



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
xxx.xx
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO –IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

APLICAÇÃO DE CONTROLADOR ADAPTATIVO EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

**José Roberto Pinto da Silval(*)
COPEL GeT e UFPR**

**Hamilton Medeiros Silveira
TRACTBEL ENERGIA e UFSC**

RESUMO

O trabalho apresenta uma proposta de otimização do desempenho da frequência através da minimização de variância, em sistemas elétricos, através da aplicação de um controlador adaptativo nos sistemas de controle de velocidade dos geradores instalados nesses sistemas. O controlador utiliza a técnica da variância mínima e de adaptação paramétrica. Como o processo de controle da frequência opera sujeito a perturbações de natureza determinísticas e estocásticas, é um processo adequado para a aplicação em questão. A simulação do controlador mostrou que, sob o ponto de vista de dispersão do desvio da frequência, é vantajosa a aplicação do controlador adaptativo.

PALAVRAS-CHAVE

Regulação Primária da Frequência, Variância Mínima, Controle Adaptativo, Otimização de Sistema de Controle, Processos Estocásticos.

1.0 - INTRODUÇÃO

No processo de transmissão e distribuição de energia elétrica existe a possibilidade de otimizar o desempenho de determinadas variáveis controladas do sistema elétrico, como por exemplo, a frequência. Essa otimização refere-se a operar o sistema utilizando os recursos de controle de modo a obter o menor erro possível entre o valor real e o valor desejado para a variável escolhida para a otimização. No presente trabalho esse erro está definido como erro de seguimento.

Por outro lado, existe uma técnica de otimização de processos baseado no conceito de mínima variância, que é uma teoria desenvolvida por Astron [1] e que permite otimizar processos submetidos a perturbações estocásticas e determinísticas. Como a variação da carga de um sistema elétrico de transmissão ou distribuição tem um comportamento determinístico e estocástico, todos os processos de controle desses sistemas que sofrem ação da variação da carga podem ser tratados a luz da teoria de otimização através da mínima variância. E um processo que sofre a ação da variação da carga é o processo de controle primário de velocidade do eixo dos geradores conectados no sistema de transmissão ou sistema de distribuição. Como a frequência do sistema elétrico tem uma relação direta com a velocidade de rotação dos eixos dos geradores, com um pouco de boa vontade pode-se considerar esse processo de controle primário da velocidade dos eixos dos geradores como um processo que faz parte do processo de controle da frequência do sistema elétrico.

No processo de regulação primária da velocidade, um elemento de destaque é o regulador de velocidade, cuja lei de controle é classicamente calculada levando em conta apenas a ocorrência de perturbações definidas como perturbações determinísticas. Acontece que na operação em tempo real ocorrem também perturbações de natureza estocástica, perturbações essas que dificultam a operação do regulador de velocidade na busca por um

(*) Rua José Izidoro Biazeto, n° 158 – sala 235 - Bloco A – CEP 81200-240 Curitiba, PR – Brasil
Tel: (+55 41) 3331-4182 – Fax: (+55 41) 3331-3702 – Email: jose@copel.com

erro mínimo de seguimento da frequência. Assim, para contornar a dificuldade de controle introduzida pela perturbação estocástica, neste trabalho é proposto um esquema de controle adaptativo [1], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], que aplicado ao processo de regulação primária de velocidade, rejeita as perturbações determinísticas, bem como minimiza a influência das perturbações estocásticas, e com isso promove um mínimo erro entre o valor real e o valor desejado da frequência.

Finalmente, vale lembrar que o método de otimização através da mínima variância pode ser implementado em outros dispositivos de controle dos sistemas elétricos de transmissão ou nos sistemas elétricos de distribuição, como por exemplo, nos sistemas de excitação de grandes usinas, nos sistemas de excitação de pequenas centrais geradoras e nos sistemas de controle dos Flexible AC Transmission System.

