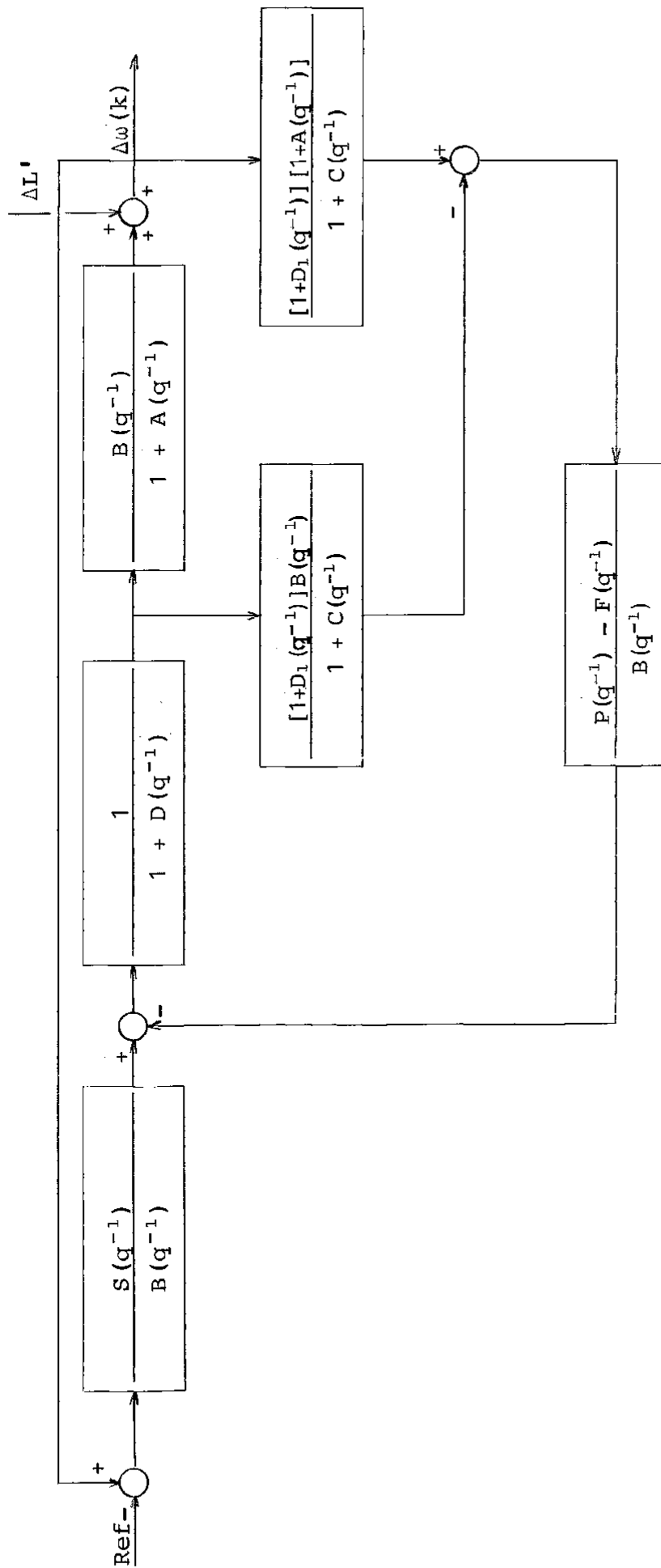


FIGURA 4.8 - Modelo em discreto do seguidor aplicado ao processo escolhido.

Na figura 4.8 os diversos blocos são definidos, de acordo com o Capítulo 2, por:

$$\frac{S(q^{-1})}{B(q^{-1})} \triangleq \frac{-1,6475q^{-1} + 0,3556q^{-2} + 0,2313q^{-3} + 0,0606q^{-4} - 0,0000017q^{-5}}{0,0608q^{-1} + 0,0061q^{-2} + 0,0004q^{-3}}$$

$$\frac{1}{1+D(q^{-1})} \triangleq \frac{1}{1,0 - 2,0q^{-1} + 1,0q^{-2}}$$

$$\frac{B(q^{-1})}{1+A(q^{-1})} \triangleq \frac{0,0608q^{-1} + 0,0061q^{-2} + 0,0004q^{-3}}{1,0 + 0,3525q^{-1} + 0,0606q^{-2} - 0,0000017q^{-3}}$$

$$\frac{[1+D_1(q^{-1})]B(q^{-1})}{1 + C(q^{-1})} \triangleq \frac{0,0608q^{-1} - 0,0547q^{-2} - 0,0057q^{-3} - 0,0004q^{-4}}{1,0 - 1,5q^{-1} + 0,75q^{-2} - 0,125q^{-3}}$$

$$\frac{[1+D_1(q^{-1})][1+A(q^{-1})]}{1 + C(q^{-1})} \triangleq \frac{1,0 - 0,6475q^{-1} - 0,2919q^{-2} - 0,0606q^{-3} + 0,0000017q^{-4}}{1,0 - 1,5q^{-1} + 0,75q^{-2} - 0,125q^{-3}}$$

$$\frac{P(q^{-1}) - F(q^{-1})}{B(q^{-1})} \triangleq \frac{-3,0q^{-1} + 2,25q^{-2} - 0,875q^{-3} + 0,125q^{-4}}{0,0608q^{-1} + 0,0061q^{-2} + 0,0004q^{-3}}$$

$$1 + D_1(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$$

$$1 + D_2(q^{-1}) = 1 - 2q^{-1} + q^{-2}$$

$$1 + D_3(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$$

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÕES EFETUADAS E RESULTADOS OBTIDOS

5.1. INTRODUÇÃO

A partir da discretização do processo apresentado no Capítulo 4, pode-se finalmente efetuar simulações para avaliar o desempenho do seguidor a variância mínima desenvolvido no Capítulo 2.

Assim sendo, no Capítulo em tela apresentam-se as simulações efetuadas, bem como uma análise sucinta de cada caso.

5.2. CASOS SIMULADOS - ANÁLISE

As simulações efetuadas podem ser classificadas em dois grandes grupos. No primeiro a referência adotada é do tipo constante e igual a zero. No segundo, a referência adotada é do tipo constante/rampa.

No primeiro grupo simulou-se inicialmente somente o processo apresentado na figura 4.4, ou seja, o regulador convencional, sujeito a perturbação determinística, estocástica e estocástica/determinística, que compõem os casos 1, 2 e 3 respectivamente.

Ainda no primeiro grupo simulou-se o seguidor aplicado ao regulador convencional, sujeito a perturbação determinística, estocástica e determinística/estocástica. Neste último, simularam-se casos com o polinômio $[1 + F(q^{-1})]$ de ordem zero, um e dois, para mostrar parametricamente a melhora obtida com a evolução da ordem desse polinômio, como citado no Capítulo 2. Estas simulações são compostas pelos casos 4, 5, 6, 7 e 8.

No segundo grupo, com a referência sendo uma constante/rampa, inicialmente simulou-se o regulador convencional somente, sujeito a perturbação determinística e determinística/estocástica, apresentados nos casos 9 e 10 respectivamente.

Ainda nesse grupo simulou-se o seguidor aplicado ao regulador convencional, sujeito a perturbação determinística e determinística/estocástica, com o polinômio $[1 + F(q^{-1})]$ de ordem dois. Essas simulações compõem os casos 11 e 12 respectivamente.

Mais a frente apresenta-se uma análise sucinta de cada caso simulado.

Quanto à simulação das perturbações, de acordo com o que está apresentado no item 4.2, o modelo adotado para as perturbações estocástica e determinística é dado por:

$$\Delta L' = \frac{1}{1 + A(q^{-1})} W(k) + \frac{1 + C(q^{-1})}{1 + A(q^{-1})} \xi(k) \quad (5.2-1)$$

Para a determinação dos sinais $W(k)$ e $\xi(k)$, adotou-se o modelo apresentado a seguir:

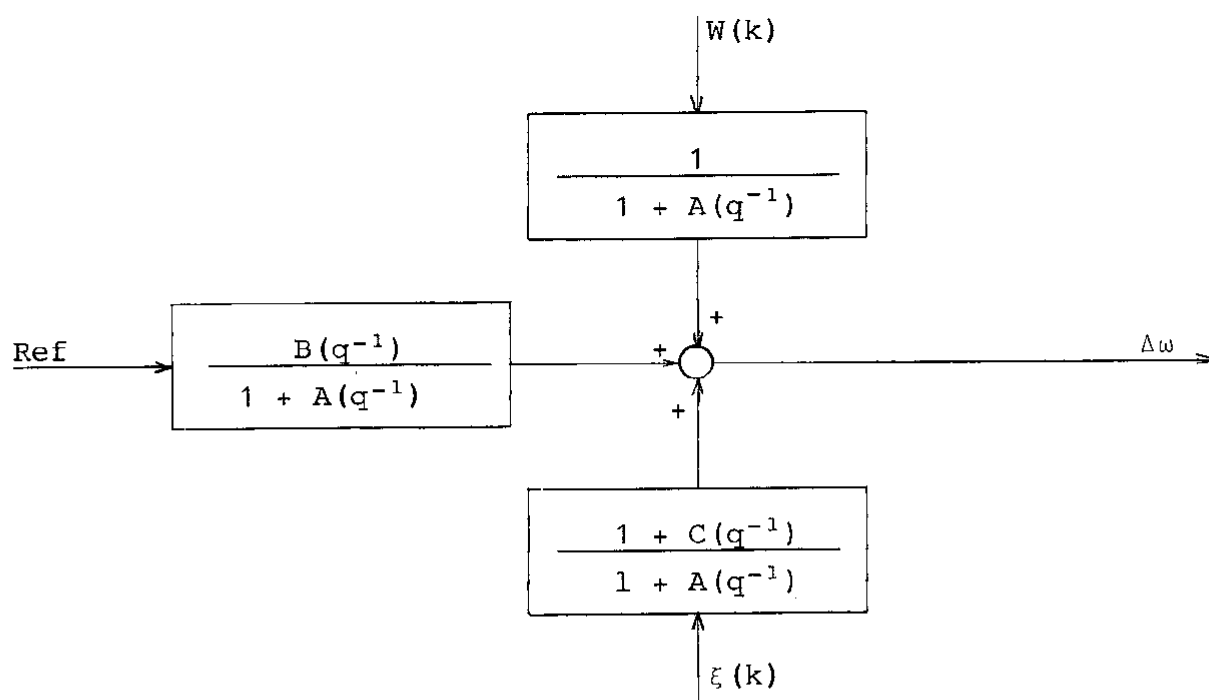


FIGURA 5.1 - Modelo para determinação dos sinais $W(k)$ e $\xi(k)$.

onde o bloco $B(q^{-1}) / 1 + A(q^{-1})$ corresponde ao processo escolhido.

