

Tipo de artículo: Artículo original  
Temática: Inteligencia Artificial  
Recibido: 30/07/2019 | Aceptado: 15/11/2019

# Control con rechazo activo a perturbaciones para procesos con retardo de transporte

## *Active disturbance rejection controller for processes with time delay*

Carlos E. Martínez Ochoa <sup>1</sup>, Ivón Oristela Benítez González <sup>2</sup>, Ariel Omar Cepero Díaz <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Empresa de Automatización Integral, CEDAI, Santiago de Cuba, Cuba, [CarlosMO@cedai.com.cu](mailto:CarlosMO@cedai.com.cu)

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Hecheverría, CUJAE, La Habana, Cuba. [novi@automatica.cujae.edu.cu](mailto:novi@automatica.cujae.edu.cu)

<sup>3</sup> Empresa de Aviación AVIANET. La Habana, Cuba. [ariel.cepero@hav.ecasa.avianet.cu](mailto:ariel.cepero@hav.ecasa.avianet.cu)

\* Autor para correspondencia: [cmartinez8a@nauta.cu](mailto:cmartinez8a@nauta.cu)

---

### Resumen

En este documento, se muestra el Control con Rechazo Activo a Perturbaciones (ADRC) aplicado a los sistemas con retardo de transporte. Para estimar la salida del proceso sin el retardo se utiliza un predictor de Smith, la salida del predictor se le suministra al Observador de Estado Extendido (ESO) el que estima las salidas del sistema y la perturbación; las salidas del cual llegan al controlador, para controlar el proceso y rechazar las perturbaciones. Para ilustrar el comportamiento del mismo se ofrecen ejemplos: uno de ellos aplicado a una columna de destilación y otro a un proceso con gran demora de tiempo, se presenta el comportamiento de sus parámetros ante las variaciones del proceso y las simulaciones realizadas con el programa Matlab/Simulink.

**Palabras clave:** Control, procesos, demora, tiempo, ADRC.

### Abstract

*In this document, the Active Disturbance Rejection Controller (ADRC) is shown applied to the systems with time delay. To estimate the output of the process without time delay it is used the Smith's predictor, the output predictor's is the input to Extended State Observer (ESO) it output estimates the system outputs and the disturbance, which are taken as input to the controller, to control the process and to reject the disturbance. To illustrate the behaviour to ADRC some examples are given: one of them applied to a distillation column and another to a process with great time delay, these parameter's behaviour are presented for variations of the process and the simulations supported with the program Matlab/Simulink.*

**Keywords:** Control, process, delay, time, ADRC.

## Introducción

En los años recientes, ha aumentado considerablemente el interés en la investigación de los efectos de la demora de tiempo en el comportamiento de los sistemas. Esto es debido a la existencia de retrasos en muchos tipos de sistemas, incluyendo los biológicos, económicos, sociales y de ingeniería. De manera general en el campo de la ingeniería del control, se aprecia que los retrasos siempre son perjudiciales y son la mayor causa de inestabilidad y disminución del margen de estabilidad (Dastan, 2019).

Aunque el control realimentado (convencional) es el tipo más comúnmente encontrado en la industria de procesos químicos, este no es el único. Existen situaciones donde el control realimentado es insuficiente para lograr la respuesta deseada en un proceso. En tales casos otras configuraciones de control son utilizadas; como en adelante (feedforward), cascada, multivariable, rango dividido (split range) y control adaptativo... el control realimentado de sistemas con retardo de transporte o tiempo muerto grande y sistemas con respuesta inversa... para tales sistemas los controladores convencionales P, PI, o PID pueden no ser suficiente para lograr la respuesta deseada (Stephanopoulos, 2002).

## Retardo de transporte

El retardo de transporte tiene un comportamiento de fase no mínima y tiene un retardo de fase excesivo sin atenuación en altas frecuencias. Estos retardos de transporte aparecen normalmente en los sistemas térmicos, hidráulicos y neumáticos (Ogata, 2010). En la siguiente figura se observa un sistema con retardo de transporte:

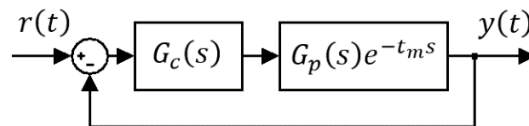


Figura 1. Sistema a lazo cerrado con retardo de transporte

El control realimentado convencional podría proveer una respuesta a lazo cerrado poco satisfactoria por las siguientes razones (Stephanopoulos, 2002):

1. La perturbación en la entrada del proceso no es detectada en la salida hasta un significativo periodo de tiempo.
2. La acción de control se tomará en la base de la última medición, la cual será inadecuada porque los esfuerzos para regular la situación (eliminar el error) es originado por el retardo.
3. La acción de control también tomará el mismo tiempo en lograr que su efecto aparezca en la salida del proceso.
4. Como resultado de los factores anteriores, se observa que el retardo de transporte es una fuente significativa en la respuesta de los sistemas a lazo cerrado.

Problemas del control de sistemas con grandes tiempos muertos mediante realimentación de la salida: el controlador sigue actuando, aun cuando su salida sea adecuada para corregir el error cuando su acción tenga efecto sobre la salida, dando lugar a grandes oscilaciones e inestabilidad del sistema.

