



UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control

ASIGNATURA: TÉCNICAS AVANZADAS DE CONTROL

EJERCICIOS DE LA UNIDAD DIDÁCTICA 3

E3.1 INTRODUCCIÓN

Los ejercicios que se proponen tienen como objeto ilustrar la aplicación práctica de los conceptos en los que está basado el diseño de sistemas adaptativos desde la perspectiva de la estabilidad desarrollada en esta Unidad Didáctica. Los ejercicios considerarán la operación de sistemas adaptativos, bajo control manual o bajo control adaptativo predictivo (AP) del proceso, y tanto en el caso ideal como en el caso real sin diferencia de estructuras.

El alumno deberá disponer de un entorno de programación similar al considerado en las Unidades Didácticas anteriores. Como en dichas Unidades Didácticas, el programa tipo de simulación que se utilizará en los ejercicios consistirá en un bucle *for* cuyo índice representará el tiempo de simulación, medido en períodos de control, cuyo valor inferior será 0 y valor superior la duración del experimento. En cada ejecución de dicho bucle, la secuencia de operaciones, será la siguiente:

1. Ejecución de la ecuación del proceso para obtener la correspondiente salida.
2. Ejecución del sistema adaptativo, calculando el error de estimación a priori y adaptando los parámetros del proceso según la ecuación (5.20) en el caso ideal y las ecuaciones (6.13) y (6.14) en el caso real. En la ecuación (5.20) el alumno puede elegir la matriz B igual a la matriz identidad o a cualquier otra matriz que desee experimentar. En la ecuación (6.14) el valor del límite Δ_b será oportunamente definido en el ejercicio en cuestión.
3. Bajo control manual, determinación de la acción de control a aplicar en el instante siguiente.
4. Bajo control predictivo, cálculo de la salida deseada en $k + 1$ empleando para ello la ecuación (3.9), y posteriormente cálculo de la acción de control predictivo mediante la ecuación (3.10). Es decir, en estos ejercicios utilizaremos únicamente la aplicación de la estrategia básica de control predictivo.

Para permitir el correspondiente análisis, el programa tipo deberá asimismo proveer el almacenamiento y la realización de gráficas, en el intervalo de duración de los ejercicios, de las variables de entrada y salida del proceso, de la salida predicha (bajo control manual) o de la salida deseada (bajo control automático), los parámetros del modelo AP y, de las funciones $f_1(k)$ y $f_2(k)$ que definimos a continuación:

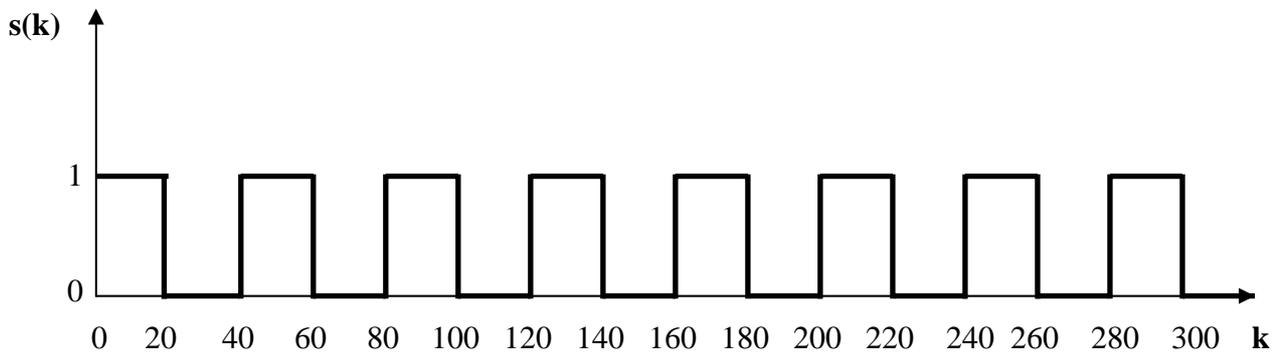
- $f_1(k)$ es la suma de los cuadrados de los errores de estimación a posteriori en los instantes en los que se produce adaptación de los parámetros del modelo AP ,

donde $e(k|k) = 0 \forall k$ en el que no se ejecute la estimación paramétrica.

$$f_2(k) = \frac{1}{2} \|\tilde{\theta}(k)\|^2$$

- $f_2(k)$ es igual a un medio del cuadrado de la norma del error de estimación paramétrica, es decir:

En los ejercicios de esta Unidad Didáctica se utilizará un escenario de simulación estándar, que se define con la ayuda de la Gráfica E3.1.