Para a perturbação determinística, considerou-se $\xi(k)$ igual a zero e determinou-se um valor de $W(k)$, constante, que produzisse um desvio de frequência em regime ($\Delta\omega$) correspondente a $0,01\omega_0$, onde ω_0 é a frequência nominal do sistema elétrico (60Hz).

O valor de $W(k)$ que atende o requisito acima é 0,0145.

Para a perturbação estocástica, considerou-se $W(k) = 0$ e determinou-se um valor do desvio padrão de $\xi(k)$ (ruído branco) que produzisse um desvio de frequência compreendido entre $\pm 0,002\omega_0$. Para atender este requisito, encontrou-se um valor de 0,001 para o desvio padrão de $\xi(k)$.

Ao longo das simulações, as perturbações determinística e estocástica adotadas seguiram sempre as definições anteriores.

CASO 1 - REGULADOR CONVENCIONAL

Perturbação determinística constante. Sem perturbação estocástica. Referência zero.

Neste caso, cujo diagrama representativo está apresentado na figura 5.2, tem-se apenas o regulador convencional, sujeito a perturbação determinística. Como esperado, o desvio de frequência é um valor constante.

CASO 2 - REGULADOR CONVENCIONAL

Sem perturbação determinística. Com perturbação estocástica. Referência zero.

Neste caso, cujo diagrama representativo está apresentado na figura 5.3, tem-se apenas o regulador convencional, sujeito a perturbação estocástica.

Observe-se a dispersão da saída do processo (desvio de frequência) em relação à referência.

CASO 3 - REGULADOR CONVENCIONAL

Com perturbação determinística e estocástica. Referência zero.

Neste caso, cujo diagrama representativo está apresentado na figura 5.4, tem-se apenas o regulador convencional, sujeito a perturbação estocástica e determinística.

Observe-se que a saída do processo é bastante dispersa em relação à referência e deslocada desta pela perturbação determinística.

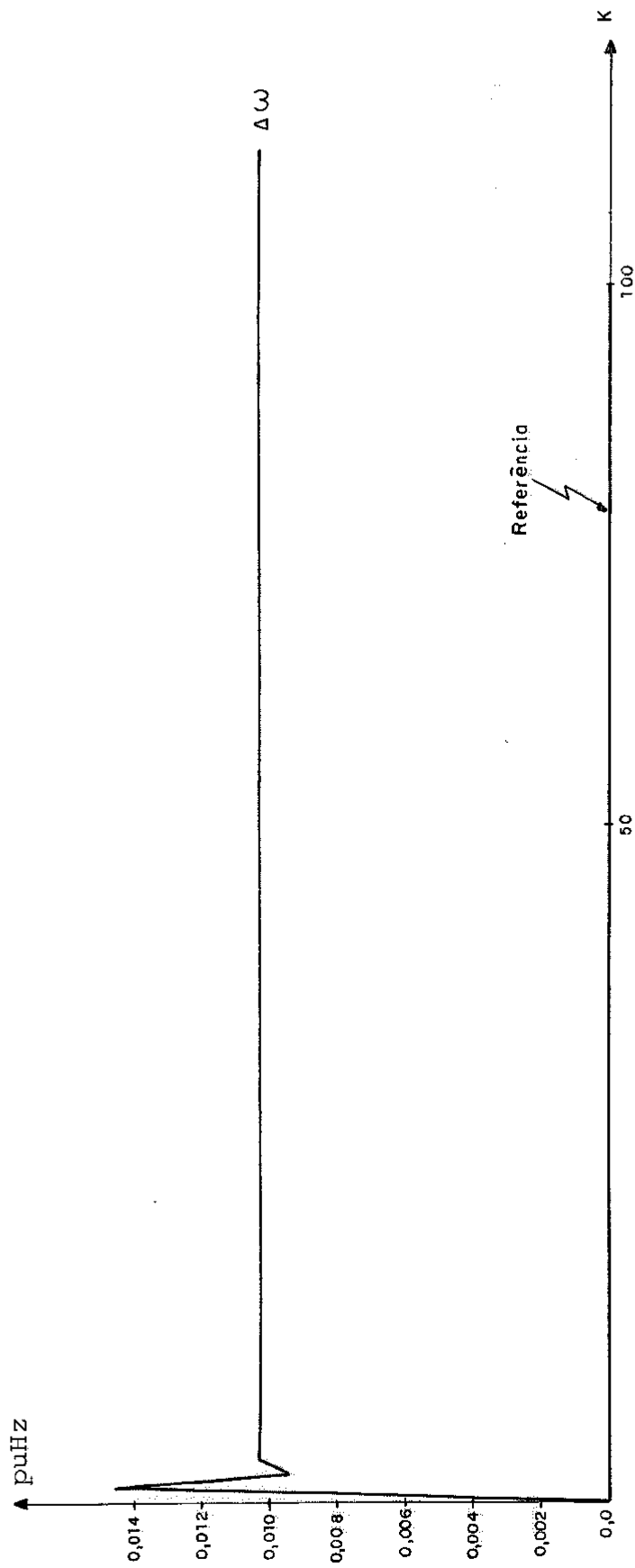


FIGURA 5.2 - Regulador convencional. Perturbação determinística constante.
Sem perturbação estocástica. Referência zero.

- 20 - BYERLY, R.T.; KIMBARK, E.W. "STABILITY OF LARGE ELECTRIC POWER SYSTEMS-COMPUTER REPRESENTATION OF EXCITATION SYSTEMS". IEEE PRESS. 1974.
- 21 - YOUNG, C.C. "MODERN CONCEPTS OF POWER SYSTEM DYNAMICS - THE SYNCHRONOUS MACHINE". IEEE TUTORIAL COURSE. 1970.
- 22 - MONTICELLI, A. "FLUXO DE CARGA EM REDES DE ENERGIA ELÉTRICA". EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA. 1983.
- 23 - CHEN, C.T. "INTRODUCTION TO LINEAR SYSTEM THEORY". HOLD, RI-NEHART AND WINSTON, INC. 1970.
- 24 - KUO, B.C. "ANALYSIS AND SYNTHESIS OF SAMPLED-DATA CONTROL SYSTEMS". PRENTICE-HALL, INC. 1963.

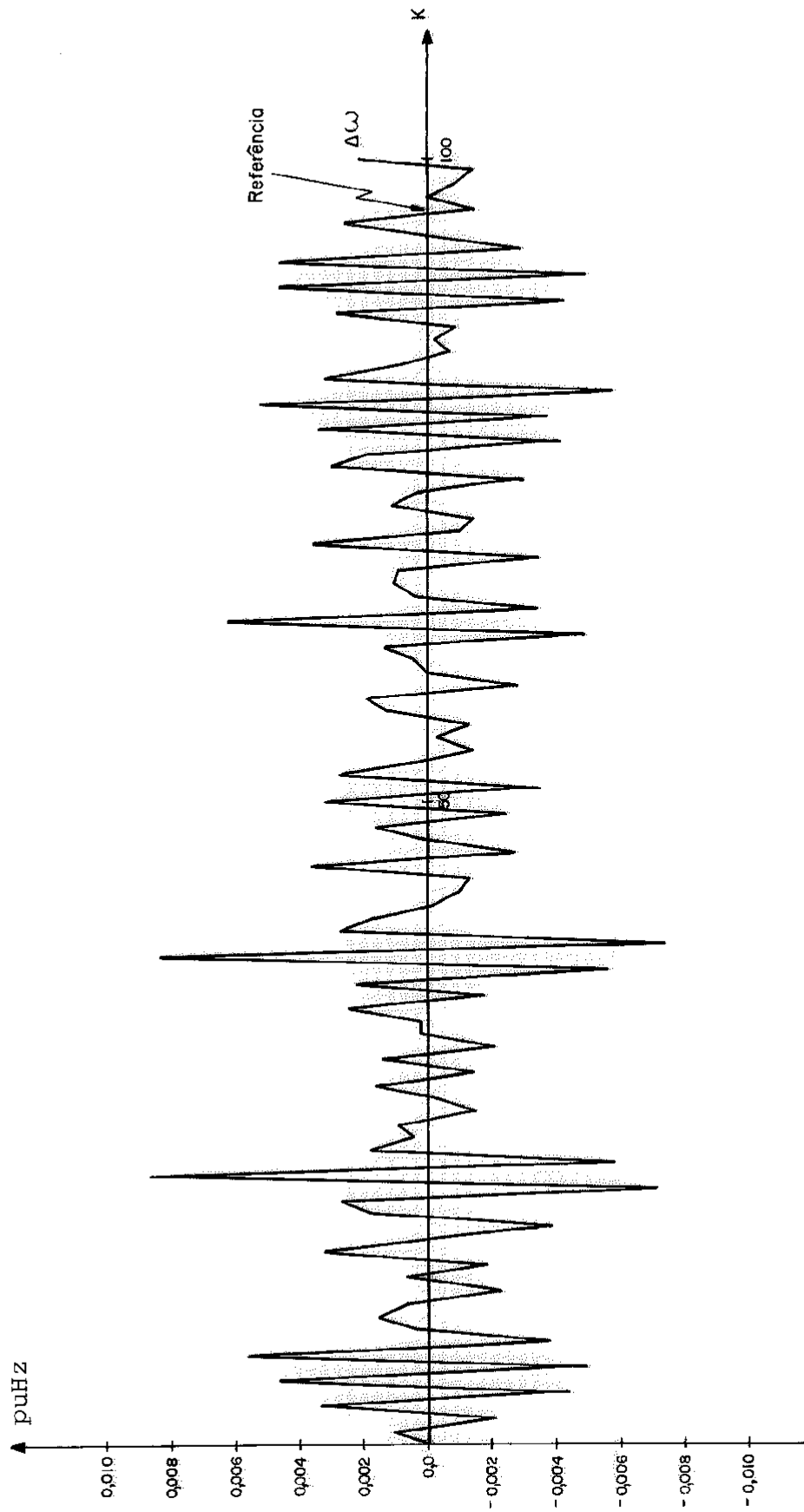


FIGURA 5.3 - Regulador convencional. Sem perturbação determinística.
Com perturbação estocástica. Referência zero.

