

# DISEÑO Y ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE OBSERVADORES ADAPTATIVOS EN ESQUEMAS DE CONTROL MEDIANTE REALIMENTACIÓN COMPLETA DE ESTADOS

Valencia Montaña Mónica Andrea

Facultad de Ingeniería Electrónica, Escuela Politécnica del Ejército

Av. El Progreso S/N, Sangolquí, Ecuador

## Resumen

En esta investigación se plantea analizar un esquema de control adaptativo cuando se incluye un bloque de estimación de estados que también tendría el carácter de adaptativo. Una etapa importante del desarrollo del proyecto será la identificación en línea de los parámetros de la planta que servirán tanto para el cálculo de la ley de control adaptativo, basada en la realimentación de estados, como para el cálculo del observador adaptativo mediante la reproducción de la dinámica de la planta.

El proyecto incluirá el análisis de desempeño de observadores adaptativos en esquemas de control por realimentación de estados. Para el efecto se ensayará con tres variaciones fundamentales a la propuesta:

- Ley de control adaptativo y observador de estados constante
- Ley de control constante y observador adaptativo
- Ley de control y observador adaptativos

El análisis de los esquemas de control de este proyecto está aplicado a sistemas que tienen una entrada y una salida (sistemas SISO), la única información que se da al observador es la salida del sistema que se desea controlar, y la entrada del sistema.

El esquema a utilizar es el Controlador Adaptativo Autosintonizado STR (Self-Tuning Regulator), debido a su fácil implementación y a su autoajuste óptimo en base al conocimiento de la dinámica del proceso a controlar.

Para identificar los parámetros de la planta se utiliza el método de mínimos cuadrados recursivos. Finalmente, se desarrollarán rutinas computacionales y esquemas de simulación en Matlab que permitan el análisis de resultados de los esquemas propuestos.

## I. INTRODUCCION

El control adaptativo otorga al sistema de control una cierta capacidad para juzgar su propio funcionamiento y aplicar las medidas necesarias para corregir sus propios parámetros con el propósito de alcanzar un desempeño óptimo ante condiciones externas.

El proyecto actual busca obtener las características deseadas de un sistema de referencia dado mediante el control adaptativo, implantando un sistema de estimación de estados, en función de las entradas y salidas reales del sistema, debido a que con frecuencia se presenta el problema de que no todos los estados están disponibles para su realimentación y no es posible hacer una medición de alguno de los estados.

El sistema de estimación de estados llamado Observador, realizará la función de reducir la diferencia entre los estados reales y los estimados, permitiendo así, enviar información estimada acerca del valor que toman dichos estados, dando a conocer un aproximado del valor real con un menor margen de error, esta función se puede desarrollar teniendo un completo conocimiento del sistema, es decir, que el modelo que se tiene del sistema refleja la relación entre la entrada y salida del sistema.

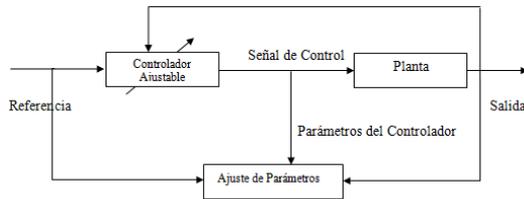
## II. Sistema de Control Adaptativo

Un sistema de control adaptativo es aquel que constantemente mide las características dinámicas de la planta, las compara con las características deseadas, y usa la diferencia para variar parámetros ajustables del sistema con el fin de mantener el comportamiento óptimo del sistema, independientemente de las variaciones externas.

### A. Control Adaptativo en el Espacio de Estados

A través de la identificación del sistema se determina el modelo adecuado dado un conjunto de datos de entrada/salida, el cual es usado para optimizar el control y la estimación.

Un regulador adaptativo, al igual que la realimentación en un sistema de control, busca modificar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del sistema, por tanto el control realimentado tiene como objetivo reaccionar a los cambios del estado o salida del proceso manteniéndolo controlado. La configuración de un control adaptativo se muestra a continuación:



**Figura. 1.1. Configuración genérica de un Controlador Adaptativo**

La figura 1.1 está formada por un bucle principal de realimentación negativa en el que aparece un regulador ajustable, y otro bucle que sirve para ajustar los parámetros de dicho regulador, dentro de dicho bucle se observa el comportamiento del controlador se compara con un comportamiento deseado y según el resultado de dicha comparación se ajusta los parámetros del regulador, para esto se utiliza un mecanismo de adaptación que puede actuar directamente sobre la señal de control que recibe el proceso.

## III. Identificación en el Espacio de Estados

La identificación de Sistemas se basa en construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos obtenidos del propio sistema, dicho modelo se construye a partir de datos observados.

El desarrollo del Control Adaptativo debe basarse en el conocimiento de las características dinámicas del sistema que se va a controlar. Se denomina Identificación al conjunto de estudios, algoritmos y teorías que analizan este conocimiento.

Resumiendo las formulas del algoritmo de minimos cuadrados: [1]

$$K_k = P_{k-1} m_k [1 + m_k^T P_{k-1} m_k]^{-1} \quad (1)$$

$$e_k = y_k - m_k^T \theta_{k-1} \quad (2)$$

$$P_k = P_{k-1} - K_k m_k^T P_{k-1} \quad (3)$$

$$\theta_k = \theta_{k-1} - P_k m_k e_k \quad (4)$$

Donde:

$\theta_k$  → Vector de parámetros en el instante presente

$\theta_{k-1}$  → Vector de parámetros en el instante anterior

$m_k$  → Vector de regresión en el instante actual

$y_k$  → Vector de medición en la salida del sistema en el instante actual

$k$  → Matriz de ganancias

$e_k$  → Error de Predicción.