Gráfica E 3.1.- Escenario de simulación

En la Gráfica E3.1, el eje de abscisas representa el instante simulado de control y, el eje de ordenadas, la variable $s(k)$, que bajo control manual será igual a la señal de control a aplicar al proceso $u(k)$, y bajo control AP será igual a la consigna $y_{sp}(k)$.

Cuando se aplique control manual, los ejercicios pueden considerarse como alternativa para generar la señal de control por medio de un paseo aleatorio, haciendo la señal de control igual a la integral de un ruido blanco gaussiano, tal y como se indica en el ejercicio en cuestión.

E3.2 EJERCICIOS EN EL CASO IDEAL

E3.2.1 Control Manual

$$f_1(k) = \sum_{i=1}^k e(k|k)^2$$

Los ejercicios E3.1 a E3.8 que se proponen a continuación pretenden ilustrar, en el caso ideal, la operación del mecanismo de adaptación frente a diferentes tipos de señal de entrada.

Ejercicio E3.1. Aplicar un sistema adaptativo en el escenario de simulación estándar bajo control manual, a un proceso definido por la ecuación

$$y(k) = a_1 \cdot y(k-1) + a_2 \cdot y(k-2) + b_1 \cdot u(k-1) + b_2 \cdot u(k-2)$$

cuyos parámetros reciben los siguientes valores:

- $a_1 = 1,2008$; $a_2 = -0,5134$; $b_1 = 0,1738$; $b_2 = 0,1388$.

y donde los valores iniciales de los parámetros del modelo adaptativo son:

- $\hat{a}_1 = 1$; $\hat{a}_2 = 0$; $\hat{b}_1 = 0,1$; $\hat{b}_2 = 0$.

□

Ejercicio E3.2. Aplicar un sistema adaptativo al caso descrito en el ejercicio E 3.1, pero donde los valores iniciales de los parámetros del modelo adaptativo tengan los siguientes valores iniciales:

- $\hat{a}_1 = 1$; $\hat{a}_2 = -0,2$; $\hat{b}_1 = 0,1$; $\hat{b}_2 = 0,1$.

□

Ejercicio E3.3. Aplicar un sistema adaptativo al caso descrito en el ejercicio E 3.1, pero donde la señal de control sea un paseo aleatorio generado por un ruido blanco gaussiano de media cero y desviación tipo 0,1.

□

Ejercicio E3.4. Aplicar un sistema adaptativo al caso descrito en el ejercicio E 3.2, pero donde la señal de control sea un paseo aleatorio generado por un ruido blanco gaussiano de media cero y desviación tipo 0,1.

□

Ejercicio E3.5. Aplicar un sistema adaptativo al caso descrito en el ejercicio E 3.1, pero cambiando la ganancia del proceso de 1 a 2 en el instante 150.

□

Ejercicio E3.6. Aplicar un sistema adaptativo al caso descrito en el ejercicio E 3.2, pero cambiando la ganancia del proceso de 1 a 2 en el instante 150.

□

Ejercicio E3.7. Aplicar un sistema adaptativo al caso descrito en el ejercicio E 3.3, pero donde la ganancia del proceso cambie de 1 a 2 en el instante 190.

□

Ejercicio E3.8. Aplicar un sistema adaptativo al caso descrito en el ejercicio E 3.4, pero donde la ganancia del proceso cambie de 1 a 2 en el instante 190.

□

E3.2.1 Control adaptativo predictivo

Los ejercicios E3.9 a E3.14 que se proponen a continuación pretenden ilustrar, en el caso ideal, la operación del mecanismo de adaptación bajo control AP, cuando la salida del proceso se aproxima a la consigna y cuando se estabiliza en ella.

Ejercicio E3.9. Aplicar control adaptativo predictivo en el escenario de simulación estándar para control automático, al proceso considerado en el ejercicio E3.1, asignando a los parámetros del modelo AP los mismos valores iniciales que en dicho ejercicio y definiendo la dinámica deseada por un polo doble igual a 0,6 .

□

Ejercicio E3.10. Aplicar control adaptativo predictivo, tal y como se ha indicado en el ejercicio E3.9, pero asignando a los parámetros del modelo AP los siguientes valores iniciales:

- $\hat{a}_1 = 1$; $\hat{a}_2 = -0,2$; $\hat{b}_1 = 0,05$; $\hat{b}_2 = 0,05$;

□

Ejercicio E3.11. Aplicar control predictivo sin adaptación, en un ejercicio equivalente al E3.10, pero en el cual el sistema adaptativo no está en operación.