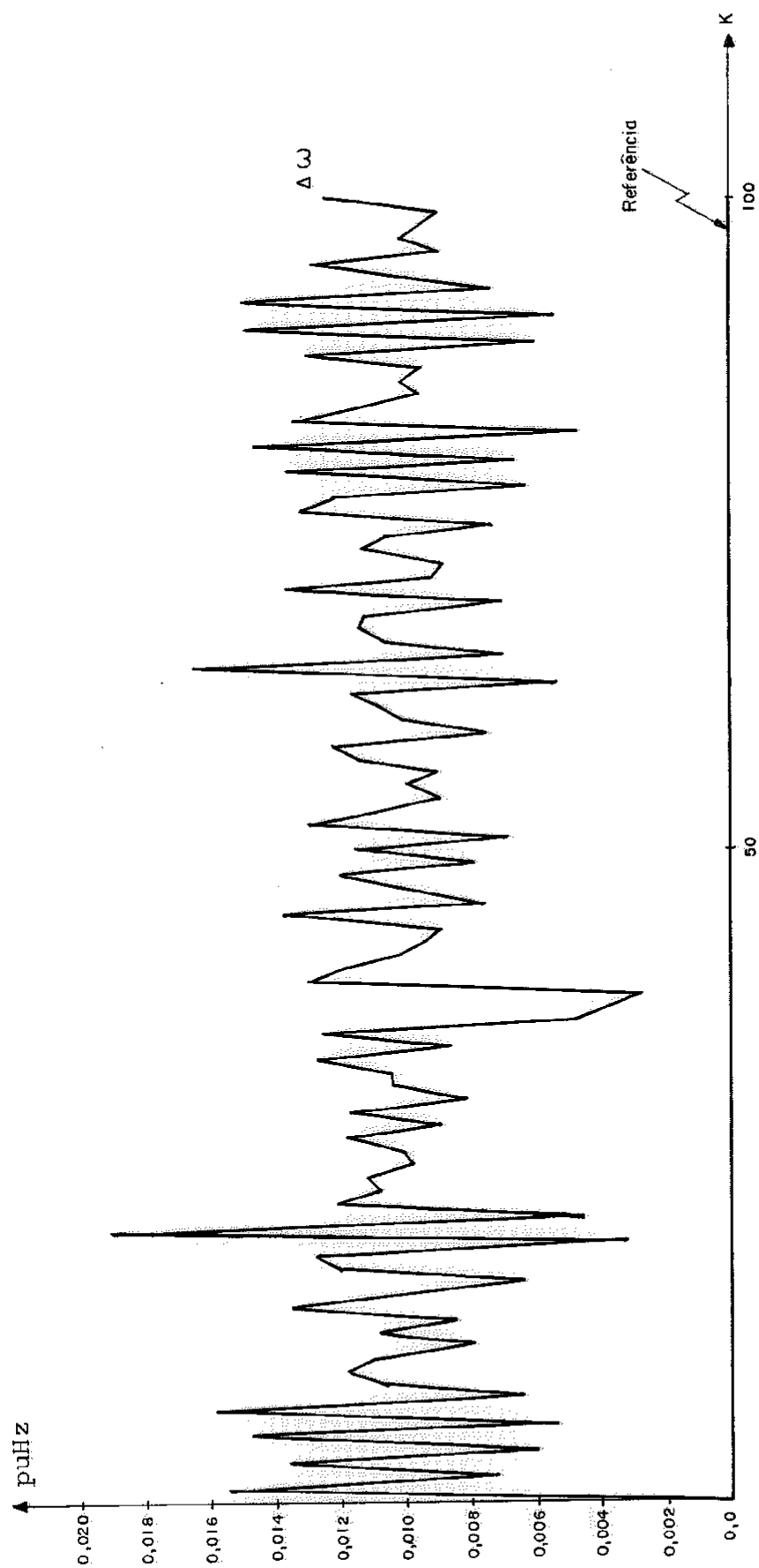


FIGURA 5.4 - Regulador convencional. Com perturbação determinística e estocástica. Referência zero.

CASO 4 - REGULADOR CONVENCIONAL COM SEGUIDOR

Com perturbação determinística. Sem perturbação estocástica. Referência zero.

Polinômio $[1 + F(q^{-1})]$ de primeira ordem.

Neste caso, cujo diagrama representativo está na figura 5.5, tem-se o seguidor aplicado ao regulador convencional, sujeito apenas a perturbação determinística.

Note-se que neste caso a saída do processo converge para a referência.

Note-se também, comparando este com o caso 1, a grande vantagem do uso do seguidor na eliminação da influência da perturbação no sinal de saída do processo.

O polinômio $[1 + F(q^{-1})]$ adotado foi $(1+0,5q^{-1})$.

CASO 5 - REGULADOR CONVENCIONAL COM SEGUIDOR

Sem perturbação determinística. Com perturbação estocástica. Referência zero.

Polinômio $[1 + F(q^{-1})]$ de primeira ordem.

Neste caso, cujo diagrama representativo está na figura 5.6, tem-se o seguidor aplicado ao regulador convencional, sujeito apenas a perturbação estocástica.

Comparando-se este com o caso 2 pode-se notar a grande vantagem do uso do seguidor. Note-se também que a variância do erro de seguimento é menor que a apresentada no caso 2.

Cumprе citar que aqui o polinômio $[1 + F(q^{-1})]$ adotado foi $(1+0,5q^{-1})$.

CASO 6 - REGULADOR CONVENCIONAL COM SEGUIDOR

Com perturbação determinística e estocástica. Referência zero.

Polinômio $[1 + F(q^{-1})]$ de ordem zero.

Neste caso, cujo diagrama representativo está na figura 5.7, tem-se o seguidor aplicado ao regulador convencional,

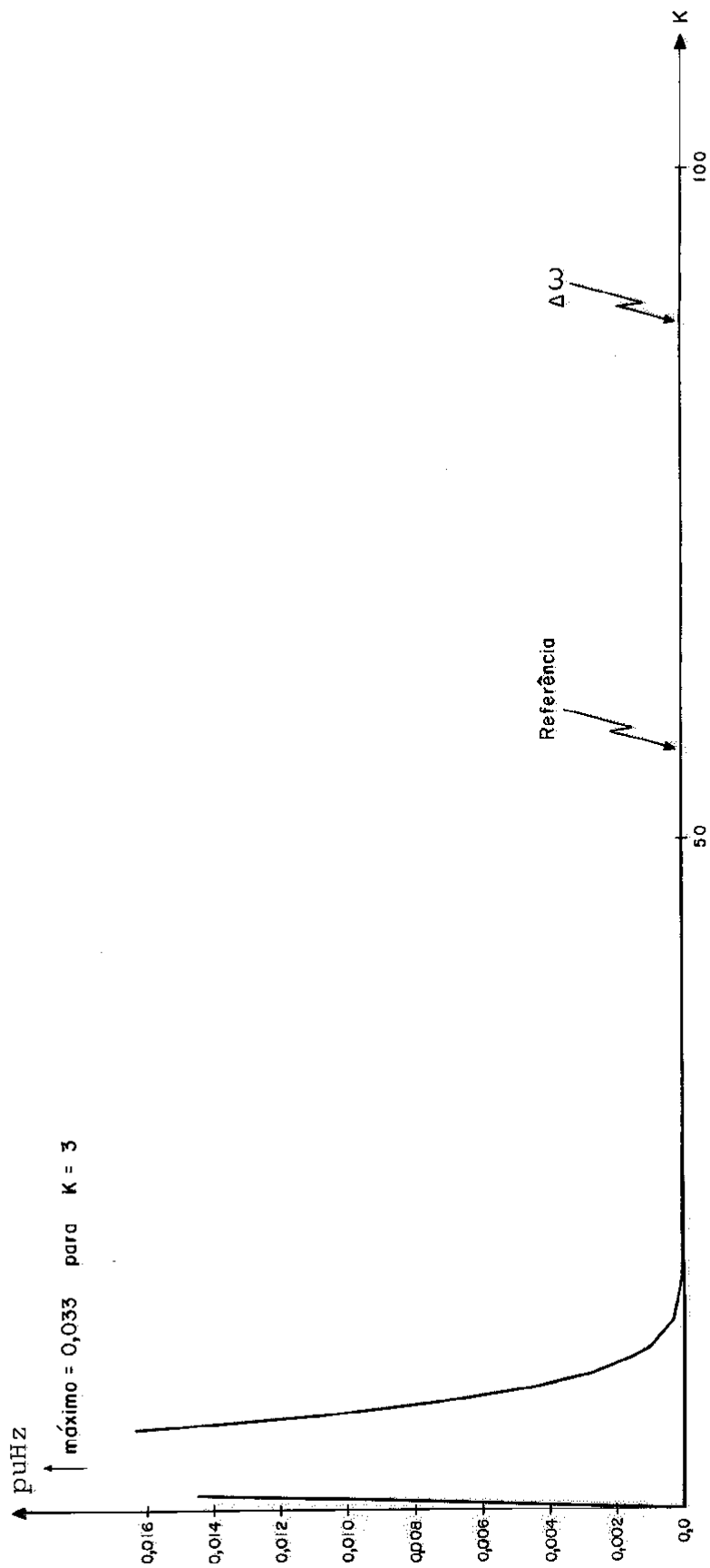


FIGURA 5.5 - Regulador convencional com seguidor. Com perturbação determinística. Sem perturbação estocástica. Referência zero. $F(q^{-1}) = 0,5 q^{-1}$.