Este algoritmo permite realizar la identificación de los parámetros “en línea” lo cual es muy importante para el estudio de control adaptativo.

El algoritmo de mínimos cuadrados recursivos da valores a la matriz P y al vector de parámetros  $\theta$ , y en cada instante k analiza los valores de entrada  $u(k)$  y salida  $y(k)$  y, para formar el vector regresor  $m(k)$ , y calcular  $P(k)$ ,  $K(k)$ , finalmente  $\theta(k)$ :

Generalizaremos el procedimiento realizado para utilizar este algoritmo en los siguientes pasos:[2]

1. Inicializar los valores del vector  $\theta$  y la matriz P
2. Medir las señales de entrada y salida
3. Formar el vector m (vector de regresión)
4. Hallar la matriz de ganancias K
5. Hallar el error de predicción e
- 6.

7. Calcular los parámetros estimados
8. Calcular la matriz P para el instante siguiente
9. Regresar al punto 2 en el siguiente muestreo

#### A. Identificación por Mínimos Cuadrados Recursivos con factor de olvido:

El método de identificación de mínimos cuadrados presenta un problema; que no puede detectar cambios en los parámetros a lo largo del tiempo, esto ocurre debido a que la traza de la matriz P se hace muy pequeña; esto se puede solucionar adicionando un “factor de olvido  $\lambda$ ”, al algoritmo para ponderar más a las muestras recientes, permitiendo así detectar los posibles cambios en los parámetros luego de un tiempo considerable de funcionamiento, aun siendo la traza de la matriz P muy pequeña. [2]

Dependiendo del valor del factor de olvido  $\lambda$  se obtiene que

$\lambda \rightarrow$  pequeño, se descartan los datos anteriores muy rápidamente, por tanto se detectan los cambios en los parámetros.

$\lambda \rightarrow$  grande o cercano a la unidad, se detectan inconvenientes para observar los cambios en los parámetros.

Por lo general se elige  $\lambda$  entre 0,98 y 0,9, pero este valor depende de los valores de cada sistema.

Formulas matemáticas utilizando el Algoritmo de Mínimos Cuadrados con Factor de Olvido [2]:

$$P_k = \frac{1}{\lambda} \left[ P_{k-1} - \frac{P_{k-1} m(k) m(k)^T P_{k-1}}{\lambda + m(k)^T P_{k-1} m(k)} \right] \quad (5)$$

$$K_k = \frac{P_{k-1} m(k)}{\lambda + m(k)^T P_{k-1} m(k)} \quad (6)$$

$$e_k = y_k - m(k)^T \theta_{k-1} \quad (7)$$

$$\theta_k = \theta_{k-1} + P_k m(k) e_k \quad (8)$$

#### IV. Cálculo de la ganancia del Controlador discreto en el espacio de estados

Para el diseño del controlador discreto en el espacio de estados mediante la realimentación de las variables de estado, se debe encontrar la matriz de realimentación K, la cual debe cumplir los parámetros fijados para el diseño.

Para hallar la matriz K, se utiliza el método de diseño por ubicación de polos.

Sea el sistema en espacio de estados

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B u(k) \\ y(k) &= C u(k) \end{aligned} \quad (9)$$

Los polos en lazo abierto están definidos por:

$$\det(zI - A) = 0 \quad (10)$$

Se puede definir la ubicación de los polos deseados con la ecuación característica descrita continuación:

$$\alpha_c(z) = z^n + \alpha_1 z^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} z + \alpha_n = 0 \quad (11)$$

Ley de Control para realimentación de estados:

$$u(k) = -K x(k) \quad (12)$$

De las ecuaciones (1) y (4) se obtiene:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= (A - BK)x(k) \\ y(k) &= C x(k) \end{aligned} \quad (13)$$

Cuyos polos están ubicados en:

$$\det(zI - (A - BK)) = 0 \quad (14)$$

Igualando ecuaciones se obtiene el vector de ganancia K

$$\det(zI - (A - BK)) = \alpha_c(z) \quad (15)$$

Los polos deseados en lazo cerrado pueden ser ubicados dentro del semiplano, donde el sistema sea controlable. Los polos del sistema se eligen para que cumplan las especificaciones del sistema de control.

## V Observadores

Los observadores tienen la ventaja de ser robustos a las perturbaciones, variaciones en los parámetros y el ruido del sistema, además son herramientas virtuales, que permiten estimar las variables de un sistema en base a las mediciones de las señales de salida y entrada del sistema a controlar.

En muchos casos las variables de estado no están disponibles para ser realimentadas, para lo cual, se utiliza un observador para estimar dichas variables de estado.

Existen dos tipos de Observadores de Estado:

- **Observador de Estado de Orden Completo:** Son aquellos que Observan todas las variables de estado un sistema.
- **Observador de Orden Reducido:** Son aquellos que observan solo algunas variables de estado de un sistema.

Para nuestro diseño utilizaremos un Observador de Orden Completo.