□

Ejercicio E3.12. Aplicar control adaptativo predictivo en un ejercicio equivalente al E3.9, pero en el que la ganancia del proceso cambie de 1 a 2 en el instante 150.

□

Ejercicio E3.13. Aplicar control adaptativo predictivo en un ejercicio equivalente al E3.10, pero en el que la ganancia del proceso cambie de 1 a 2 en el instante 150.

□

Ejercicio E3.14. Aplicar control predictivo sin adaptación, en un ejercicio equivalente al E3.11, pero en el que la ganancia del proceso cambie de 1 a 2 en el instante 150, y asignando a los parámetros del modelo predictivo los siguientes valores:

- $\hat{a}_1 = 1$; $\hat{a}_2 = -0,2$; $\hat{b}_1 = 0,1$; $\hat{b}_2 = 0,1$;

□

E3.3 EJERCICIOS EN EL CASO REAL SIN DIFERENCIA DE ESTRUCTURAS

E3.3.1 Control Manual

Los ejercicios E3.15 a E3.18 que se proponen a continuación pretenden ilustrar, en el caso real sin diferencia de estructuras, bajo control manual, la operación del mecanismo de adaptación y la influencia de la elección del parámetro Δ_b .

Ejercicio E3.15. Sea el proceso definido mediante las ecuaciones:

$$y_a(k) = a_1 \cdot y_a(k-1) + a_2 \cdot y_a(k-2) + b_1 \cdot u(k-1) + b_2 \cdot u(k-2)$$

$$y(k) = y_a(k) + n_y(k)$$

cuyos parámetros reciben los siguientes valores:

- $a_1 = 1,2008$; $a_2 = -0,5134$; $b_1 = 0,1738$; $b_2 = 0,1388$.

y el ruido de medida $n_y(k)$ es un ruido blanco gaussiano de media nula y de desviación estándar 0,02. Aplicar, en el escenario de simulación estándar bajo control manual, un sistema adaptativo definido por los algoritmos (6.13) y (6.14), donde a Δ_b se le asigna un valor igual a dos veces la desviación estándar de $\Delta(k)$ ¹ y los valores iniciales del modelo AP son:

- $\hat{a}_1 = 1$; $\hat{a}_2 = 0$; $\hat{b}_1 = 0,1$; $\hat{b}_2 = 0$;

□

Ejercicio E3.16. Repetir el ejercicio E3.15, pero eligiendo un valor de Δ_b igual a 3 veces la desviación estándar de $\Delta(k)$.

□

Ejercicio E3.17. Repetir el ejercicio E3.15 eligiendo experimentalmente un valor conveniente para Δ_b .

□

Ejercicio E3.18. Repetir el ejercicio E3.17 pero aplicando como entrada al proceso un paseo aleatorio generado por un ruido blanco gaussiano de media cero y desviación tipo 0,1.

□

E3.3.2 Control adaptativo predictivo

Los ejercicios E3.19 a E3.22 que se proponen a continuación pretenden ilustrar, en el caso real sin diferencia de estructuras, la operación del mecanismo de adaptación bajo control AP con un parámetro Δ_b convenientemente elegido.

Ejercicio E3.19. Sea el proceso definido mediante las ecuaciones:

$$y_a(k) = a_1 \cdot y_a(k-1) + a_2 \cdot y_a(k-2) + b_1 \cdot u(k-1) + b_2 \cdot u(k-2)$$

$$y(k) = y_a(k) + n_y(k)$$

cuyos parámetros reciben los siguientes valores:

¹ Para realizar este cálculo, debe tenerse en cuenta que $\Delta(k)$ está definida, y se relaciona con el ruido de medida $n_y(k)$, mediante la ecuación (2.28), y que la varianza de la suma de variables aleatorias independientes es igual a la suma de la varianzas.

- $a_1 = 1,2008$; $a_2 = -0,5134$; $b_1 = 0,1738$; $b_2 = 0,1388$.

y el ruido de medida $n_y(k)$ es un ruido blanco gaussiano de media nula y de desviación estándar 0,02. Aplicar a este proceso, en el escenario de simulación estándar, control AP, en el que la dinámica deseada está definida por un polo doble igual a 0,6, el sistema adaptativo por los algoritmos (6.13) y (6.14), eligiendo experimentalmente un valor conveniente para Δ_b , y los valores iniciales del modelo AP son:

- $\hat{a}_1 = 1$; $\hat{a}_2 = 0$; $\hat{b}_1 = 0,1$; $\hat{b}_2 = 0$;

□

Ejercicio E3.20. Repetir el ejercicio E3.19 pero eligiendo como valores iniciales del modelo AP los siguientes:

- $\hat{a}_1 = 1$; $\hat{a}_2 = -0,2$; $\hat{b}_1 = 0,1$; $\hat{b}_2 = 0,1$;

□

Ejercicio E3.21. Repetir el ejercicio E3.19 pero cambiando la ganancia del proceso de 1 a 2 en el instante 150.