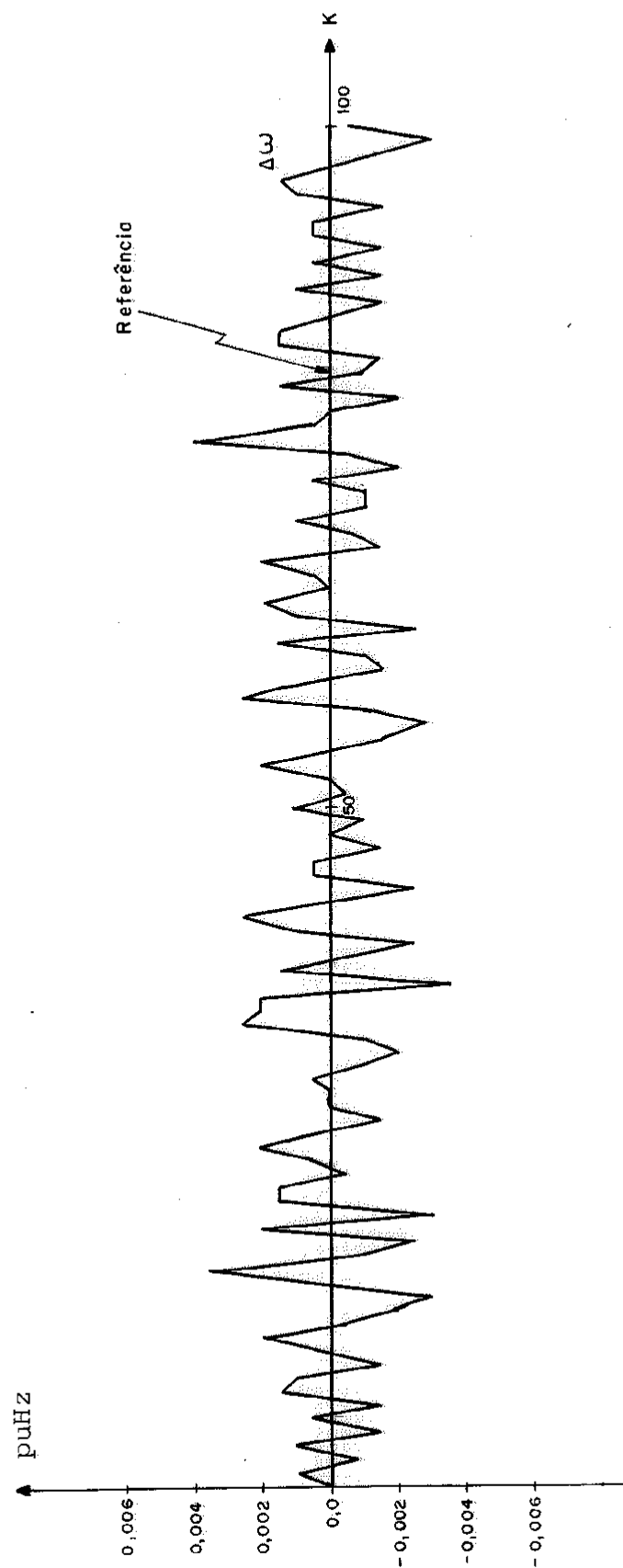


FIGURA 5.6 - Regulador convencional com seguidor. Sem perturbação determinística. Com perturbação estocástica. Referência zero. $F(q^{-1}) = 0,5 q^{-1}$.

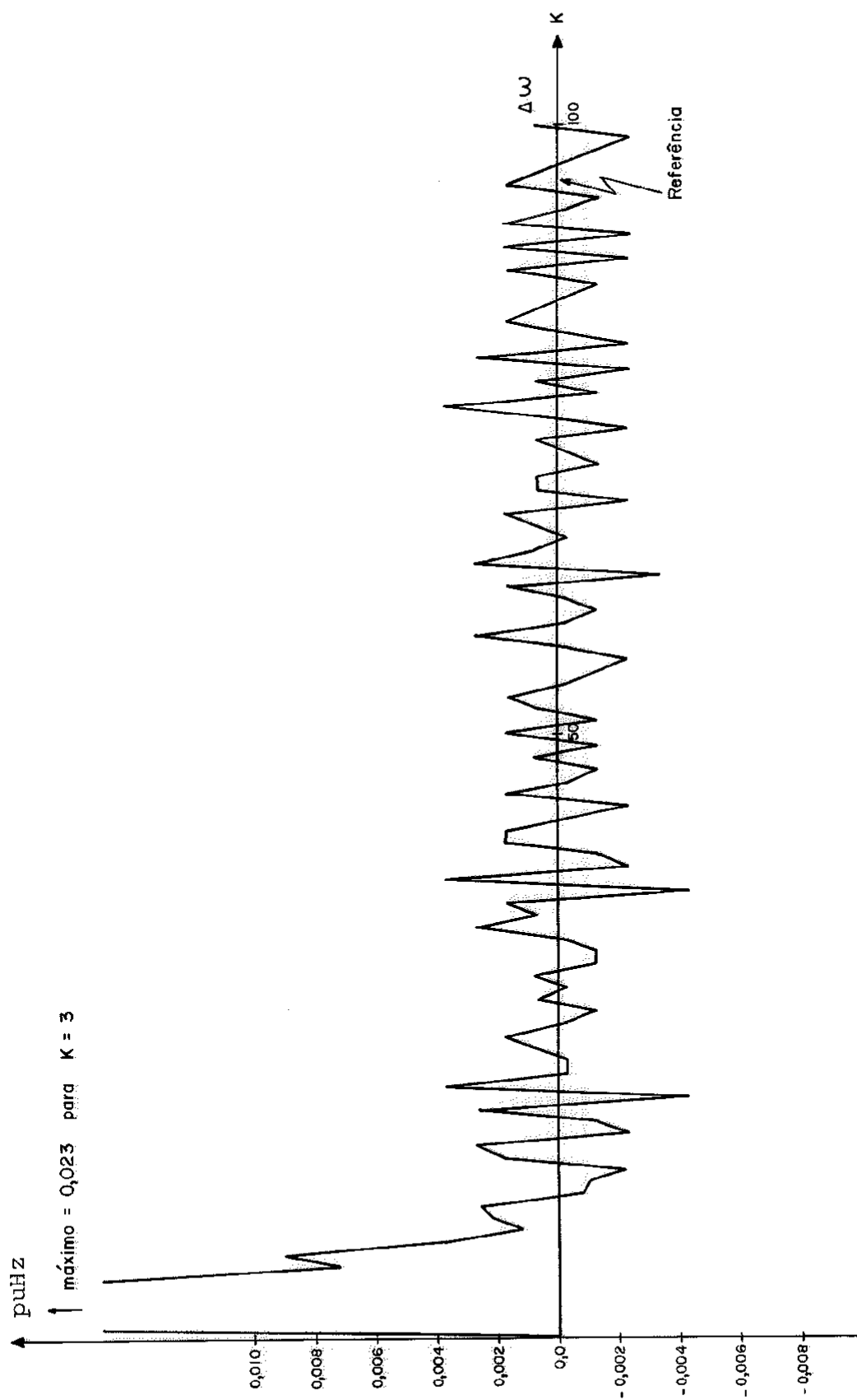


FIGURA 5.7 - Regulador convencional com seguidor. Com perturbação determinística e estocástica. Referência zero. $F(q^{-1}) = 0,0$.

sujeito a perturbação determinística e estocástica. O polinômio $[1 + F(q^{-1})]$ adotado foi igual a 1,0, isto é, de ordem zero.

Note-se a dispersão da saída do processo em torno da referência, bem como compare-se este com o caso 3 e observe-se a enorme vantagem do uso do seguidor.

CASO 7 - REGULADOR CONVENCIONAL COM SEGUIDOR

Com perturbação determinística e estocástica. Referência zero.

Polinômio $[1 + F(q^{-1})]$ de primeira ordem.

Este caso, cujo diagrama representativo está na figura 5.8, difere do caso 6 apenas no polinômio $[1 + F(q^{-1})]$, que agora é de primeira ordem, igual a $(1 + 0,5q^{-1})$.

Note-se que a dispersão da saída do processo em torno da referência é menor que no caso 6.

CASO 8 - REGULADOR CONVENCIONAL COM SEGUIDOR

Com perturbação estocástica e determinística. Referência zero.

Polinômio $[1 + F(q^{-1})]$ de segunda ordem.

Este caso, cujo diagrama representativo está apresentado na figura 5.9, difere do caso 7 no polinômio $[1 + F(q^{-1})]$, que agora é de segunda ordem, igual $(1 + 0,67q^{-1} + 0,33q^{-2})$.

Note-se que aqui a dispersão da saída do processo em torno da referência é ainda menor que no caso 7.

Isto significa que, comparando os casos 6, 7 e 8, quanto maior a ordem do polinômio $[1 + F(q^{-1})]$, menor a dispersão da saída do processo em torno da referência, fato demonstrado no desenvolvimento teórico do seguidor, no Capítulo 2.

CASO 9 - REGULADOR CONVENCIONAL

Com perturbação determinística. Sem perturbação estocástica. Referência constante /rampa.