## Control con Rechazo Activo a Perturbaciones para Procesos de Orden $n$

El Control con Rechazo Activo a Perturbaciones es una metodología relativamente nueva que posee un potencial interesante en la resolución de problemas de control de procesos industriales caracterizados por elevados niveles de incertidumbre. El ADRC como una solución potencial se ha explorado en varios dominios de ingeniería de control (Yi, 2014):

- Sistemas de motor: el control de velocidad de motor de imán permanente síncrono y el motor inducción.
- El control de vuelo: el mando de actitud de nave espacial y los vehículos de gran velocidad.
- Control de robot: control de fuerza y coordinación de mano-ojo.
- Procesos térmicos: los sistemas inestables de conducción de calor, los sistemas de caldera-turbina-generator, el gasificador de ALSTOM y en sistemas de orden fraccionario.
- Dispositivos de electrónica de potencia: convertidores de potencia DC a DC, rectificadores e inversores.
- Sistemas de potencia: en los compresores de flujo axiales y en los motores de gasolina.

En las figuras siguientes se muestran ejemplos en los cuales se utiliza el ADRC (Yi, 2014):



Figura 2. Robot humanoide ejecuta caligrafía China

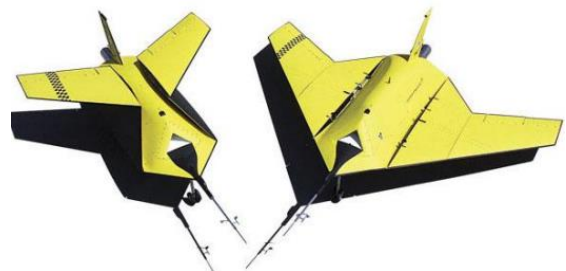


Figura 3. Avión morphing

El ADRC Fue propuesto por Jingqing Han, uno de los pioneros en la teoría de control y aplicaciones en China, en los años 1990. En 1997, Jingqing Han, Jiang Fangjun, Zhiqiang Gao realizaron la primera prueba exitosa en un servo

mecanismo en la Universidad del Estado de Cleveland. Los sistemas lineales y los no lineales, bajo algunas condiciones, pueden transformarse en la forma canónica de cascada de integradores vía y realimentación (Yi, 2014):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{1}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; C = [1 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0] \text{ y } D = [0] \tag{2}$$

El límite entre el sistema lineal y no lineal puede suprimirse por la entrada de control para los varios tipos de sistemas: lineal invariante en el tiempo o no lineal variante en el tiempo pueden transformarse hacia un sistema lineal de una cadena de integradores desacoplados vía control de entrada.

Las ideas:

- Tratar al modelo desconocido del sistema: como un estado especial (Han, lo nombró el estado extendido).
- Diseñar un observador especial: el observador de estado extendido (ESO), para estimar el sistema en tiempo real.

El potencial del control con rechazo activo a perturbaciones como una solución viable al control industrial, ha aumentado principalmente debido a su habilidad de rechazo a perturbación y su independencia de modelo matemático detallado de la planta. Con el controlador y el observador en ADRC principalmente determinado a priori por las especificaciones de la planta, y el orden de la planta conocido para la mayoría de los procesos industriales, el único parámetro que se necesita es la ganancia de la entrada que caracteriza la relación proporcional entre el signo de la señal de entrada y la variación de la salida del proceso (Madonski, 2015).

El ADRC fue originalmente propuesto para procesos de orden  $n$ , pero para el control la precisión del modelo del proceso es usualmente una dificultad y realizar un controlador de orden elevado con módulos simples en Sistema de Control Distribuido es engorroso, de aquí que en la práctica usualmente se prefiere un control de bajo orden... (Sun, 2016).

**Ejemplo 1.** Considere el siguiente sistema con múltiples entradas y múltiples salidas, no lineal, variante en el tiempo y con incertidumbres. Muchos sistemas de la ingeniería pueden ser descritos por ésta ecuación (Yi, 2014):

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_{n-1} &= x_n \\
 \dot{x}_n &= d(t) + f(x, t) + B(x, t)u(t) \\
 y &= x_1
 \end{aligned} \tag{3}$$

$x_i$ : Estados,  $u(t) \in R^m$ .

$y(t)$ : Salida controlada,  $y(t) \in R^m$ .

$u(t)$ : Entrada de control,  $u(t) \in R^m$ ,

$d(t)$ : perturbación desconocida,  $d(t) \in R^m$ .

$f(x, t)$ : Incertidumbres dinámicas,  $f(x, t) \in R^m$ .

$B(x, t)$ : Matriz de entrada  $\in R^{m \times m}$ .

Considerando:

$$\dot{x}_{n+1} = d(t) + f(x, t) + [B(x, t) - \bar{B}(t)]u(t) \tag{4}$$

$d(t)$ : Perturbación externa.

$\{f(x, t) + [B(x, t) - \bar{B}(t)]u(t)\}$ : “Estado extendido” o “perturbación total” (no lineal o variante en el tiempo).

Escribiendo el sistema con su perturbación en una forma canónica:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_{n-1} &= x_n \\
 \dot{x}_n &= x_{n+1} + \bar{B}(t)u(t) \\
 y &= x_1
 \end{aligned} \tag{5}$$

Observador de estado extendido para estimar la perturbación total es de orden de la planta más uno.

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 - g_1(\hat{x}_1 - y) \\
 &\vdots \\
 \dot{\hat{x}}_n &= \hat{x}_{n+1} - g_n(\hat{x}_1 - y) + \bar{B}(t)u(t) \\
 \dot{\hat{x}}_{n+1} &= -g_{n+1}(\hat{x}_1 - y)
 \end{aligned} \tag{6}$$

$g_i(\hat{x}_1 - y)$ : función a diseñarse.