### A. Observador de Estado

Asumiendo que el sistema es completamente observable, tenemos:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= \Phi \hat{x}(k) + \Gamma u(k) \\ y(k) &= H \hat{x}(k) \end{aligned} \quad (16)$$

La ecuación del estimador de estados se compone del sistema más un término adicional de corrección, como se describe a continuación [3]:

$$\tilde{x}(k+1) = \Phi \tilde{x}(k) + \Gamma u(k) + L [y(k) - H \tilde{x}(k)] \quad (17)$$

Donde  $\hat{x}(k)$  es el vector de estado estimado

El observador reproduce la entrada y la salida del sistema y corrige la ecuación dinámica con un término que es proporcional al error entre la salida del sistema real ( $y(t)$ ) y la salida estimada ( $H \tilde{x}(t)$ ).

El error de estimación es: [3]

$$\tilde{x}(k) = \hat{x}(k) - \tilde{x}(k) \quad (18)$$

En consecuencia la dinámica del error estimado, será:

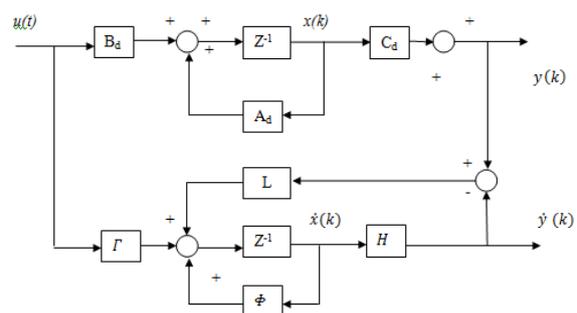
$$\tilde{x}(k+1) = \Phi \hat{x}(t) + \Gamma u(k) - \Phi \tilde{x}(k) - \Gamma u(k) - L(y(k) - H \tilde{x}(k)) = (\Phi - LH) \tilde{x}(k) \quad (19)$$

Por tanto el problema de diseño del observador de estados se reduce a encontrar la ganancia del observador L, considerando que los autovalores de  $\Phi - LH$  estén en el semiplano izquierdo, esto es, encontrar los polos por realimentación de estados. Para ubicar los polos del observador teóricamente deben estar más a la izquierda del semiplano izquierdo, que los polos del sistema de realimentación de estados, para obtener un estimado adecuado de los estados.

### B. Diseño de sistemas de control basados en Observadores:

Asumiendo que los vectores de entrada  $u(k)$  y salida  $y(k)$  pueden ser medidos y que el sistema es observable, se puede obtener un observador a partir de un modelo idéntico al de la planta, conectado en paralelo, como se muestra a continuación:

El modelo en tiempo discreto, para un periodo de muestreo T se puede expresar como:



**Figura 5.1. Diagrama de bloques del sistema de control discreto añadiendo un observador de Estados**

### Calculo de la ganancia del Observador:

Para hallar la matriz de ganancias L, el sistema debe ser completamente observable, para lo cual los autovalores de  $\Phi - LH$  tengan valores deseados.

Sea el sistema descrito en la ecuación (16).

Ecuación característica para definir los polos deseados del observador:

$$\alpha_e(z) = z^n + \alpha_1 z^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} z + \alpha_n = 0 \quad (20)$$

Los polos que definirán la dinámica del error actual están en:

$$\det(zI - (\Phi - LH)) = 0 \quad (21)$$

Para que los polos se ubiquen en  $z^2 = 0$

$$\alpha_e(z) = z^2 \quad (22)$$

Igualando (13) y (14) tenemos:

$$\det(zI - (\Phi - LH)) = \alpha_e(z) \quad (23)$$

Los polos del observador se escogen de manera que la respuesta del observador sea más rápida que la del sistema (para que esta resulte dominante) típicamente 4 o 5 veces más rápida.

El objetivo del sistema es que la estimación del estado converja rápidamente al valor real de dicho estado, esto se podría lograr si se coloca los polos del observador en cero.

## VI. Control Integral con Seguimiento a Referencia:

### Acción Integral con Seguimiento a Referencia

Para añadir al diseño un Control Integral, se introduce una entrada de referencia a través del aumento de la ganancia N, este valor es sensible a los parámetros de la planta, por lo que presenta un gran problema porque siempre habrá incertidumbre en los parámetros de la planta, para solucionar este problema se integrara el error entre la entrada de referencia y la salida, cuyo valor deberá tender a cero, utilizando el estado integrado como parte de nuestro sistema.

El objetivo es que la señal de salida  $y(k)$  realice el seguimiento a una entrada de referencia de la señal

$r(k)$ , con error de estado estacionario igual a 0, a pesar de la incertidumbre en los parámetros de la planta, para esto se define el nuevo estado  $x_i(k)$  que es la integral del error entre la referencia y la salida de la planta, se tiene [4]:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= x_i(k) + T(r(k) - y(k)) \\ x_i(k+1) &= x_i(k) + T(r(k) - C \hat{x}(k)) \\ x_i(k+1) &= x_i(k) - TC \hat{x}(k) + Tr(k) \end{aligned} \quad (24)$$

$T \rightarrow$  Periodo de muestreo del sistema

Ecuación en la forma canónica:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k+1) \\ x_i(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -TC & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ x_i(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ T \end{bmatrix} r(k)$$

$$y(k) = [C \quad 0] \begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ x_i(k) \end{bmatrix} \quad (25)$$

Ley de Control

$$u(k) = -K_a(\hat{x}) + N r(k) \quad (26)$$

$k_a$  representa las ganancias del controlador

Donde [4]:

$$N = \frac{T K_i}{z_i - 1} \quad (18); \quad z_i \rightarrow \text{tercer polo } p_3$$