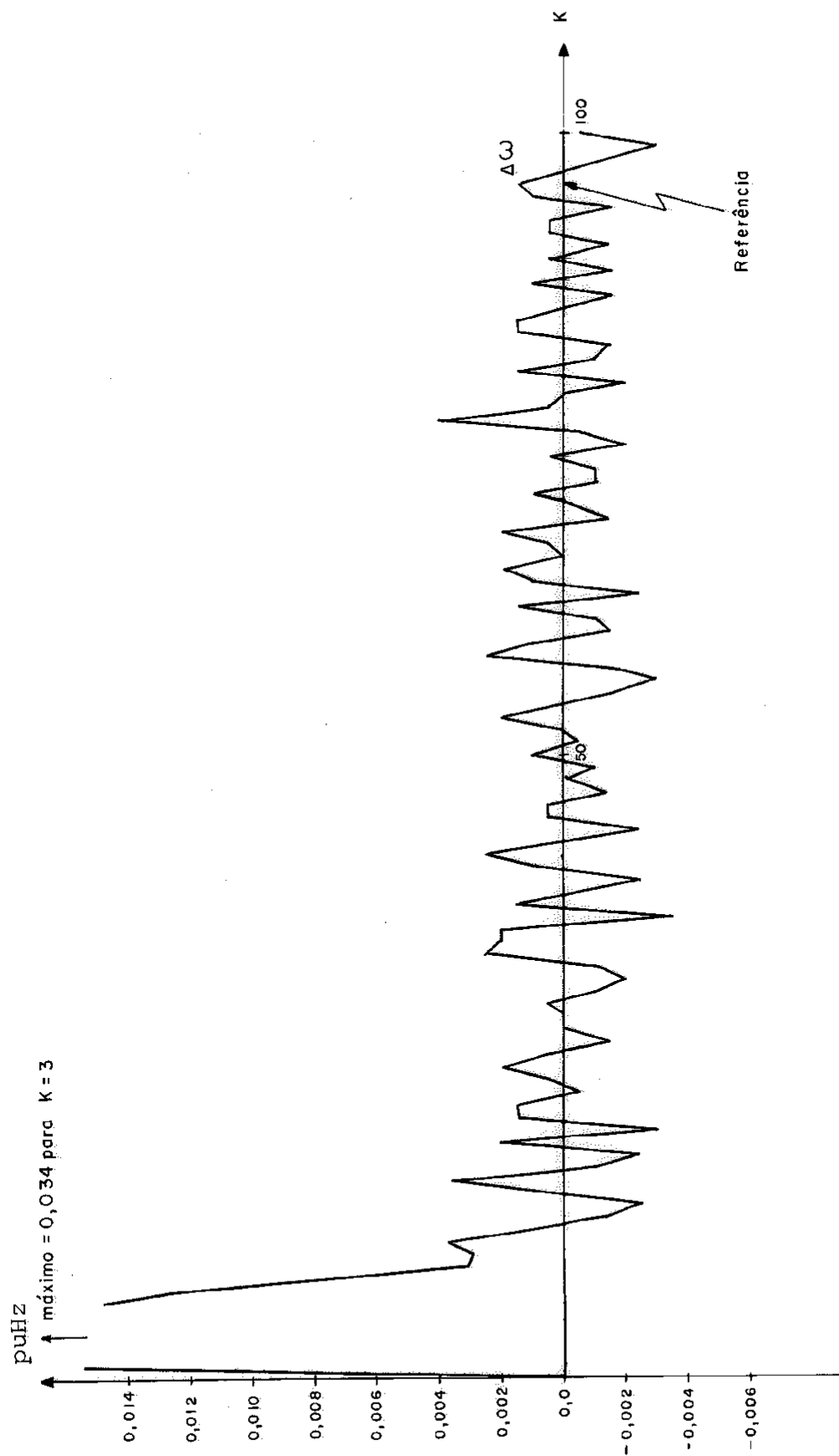


FIGURA 5.8 - Regulador convencional com seguidor. Com perturbação determinística e estocástica. Referência zero. $F(q^{-1}) = 0,5 q^{-1}$.

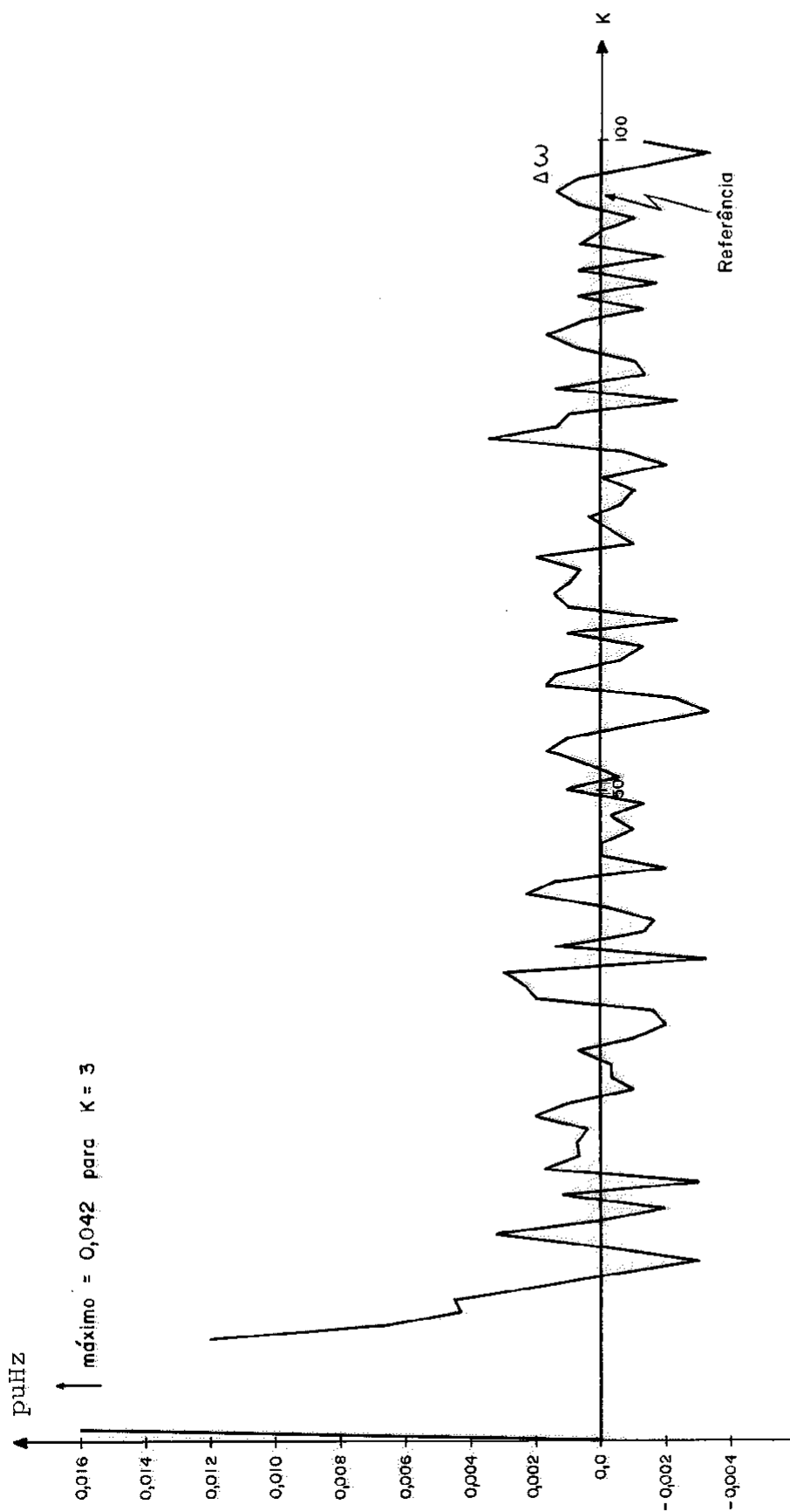


FIGURA 5.9 - Regulador convencional com seguidor. Com perturbação estocástica e determinística. Referência zero. $F(q^{-1}) = 0,67 q^{-1} + 0,33 q^{-2}$.

Neste caso, cujo diagrama representativo está apresentado na figura 5.10, tem-se apenas o regulador convencional sujeito a perturbação determinística.

Note-se a influência da perturbação determinística sobre a saída do processo.

CASO 10 - REGULADOR CONVENCIONAL

Com perturbação determinística e estocástica. Referência constante/rampa.

Neste caso, cujo diagrama representativo é apresentado na figura 5.11, tem-se apenas o regulador convencional, sujeito a perturbações determinística e estocástica.

Note-se aqui uma dispersão considerável da saída do processo em relação à referência.

CASO 11 - REGULADOR CONVENCIONAL COM SEGUIDOR

Com perturbação determinística. Sem perturbação estocástica. Referência constante/rampa. Polinômio $[1 + F(q^{-1})]$ de primeira ordem.

Neste caso, cujo diagrama representativo está na figura 5.12, tem-se o seguidor aplicado ao regulador convencional, sujeito a perturbação determinística.

Comparando-se esse caso com o caso 9, observe-se que a saída do processo converge para a referência com uma pequena dispersão, e fica evidente a vantagem do uso do seguidor.

Verifica-se também, como proposto no desenvolvimento teórico do Capítulo 4, que o projeto do seguidor é adequado para sinais de referência do tipo constante/rampa.

O polinômio $[1 + F(q^{-1})]$ adotado foi $(1 + 0,5q^{-1})$.