Se proyecta la ley de control sin necesidad de un conocimiento exacto del modelo matemático, lo cual es un gran avance en la ciencia del control y la ingeniería. Para un proceso de orden dos se obtiene:

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 - g_1(\hat{x}_1 - y) \\
 \dot{\hat{x}}_2 &= \hat{x}_3 - g_2(\hat{x}_1 - y) + \bar{b}(t)u(t) \\
 \dot{\hat{x}}_3 &= -g_3(\hat{x}_1 - y) \\
 u(t) &= -\bar{b}^{-1}(t)\hat{x}_3 + u_0(y, \hat{x}_2)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$-\bar{b}^{-1}(t)\hat{x}_3$ : Para compensar la perturbación total.  
 $u_0(y, \hat{x}_2)$ : Para lograr la ejecución de la forma canónica del sistema.

La esencia del ADRC: estimar la "incertidumbre total" mediante el ESO, estimando la influencia de las incertidumbres y de la perturbación en la salida sistema controlado para rechazar su efecto. La perturbación: afecta la salida (Yi, 2014).

### Control con Rechazo Activo a Perturbaciones para Procesos con Retardo de Transporte

Basado en el ESO (7) para estimar la perturbación  $f$  y el sistema de estado  $X$  sin la demora de tiempo y en (Xinpeng, 2018), se utilizó el siguiente esquema:

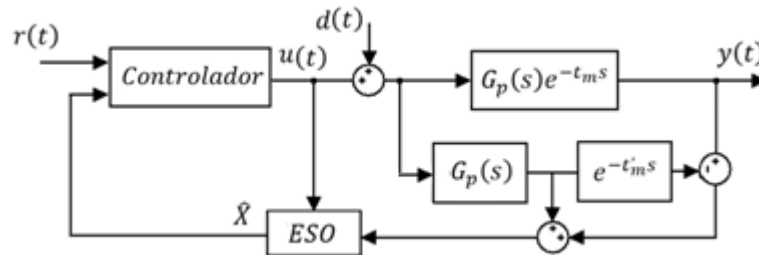


Figura 4. Esquema del control ADRC.

- $r(t)$ : Señal de referencia.
- $y(t)$ : Señal de salida.
- $d(t)$ : Perturbación.
- $G_p(s)e^{-t_m s}$ : El proceso con la demora  $t_m$ .
- $G_p(s)$ : El proceso sin la demora.
- $e^{-t_m s}$ : Demora del proceso.
- ESO: Observador de estado extendido basado en modelo.
- $\hat{X}$ : Estados reconstruidos.
- K: Ganancias del controlador.

### Algoritmo del ADRC Utilizado

Se considera un sistema dinámico no lineal, variante en el tiempo, de segundo orden descrito por la ecuación diferencial (Teppa, 2012) y (Madonski, 2015):

$$\ddot{y}(t) = f(t, \dot{y}(t), w(t)) + bu(t) \quad (8)$$

Donde  $w$  es la perturbación externa,  $u$  es la entrada,  $y$  es la salida y  $b$  es una constante real del sistema que se conoce indirectamente a través del estimado  $b_0$ . La expresión  $f(t; \dot{y}(t); w(t))$  o simplemente  $f$  representa la dinámica desconocida de la clase no lineal y variante en el tiempo que posee el sistema. Esto es, la única información que se requiere del sistema es su orden y el parámetro  $b_0$ .

El principio en el que se apoya el ADRC consiste en la estimación y posterior cancelación de  $f$ . Asumiendo que  $f$  es derivable, el sistema (3) puede representarse en la siguiente forma de estado extendida:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 + bu \\ \dot{x}_3 &= \dot{f} \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (9)$$

El ESO estimará el vector  $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [y' \ y \ f]^T$  y estará caracterizado por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 - g_1(\hat{x}_1 - y) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= \hat{x}_3 - g_2(\hat{x}_1 - y) + bu \\ \dot{\hat{x}}_3 &= -g_3(\hat{x}_1 - y) \end{aligned} \quad (10)$$

Siendo  $g_1$ ;  $g_2$  y  $g_3$  las ganancias del observador, las cuales se calculan de forma que el polinomio característico  $s^3 + l_1s^2 + l_2s + l_3$  sea Hurwitz. Por razones prácticas, todos los polos del ESO se localizan en  $w_0$ , lo que resulta en:

$$s^3 + g_1s^2 + g_2s + g_3 = (s + w_0)^3 \quad (11)$$

Generalmente, mientras más elevada sea la ganancia del observador, más exacta será la estimación. Sin embargo, debe tenerse presente que las ganancias altas también incrementan la sensibilidad al ruido de medición. El ADRC cancelará el efecto de  $f$  empleando  $\hat{x}_3$  a través de la ley de control:

$$u = \frac{k_1(r - \hat{x}_1) - k_2\hat{x}_2 - \hat{x}_3}{b_0} \quad (12)$$

Donde  $r$  es la señal de referencia,  $k_1$  y  $k_2$  las ganancias del controlador seleccionadas de forma que el polinomio  $s^2 + k_2s + k_1$  sea Hurwitz. En forma similar al diseño del ESO, los polos del controlador se suelen localizar en  $w_c$  lo que origina:

$$s^2 + k_2s + k_1 = (s + w_c)^2 \quad (13)$$

Para determinar las frecuencias  $w_c$  y  $w_o$  se suele emplear como estimado inicial la relación heurística.

$$w_o = 3 \text{ a } 5 \text{ veces } w_c \quad (14)$$

Al reemplazar (12) en (8) el sistema a lazo cerrado se transforma en:

$$\ddot{y} = (f - \hat{x}_3) + k_1(r - y) - k_2\dot{y} \quad (15)$$

Note que el primer término a la derecha de (15) es insignificante, por lo que el ADRC logra compensar el efecto de  $f$  en tiempo real.