2.0 - DESENVOLVIMENTO DE UM SEGUIDOR À VARIÂNCIA MÍNIMA

Seja um processo cujo modelo é dado pela seguinte equação diferença:

$$[1+A(q^{-1})]y(k)=B(q^{-1})u(k)+W(k)+[1+C(q^{-1})]\xi(k) \quad (2.1)$$

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

$$A(q^{-1}) = a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n} \quad (2.1-a)$$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + \dots + b_nq^{-n} \quad (2.1-b)$$

$$C(q^{-1}) = c_1q^{-1} + \dots + c_nq^{-n} \quad (2.1-c)$$

$\xi(k)$ = ruído branco que modela a perturbação estocástica

$W(k)$ = sinal que modela a perturbação determinística

O diagrama de blocos desse sistema é dado por:

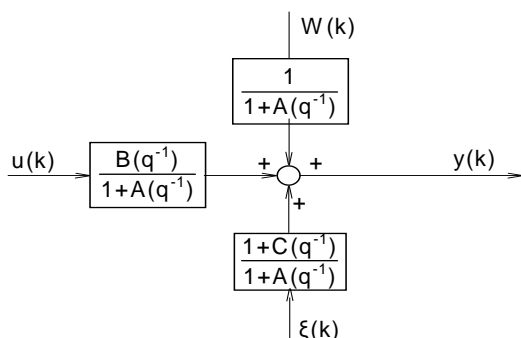


FIGURA 1 – Diagrama de blocos do processo em análise.

Devido à perturbação estocástica, é impossível esperar que a saída $y(k)$ siga exatamente a referência, que chamaremos de $R(k)$. Para resolver essa questão a seguir é desenvolvido um seguidor de modo que a variância do erro de seguimento dado por

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

seja mínimo. Em outras palavras, o problema que se tem agora é determinar um seguidor para o processo descrito pela equação 2.1 tal que a variância do erro de seguimento seja mínima.

Inicialmente define-se um estimador da perturbação $\hat{\omega}(k)$ dado por:

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

Para o cálculo do seguidor, define-se o polinômio

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

tal que

$$[1+D(q^{-1})]R(k) = 0 \quad (2.5)$$

$$[1+D(q^{-1})]W(k) = 0 \quad (2.6)$$

Aplicando-se o polinômio de 2.4 no modelo do processo dado em 2.1 chega-se a

$$[1+D(q^{-1})][1+A(q^{-1})]y(k) = B(q^{-1})v(k) + [1+D(q^{-1})][1+C(q^{-1})]\xi(k) \quad (2.7)$$

onde

$$v(k) = [1+D(q^{-1})]u(k) \quad (2.8)$$

Aplicando-se o polinômio dado na equação 2.4 na equação do erro de seguimento dada em 2.2 e após aplicando em 2.7 chega-se a :

$$[1+S(q^{-1})]\varepsilon(k) = B(q^{-1})v(k) + [1+P(q^{-1})]\omega(k) \quad (2.8)$$

onde

$$[1+S(q^{-1})] = [1+D(q^{-1})][1+A(q^{-1})] = 1 + s_1q^{-1} + s_2q^{-2} + \dots + s_{ns}q^{-ns} \quad e \quad (2.9)$$

$$[1+P(q^{-1})] = [1+D(q^{-1})][1+C(q^{-1})] = 1 + p_1q^{-1} + p_2q^{-2} + \dots + p_{np}q^{-np} \quad (2.10)$$

Define-se agora o controlador dado por:

$$B(q^{-1})v(k) = S(q^{-1})\varepsilon(k) - [P(q^{-1}) - F(q^{-1})]\hat{\omega}(k) \quad (2.11)$$

Onde o filtro F é dado por:

$$F(q^{-1}) = f_1q^{-1} + f_2q^{-2} + \dots + f_rq^{-r} \quad (2.12)$$

Substituindo-se a equação do controlador dada em 2.11 na equação 2.8 chega-se a expressão do erro dada por:

$$\varepsilon(k) = -P(q^{-1})[\hat{\omega}(k) - \omega(k)] + F(q^{-1})\hat{\omega}(k) + \omega(k) \quad (2.13)$$