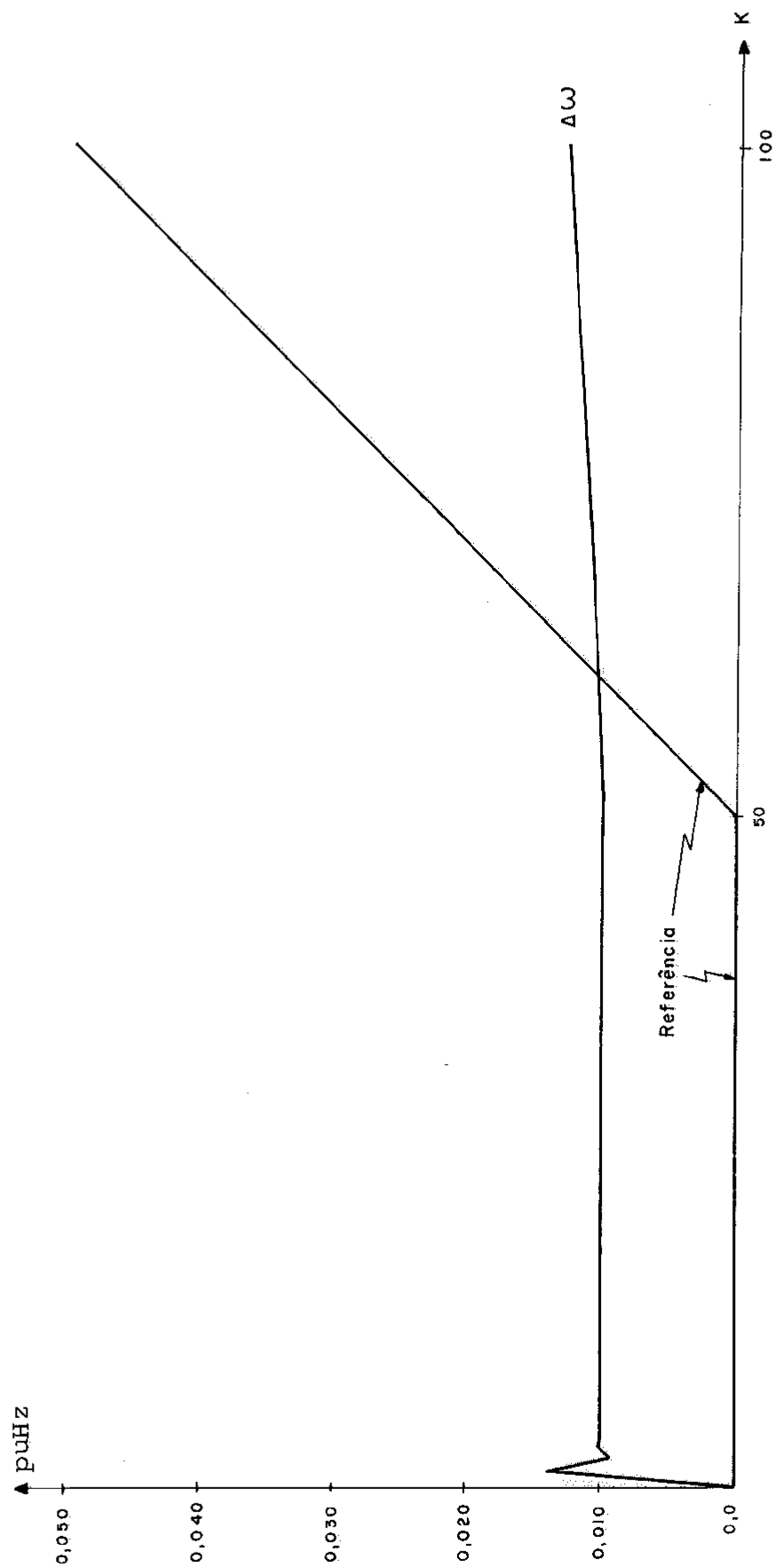


FIGURA 5.10 - Regulador convencional. Com perturbação determinística.
Sem perturbação estocástica. Referência constante/rampa.

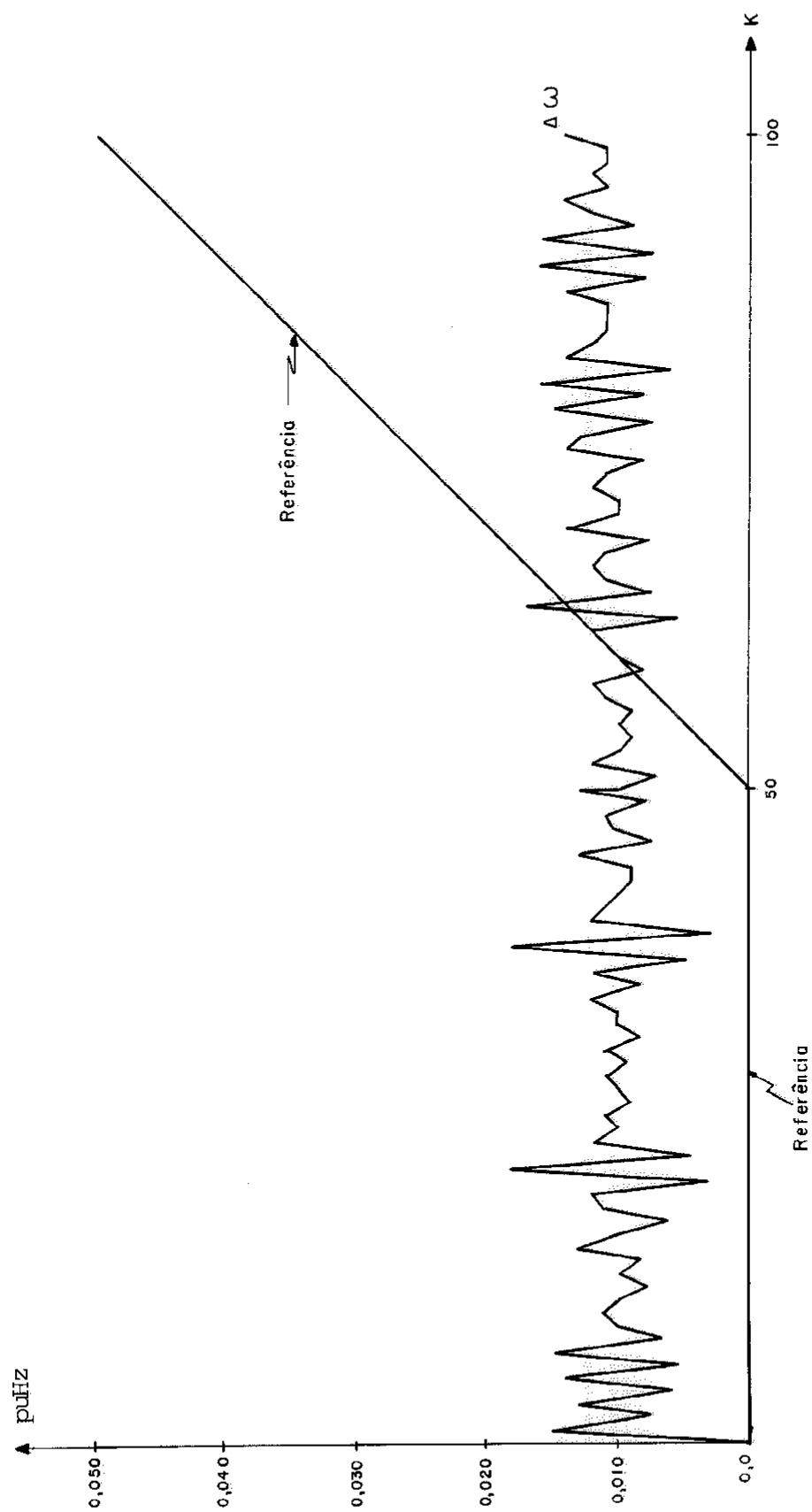


FIGURA 5.11 - Regulador convencional. Com perturbação determinística e estocástica. Referência constante/rampa.