### Reglas para el Ajuste del ADRC

Las siguientes Reglas se utilizan para ajuste del ADRC: ...se escoge el valor supuesto de  $\bar{b}$  alrededor de  $b$ , el cual será más grande con el aumento de retraso de tiempo  $\tau$ . Las ganancias  $k$  (del controlador) no pueden ser demasiado grandes, porque llevaría a la oscilación del sistema. Los procedimientos para poner a punto los parámetros del control son los siguientes (Zhang, 2017):

- (i) Si el modelo es conocido, el valor de  $\tau_o$  y  $\bar{b}$  puede seleccionarse según  $\tau$  y  $b$ ; o pueden ponerse a punto basado en el análisis anterior.
- (ii) Seleccione  $1/\tau$  como el valor inicial de  $w_c$ , y el valor inicial de  $w_o$  puede ser de dos a diez veces mayor que el ancho de banda del controlador.
- (iii) Incremente el valor de  $w_o$  gradualmente manteniendo  $w_c$  constante hasta que la señal del ruido sea difícil para cumplir con los requerimientos del sistema. De la misma manera, manteniendo constante  $w_o$ , incremente hasta que la salida del sistema oscile; entonces disminuya  $w_o$  e incremente  $w_c$  continuamente. Acorde a esa manera, ajuste  $w_o$  e incremente  $w_c$  hasta lograr los requerimientos del control.
- (iv) Si tiene mucha oscilación el seguimiento del proceso, se podría ajustar el valor de  $\bar{b}$ .

Normalmente entre mayor ancho de banda es mejor la ejecución. Mientras el costo es que el sistema es susceptible al ruido. Cuando el retardo de transporte no es exactamente conocido el ancho de banda no debe ser muy grande.



## Resultados y Discusión

A continuación, se utiliza en Control con Rechazo Activo a Perturbaciones para controlar procesos con demora de tiempo.

**Ejemplo 2.** Considere la siguiente la siguiente función de transferencia de una columna de destilación utilizada por (Alfaro, 2012), en la cual se utiliza el flujo de vapor para lograr el control del nivel del fondo, mediante un ADRC controle el sistema y muestre el comportamiento del mismo cuando los parámetros del proceso coinciden con los del predictor de Smith y una perturbación en la entrada, así como cuando el proceso tiene una diferencia de +20% y de -20%:

$$G_2(s) = \frac{0,2}{s} e^{-7,4s} \quad (16)$$

La perturbación  $d$  desde (0 hasta 200) s es igual a cero unidades y desde 200 s hasta los 300 s es igual a 0, 2 unidades.

Utilizando el algoritmo mostrado desde las ecuaciones 8 a 15, el predictor de Smith y la figura 4, se puede realizar el esquema de simulación que se ofrece a continuación:

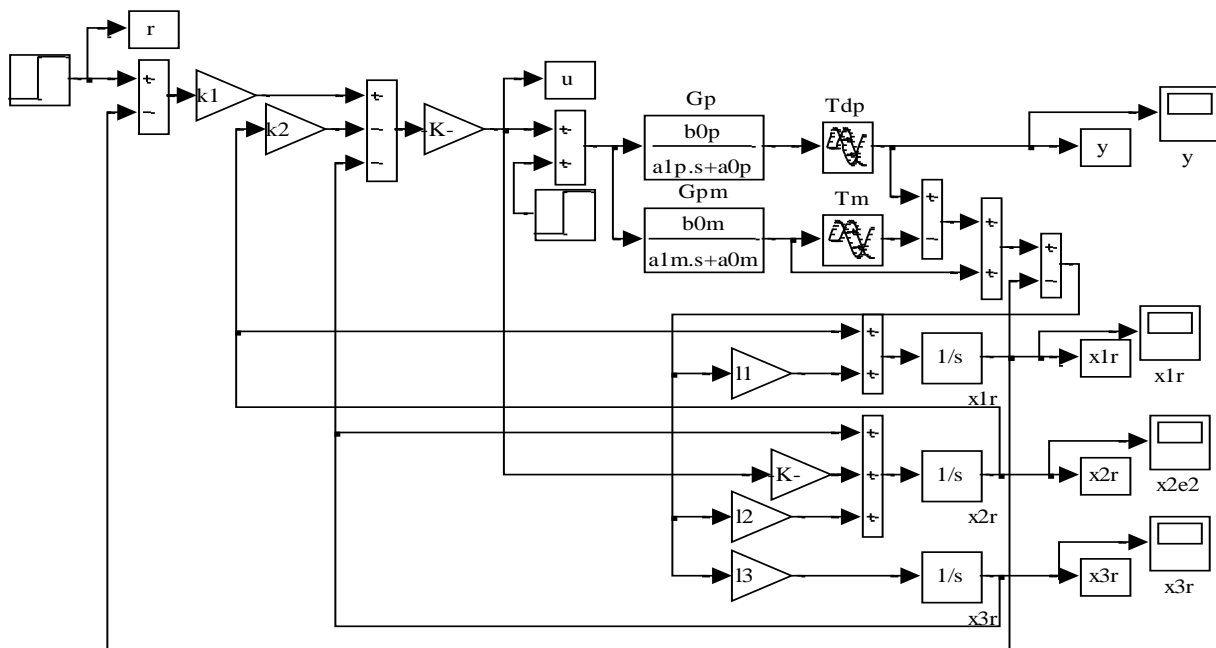


Figura 5. Esquema general del proceso con ADRC

Resultados de las simulaciones del ejemplo 2.