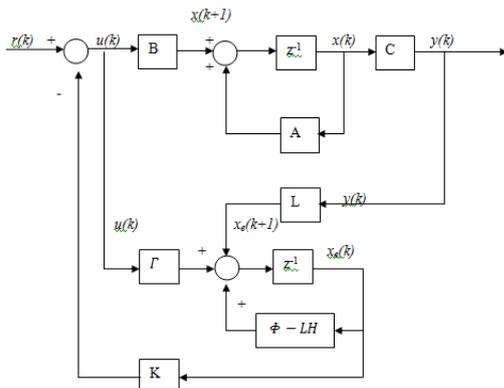
Si se elige el valor de N tal que el polo integrador de lazo cerrado sea igual a 0 se evita el efecto de la dinámica integradora en el sistema de lazo cerrado, esto ayudará ya que la dinámica del integrador es muy lenta porque solo está destinada a influir fuertemente en la respuesta de Estado Estacionario.

Resumiendo el procedimiento para diseñar un controlador Integral:

1. Aumentar al sistema original, en lazo abierto, el orden n, para lo cual se tendrá un nuevo sistema.
2. Mediante realimentación completa de estados, definir la ubicación deseada de los polos del sistema, incluido el polo del integrador.
3. Calcular N tal que en el sistema de lazo cerrado el polo del integrador sea igual a cero.

## VII. Esquemas de Control Adaptativo en el Espacio de Estados añadiendo un Observador de estados.

El Controlador Adaptativo es aquel que puede modificar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del sistema y a las perturbaciones a la que fue sometido dicho sistema.



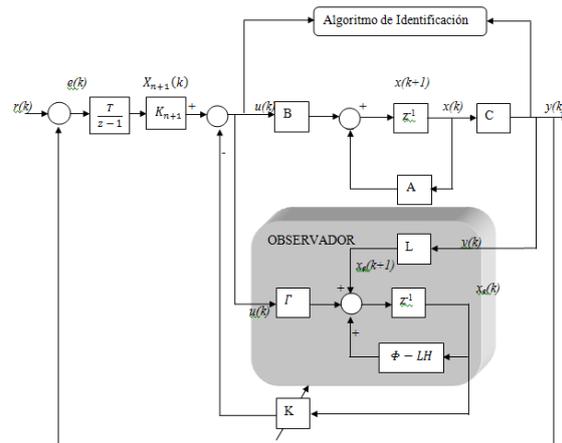
**Figura 7.1. Controlador Discreto añadiendo un Observador de estados**

la figura 7.1 muestra un esquema de Controlador Discreto adicionando un observador, para que este método sea adaptativo se deberá añadir al sistema un bloque del algoritmo de identificación para que actualice las medidas en cada periodo de muestreo.

El proceso de identificación en línea se lo realiza en paralelo a sistema en el espacio de estados. Este proceso de identificación, se obtiene conociendo los valores de entrada y salida del sistema, para que sean enviados al algoritmo de identificación, y finalmente obtener los valores de los parámetros de la planta.

### A. Ley de Control Adaptativa y Observador de Estados Fijo

En este esquema para el caso del Controlador el algoritmo de identificación está constantemente actualizando sus valores en cada periodo de muestreo para obtener los parámetros finales de la planta, independientemente de las perturbaciones, y así convertir al controlador en Adaptativo. En el caso del bloque de Observador de Estados fijos, la matriz de ganancia L, tiene valores fijos.

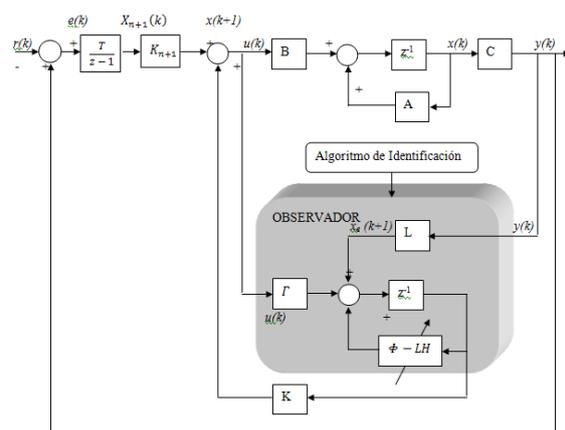


**Figura 7.2. Diagrama de bloques Control Adaptativa y Observador de Estados Constantes**

### B. Ley de Control Fija y Observador de Estados Adaptativos

En este esquema para el caso del Controlador Fijo, la matriz de ganancia K se mantiene constante en todo el periodo de muestreo.

En el Observador de Estados el algoritmo de identificación está constantemente actualizando sus valores para obtener los valores finales que da el Algoritmo de mínimos cuadrados recursivos, y así tener un Observador en Adaptativo.



**Figura 7.3. Diagrama de bloques Ley de Control Fija y Observador de Estados Adaptativos**

### C. Ley de Control y Observador Adaptativos

Para el esquema que muestra la figura 7.4, se observa que el bloque de algoritmo de identificación involucra tanto al Controlador y al Observador de estados, actualizando constantemente los valores que da el algoritmo de mínimos cuadrados recursivos, permitiendo que sean Adaptativos.