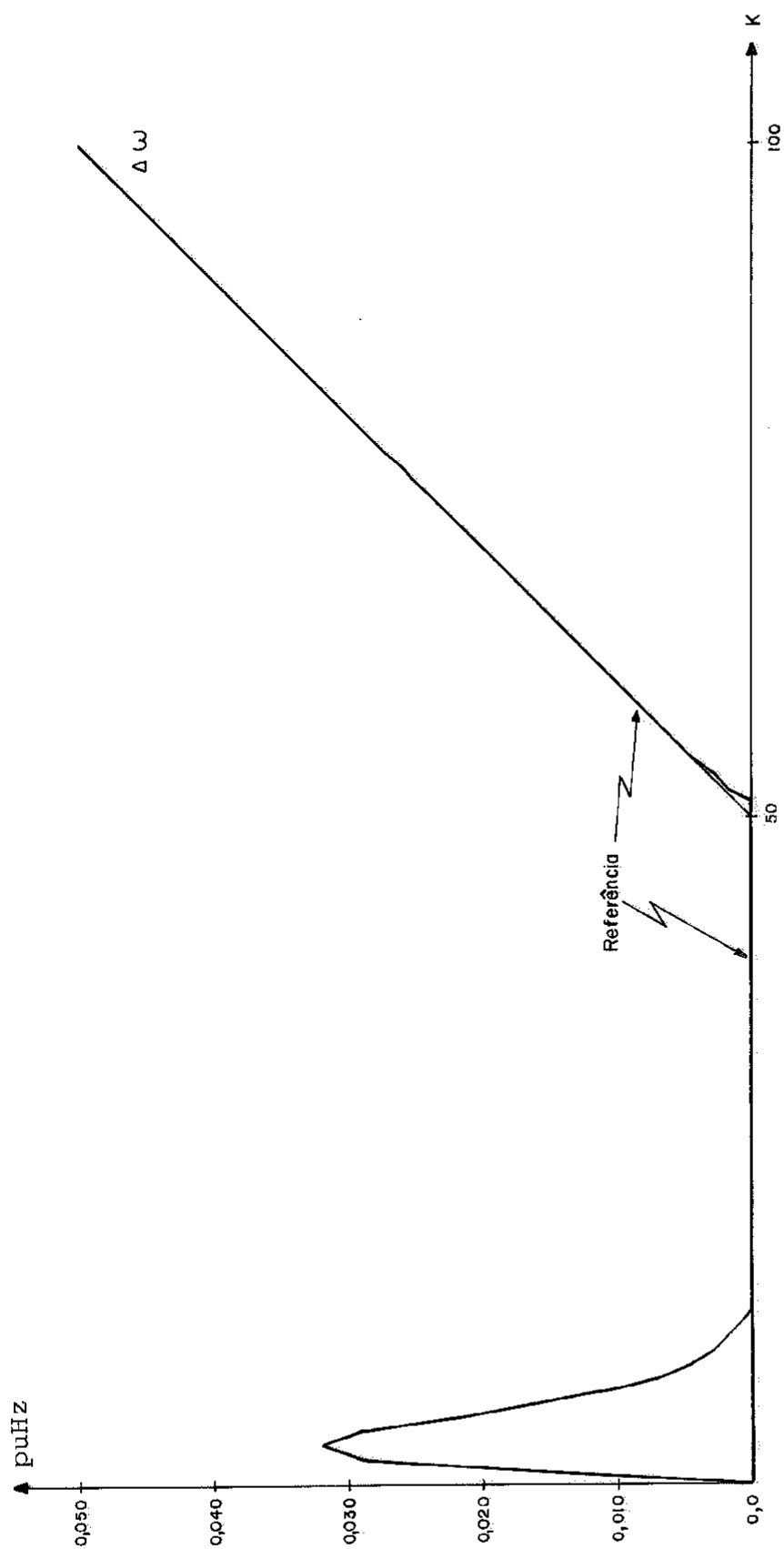


FIGURA 5.12 - Regulador convencional com seguidor. Com perturbação determinística.
Sem perturbação estocástica. Referência constante/rampa. $F(q^{-1}) = 0,5q^{-1}$

CASO 12 - REGULADOR CONVENCIONAL COM SEGUIDOR

Com perturbação determinística e estocástica. Referência constante/rampa. Polinômio $[1+F(q^{-1})]$ de segunda ordem.

Neste caso, cujo diagrama representativo está na figura 5.13, tem-se o seguidor aplicado ao regulador convencional, sujeito a perturbações determinística e estocástica. Aqui adotou-se o polinômio $[1+F(q^{-1})] = (1+0,67q^{-1}+0,33q^{-2})$, isto é, um polinômio de segunda ordem.

Comparando-se este caso com o Caso 10, verifica-se a enorme vantagem do uso do seguidor.

Analogamente ao caso 11, verifica-se que o seguidor projetado atende ao requisito da referência poder ser do tipo constante/rampa.

5.3. OBSERVAÇÃO GERAL

Em todos os casos simulados o sinal de entrada do processo, quando junto do seguidor, possui amplitude tolerável.

A título de ilustração, na figura 5.14 apresenta-se o diagrama representativo deste sinal, chamado de $u(k)$, em um caso escolhido, que corresponde à situação do seguidor aplicado ao regulador convencional, sujeito a perturbações determinística e estocástica (caso 6), aliás, um dos casos onde o sinal $u(k)$ tem maior amplitude.

5.4. CONCLUSÕES

Comparando-se os casos 6, 7 e 8 observe-se que quanto maior é o grau do polinômio $[1 + F(q^{-1})]$, maior é o valor de pico no transitório que ocorre no processo de correção de frequência.

O valor de pico no transitório referente ao caso onde adotou-se o polinômio $[1 + F(q^{-1})] = 1,0$, caso 6, sob o ponto de vista prático é tolerável. Os casos 7 e 8 (ordem de $[1 + F(q^{-1})]$ igual a 1 e 2 respectivamente), apresentam valores de pico que, em termos práticos, são excessivamente elevados, fato que implicaria na atuação dos esquemas de proteção do sistema elétrico.

Assim sendo, no caso de optar-se pela implementação do seguidor com o polinômio $[1 + F(q^{-1})]$ de ordens maiores, torna-se necessário modificar o esquema de controle a fim de se proteger o sistema contra picos transitórios elevados.

Convém citar ainda que a perturbação determinística adotada nas simulações é severa, sob o ponto de vista prático, fato que contribuiu para os efeitos de altos valores de pico transitório encontrados nas simulações.

Deve-se ter em conta também que o esquema de controle proposto adota uma estratégia de controle ótimo, fato que leva a se esperar transitórios maiores dos que ocorrem nos controles convencionais.

Comparando-se os casos 1, 2 e 3 com os casos 4, 5, 6, 7 e 8, bem como os casos 9 e 10 com os casos 11 e 12, observa-se que, em regime permanente, o seguidor estudado apresenta um comportamento muito melhor que o desempenho da regulação primária convencional.

Embora não se tenha apresentado os resultados, observou-se que o comportamento do seguidor, quando projetado apenas para referência constante, não apresentou diferença considerável quando comparado com os resultados obtidos nos casos 4, 5, 6, 7 e 8, onde o seguidor projetado admite referência do tipo constante/rampa.

Neste trabalho, projetou-se e simulou-se o regulador proposto para um gerador hidráulico, que é um sistema a fase não mínima. Observou-se que, neste caso, o sinal de controle (entrada do processo de regulação primária) é não limitado, fato que impossibilita sua aplicação prática, o que vem justificar a restrição imposta no item 2.2 deste trabalho.

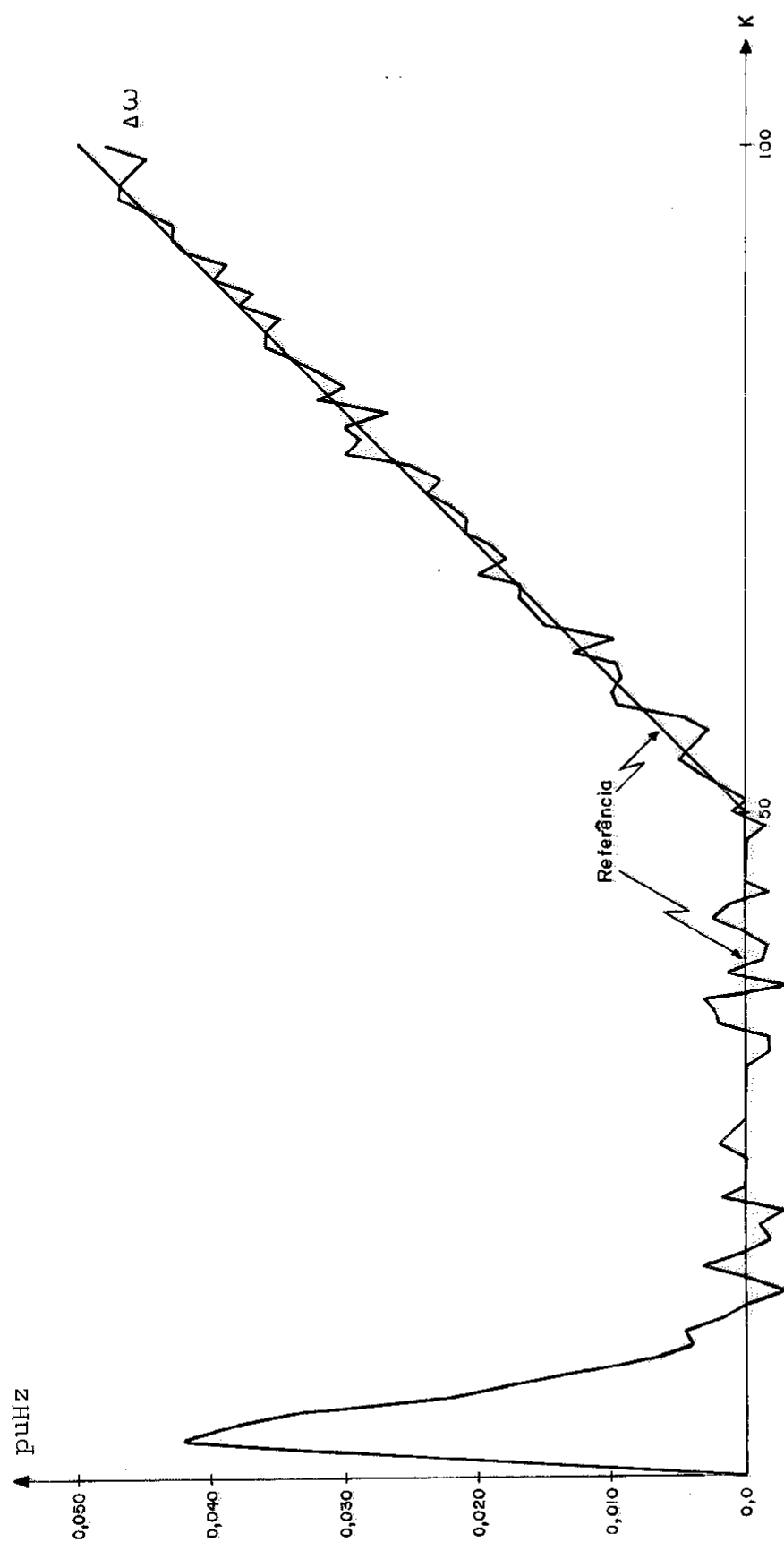


FIGURA 5.13 - Regulador convencional com seguidor. Com perturbação estocástica e determinística. Referência constante/rampa.
 $F(q^{-1}) = 0,67 q^{-1} + 0,33 q^{-2}$.