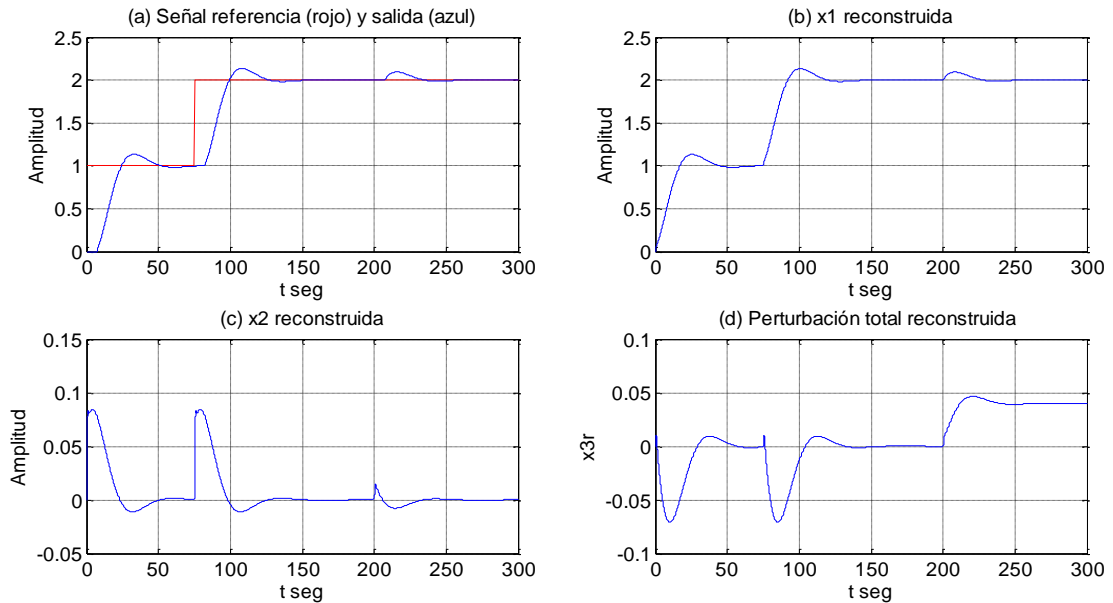


Figura 6. Respuesta de la simulación para los mismos parámetros del proceso y del predictor de Smith

Se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (para los mismos valores de los parámetros del proceso y del predictor de Smith) a) la señal de referencia y la salida de la planta, en b) la salida  $x_1$  reconstruida, en c) la salida de la planta  $x_2$  reconstruida, en d) la perturbación total; se aprecia en la figura *a* que el control es capaz de lograr un seguimiento asintótico de la señal de referencia con un sobrepaso menor que el 10% y el tiempo de establecimiento en menos de 50 segundos, en la figura *b* se observa que la señal  $x_1$  reconstruida es aproximada a la señal de salida de la planta, y en la figura *c* se aprecia que a los 200 segundos hay una perturbación que influye en el proceso con 0,04 unidades y el control es capaz de eliminar su efecto en menos de 50 segundos.

Se observa en la Figura 7 (para un aumento en los coeficientes  $a_1$ ,  $b_0$  y de la demora del proceso de un 20% y el predictor de Smith se mantiene igual al modelo del proceso) a) la señal de referencia y la salida de la planta, en b) la salida  $x_1$  reconstruida, en c) la salida de la planta  $x_2$  reconstruida, en d) la perturbación total; se aprecia en la figura *a* que el control es capaz de lograr un seguimiento asintótico de la señal de referencia con un sobrepaso menor que el 15% y el tiempo de establecimiento en menos de 75 segundos, en la figura *b* se observa que la señal  $x_1$  reconstruida es aproximada a la señal de salida de la planta, y en la figura *c* se aprecia que a los 200 segundos hay una perturbación que influye en el proceso con 0,04 unidades y el control es capaz de eliminar su efecto en menos de 50 segundos.

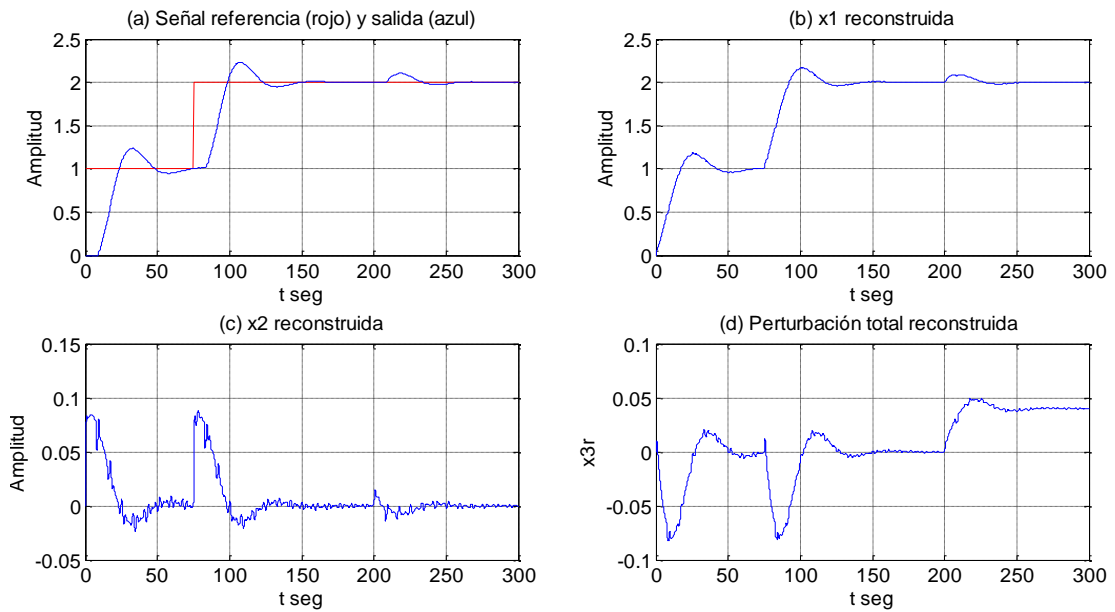


Figura 7. Respuesta de la simulación para un aumento de parámetros del proceso.