Por outro lado, nesta última expressão o filtro modelado pelo polinômio $F(q^{-1})$ não é conhecido. No entanto, pode-se determiná-lo através da aplicação da estratégia de mínima variância do erro de seguimento na equação dinâmica deste erro, dada pela expressão 2.13, que levada ao regime permanente tem a forma:

$$\varepsilon(k) = [1+F(q^{-1})]\omega(k) \quad (2.14)$$

O problema final agora é então encontrar o polinômio $[1+F(q^{-1})]$ tal que o controlador definido por

$$B(q^{-1})v(k) = S(q^{-1})\varepsilon(k) - [P(q^{-1}) - F(q^{-1})]\hat{\omega}(k) \quad (2.15)$$

leve o erro de seguimento, dado por:

$$\varepsilon(k) = y(k) - R(k) = [1+F(q^{-1})]\omega(k) = [1+F(q^{-1})][1+D(q^{-1})]\xi(k) \quad (2.16)$$

a ter o menor valor possível para a sua variância.

A perturbação determinística $W(k)$ tem que ser saída de um sistema linear autônomo invariante com o tempo, expresso por:

$$[1+D_1(q^{-1})]W(k) = 0 \quad (2.16)$$

Para calcular o polinômio $1+F(q^{-1})$ admitiu-se que a perturbação $W(k)$ é um sinal constante/rampa, sendo

$$1+D_1(q^{-1}) = 1 - 2q^{-1} + q^{-2} \quad (2.17)$$

Por outro lado a variância do erro de seguimento é definida por:

$$\text{var}[\varepsilon(k)] = E[\varepsilon^2(k)] - E^2[\varepsilon(k)] \quad (2.18)$$

Quando $\xi(k)$ for simulado como um ruído branco e o polinômio $1+F(q^{-1}) = 1$, o resultado do cálculo do menor valor para a variância do $\varepsilon(k)$ é $6\sigma^2$, sendo σ^2 a variância do ruído branco. Por outro lado, quando se adota

$1+F(q^{-1}) = 1+f_1q^{-1}$, o resultado do cálculo do menor valor para a variância do $\varepsilon(k)$ é $3,33\sigma^2$. Quando se adota $1+F(q^{-1}) = 1+f_1q^{-1}+f_2q^{-2}$, o resultado do cálculo do menor valor para a variância do $\varepsilon(k)$ é $2,50\sigma^2$.

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

Neste estágio do desenvolvimento do seguidor pode-se montar um diagrama de blocos que apresenta a estrutura de todas as entidades envolvidas no problema: o estimador da perturbação estocástica, o seguidor e o sinal de referência. A seguir apresentam-se as equações que permitem a montagem desse diagrama de blocos:

$$[1+A(q^{-1})]y(k)=B(q^{-1})u(k)+W(k)+[1+C(q^{-1})]\xi(k) \quad (2.19)$$

$$\hat{\omega}(k) = \frac{[1+D_1(q^{-1})][1+A(q^{-1})]}{1+C(q^{-1})}y(k) - \frac{[1+D_1(q^{-1})]B(q^{-1})}{1+C(q^{-1})}u(k) \quad (2.20)$$

$$u(k) = \frac{v(k)}{1+D(q^{-1})} \quad (2.21)$$

$$B(q^{-1})v(k) = S(q^{-1})\varepsilon(k) - [P(q^{-1}) - F(q^{-1})]\hat{\omega}(k) \quad (2.22)$$

$$\varepsilon(k) = y(k) - R(k) \quad (2.23)$$

A partir dessas equações pode-se montar o diagrama de blocos que modela toda a malha de controle adaptativo de um processo utilizando a técnica da mínima variância. Esse diagrama de blocos está apresentado a seguir:

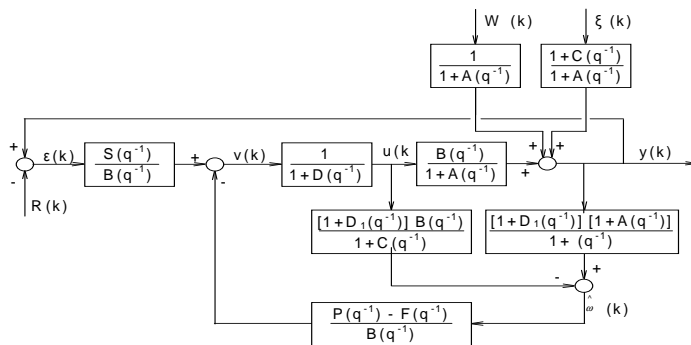


FIGURA 2 - Diagrama de blocos do seguidor a variância mínima para processos sujeitos a perturbações estocásticas e determinísticas.

3.0 - A APLICAÇÃO DO CONTROLADOR À MÍNIMA VARIÂNCIA NO PROCESSO DE REGULAÇÃO PRIMÁRIA DA FREQUÊNCIA

No presente trabalho considera-se o processo de regulação primária de velocidade como sendo o processo de controle de velocidade do eixo do gerador levando em conta apenas o regulador de velocidade, o gerador e o sistema elétrico, em malha aberta.

Admita-se que em um sistema elétrico ocorra uma determinada variação de carga. Neste instante, em cada gerador ocorre alteração no valor da potência elétrica gerada. Nos instantes iniciais após esse evento não há variação da potência mecânica de entrada nos geradores; conseqüentemente, surge nos geradores uma potência acelerante, que implica na alteração da velocidade de rotação dos eixos dos geradores, o que implica na alteração da frequência do sistema elétrico sob a sua influência. Sob a ótica de controle e do seguidor desenvolvido no Item 2 anterior, o erro entre a frequência desejada e a frequência atual pode ser chamado de erro de seguimento.

Enquanto não houver atuação nos órgãos primários dos geradores, a velocidade destes continuará diferente da nominal. Neste quadro têm-se então dois problemas:

- com a variação da carga do sistema elétrico tem-se um desequilíbrio entre a potência ativa total gerada e a carga total do sistema elétrico;
- a frequência do sistema elétrico assume valores diferentes do nominal, pois existe uma relação física entre a rotação dos geradores e a frequência do sistema elétrico onde esses geradores estão inseridos.

A solução desses problemas inicia-se pela ação de controle classicamente conhecida como regulação primária [2], [3], que pode ser entendida como um processo de controle que atende dois objetivos básicos:

- equilibrar a carga e a geração total do sistema.
- recuperar a frequência do sistema elétrico para valores próximos do nominal.

Para executar essas funções, a malha de controle da regulação primária compõe-se de:

- regulador de velocidade;
- órgão primário ou turbina;
- gerador;
- sistema elétrico

Por outro lado, observa-se que durante a operação de um sistema elétrico, a sua carga varia instante a instante, devido às constantes entradas e saídas de carga, devido às variações das cargas consumidas com as variações da tensão e devido às variações das cargas consumidas com a variação da frequência. 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 do sistema elétrico não seja perfeitamente constante ao longo do tempo. Por isso, pode-se estender o processo de controle de velocidade dos eixos dos geradores para o processo de controle da frequência do sistema elétrico. Essas variações na frequência do sistema sensibilizam o sistema de controle de velocidade dos geradores, que atuam no sentido de restabelecer o equilíbrio entre a carga total e a geração total desse sistema, bem como atuam no sentido de reduzir ao máximo os desvios da frequência.

Uma outra característica que se observa no comportamento da frequência é a sua natureza estocástica, ou seja, a frequência se comporta como um sinal cuja amplitude depende do tempo e um sinal que em cada instante se comporta como uma variável aleatória. Assim, conclui-se que essas variações contínuas e de pequena amplitude da carga são perturbações estocásticas no processo de controle primário da frequência de um sistema elétrico, as quais provocam neste um desvio de frequência com característica estocástica.