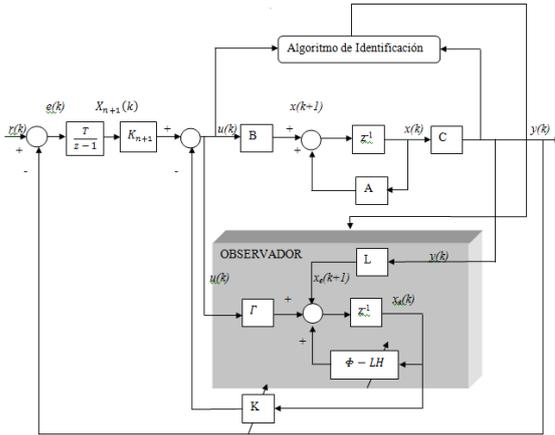


Figura 7.4. Diagrama de bloques Ley de Control y Observador Adaptativos

### VIII. Procedimiento de Diseño

#### Sistemas de segundo orden

Para el diseño del controlador y del observador de estados, se parte de los valores que nos da el algoritmo de mínimos cuadrados, para los sistemas de segundo orden (caso de estudio 1 y caso de estudio 2).

- a) El sistema original de matrices discretas en espacios de estado en la forma canónica:

$$A = \begin{bmatrix} W_1 & W_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = [W_3 \quad W_4]$$

- b) Ampliando la matriz para que el sistema realice un seguimiento a referencia incrementando una variable

$$A_a = \begin{bmatrix} W_1 & W_2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ T & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B_a = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_a = [W_3 \quad W_4 \quad 0]$$

- c) Igualando la ecuación característica del sistema ampliado al polinomio característicos de los polos deseados.

$$\det[zI - (A_a - B_a K)] = \alpha_c(z)$$

$$\det \begin{bmatrix} z - W_1 + K_1 & -W_2 + K_2 & K_3 \\ -1 & z & 0 \\ -T & 0 & z - 1 \end{bmatrix} = \alpha_c(z)$$

$$T = 0,02$$

- d) Se utiliza el método de ubicación de polos para determinar los valores de las ganancias, ubicando los polos deseados en el plano z

$$\alpha_c(z) = (z - p_1)(z - p_2)(z - p_3)$$

- e) Se obtiene las ganancias del controlador

$$k_1, \quad k_2, \quad k_3$$

- f) Diseño del Observador de Estados

$$\alpha_e(z) = 0$$

$$\det(zI - (\Phi - LH)) = \alpha_e(z)$$

$$\det \begin{bmatrix} z - W_1 + W_3 L_1 & -W_2 + W_4 L_1 \\ -1 + W_3 L_2 & z + W_4 L_2 \end{bmatrix} = 0$$

$$L = \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \end{pmatrix}$$

El diseño descrito anteriormente es aplicado para el caso en el que el Controlador y el Observador son adaptativos, para el caso en el que el Controlador y el Estimador son fijos, las matrices utilizadas son las matrices originales del sistema, y sus valores son constantes, en este caso no aplica el método de identificación por mínimos cuadrados.

El diseño anterior se aplica de manera general para sistemas de orden n, para los sistemas de cuarto orden (caso de estudio 3) el algoritmo de mínimos cuadrados da 8 valores de W.

## IX. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

### A. Descripción de los casos de estudio

#### Caso 1:

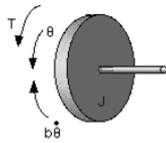


Figura 9.1. Diagrama de fuerzas el motor

El objetivo de este caso de estudio es controlar la velocidad de un motor DC y las especificaciones de diseño impuestas son las siguientes [Ref]:

$$J = 0.01 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$b = 0.1 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$$

$$K = K_e = K_t = 0.01 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{Amp}}$$

$$R = 1 \text{ ohm.}$$

$$L = 0.5 \text{ H.}$$

La ecuación de Estado

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V$$

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$$

#### Caso 2:

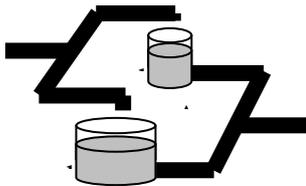


Figura 9.2. Diagrama de fuerzas el motor

El objetivo de este caso de estudio es controlar el caudal de salida de dos tanques, las especificaciones de diseño son las siguientes: [Ref]

$$B=4$$

$$A_1=3.1416 \text{ m}^2$$

$$A_2=12.5663 \text{ m}^2$$

Ecuaciones de Estado:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{A_1} & 0 \\ 0 & -\frac{B}{A_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{B}{A_1} \\ \frac{B}{A_2} \end{bmatrix} q_e$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

#### Caso 3:

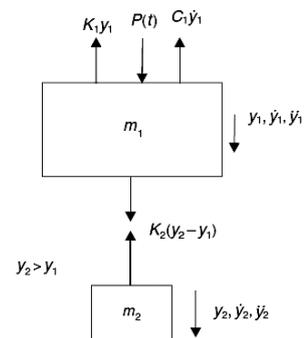


Figura 9.3. Diagrama de fuerzas el motor

El objetivo de este caso de estudio es controlar la traslación de un sistema mecánico., las especificaciones de diseño son las siguientes: [Ref]

$$m_1 = 250 \text{ Kg.} \quad m_2 = 32 \text{ Kg.}$$

$$K_1 = 80 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad K_2 = 200 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$C_1 = 350 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

Ecuaciones de estado:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1+K_2}{m_1} & -\frac{C_1}{m_1} & \frac{K_2}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_2}{m_2} & 0 & -\frac{K_2}{m_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

## B. Análisis comparativo de desempeño de los esquemas de control propuestos

### Control de Velocidad para un Motor de Corriente Continua

Se debe diseñar un controlador adaptativo y estimador adaptativo que cumpla las especificaciones de un *overshoot* máximo de 5% y un tiempo de establecimiento menor o igual que 7 segundos.