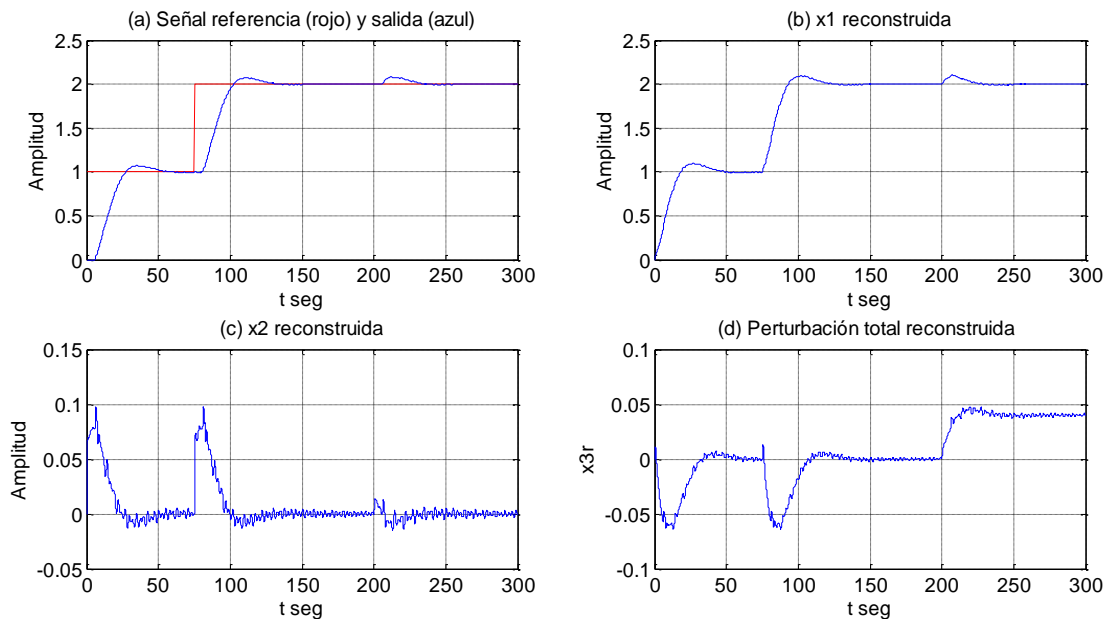


Figura 8. Respuesta de la simulación para una disminución de los parámetros del proceso

Se observa en la Figura 8 (para una disminución en los coeficientes  $a_1, b_0$  y de la demora del proceso de un 20% y el predictor de Smith se mantiene igual al modelo del proceso) a) la señal de referencia y la salida de la planta, en b) la salida  $x_1$  reconstruida, en c) la salida de la planta  $x_2$  reconstruida, en d) la perturbación total; se aprecia en la figura *a* que el control es capaz de lograr un seguimiento asintótico de la señal de referencia con un sobrepaso menor que el 10% y el tiempo de establecimiento en menos de 50 segundos, en la figura *b* se observa que la señal  $x_2$  reconstruida es aproximada a la señal de salida de la planta, y en la figura *c* se aprecia que a los 200 segundos hay una perturbación que influye en el proceso con 0,04 unidades y el control es capaz de eliminar su efecto en menos de 50 segundos.

**Ejemplo 3.** Considere controlar el siguiente proceso con retardo de transporte mostrado por (Campoy, 2012), mediante un ADRC y mostrar el comportamiento del mismo cuando los parámetros del proceso coinciden con los del predictor de Smith, así como, cuando el proceso tiene una diferencia con el predictor de +20%, de -20% y en la entrada al proceso hay una perturbación tipo escalón a los 400 segundos:

$$G_3(s) = \frac{1}{10s + 1} e^{-20s} \tag{17}$$

### Resultados de las simulaciones del ejemplo 3

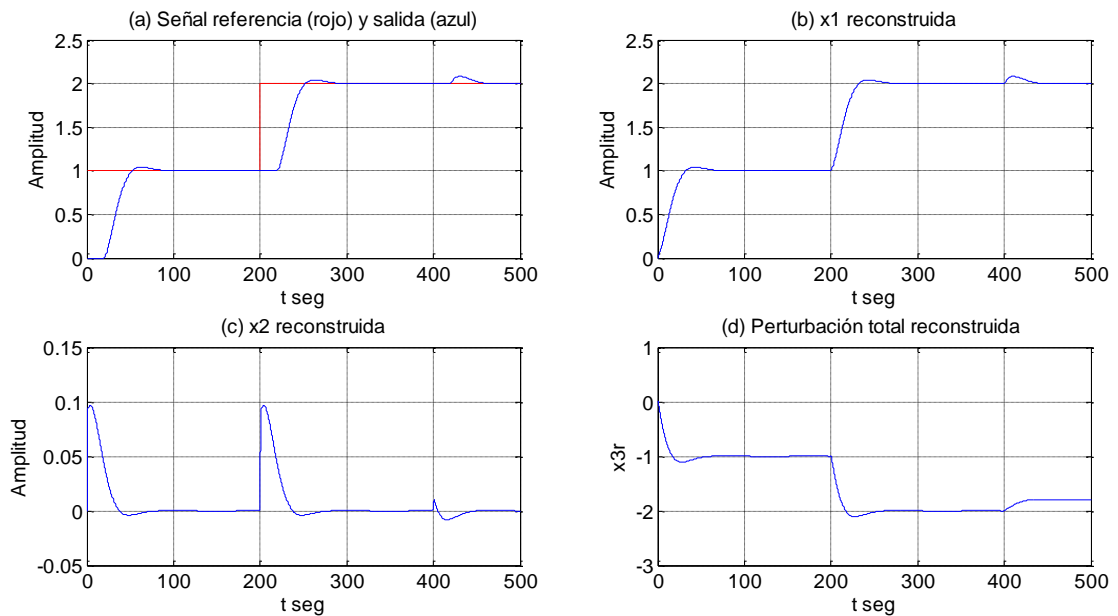


Figura 9. Respuesta de la simulación para los mismos parámetros del proceso y del predictor de Smith

Se observa en la Figura 9 (para los mismos valores de los parámetros del proceso y del predictor de Smith) a) la señal de referencia y la salida de la planta, en b) la salida  $x_1$  reconstruida, en c) la salida de la planta  $x_2$  reconstruida, en d) la perturbación total; se aprecia en la figura *a* que el control es capaz de lograr un seguimiento asintótico de la señal de referencia con un sobrepaso menor que el 5% y el tiempo de establecimiento en menos de 65 segundos, en la figura *b* se observa que la señal  $x_1$  reconstruida es aproximada a la señal de salida de la planta, y en la figura *c* se aprecia que a los 400 segundos hay una perturbación que influye en el proceso con 0,2 unidades y el control es capaz de eliminar su efecto en menos de 50 segundos.

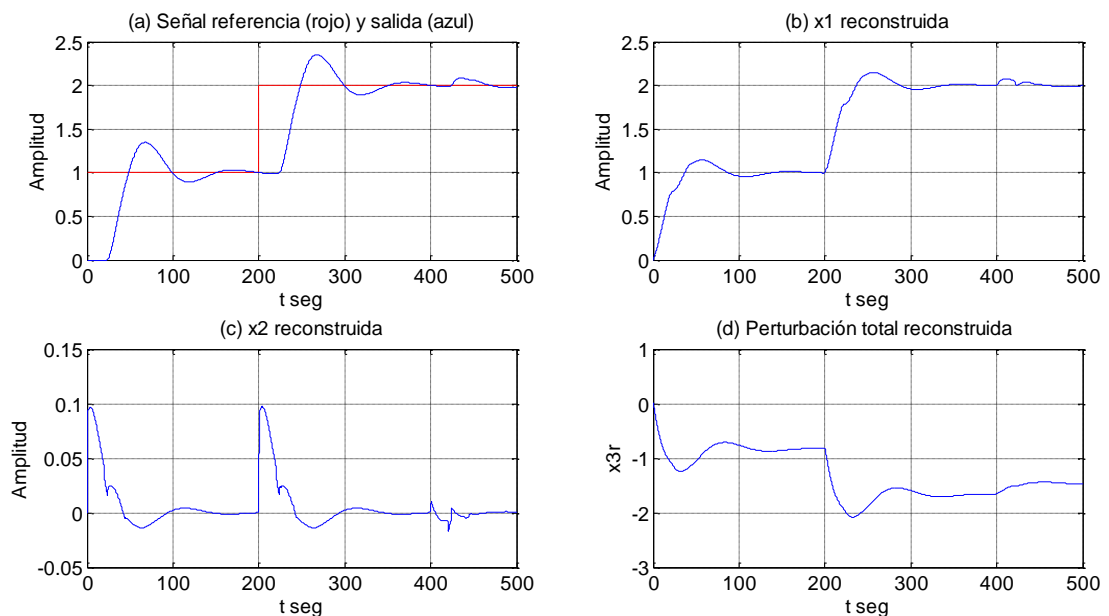


Figura 10. Respuesta de la simulación para un aumento de parámetros del proceso

Se observa en la Figura 10 (para un aumento en los coeficientes  $a_1$ ,  $b_0$  y en la demora del proceso de un 20%, y el predictor de Smith se mantiene igual al modelo del proceso) a) la señal de referencia y la salida de la planta, en b) la salida  $x_1$  reconstruida, en c) la salida de la planta  $x_2$  reconstruida, en d) la perturbación total; se aprecia en la figura *a* que el control es capaz de lograr un seguimiento asintótico de la señal de referencia con un sobrepaso menor que el 35% y el tiempo de establecimiento en menos de 160 segundos, en la figura *b* se observa que la señal  $x_1$  reconstruida es aproximada a la señal de salida de la planta, y en la figura *c* se aprecia que a los 400 segundos hay una perturbación que influye en el proceso con 0,2 unidades y el control es capaz de eliminar su efecto en menos de 50 segundos.