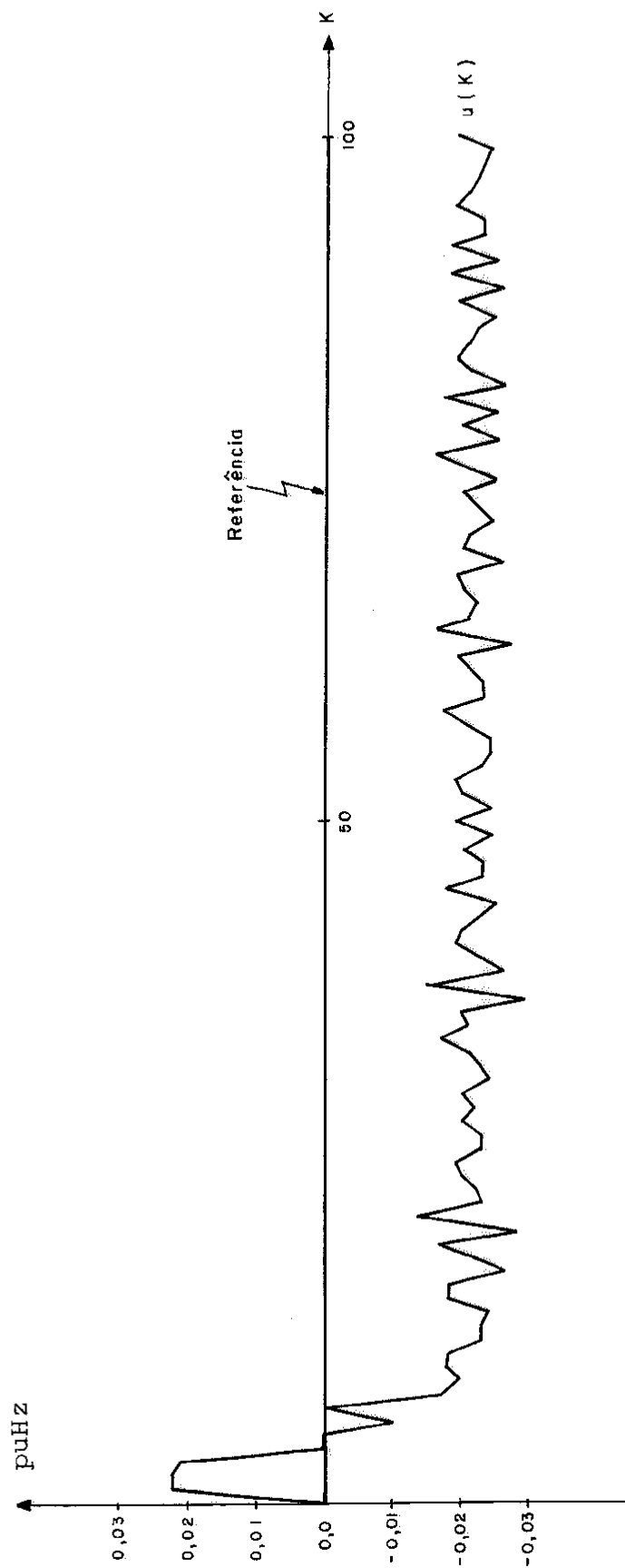


FIGURA 5.14 - Sinal de entrada do regulador convencional com o seguidor aplicado, correspondente ao caso com perturbação determinística e estocástica, referência zero e polinômio $F(q^{-1})$ de ordem zero.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho foi inicialmente apresentado o desenvolvimento de um seguidor a variância mínima, a ser aplicado em um processo sujeito a perturbações determinística e estocástica.

A partir deste seguidor, partiu-se para uma aplicação deste no processo de regulação primária carga-freqüência de um sistema elétrico de potência, com usinas térmicas. Esta aplicação, apresentada neste trabalho através de simulações digitais, mostrou a grande vantagem do uso do seguidor desenvolvido, qual seja, a redução considerável do erro de seguimento entre o desvio de freqüência do sistema elétrico e a referência do regulador de velocidade das unidades geradoras desse sistema, quando comparado com os reguladores clássicos.

Além disso, ficou mostrado que, neste processo de regulação primária, o seguidor proposto reduz consideravelmente o erro de freqüência do sistema elétrico em regime permanente.

Com base na idéia desse trabalho, sugerem-se a seguir alguns temas a serem desenvolvidos:

1. Desenvolvimento de um seguidor a variância mínima, a ser aplicado no processo de regulação primária carga-freqüência de um sistema elétrico de potência, com usinas hidráulicas

2. Desenvolvimento de um seguidor a variância mínima, a ser aplicado em regulação secundária de carga-freqüência de um sistema elétrico de potência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - MELLO, F.P. "DINÂMICA E CONTROLE DA GERAÇÃO". SÉRIE PTI. UFSM. 1979.
- 2 - ELGERD, O. "INTRODUÇÃO À TEORIA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA". EDITORA MC GRAW-HILL DO BRASIL LTDA. 1976.
- 3 - ZÜRN, H.H. "NOTAS DE AULA". CURSO AVANÇADO EM CONTROLE DE SISTEMAS ELÉTRICOS. UFSC. 1983
- 4 - ÅSTRÖM, K.J. "INTRODUCTION TO STOCHASTIC CONTROL THEORY". ACADEMIC PRESS. 1970.
- 5 - BEHR, A.T. "ESTUDO SOBRE IDENTIFICADORES E SEGUIDORES DE VARIÂNCIA MÍNIMA". DISSERTAÇÃO DE MESTRADO. UFSC. 1982.
- 6 - PAPOULIS, A. "PROBABILITY, RANDOM VARIABLES, AND STOCHASTIC PROCESSES". MCGRAW-HILL BOOK COMPANY. 1965
- 7 - DAVISON, E.J. "THE ROBUST DECENTRALIZED CONTROL OF A GENERAL SERVOMECHANISM PROBLEM". IEEE TRANS.AUTOMAT.CONTR.VOL AC-21, pp 14-24, FEV 1976.
- 8 - DAVISON, E.J. "THE ROBUST CONTROL OF A SERVOMECHANISM PROBLEM FOR LINEAR TIME - INVARIANT MULTIVARIABLE SYSTEMS". IEEE TRANS.AUTOMAT.CONTR. VOL AC-21, NO 1, pp 25-34, FEV 1976.
- 9 - LIVRAMENTO, C.A. "CONTROLE DIGITAL-ANALÓGICO PARA RASTREAMENTO ROBUSTO E RÁPIDO ENTRE AMOSTRAGENS". DISSERTAÇÃO DE MESTRADO UFSC. DEZEMBRO 1979.
- 10 - MELO, J.D.; SINGH, S.N. "SENSIVITY REDUCTION AND ROBUST TRACKING WITH APPLICATION TO AIRCRAFT CONTROL". DPTO.ENG. ELÉTRICA - UFSC/FLORIANÓPOLIS-SC.

- 11 - RUNTZ, K.J.; FARAG, A.S.A.; HUBER, D.W.; HOPE, G.S.; MALIK, O.P. "DIGITAL CONTROL SCHEME FOR A GENERATING UNIT".
DEPARTAMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING - THE UNIVERSITY OF
CALGARY. CALGARY, ALBERTA T2N 1N4, CANADA.
- 12 - LANG, J.H. "ON THE DESIGN OF A SPECIAL-PURPOSE DIGITAL
CONTROL PROCESSOR". IEEE TRANS. AUTOMAT.CONTR. VOL AC-29,
pp 195-201, MARÇO 1984
- 13 - LEONARDO, M. " O QUE SÃO CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS".
ELETRICIDADE MODERNA. AGOSTO 1985.
- 14 - "DETERMINING LOAD CHARACTERISTICS FOR TRANSIENT PERFORMANCES"
ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, PALO ALTO, CALIFORNIA.
MARÇO. 1981.
- 15 - MEYER, F.J.; LEE, K.Y. "IMPROVED DYNAMIC LOAD MODEL FOR
POWER SYSTEM STABILITY STUDIES".IEEE TRANS. ON P.A.S.,
VOL PAS-101, NO.9, pp 3303-3309, SET. 1982.
- 16 - CONCORDIA, C.; IHARA, S. "LOAD REPRESENTATION IN POWER
SYSTEM STABILITY STUDIES" IEEE TRANS. ON P.A.S., VOL PAS-
101, NO.4, pp 969-977, ABRIL 1982.
- 17 - FROWD, R.J.; PODMORE, R.; WALDRON, M. "SYNTHESIS OF DYNAMIC
LOAD MODELS FOR STABILITY STUDIES". IEEE TRANS.ON.P.A.S.,
VOL PAS-101, NO1, pp 127-135, JAN 1982.
- 18 - SABIR, S.A.Y.; LEE, D.C. "DYNAMIC LOAD MODELS DERIVED FROM
DATA ACQUIRED DURING SYSTEM TRANSIENTS". IEEE TRANS. ON
P.A.S., VOL PAS-101, NO.9, pp 3365-3372, SET. 1982.
- 19 - ILICETO, F.; CEYHAN, A.; RUCKSTUHL, G. "BEHAVIOR OF LOADS
DURING VOLTAGE DIPS ENCOUNTERED IN STABILITY STUDIES-FIELD
AND LABORATORY TESTS". IEEE TRANS. ON P.A.S., VOL PAS-91,
pp 2470-2479, NOV/DEZ 1972.

- 20 - BYERLY, R.T.; KIMBARK, E.W. "STABILITY OF LARGE ELECTRIC POWER SYSTEMS-COMPUTER REPRESENTATION OF EXCITATION SYSTEMS". IEEE PRESS. 1974.
- 21 - YOUNG, C.C. "MODERN CONCEPTS OF POWER SYSTEM DYNAMICS - THE SYNCHRONOUS MACHINE". IEEE TUTORIAL COURSE. 1970.
- 22 - MONTICELLI, A. "FLUXO DE CARGA EM REDES DE ENERGIA ELÉTRICA". EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA. 1983.
- 23 - CHEN, C.T. "INTRODUCTION TO LINEAR SYSTEM THEORY". HOLD, RI-NEHART AND WINSTON, INC. 1970.
- 24 - KUO, B.C. "ANALYSIS AND SYNTHESIS OF SAMPLED-DATA CONTROL SYSTEMS". PRENTICE-HALL, INC. 1963.