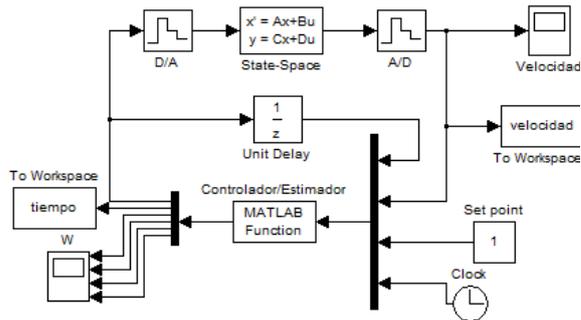


Figura 9.4. Esquema de simulación Control de velocidad motor DC

### Controlador Adaptativo - Estimador Adaptativo

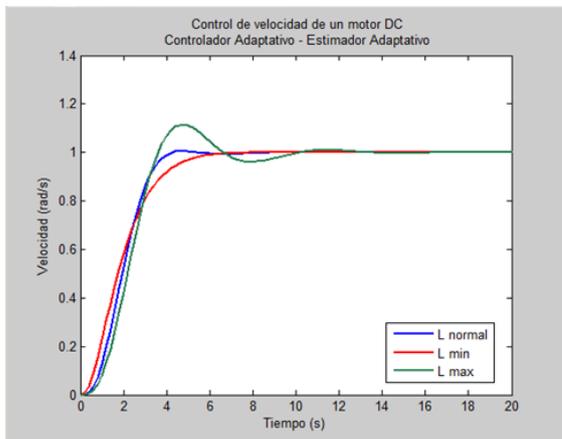


Figura 9.5. Respuesta del sistema de Control de velocidad motor DC Controlador Adaptativo Estimador adaptativo

Se concluye que el porcentaje de *overshoot* está por debajo del porcentaje de la especificación inicial del 5% para los casos en que la inductancia

eléctrica es mínima y normal; cuando la inductancia eléctrica llega a su máximo por incertidumbre llega al 11.5%.

### Controlador Constante – Estimador Adaptativo

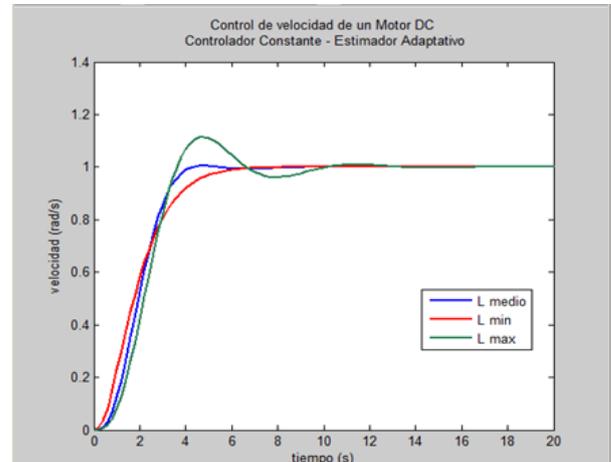


Figura 9.6. Respuesta del sistema de Control de velocidad motor DC. Controlador Constante Estimador adaptativo

Se puede notar que se ha obtenido resultados similares a los que se obtuvieron en los escenarios en el que el controlador es adaptativo, a excepción del escenario en que la inductancia eléctrica es máxima en la que el tiempo de establecimiento se ha reducido de 19.2 segundos a 16.8 segundos y el porcentaje de *overshoot* de 11.5% a 11.4%.

### Controlador Adaptativo – Estimador Constante

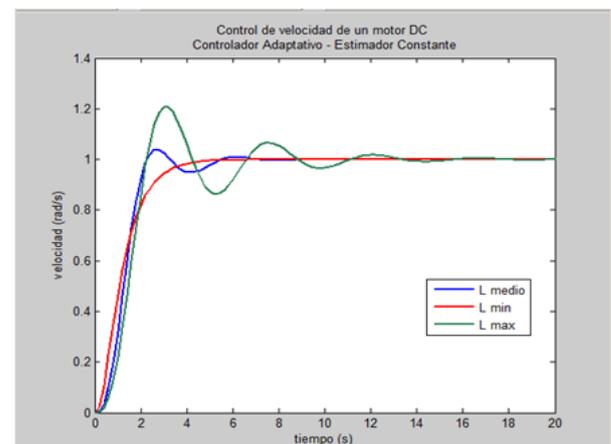


Figura 9.7. Respuesta del sistema de Control de velocidad motor DC. Controlador Adaptativo- Estimador Constante

## Control de Caudal de Salida de Líquido

Se diseñará un sistema de control adaptativo para el control de caudal de salida de un líquido que cumpla las especificaciones de un porcentaje *overshoot* máximo de 5%, tiempo de crecimiento de 3.6 segundos y un tiempo de establecimiento menor o igual que 10 segundos.