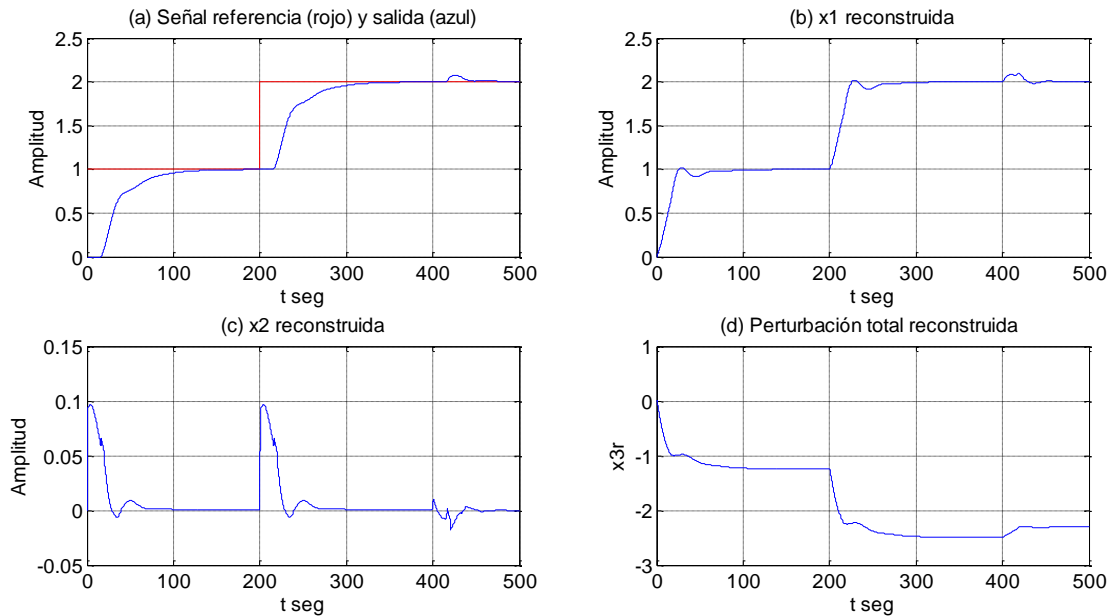


Figura 11. Respuesta de la simulación para una disminución de los parámetros del proceso

Se observa en la Figura 11 (para una disminución en los coeficientes  $a_1$ ,  $b_0$  y en la demora del proceso de un 20%, y el predictor de Smith se mantiene igual al modelo del proceso) en la figura *a* que el control es capaz de lograr un seguimiento asintótico de la señal de referencia sin sobrepaso y el tiempo de establecimiento en menos de 110 segundos, en la figura *b* se observa que la señal  $x_1$  reconstruida es aproximada a la señal de salida de la planta, y en la figura *c* se aprecia que a los 400 segundos hay una perturbación que influye en el proceso con 0,2 unidades y que el control es capaz de eliminar su efecto en menos de 50 segundos.

## Conclusiones

El Control Rechazo Activo a Perturbaciones utilizado se considera un sistema de orden  $n$  como si fuera de segundo orden de la forma  $\dot{y}(t) = f(t, \dot{y}(t), w(t)) + bu(t)$ :

- ✓ es robusto, debido a que permite el control de procesos con variaciones de sus parámetros. Según se observa en los ejemplos 2 y 3.
- ✓ posee dos parámetros de control, con los que se puede realizar ubicación de polos como un sistema de segundo orden. Observar ecuaciones (8) a (12).

- ✓ se puede considerar que según los resultados obtenidos en los ejemplos 2 y 3, en las figuras 6 a 11 que el Control con Rechazo Activo a Perturbaciones mostrado en este documento capaz de controlar satisfactoriamente procesos con retardo de transporte del tipo estudiado.

## Referencias

- ALFARO, Víctor M; VILANOV, Ramón. Robust Tuning and Performance Analysis of 2DoF PI Controllers for. 2012, p 14.
- CAMPOY, Pascual. Control de procesos con grandes tiempos muertos. U.P.M.-DISAM. 2011, p 25.
- DASTAN, Zahed; TAVAKOLI-KAKHKI, Mahsan. High Order Disturbance Rejection and Tracking via Delayed Feedback Control Method. 2019, p 11.
- MADONSKI, Rafał; Zhiqiang GAO, and Krzysztof ŁAKOMY; Towards a turnkey solution of industrial control under the active disturbance rejection paradigm. 2015.
- OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de control moderna; Quinta edición. PEARSON EDUCACIÓN, S.A., Madrid, 2010, p 908.
- STEPHANOPOULOS, George. Chemical Process Control An Introduction to Theory and Practice. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 2002, p 685.
- SUN, Li; LI, Donghai; HU, Kangtao; LEE, Kwang Y. and PAN, Fengping. On Tuning and Practical Implementation of Active Disturbance Rejection Controller: A Case Study from a Regenerative Heater in a 1000 MW Power Plant. 2016, p 11.
- TEPPA-GARRAN, Pedro; BRAVO, Miguel; GARCÍA, Germain. Control por rechazo activo de perturbaciones del nivel de líquido de un sistema de tanques acoplados. 2012, p 9.
- XINPENG Geng; HAO, Shoulin; LIU, Tao; ZHONG, Chongquan. Generalized Predictor Based Active Disturbance Rejection Control for Non-Minimum Phase Systems. 2018, p 36.
- YI, Huang; WENCHAO, Xue; GAO, Zhiqiang; SIRA-RAMIREZ, Hebertt; DAN, Wu; MINGWEI, Sun. Active Disturbance Rejection Control: Methodology, Practice and Analysis. 2014, p 97.
- YOU, Jiang; FAN, Weiyan; YU, Lijun; FU, Bin and LIAO, Mengyan. Disturbance Rejection Control Method of Double-Switch Buck-Boost Converter Using Combined Control Strategy. 2019
- ZHANG, Dongyang; YAO, Xiaolan; WU, Qinghe and SONG, Zhuoyue. ADRC based control for a class of input time delay systems. 2017.