Além das pequenas perturbações, em um sistema elétrico pode-se ter variações de carga não de pequenas amplitudes, mas variações grandes, abruptas e com amplitude constantes, 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;
- defeitos
- operação de cargas especiais.

Esses tipos de variações têm características determinísticas, ou sob o ponto de vista estatístico, comportam-se como perturbações persistentes determinísticas. Com um raciocínio análogo ao raciocínio usado para as variações de pequena amplitude, as variações de grande amplitude de carga também implicam em variações da frequência do sistema, de modo que se pode dizer que o comportamento da frequência do sistema associado a essas variações abruptas de carga é um comportamento determinístico. Nesse caso, a carga se comporta como uma perturbação determinística no processo de controle de frequência do sistema, e conseqüentemente gera um desvio de característica determinística na frequência.

Conclui-se então que a malha de controle de velocidade dos geradores opera submetida a dois tipos de perturbações. Uma perturbação de natureza determinística e outra perturbação de natureza estocástica. Cada uma dessas perturbações gera um respectivo erro de seguimento da frequência, e cada um desses erros de seguimento possui a mesma natureza da perturbação que o gerou. Por outro lado, deseja-se um erro de seguimento com o menor valor possível, ou seja, um erro de seguimento mínimo. Por isso, o processo de regulação primária convencional em sistemas elétricos é um processo adequado para a aplicação do seguidor a variância mínima desenvolvido no Item 2.0 anterior. Convém destacar que, como esse seguidor rejeita as perturbações determinísticas, um outro produto resultante da utilização desse seguidor é a redução do desvio da frequência em regime permanente devido à perturbação determinística.

Finalmente, apresenta-se, na figura 3 a seguir, um modelo [2] que foi adotado nesse trabalho para o processo de regulação primária da velocidade em discussão.

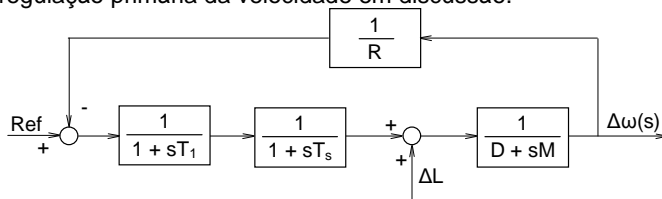


FIGURA 3 – Modelo da malha de regulação primária

E nesse modelo do processo de regulação primária será aplicado o seguidor à variância mínima, com o objetivo de minimizar o erro entre a frequência atual e a frequência desejada.

4.0 - A DISCRETIZAÇÃO DO PROCESSO

Para analisar o desempenho do seguidor à variância mínima aplicado no processo de regulação primária é necessário discretizar o modelo do processo. No caso, para a discretização utilizou-se o modelo apresentado na figura 4 a seguir:

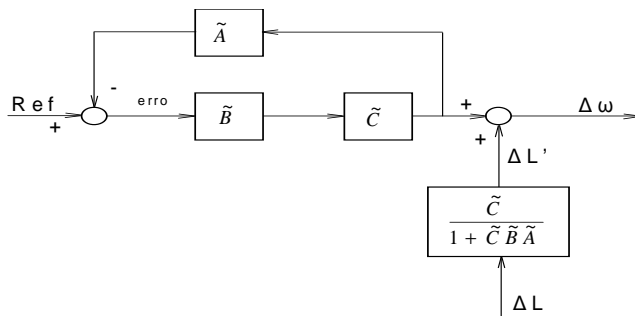


FIGURA 4 – Modelo adotado para a discretização

A adaptação do modelo da malha de regulação primária para a aplicação do seguidor a variância mínima gera o diagrama de blocos apresentado na figura 5 a seguir:

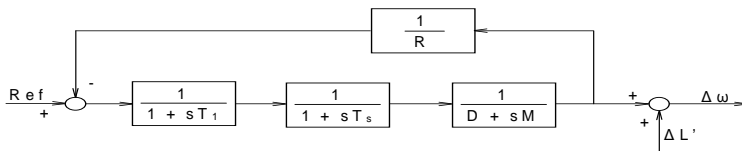


FIGURA 5 – Modelo adaptado para a aplicação do seguidor a variância mínima

Para discretizar o processo, foram utilizados os seguintes valores para os parâmetros: $T_1 = 0,25$ s; $T_s = 0,35$ s; $D = 1,0$ puMW/puHz; $M = 10$ s e $R = 0,05$ pu. Agora, utilizando-se o método de discretização proposto por Chen[14], com um período de discretização de 1,0 segundo, obteve-se uma realização discreta, cuja função de transferência antes do somador da perturbação é dada por:

$$\frac{0,0608q^{-1} + 0,0061q^{-2} + 0,0004q^{-3}}{1,0 + 0,3525q^{-1} + 0,0606q^{-2} - 0,0000017q^{-3}} \quad (4.1)$$

A equação do modelo considerando a perturbação estocástica $\xi(K)$ e a perturbação determinística $W(K)$ é dada por:

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

De posse da função de transferência em discreto do processo e utilizando-se as expressões do seguidor desenvolvidas no Item 2.0, pode-se determinar a função de transferência em discreto do seguidor e identificação do processo, formando assim o controlador adaptativo para o processo de regulação primária da frequência. A figura 6 a seguir apresenta o resultado dessa determinação. A identificação está detalhada na referência [15].

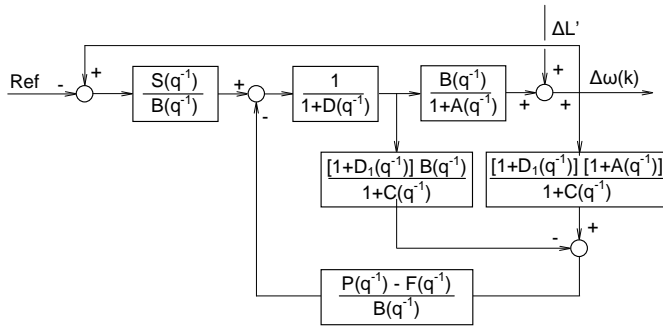


FIGURA 6 – Modelo em discreto do o controlador adaptativo para o processo de regulação primária da freqüência

Apresenta-se a seguir a análise do desempenho desse modelo, para que se possa avaliar o efeito do seguidor à variância mínima no processo de regulação primária.

5.0 - ANÁLISE DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

A partir da discretização do processo apresentado no item 4, efetuou-se simulações para avaliar o desempenho do seguidor a variância mínima aplicado no processo de controle primário de freqüência.

Inicialmente simulou-se o desempenho do processo de regulação de velocidade clássico, sujeito a perturbação estocástica e perturbação determinística, com referência zero. Na figura 7 a seguir está plotado o erro de seguimento da freqüência para a aplicação dos distúrbios em questão. Nesse caso observou-se que a saída do processo é bastante dispersa em relação à referência e deslocada desta pela perturbação determinística.

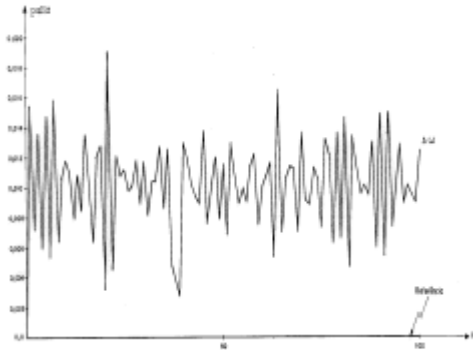


FIGURA 7 – Regulador convencional. Com perturbação estocástica e determinística. Referência zero.