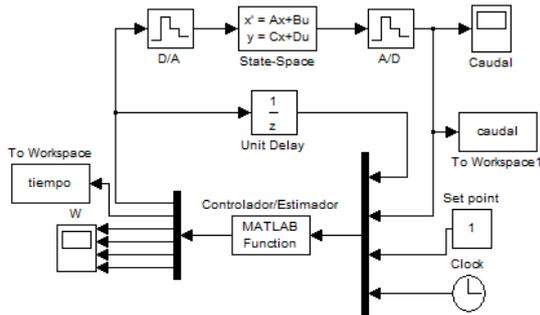


Figura 9.8. Esquema de simulación Control de Caudal de dos Tanques

## Controlador Adaptativo – Estimador Adaptativo

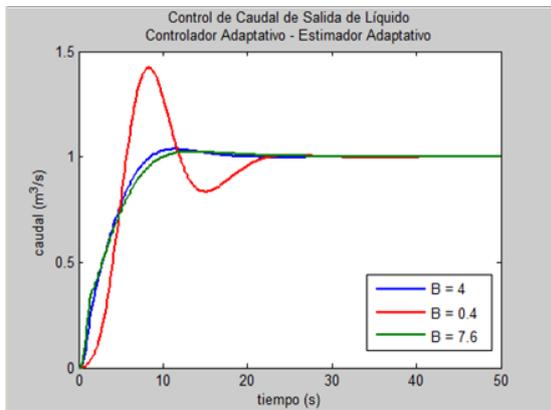


Figura 9.9. Respuesta del sistema de Control de Caudal de salida. Controlador Adaptativo- Estimador Adaptativo

El porcentaje de *overshoot* del sistema es aceptable cuando la constante de proporcionalidad B a la altura del líquido está entre el valor medio y el valor máximo. En estos escenarios, el tiempo de

establecimiento está entre 15 y 16.2 segundos, respectivamente.

## Controlador Constante – Estimador Adaptativo

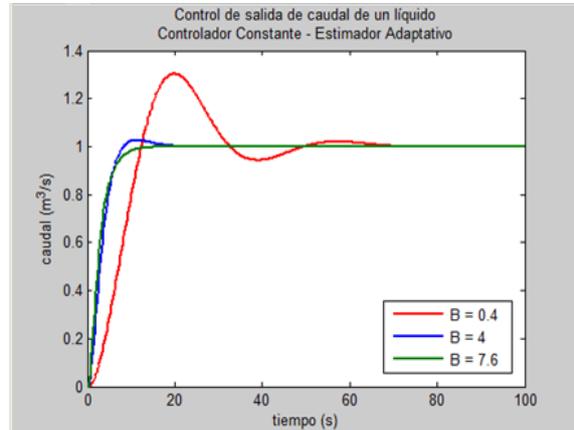


Figura 9.10. Respuesta del sistema de Control de Caudal de salida. Controlador Constante- Estimador Adaptativo

## Controlador Adaptativo – Estimador Constante

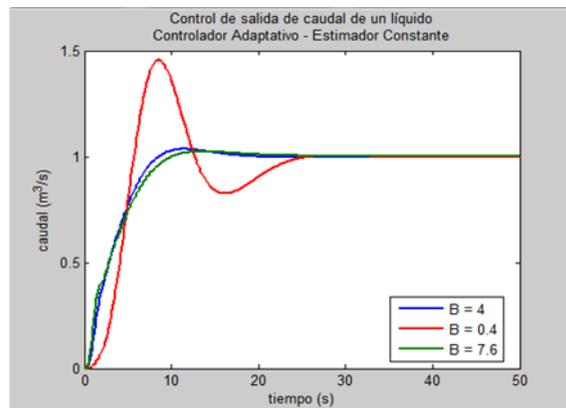


Figura 9.11. Respuesta del sistema de Control de Caudal de salida. Controlador Adaptativo- Estimador Constante

## Control de un sistema de traslación mecánico

Se diseñará un sistema de control adaptativo para el control de la posición de una masa en un sistema de traslación mecánico que cumpla las especificaciones de un porcentaje *overshoot* máximo de 10% y un tiempo de establecimiento menor o igual que 30 segundos.

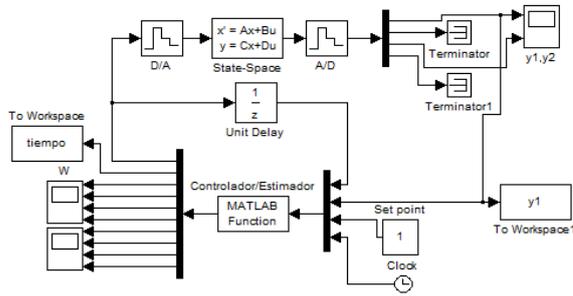


Figura 9.12. Esquema de simulación Control de Traslación de Sistema Mecánico

### Controlador Adaptativo – Estimador Adaptativo

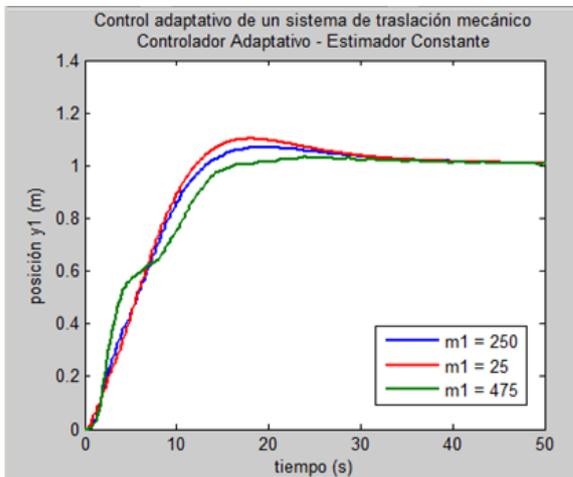


Figura 9.13. Respuesta del sistema de Control de Traslación de un Sistema Mecánico. Controlador

El porcentaje de *overshoot* del diseño está dentro de la especificación de 10% para la salida  $y_1$ . El tiempo de estabilización está entre 34 y 36.8 segundos, aproximándose al tiempo deseado de 30 segundos.