□

Ejercicio E3.22. Repetir el ejercicio E3.20 pero cambiando la ganancia del proceso de 1 a 2 en el instante 150.

□

E3.4 COMENTARIOS A LOS EJERCICIOS

Los realización de los ejercicios conlleva la generación de las gráficas de las funciones $f_1(k)$ y $f_2(k)$, que son indicativas del rendimiento del sistema adaptativo predictivo y nos permiten interpretar su operación.

Ejercicios E3.1 a E3.8: En el caso ideal, bajo control manual, podemos observar que en las transiciones de la señal de control se producen errores de estimación a posteriori, que hacen crecer la función $f_1(k)$. Sin embargo, cuando la señal de control se estabiliza, el error a posteriori tiende a cero rápidamente, y en consecuencia, la función $f_1(k)$ no continúa incrementándose. En consecuencia, la función $f_1(k)$ es no decreciente y va creciendo a intervalos. Por su parte, la función $f_2(k)$, que es indicativa del error de estimación paramétrico, es una función con evolución exactamente inversa a la función $f_1(k)$, es decir, en los intervalos en los que el error de estimación a posterior es diferente de cero, decrecerá, indicando que el error de identificación paramétrica decrece; y en los intervalos en los que el error de estimación sea cero, permanecerá constante.

Ejercicios E3.9 a E3.14: En el caso ideal, bajo control AP, podemos observar que en las transiciones de la salida del proceso hacia la consigna, se producen errores de estimación a posteriori, mientras que una vez estabilizada la salida del proceso en la consigna, el error de estimación se hace rápidamente cero y la variación en los parámetros estimados cesa. Cada una de estas transiciones se refleja en un acercamiento

de los parámetros del modelo a los parámetros del proceso en términos de una reducción del cuadrado de la norma del error de identificación paramétrica. A medida que este aprendizaje ocurre, la trayectoria de salida del proceso se aproxima cada vez más a la trayectoria deseada. El funcionamiento del mecanismo de adaptación que podemos observar en los ejercicios, pone de relieve que, en pocos períodos, el sistema puede alcanzar un rendimiento de control satisfactorio, y que este resultado se consigue a pesar de que exista un error de identificación paramétrica significativo. Es decir, no es necesaria una identificación precisa del proceso para obtener un rendimiento de control satisfactorio y la operación del mecanismo de adaptación tiende a reducir el error de estimación hacia cero de manera eficaz y a estabilizar el valor de los parámetros estimados, verificándose estrictamente las condiciones de la Conjetura establecida en el capítulo 2, lo que garantiza el mencionado rendimiento de control. El comportamiento de las funciones f_1 y f_2 es análogo al que hemos observado en los experimentos bajo control manual, previamente comentados.

Ejercicios E3.15 a E3.22: En el caso real sin diferencia de estructuras, la elección de un parámetro Δ_b relativamente grande con respecto a la señal de perturbación $\Delta(k)$, conllevará un menor número de ejecuciones del mecanismo de adaptación. Ello puede ralentizar el proceso de identificación y, asimismo, cuando la variable del proceso se estabiliza en la consigna y la adaptación cesa, resultará en un error de predicción, y en consecuencia, en un error de control, de mayor magnitud, de acuerdo con (6.14). En este caso la función f_1 crecerá con las ejecuciones del mecanismo de adaptación, y la función f_2 generalmente decrecerá con dichas ejecuciones, al mismo tiempo que se reduce el error de identificación paramétrica y las condiciones de la Conjetura se verificarán después de cada transición. Por el contrario, si el parámetro Δ_b es relativamente pequeño con respecto a la señal de perturbaciones, el número de ejecuciones del mecanismo de adaptación será mayor, pero no podemos asegurar que en todos los casos el error de identificación paramétrica se reduzca y la función f_2 puede eventualmente crecer. El alumno debe comentar los resultados obtenidos al asignar diferentes valores al parámetro Δ_b , y evaluar la conveniencia de elegir un valor, ni relativamente grande, ni relativamente pequeño, para optimizar el rendimiento del mecanismo de adaptación.