Por outro lado, se for aplicado o controlador adaptativo, cuja resposta às perturbações está na figura 8 a seguir, observa-se uma dispersão muito menor da saída do processo.

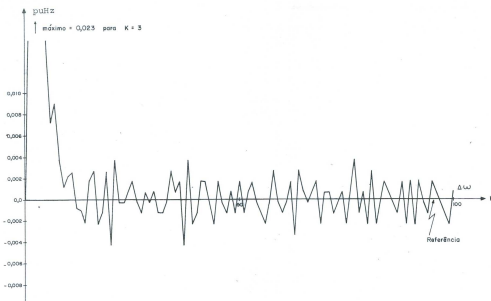


FIGURA 8 – Regulador adaptativo. Com perturbação estocástica e determinística. Referência zero.

No outro caso notável analisado, ilustrado na figura 9 a seguir, foi considerado o regulador convencional sujeito à perturbação determinística e estocástica, com referência constante/rampa. Note-se aqui uma dispersão considerável da saída do processo em relação a referência.

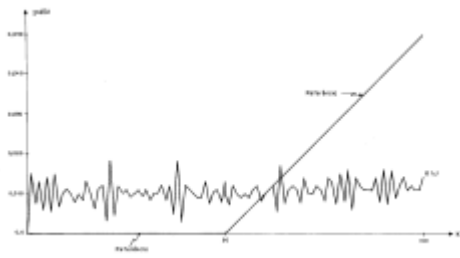


FIGURA 9 – Regulador convencional. Com perturbação estocástica e determinística. Referência constante/rampa.

Finalmente analisou-se o controlador adaptativo aplicado ao regulador convencional, sujeito a perturbação determinística e perturbação estocástica, referência constante/rampa e polinômio $1+F(q^{-1})$ de segunda ordem.. A saída do processo está ilustrada na figura 10 a seguir, Pode-se verificar a vantagem do uso do controlador adaptativo.

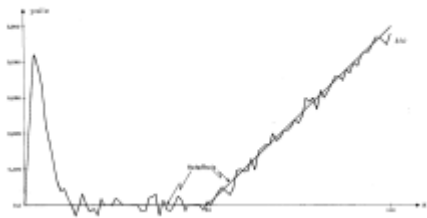


FIGURA 10 - Regulador adaptativo. Com perturbação estocástica e determinística. Referência constante/rampa.

6.0 - CONCLUSÕES

Pode-se verificar que, sob o ponto de vista de dispersão do erro de seguimento, é vantajosa a utilização do controlador adaptativo que opera segundo a técnica de variância mínima.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Astron, K.J. "Introduction to Stochastic Control Theory". Academic Press. 1983.
- (2) Mello, F.P. "Dinâmica e Controle da Geração". Série PTI. UFSM. 1979.
- (3) Elgerd, O. "Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica". editora MC Graw-Hill do Brasil Ltda. 1976.
- (4) Zürn, H.H. "notas de aula". Curso avançado em controle de sistemas elétricos. UFSC. 1983
- (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". MC Graw-Hill Book Company. 1965
- (7) Davison, E.J. "The robust decentralized control of a general servomechanism problem". IEEE Trans. Automat. Contr. vol ac-21, 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. "Sensitivity 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". Department of Electrical Engineering – The University of Calgary. Calgary, Alberta t2n 1n4, Canada.
- (12) Lang, J.H. "On the desing of a special-special-purpose digital control processor". IEEE Trans. Automat. Contr. vol ac-29, pp 195-201, março 1984
- (13) Young, C.C. "Modern concepts of power system dynamics – the synchronous machine". IEEE Tutorial Course. 1970.
- (14) Chen, C.T. "Introduction to linear system theory". Hold, Rinehart and Winston, Inc. 1970.
- (15) Silva, J.R.P da. "Análise de Controle Primário Carga-Frequência em Ambiente Estocástico e Determinístico". Dissertação de Mestrado, UFSC, 1983.