### Controlador Constante – Estimador Adaptativo

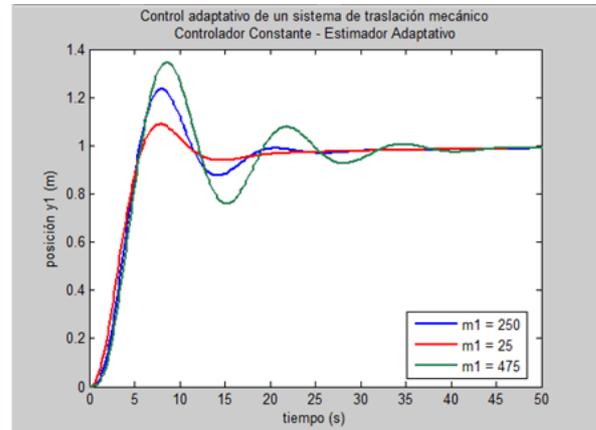


Figura. 9.14. Respuesta del sistema de Control de Traslación de un Sistema Mecánico.

El tiempo de establecimiento se acerca mucho más a los 30 segundos, excepto para el caso en que la  $m_1$  tiene su valor máximo, y se supera el porcentaje de *overshoot* de las especificaciones.

### Controlador Adaptativo – Estimador Constante

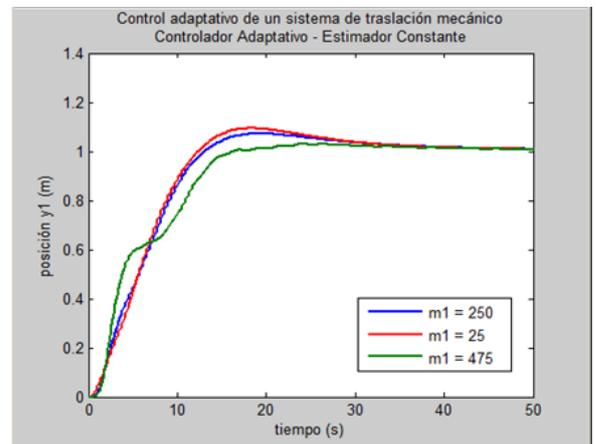


Figura. 9.15. Respuesta del sistema de Control de Traslación de un Sistema Mecánico.

## Conclusiones

- Las respuestas de los sistemas de control, para los diferentes casos de estudio, obtenidas al combinar un controlador adaptativo más un observador adaptativo presentan un desempeño óptimo; puesto que los parámetros de desempeño de los sistemas son próximos a los valores deseados.
- Al realizar el diseño del controlador y observador adaptativo, las matrices de estado utilizadas se forman con los parámetros de los sistemas previamente identificados a través del Algoritmo de Mínimos Cuadrados Recursivos. Ésta identificación última se la realiza en línea, y permite que el algoritmo tome los últimos valores muestreados de la entrada y salida del sistema.

## Recomendaciones

- Es muy importante la ubicación de los polos del observador. Estos se deberán escoger de manera que la respuesta del observador sea más rápida que la respuesta del sistema; para lo cual se sugiere colocar los polos del observador en cero, a fin de contrarrestar su efecto dominante.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Moreno José, Estimación de parámetros en controladores de sistemas de excitación utilizando un método de identificación, Maestría en ciencias en ingeniería eléctrica, 2010.
- [2]. Modelado e identificación de sistemas, 5° Ingeniería Industrial, Practica 5, Identificación de Mínimos Cuadrados Recursivos, <http://isa.umh.es/assignaturas/mis/ident2.pdf>, 2002 - 2003, Enero 2010
- [3]. Colmenares, William, Estimadores de Estado, Departamento de Procesos y Sistemas, [http://www.ps.usb.ve/Control/PS2316\\_0106/problema/mario/ejercicio7.pdf](http://www.ps.usb.ve/Control/PS2316_0106/problema/mario/ejercicio7.pdf), Febrero 2007.
- [4]. MR I.K. Peddle, Control Systems 414, Discrete State Space Control, <http://staff.ee.sun.ac.za/ikpeddle/files/Modules%20Presented/Control%20Systems%20414/Notes/DiscreteStateSpace.pdf>, Abril 2007
- [Ref]. Calderón Juan, Análisis de Desempeño de Controladores Adaptativos Discretos en el Espacio de Estados, Proyecto para la obtención del título en Ingeniería Electrónica, Abril 2008.
- OGATA, Katsuhiko, *Ingeniería de Control Moderno*, Tercera Edición, Prentice Hall.
- PHILLIPS, Charles; HARBOR, Royce, *Feedback Control Systems*, Tercera Edición, Prentice Hall, 1996

## Biografía del Autor:



Mónica Andrea nació en Esmeraldas, Ecuador, en 1984. Ingeniera en Electrónica Automatización y Control por la Escuela Politécnica del Ejército. Sus áreas de interés son aplicación de automatización de procesos industriales.

Dirección Correo Electrónico:

moniquita\_2112@hotmail.com

